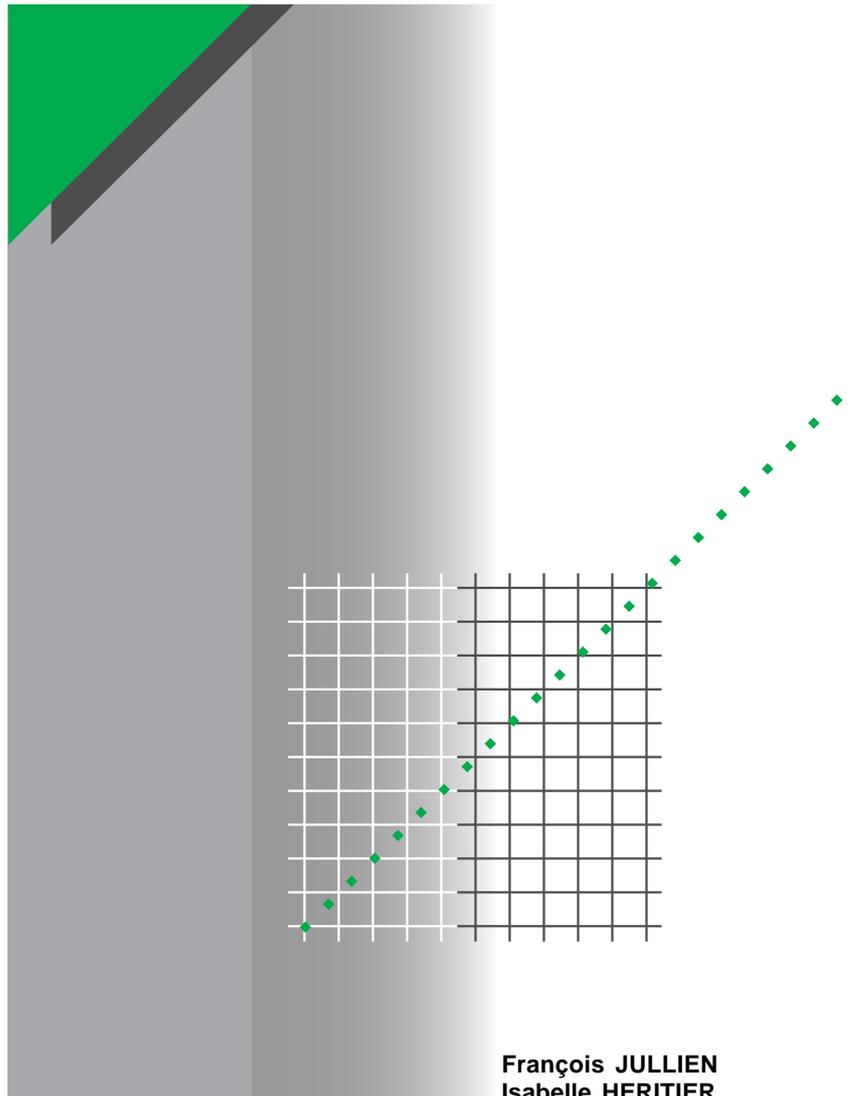


Cuaderno Técnico nº 178

El esquema IT (neutro aislado) de los esquemas de conexión a tierra BT



François JULLIEN
Isabelle HERITIER



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

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

Puede accederse a estas publicaciones en Internet:

<http://www.schneiderelectric.es>

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

Centro de Formación Schneider

C/ Miquel i Badia, 8 bajos

08024 Barcelona

Telf. (93) 285 35 80

Fax: (93) 219 64 40

e-mail: formacion@schneiderelectric.es

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

Advertencia

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

La reproducción total o parcial de este Cuaderno Técnico está autorizada haciendo la mención obligatoria: «Reproducción del Cuaderno Técnico nº 178 de Schneider Electric».

Cuaderno Técnico nº 178

El esquema IT (neutro aislado) de los esquemas de conexión a tierra en BT



François JULLIEN

Trabaja desde 1987 en la actividad Baja Tensión del Grupo Schneider.

Diplomado ingeniero en 1996 por el Conservatoire National des Arts et Métiers, pasa a ser responsable del equipo técnico electrónico en la actividad Baja Tensión de Potencia, con una especial dedicación a seguir desarrollando la gama de los sistemas Vigilohm para el control del aislamiento de las redes eléctricas y la búsqueda de defectos de aislamiento.



Isabelle HERITIER

Diplomada en ingeniería por el ENSERG (Ecole Nationale Supérieure d'Electronique et de Radioélectricité de Grenoble), entró en Merlin Gerin en 1989.

Sucesivamente ha sido responsable del desarrollo de un sistema de control de aislamiento para la Marine Nationale, después ingeniero de apoyo de la fuerza de venta, y finalmente jefe de producto de la gama de relés diferenciales, controladores de aislamiento y aparatos comunicantes.

Actualmente es gerente de producto de los interruptores automáticos BT de 100 a 600 A.

Merlin Gerin

Eunea Merlin Gerin

Modicon

Telemecanique

Mesa

Himel

Square D

Trad.: J.M. Giró

Original francés: diciembre 1998

Versión española: mayo 2001

Schneider
 **Electric**

Terminología

C₁ para la fase 1, **C₂** para la fase 2 y **C₃** para la fase 3: Componentes capacitivas de la impedancia a tierra de cada fase.

CP (en terminología anglosajona **PE**): Conductor de protección (nota del traductor).

C_R: Capacidad global de la red (capacidades de fuga de los cables y de los posibles filtros).

DDR: Dispositivo de corriente Diferencial Residual.

DPCC: Dispositivo de Protección Contra Cortocircuitos.

I_C: Corriente capacitativa.

I_d: Corriente de defecto que circula por la resistencia de la toma de tierra R_A de la masa de utilización.

I_{fu}: Corriente de fusión del fusible en un tiempo máximo dado por las normas.

I_m: Corriente de disparo (umbral) de corto retardo (magnético o electrónico) de un interruptor automático.

I_N: Corriente capacitativa que recorre la conexión entre neutro y tierra, especialmente a través de una impedancia Z_N , cuando existe.

JdB: Juego de Barras.

L: Longitud de los circuitos defectuosos.

m: Razón entre las secciones del conductor activo y la sección del conductor de protección (S_a/S_{CP}).

ρ: Resistividad del cobre.

R₁ para la fase 1, **R₂** para la fase 2 y **R₃** para la fase 3: Componentes resistivas de la impedancia a tierra de cada fase.

R_a: Resistencia del conductor activo (fase o neutro) del circuito en el que se produce el defecto.

R_A: Resistencia de la toma de tierra de las masas de utilización.

R_B: Resistencia de la toma de tierra del neutro.

R_{CP}: Resistencia del conductor de protección.

R_d: Resistencia de defecto.

S_a: Sección del conductor activo.

S_{CP}: Sección del conductor de protección.

U_C: Tensión de contacto entre la masa de un aparato con defecto y otra masa o tierra.

U₀: Tensión simple, neutro-fase.

U_L: Tensión límite de seguridad (24 V), que no se ha de sobrepasar, entre la masa de un aparato y otra masa o tierra.

U_n: Tensión nominal o tensión compuesta, fase-fase (U_1, U_2, U_3), igual a $\sqrt{3} \cdot U_0$ de un circuito eléctrico trifásico.

U_r: Tensión de red.

Z_N: Impedancia adicional conectada entre el punto neutro de una red en esquema de conexión a tierra IT y tierra.

Z_R: Impedancia global de una red respecto a tierra, compuesta por los elementos capacitivos **C₁, C₂, C₃** y resistivos **R₁, R₂, R₃**.

El esquema IT (neutro aislado) de los esquemas de conexión a tierra en BT

Todos los esquemas de conexión a tierra –ECT– ofrecen el mismo grado de seguridad a los usuarios, pero tienen características diferentes de explotación.

Por este motivo, en ciertos países, la elección viene impuesta por las leyes y normativas según el tipo de edificio. Por ejemplo, en Francia (y también en España) el esquema IT es obligatorio en los quirófanos de los hospitales y el TN-C está prohibido en los locales con riesgo de explosión.

Aparte de estas obligaciones, son los objetivos de calidad (seguridad, disponibilidad, fiabilidad, mantenibilidad y buen funcionamiento de los sistemas comunicantes de baja corriente) los que permiten determinar el ECT que hay que utilizar en una instalación concreta.

El objetivo de este Cuaderno Técnico es mostrar la utilidad y el campo de aplicación del ECT IT.

Después de un rápida presentación del riesgo eléctrico y de los diferentes ECT, se estudia, ante todo, el primer defecto y después el defecto doble, concretamente referidos al esquema IT, indicando las ventajas e inconvenientes de este ECT. Este Cuaderno Técnico trata también la actuación del limitador de sobretensión (CPA) ante los diversos tipos de sobretensiones que pueden presentarse.

Acaba este Cuaderno Técnico con una tabla de comparación y elección de todos los ECT a partir de los criterios de seguridad, disponibilidad, compatibilidad electromagnética y exigencias profesionales de los usuarios.

1	Introducción	1.1 La protección de personas contra contactos eléctricos	p. 6
		1.2 Los diferentes ECT normalizados	p. 6
		1.3 Elección de un ECT	p. 9
		1.4 Naturaleza del aislamiento	p. 9
		1.5 Esquema equivalente de una red con neutro aislado o impedante	p. 10
2	El primer defecto de aislamiento en el esquema IT	2.1 Cálculo de las corrientes de defecto y de la tensión de contacto con un primer defecto	p. 11
		2.2 Los controladores permanentes de aislamiento: historia y principios	p. 14
		2.3 La búsqueda del primer defecto de aislamiento	p. 16
3	El segundo defecto de aislamiento en el esquema IT	3.1 Análisis del doble defecto de aislamiento	p. 18
		3.2 Eliminación del doble defecto de aislamiento	p. 20
4	Características especiales en el esquema IT	4.1 Sobretensiones en el esquema IT	p. 22
		4.2 Los limitadores de sobretensión	p. 24
		4.3 ¿Por qué utilizar una impedancia?	p. 25
5	Ventajas e inconvenientes del esquema IT en BT	5.1 Una mayor disponibilidad	p. 26
		5.2 Mayor seguridad frente al riesgo de incendio	p. 26
		5.3 Medios de paro en los circuitos de mando y control	p. 27
		5.4 Límites y precauciones de empleo del esquema IT	p. 27
6	Conclusión	6.1 La disponibilidad: una necesidad creciente que hay que satisfacer	p. 31
		6.2 El esquema IT encuentra su verdadero emplazamiento	p. 31
		6.3 Ventajas de una mayor seguridad	p. 32
		6.4 En resumen	p. 32
7	Bibliografía		p. 33

1 Introducción

1.1 La protección de personas contra contactos eléctricos

El uso de muy bajas tensiones de seguridad –MBTS– (< 25 V) es la solución más radical, puesto que elimina el riesgo eléctrico, pero sólo se puede aplicar en la distribución de pequeñas potencias.

En el uso normal de la electricidad, diversos estudios han permitido distinguir los choques eléctricos según su origen para, después poder aplicarles soluciones específicas.

Los contactos o choques eléctricos se originan de dos modos diferentes:

- o por contacto directo, que es el caso de una persona o animal que toca un conductor desnudo con tensión,
- o por contacto indirecto, que es el caso de una persona que toca la envolvente metálica de un receptor eléctrico que tiene un defecto de aislamiento.

Protección contra contactos directos

Las medidas de protección para protegerse contra los contactos directos son el aislamiento y la separación o distanciamiento. Estas medidas pueden reforzarse, en distribución final, mediante la protección, llamada complementaria, que aporta la instalación de Dispositivos Diferenciales de corriente Residual –DDR– de alta sensibilidad.

Protección contra contactos indirectos

Por lo que se refiere a la protección contra los contactos indirectos, es decir, los contactos entre una masa puesta accidentalmente bajo tensión y tierra, la solución consiste en conectar a tierra todas las masas de los receptores mediante los conductores de protección. Pero esta disposición no excluye la existencia de una tensión de contacto, peligrosa para las personas si es mayor que la tensión límite convencional de seguridad U_L , definida por la norma CEI 60479.

Esta tensión de contacto depende de los Esquemas de Conexión a Tierra –ECT– normalizados a nivel internacional (CEI 60364).

1.2 Los diferentes ECT normalizados

Los tres ECT normalizados a nivel internacional (CEI 60364) están actualmente recogidos en gran número de normas nacionales: en Francia, por la norma de instalación BT NF C 15-100; en España, en el REBT (MIBT-008). Sin embargo, conviene recordar aquí de forma resumida el principio de funcionamiento de estas protecciones, antes de entrar detalladamente en el esquema IT.

El esquema TN

- Principio
- el neutro del transformador se conecta a tierra,
- las masas de los receptores eléctricos están conectadas al neutro.

Este tipo de ECT permite tres configuraciones prácticas diferentes:

- un único y mismo conductor sirve de neutro y de conductor de protección: es el esquema TN-C,
- el neutro y el conductor de protección están diferenciados físicamente: es el esquema TN-S,
- y se puede usar también la coexistencia simultánea de estos esquemas, llamado esquema TN-C-S, consistente en que el neutro y el conductor de protección están separados aguas abajo de una parte de una instalación hecha en TN-C. Hay que indicar que el TN-S no puede estar aguas arriba del TN-C.

■ Funcionamiento (figura 1)

Un defecto de aislamiento en una fase se convierte en un cortocircuito y la parte de la instalación con defecto se desconecta mediante un Dispositivo de Protección Contra Cortocircuitos –DPCC–.

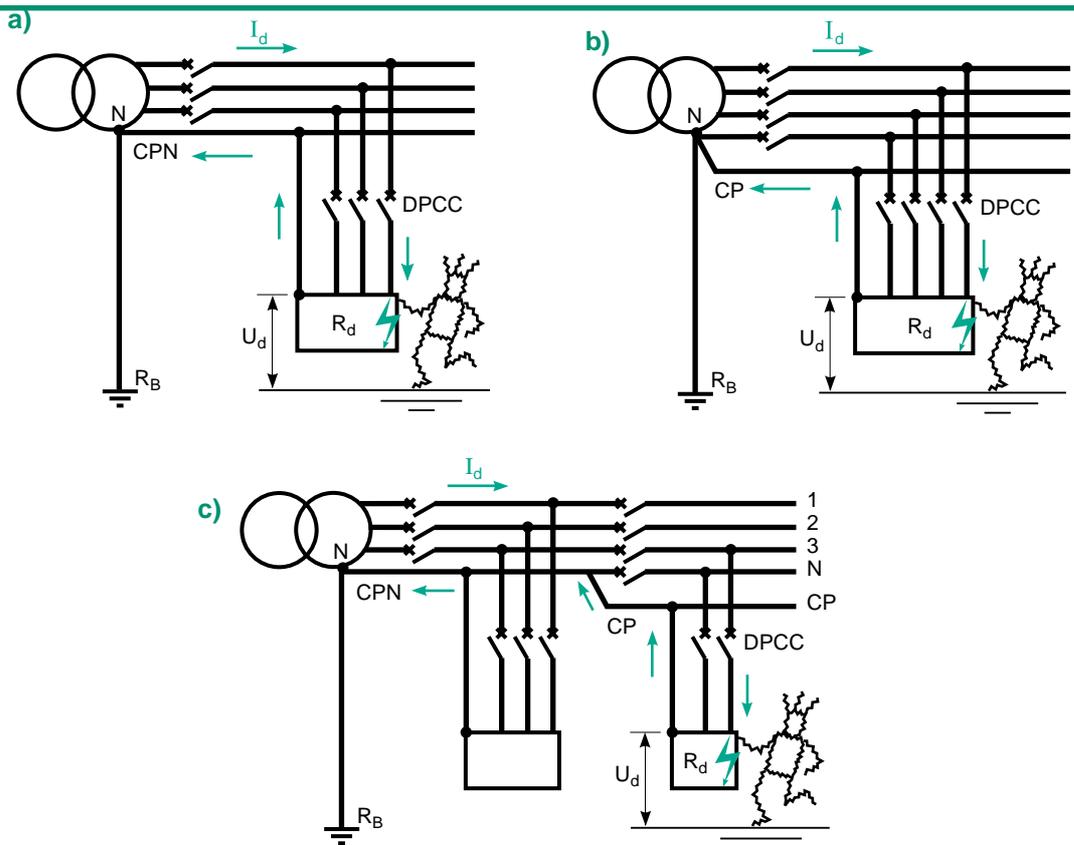


Fig. 1: Defecto de aislamiento en una red explotada en TN-C (a), TN-S (b) y TN-C-S (c).

El esquema TT

■ Principio

- el neutro del transformador está conectado a tierra,
- las masas de los receptores eléctricos están también conectadas a una toma de tierra.

■ Funcionamiento (figura 2)

La corriente de defecto de aislamiento está limitada por la impedancia de las tomas de tierra. La protección queda asegurada por los dispositivos de corriente residual –DDR–: la zona con defecto se desconecta en cuanto la corriente de defecto sobrepasa el umbral de disparo $I_{\Delta n}$ del DDR colocado aguas arriba, de tal manera que $I_{\Delta n} \cdot R_B \leq U_L$.

El esquema IT

■ Su principio

- el neutro del transformador no está conectado a tierra. En teoría está aislado de la tierra. De hecho, está naturalmente conectado a tierra a través de las capacidades parásitas de los cables de la red y/o voluntariamente mediante una impedancia de valor elevado, aproximadamente unos 1500 Ω (neutro impedante),

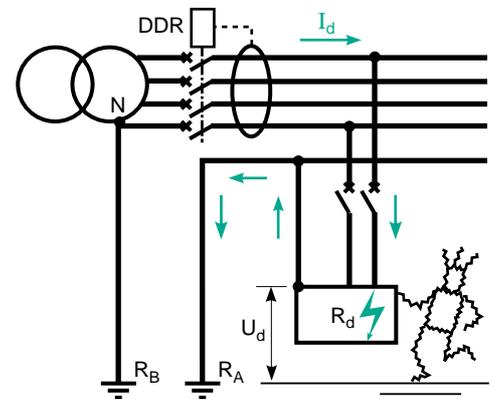


Fig. 2: Defecto de aislamiento en una red explotada en TT.

- las masas de los receptores eléctricos están conectadas a tierra.

■ Funcionamiento

- si se produce un defecto de aislamiento, se desarrolla una pequeña corriente debido a las capacidades parásitas de la red (figura 3a).

La tensión de contacto que aparece en la toma de tierra de las masas (más o menos de algunos voltios) no representa ningún peligro,

□ si se presenta un segundo defecto de aislamiento en otra fase, cuando todavía no ha sido eliminado el primero (figuras 3b y 3c), las masas de los receptores afectados pasan al potencial producido por la corriente de defecto en los conductores de protección (CP) que los

interconecta. La protección queda asegurada por los DPCC (caso de masas interconectadas mediante el CP) o por los DDR (caso de masas que tengan tomas de tierra distintas).

Es evidente que esta presentación de los diversos ECT, voluntariamente rápida, no permite abordar todas las particularidades de instalación. El lector encontrará otros datos de interés en los Cuadernos Técnicos números 114, 172 y 173.

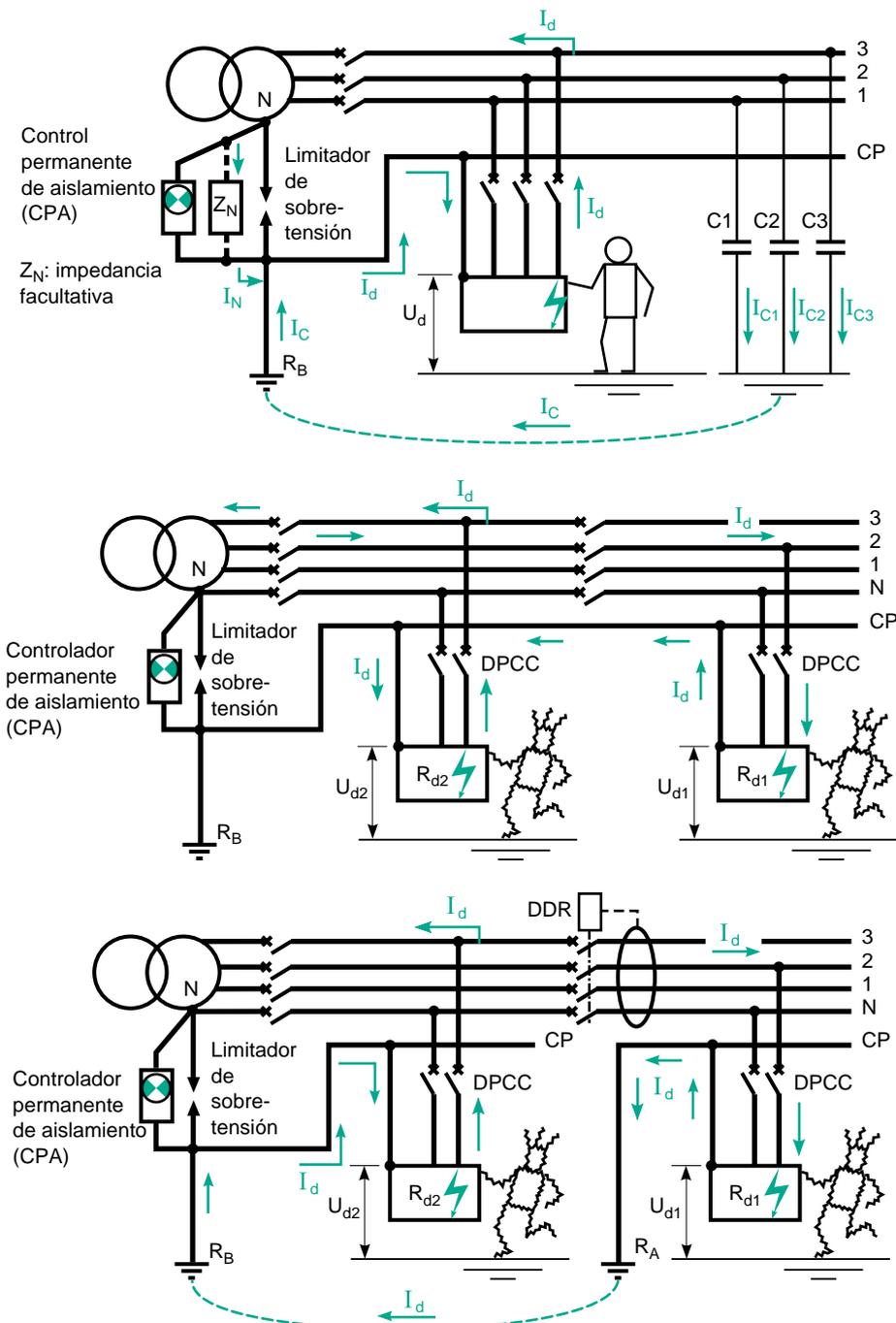


Fig. 3: Defecto de aislamiento simple (a) y doble (b y c) en una red explotada en IT.

1.3 Elección de un ECT

Aunque los tres esquemas de conexión a tierra ofrecen el mismo grado de seguridad a los usuarios contra los contactos indirectos, sólo el esquema IT permite continuar sin riesgo la explotación al aparecer un primer defecto de aislamiento.

Pero esta ventaja innegable tiene ciertas exigencias y precauciones, por ejemplo: la necesidad de buscar el primer defecto y la posibilidad de que aparezcan sobretensiones que puedan afectar al funcionamiento de los receptores sensibles.

Sin embargo, la elección del ECT de una instalación depende también, además de la seguridad de las personas y de la continuidad del suministro, de otros factores:

- el entorno (por ejemplo, locales con riesgo de incendio o emplazamientos con caídas frecuentes de rayos),

- la compatibilidad electromagnética –CEM– (presencia en la instalación de armónicos y de campos radiantes y la sensibilidad de los equipos a estos fenómenos),

- la cualificación técnica de los diseñadores y usuarios de la instalación,

- la calidad y el coste del mantenimiento,

- lo extenso de la instalación,

- ...

Si el análisis de todos estos factores garantiza la elección del ECT que mejor se adapta a una instalación, hay que destacar que la ventaja que aporta el IT en cuanto a la disponibilidad (segundo defecto muy improbable) obliga a costes de instalación y de explotación que hay que comparar con los costes de una parada en los otros ECT (pérdida de explotación y gastos de reparación del primer defecto de aislamiento).

1.4 Naturaleza del aislamiento

La impedancia en modo común

Toda red eléctrica presenta una impedancia respecto a tierra que se denomina «impedancia de modo común», cuyo origen está en el aislamiento de los cables y de los receptores de la red. Esta impedancia se compone de la resistencia y la capacidad de fuga entre cada conductor activo y tierra.

En BT, la resistencia de fuga de un cable nuevo es, para una fase y por kilómetro, del orden de 10 M Ω , mientras que su capacidad, uniformemente repartida respecto a tierra, es, aproximadamente de 25 μ F, o sea, 12,7 k Ω a 50 Hz.

Por otra parte, hay que destacar que en MT y en AT esta capacidad de fuga es todavía más importante y debe de ser necesariamente tenida en cuenta al efectuar los estudios de un plan de protección (Cuaderno Técnico nº 62).

También los receptores tienen una capacidad natural de fuga, que suele ser despreciable.

Incidencia de la capacidad distribuida en el esquema IT

En las instalaciones eléctricas se añaden otras capacidades a las de los cables de la red. Esto sucede con ciertos receptores electrónicos que generan corrientes armónicas de AF, especialmente cuando utilizan el principio

«troceador» (convertidores por modulación de ancho de impulso, por ejemplo). Por otra parte, las normas relativas a la compatibilidad electromagnética –CEM– obligan a que estas corrientes de AF se deriven a tierra, de ahí la presencia de filtros, y por tanto de condensadores, entre fases y masa.

Según el número de estos receptores, su contribución a la capacidad «de fuga» de una red puede resultar significativa y hasta importante.

Diversas medidas efectuadas en diversas redes eléctricas de potencia ponen de manifiesto que la capacidad varía mucho de una red a otra y se sitúa entre algunos μ F y varias decenas de μ F.

Puede darse el caso de que algunas de estas capacidades, demasiado importantes, pongan en entredicho el interés del esquema IT: si, con un primer defecto, el valor de la impedancia de la red respecto a tierra hace que la tensión de contacto a tierra sobrepase los 50 V, la seguridad de las personas no queda asegurada. Este caso es raro, puesto que, con una toma de tierra de 10 Ω , hace falta una capacidad de fuga a tierra de la red superior a 70 μ F (23 μ F por fase, si no se distribuye el neutro).

Por tanto, una red IT deberá presentar una capacidad limitada respecto a tierra y, durante el diseño de la red, deberá tenerse en cuenta la presencia de receptores equipados con filtros AF.

1.5 Esquema equivalente de una red con neutro aislado o impedante

He aquí algunas definiciones e hipótesis para efectuar el esquema equivalente de este tipo de red (**figura 4**):

- el punto neutro está aislado o conectado a tierra mediante una impedancia (Z_N) de valor elevado (generalmente de 1 a 2 $k\Omega$) cuya toma de tierra es equivalente a una resistencia (R_B).
- la masas de los receptores están interconectadas o totalmente o formando grupos. Debido a la CEM (Cuaderno Técnico nº 187), es aconsejable interconectar todas las masas de utilización de una misma instalación y conectarlas a su vez a una misma toma de tierra (resistencia R_A),

- las tomas de tierra (R_A y R_B) están interconectadas (que es lo más frecuente) o son independientes.

Nota: dos tomas de tierra se consideran independientes si están separadas más de 8 m.

- cada conductor activo presenta, respecto a tierra, una impedancia que se compone de una resistencia y una capacidad.

El esquema definido de esta forma puede simplificarse despreciando las resistencias respecto a las impedancias, teniendo en cuenta sus respectivos valores a 50 Hz.

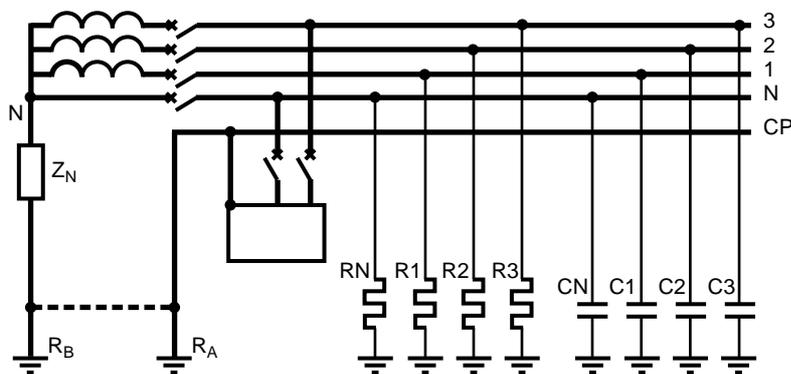


Fig. 4: Esquema equivalente de una red con neutro aislado o impedante.

2 El primer defecto de aislamiento en el esquema IT

En condiciones normales de explotación, la seguridad de las personas queda asegurada cuando la tensión de contacto es inferior a 50 V, según la norma CEI 60364 (NF C 15-100). Cuando se sobrepasa esta tensión de contacto,

estas mismas normas obligan a que el circuito abra automáticamente. El resto del capítulo demuestra por qué la explotación de una red con ECT IT permite que no haya disparo con el primer defecto de aislamiento.

2.1 Cálculo de las corrientes de defecto y de la tensión de contacto con un primer defecto

Caso general (defecto resistivo)

Cuando se produce un defecto de valor resistivo R_d entre la fase 3 y tierra, circula una corriente de defecto I_d a través de la impedancia de neutro y de las capacidades C_1 , C_2 y C_3 (figura 3a). Con la hipótesis de que las capacidades fase-tierra estén equilibradas ($C_1 = C_2 = C_3 = C$), la corriente de defecto tiene el valor:

$$I_d = U_0 \frac{1 + 3j C \omega Z_N}{R_d + Z_N + 3j C \omega Z_N R_d}$$

La corriente capacitativa se expresa:

$$I_c = U_0 \frac{+3j C \omega Z_N}{R_d + Z_N + 3j C \omega Z_N R_d}$$

y la corriente en la impedancia Z_N es:

$$I_N = \frac{U_0}{R_d + Z_N + 3j C \omega Z_N R_d}$$

La tensión de contacto U_C (tensión de contacto entre la masa del aparato con defecto y otra masa o tierra) se calcula a partir de la corriente de defecto I_d que circula a través de la resistencia de la toma de tierra R_A de las masas de utilización si éstas no están interconectadas; en caso contrario se utiliza R_B (sólo la toma de tierra de red): $U_C = R_A \cdot I_d$.

Caso de defecto franco

En este apartado, los cálculos se hacen para la configuración que provoca la tensión de contacto (U_C) más importante, por tanto, para un defecto que se produzca en una masa con la toma de tierra separada de la de Z_N .

Aplicando las fórmulas anteriormente citadas, con $R_d = 0$, se tiene:

$$I_d = \frac{U_0}{Z_N + 3j C \omega}$$

$$U_c = R_A \frac{U_0}{Z_N + 3j C \omega}$$

La corriente capacitativa es igual a:

$$I_c = +3j C \omega U_0$$

y la corriente en la impedancia Z_N :

$$I_N = \frac{U_0}{Z_N}$$

En los casos siguientes, estudiados para $Z_N = \infty$ (neutro aislado) y $Z_N = 1 \text{ k}\Omega$ (neutro impedante), los cálculos se efectúan para una red con esquema IT, de 400 Vca ($U_0 = 230 \text{ V}$), con:

R_A : resistencia de la toma de tierra =

= 10 Ω .

R_d : valor del defecto de aislamiento =

= de 0 a 10 k Ω .

■ Caso 1º:

Red muy poco capacitativa (por ejemplo limitada a un quirófano)

$C_1 = C_2 = C_3 = C = 0,3 \text{ }\mu\text{F}$ por fase.

■ Caso 2º:

Red de potencia, con

$C_1 = C_2 = C_3 = C = 1,6 \text{ }\mu\text{F}$ por fase.

■ Caso 3º:

Red extensa de potencia, con

$C_1 = C_2 = C_3 = C = 10 \text{ }\mu\text{F}$ por fase, ¡o sea, alrededor de 40 km de cables!

Los resultados de todos estos cálculos, reunidos en la tabla de la **figura 5**, confirman perfectamente el bajo valor de la tensión de defecto (≈ 20 V en los casos más desfavorables) que permite mantener en servicio y sin peligro para las personas una red diseñada con esquema IT. Demuestra también que el añadir una impedancia entre el neutro y la tierra no tiene prácticamente incidencia en la variación de la tensión de contacto.

Las curvas de la **figura 6** representan estos resultados mostrando claramente la gran importancia que tiene el valor de la capacidad de la red en el valor de U_C .

De hecho, sea cual sea la capacidad repartida de la red sana o con un primer defecto, cualquier usuario puede recordar que esta tensión resulta siempre inferior a la convencional de seguridad, y por tanto, sin peligro para las personas; además, las corrientes de un primer defecto franco son bajas y en consecuencia poco destructivas y poco perturbadoras (CEM).

R_d (k Ω)		0	0,5	1	10	
Caso 1	$Z_N = \infty$	U_C (V)	0,72	0,71	0,69	0,22
	$C_R = 1 \mu F$	I_d (A)	0,07	0,07	0,07	0,02
		$Z_N = 1k\Omega$	U_C (V)	2,41	1,6	1,19
			I_d (A)	0,24	0,16	0,12
Caso 2	$Z_N = \infty$	U_C (V)	3,61	2,84	1,94	0,23
	$C_R = 5 \mu F$	I_d (A)	0,36	0,28	0,19	0,02
		$Z_N = 1k\Omega$	U_C (V)	4,28	2,53	1,68
			I_d (A)	0,43	0,25	0,17
Caso 3	$Z_N = \infty$	U_C (V)	21,7	4,5	2,29	0,23
	$C_R = 30 \mu F$	I_d (A)	2,17	0,45	0,23	0,02
		$Z_N = 1k\Omega$	U_C (V)	21,8	4,41	2,26
			I_d (A)	2,18	0,44	0,23

Fig. 5: Cuadro comparativo de corrientes de defecto y de tensiones de contacto durante un primer defecto.

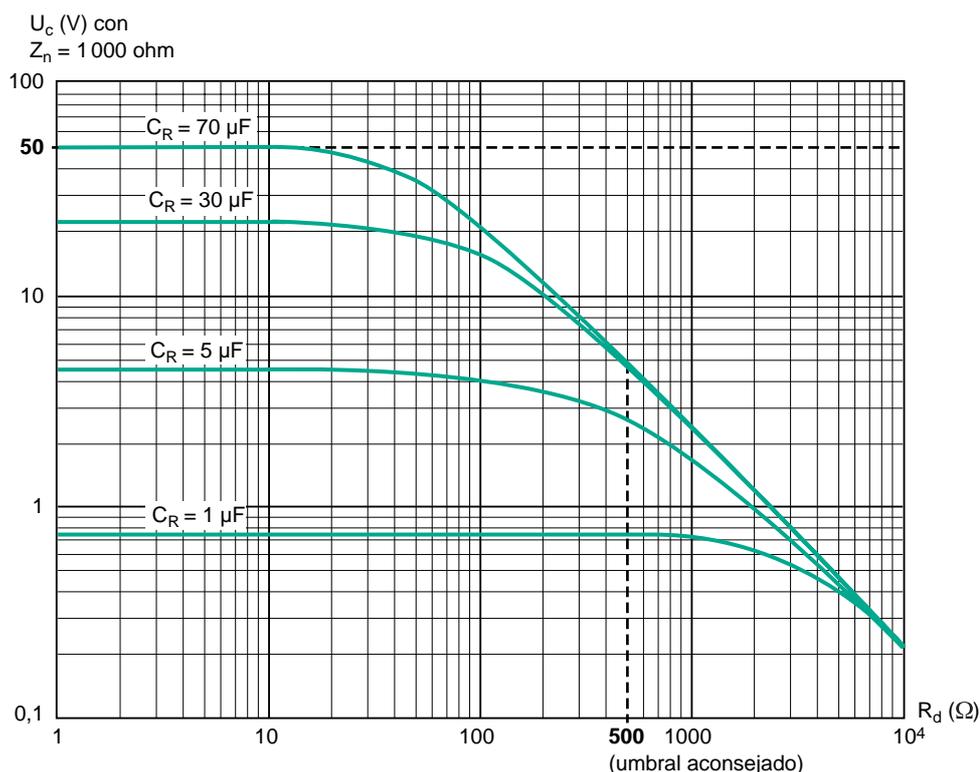


Fig. 6: La tensión de contacto durante un primer defecto de aislamiento es siempre inferior a la tensión de seguridad.

Incidencia de las capacidades distribuidas, diagrama vectorial y potencial de neutro

■ Incidencia de las capacidades distribuidas en una red sana

Las capacidades de las 3 fases crean un punto neutro artificial. Si no hay ningún defecto de aislamiento y si las capacidades de esta red están equilibradas, este punto neutro está al potencial de tierra (**figura 7**).

En ausencia de defecto, el potencial fase-tierra es por tanto igual a la tensión simple para cada fase.

■ Diagrama vectorial con un defecto franco

En caso de defecto franco en la fase 1, el potencial de la fase 1 está al potencial de tierra (**figura 8**).

El potencial neutro-tierra es por tanto igual a la tensión simple V_1 y el potencial respecto a tierra de las otras dos fases, 2 y 3, es igual a la tensión compuesta. Si el neutro está distribuido, la corriente de defecto aumenta aritméticamente: $I_C = 4j C \omega V_1$.

Sin embargo, para reducir el riesgo de un segundo defecto simultáneo que llevaría a la desconexión de los circuitos con defecto, la detección y la localización para su reparación de este primer defecto debe realizarse sin tardanza.

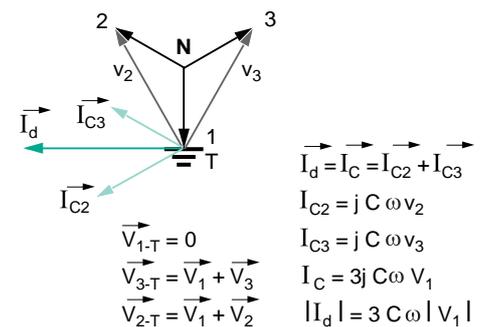
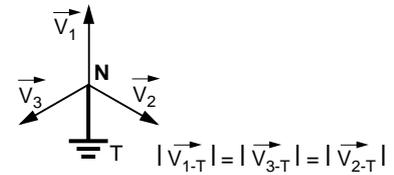


Fig. 8: Diagramas vectoriales de una red en esquema IT, sin defecto (a), y cuando la fase 1 tiene un defecto a tierra (b).

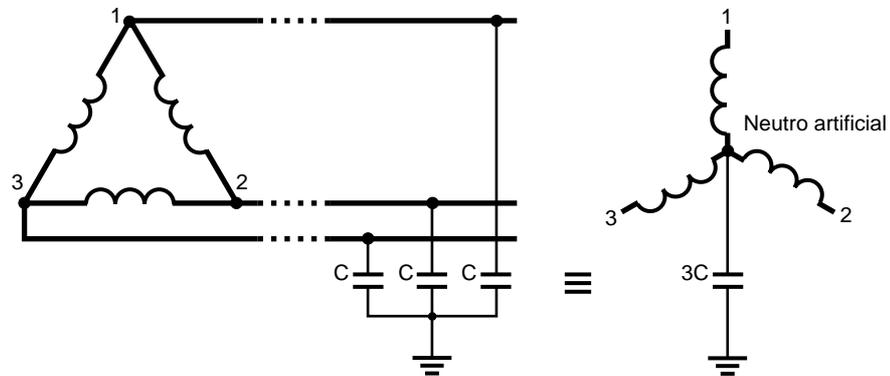


Fig. 7: Las capacidades repartidas de la red forman una conexión entre el neutro y la tierra.

2.2 Los controladores permanentes de aislamiento: historia y principios

Las primeras redes de distribución eléctrica BT se explotaron en régimen IT.

Pero muy pronto, los usuarios buscaron la forma de detectar la presencia de un primer defecto de aislamiento para evitar los riesgos originados por una corriente de cortocircuito más o menos impedante y la desconexión de una de las derivaciones (la de la protección de menor calibre) o de las dos derivaciones con defecto.

Los primeros CPA

Utilizaban 3 lámparas conectadas entre cada una de las fases y tierra (figura 9).

En una red sana las tres lámparas forman un receptor trifásico equilibrado, quedando encendidas las tres con un brillo similar. Al producirse un defecto de aislamiento, una de las tres lámparas queda cortocircuitada por la impedancia del defecto. La tensión en bornes de esta lámpara disminuye y por tanto su luminosidad. Por el contrario, la tensión en bornes de las otras dos lámparas aumenta hasta la tensión compuesta y por tanto, su luminosidad aumenta.

Este sistema es simple tanto de instalar como de utilizar. Pero como su umbral de funcionamiento

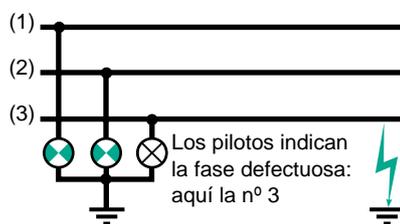


Fig. 9: Principio del primer CPA.

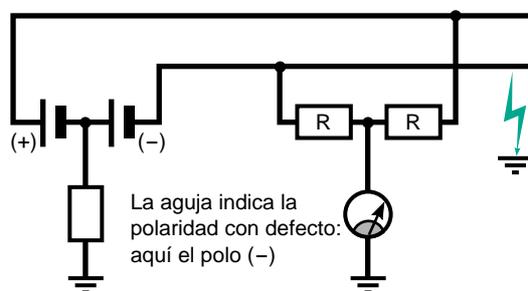


Fig. 10: Principio del CPA con distribución voltimétrica.

es bajo, en seguida se hicieron ensayos para intentar detectar los defectos de impedancia y poderse anticipar así al defecto franco.

Para una red de corriente continua (alimentada por baterías o por generador de cc)

La técnica de equilibrio voltimétrico (figura 10) fue la primera que se usó y todavía se utiliza en nuestros días.

El principio consiste en medir y comparar, por una parte, las tensiones entre la polaridad (+) y tierra, y por otra, las tensiones entre la polaridad (-) y tierra.

Este principio permite liberarse de cualquier alimentación auxiliar puesto que la red alimenta directamente el CPA a través de los captadores (resistencias) de medida. Esta técnica se aplica a redes de corriente continua y de corriente alterna bifásica pero no permite hacer la búsqueda con tensión.

Para las redes de corriente alterna

Estos CPA, que miden el aislamiento por inyección de corriente continua, son los más utilizados.

La medida permanente de la resistencia de aislamiento necesita dejar de lado los sistemas pasivos y sustituirlos por los sistemas activos. Puesto que esta resistencia se mide bien con corriente continua (figura 11), los primeros CPA, colocados entre la red y tierra, inyectaban una pequeña intensidad de cc que atravesaba el defecto. Esta técnica, sencilla y fiable, se utiliza mucho actualmente, pero, con tensión, no permite buscar los defectos.

Nótese que estos CPA utilizados en redes mixtas (que tienen rectificadores no aislados galvánicamente) pueden verse afectados e

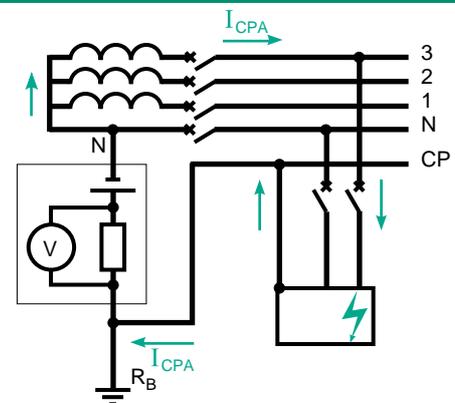


Fig. 11: Principio del CPA con inyección de corriente.

incluso quedar «cegados» si hay un defecto en la parte de corriente continua de la red.

Después se fabricaron CPA con inyección de corriente alterna de baja frecuencia (< 10 Hz). Funcionan con el mismo principio. Permiten la búsqueda del defecto, con tensión, pero pueden, por una parte, ser «engañados» por las capacidades de los cables, que son vistas como defectos de aislamiento y por otra, pueden verse afectados por los convertidores de frecuencia (variadores de velocidad).

Para todas las redes (ca y cc)

En la actualidad, puesto que las redes pueden ser mixtas, ca/cc, y además, de frecuencia variable, los aparatos nuevos han de ser capaces de controlar estos tipos de redes.

■ Algunos utilizan señales cuadradas de muy baja frecuencia (≈ 1 Hz). Consiguen librarse del problema de las capacidades de fuga a tierra, porque se cargan y descargan continuamente con el semiperíodo siguiente de signo opuesto. Se utilizan universalmente y se adaptan bien a las redes modernas, en particular a las que alimentan sistemas con electrónica de potencia que normalmente deforma la señal alterna. En cambio, su tiempo de respuesta, que depende de la capacidad de fuga a tierra de la red, puede llegar a varios minutos, lo que no les permite detectar defectos pasajeros.

■ Para paliar las limitaciones de utilización de estos CPA en las redes extensas o que tienen muchos filtros capacitivos, la técnica de inyección de corriente alterna de baja frecuencia ha sido mejorada con la «demodulación síncrona» (figura 12): este tipo de CPA aplica una tensión alterna de baja frecuencia entre la red y tierra, mide la corriente de retorno a través de la impedancia de aislamiento de la red y calcula el defasaje tensión-corriente. De esta

forma, es posible conocer las componentes, resistiva y capacitiva, de esta corriente y así hacer depender el umbral solamente de la componente resistiva. Esta evolución, que se ha podido conseguir debido a la tecnología digital, reúne las ventajas de la inyección de corriente continua y corriente alterna de baja frecuencia sin sus limitaciones.

Las normas que se refieren a los CPA

■ Las normas de fabricación

Desde febrero de 1997, existe la norma CEI 61557-8.

Define las prescripciones particulares de los controladores de aislamiento destinados a supervisar de forma continua, independientemente de su principio de medida, la resistencia de aislamiento respecto a tierra, tanto de las redes con ECT IT en ca y cc no conectado a tierra, como de las redes con ECT IT en ca que tengan rectificadores alimentados sin separación galvánica (transformador con arrollamientos separados).

Su contenido incide especialmente en tres aspectos:

□ Informar correctamente tanto a los prescriptores como a los instaladores.

El fabricante debe de dar las características de los aparatos que fabrica y especialmente las que pueden depender de la capacidad de la red (valores de los umbrales y tiempos de respuesta).

□ Asegurar la integración satisfactoria de estos equipos en su entorno eléctrico.

Esto exige que estos aparatos sean conformes con las prescripciones de las normas CEI 61326-1 y 61326-10 que se refieren a la Compatibilidad Electromagnética –CEM–.

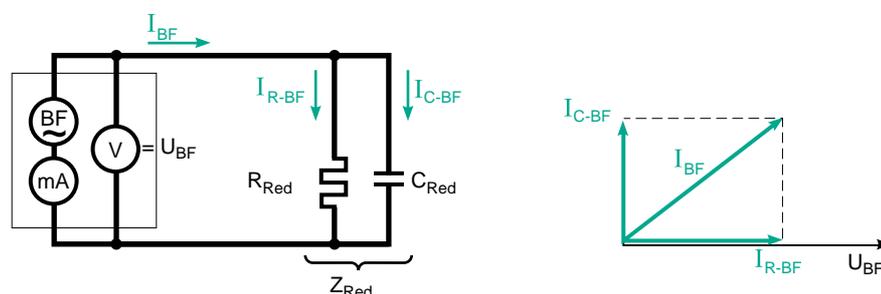


Fig. 12: La técnica de inyección de corriente alterna de baja frecuencia se ha mejorado gracias a la «demodulación síncrona» que permite discernir un mal aislamiento (fugas resistivas) de las fugas capacitivas.

□ Garantizar la seguridad de utilización para los usuarios.

Esto exige, por una parte, que pueda hacerse un test de funcionamiento de este aparato sin tener que insertar una impedancia adicional entre la red supervisada y tierra, por otra, que los elementos de ajuste estén protegidos, para que no puedan modificarse por descuido o por usuarios no habilitados y, por último, que los aparatos no sean desconectables (necesidad de utilizar herramientas para desmontarlos).

■ Las normas de explotación

Por lo que se refiere al ajuste de los CPA, la norma CEI 60364 da una primera respuesta: «Un CPA previsto adecuadamente... se ajusta a un valor inferior al valor mínimo de la resistencia de aislamiento fijada para la instalación considerada» o sea, mayor o igual a $0,5 \text{ M}\Omega$ para un circuito de tensión nominal mayor o igual a 500 V.

La guía NF C 15-100 precisa: «... ajustar a un valor inferior aproximadamente un 20% inferior a la resistencia del conjunto de la instalación...».

Sin embargo, hay que distinguir perfectamente la resistencia de aislamiento de la instalación, que no tiene en cuenta la distribución eléctrica, y el valor de aislamiento que se fija para la supervisión del conjunto de la red, incluidas las máquinas y aparatos conectados.

En el capítulo anterior, se ha explicado que para defectos superiores a 500Ω la tensión de contacto no supera 5 V con una toma de tierra de 10Ω (figura 5). Por tanto, en la práctica, en una instalación industrial normal, es razonable, sin correr el riesgo de fijar el umbral bajo de alarma en un valor comprendido entre 500 y 1000Ω , tomar un valor que permita una búsqueda eficaz (es decir, que permita localizar un defecto de aislamiento que ya ha sido detectado).

Para organizar una búsqueda preventiva, es interesante disponer de un primer umbral en un valor próximo a unos $10 \text{ k}\Omega$, por ejemplo. Este valor de umbral se ha de ajustar según las características de la instalación y las exigencias. Hay que indicar que una red poco extensa permite un umbral preventivo más elevado.

2.3 La búsqueda del primer defecto de aislamiento

Para buscar este primer defecto, aunque algunos usuarios se conforman con una identificación de la derivación defectuosa, se recomienda determinar con mucha precisión el lugar de este defecto, por ejemplo grieta en un cable o pérdida de aislamiento en un aparato, para proceder a la reparación lo más rápidamente posible.

Búsqueda cortando sucesivamente la alimentación de las salidas

Esta forma de búsqueda de defectos se cita únicamente a título informativo. Consiste en abrir sucesivamente las salidas, empezando por las principales. Al abrir la derivación defectuosa, la corriente inyectada por el CPA disminuye mucho, bajando por debajo del umbral de disparo. Al interrumpirse la alarma sonora, que suele depender del CPA, se sabe que es ésta la derivación defectuosa.

Este sistema, que obliga a interrumpir la explotación de cada una de las salidas, es contrario a la filosofía de utilización del esquema IT, que es, precisamente, la continuidad del servicio. Muy utilizado en el pasado, ha ido desapareciendo progresivamente con el desarrollo de nuevos sistemas de búsqueda que permiten encontrar el defecto con tensión (sin corte).

Buscar con tensión

■ Detección de la corriente de defecto

Como ya se ha visto anteriormente (figura 3a) el primer defecto de aislamiento es recorrido por una corriente I_d de la misma frecuencia que la de la red (50 ó 60 Hz) que vuelve a la fuente a través de las capacidades de las otras fases sanas y de la impedancia de neutro, si existe. Un primer método de búsqueda con tensión (sin cortar la distribución) fue utilizar una pinza amperimétrica para medir la corriente «de fuga» a tierra de cada derivación. La salida defectuosa es la que indica un valor mayor.

Este método tiene dos inconvenientes:

□ No es fiable en redes que tienen muchas derivaciones de las que, algunas, son muy capacitivas (¿cómo distinguir la corriente a tierra de una salida de corta longitud y con defecto de una larga y capacitativa?).

□ No puede aplicarse a una red que tiene pocas fugas capacitivas (la corriente de defecto es prácticamente imperceptible).

Para mejorar la detección del camino que sigue la corriente de defecto (a frecuencia industrial) con una pinza amperimétrica, se pueden utilizar dos artificios.

El primero consiste en aumentar el valor de la corriente de defecto colocando momentáneamente una impedancia de bajo valor en paralelo con el CPA.

El segundo tiende a distinguir las corrientes de fuga capacitativa de las corrientes de defecto insertando la impedancia citada periódicamente mediante un relé oscilante (unos 2 Hz).

■ Detección de una corriente inyectada

Este método utiliza una señal senoidal de baja frecuencia (≤ 10 Hz) inyectada por un generador o un CPA. La elección de una baja frecuencia para la búsqueda del defecto permite evitar las capacidades de fuga de la red, pero esta frecuencia no puede ser inferior a 2,5 Hz, porque es difícil detectarla con un captador magnético. Para encontrar el sitio exacto del defecto, la búsqueda se efectúa con dispositivos sensibles únicamente a la señal inyectada, que pueden ser fijos, con toroides de detección colocados en cada salida, o portátiles, con una pinza amperimétrica sintonizada a la frecuencia de la señal (**figura 13**).

Cuando los dispositivos (generadores, captadores y receptor) son fijos, la búsqueda con tensión del defecto puede hacerse automáticamente en cuanto se detecta un defecto, mediante una orden dada por el CPA.

■ Medida de aislamiento de cada salida o derivación

Los usuarios, cuyas necesidades de continuidad del servicio van aumentando cada vez más, ya no quieren esperar al primer defecto: necesitan poder programar las actuaciones de mantenimiento y, por tanto, conocer de antemano la derivación susceptible de sufrir próximamente un defecto de aislamiento.

Para esto es necesario «seguir» la evolución del aislamiento de cada derivación y poder distinguir las componentes (resistiva y capacitativa) del aislamiento. El principio de la demodulación síncrona puede también utilizarse midiendo, por una parte, la corriente de inyección que circula por las salidas (gracias a los captadores toroidales) y por otra, la tensión de inyección.

El desarrollo de este método de búsqueda ha sido posible con la aplicación de las técnicas digitales en la gestión de la distribución eléctrica (Cuaderno Técnico nº 186): el usuario puede mantener la supervisión, a distancia y permanentemente, de la evolución del aislamiento de las diversas salidas. La instalación de buses digitales permite centralizar todas las informaciones en un supervisor, visualizarlas, dejarlas registradas y, por tanto, hacer un mantenimiento predictivo y esclarecedor.

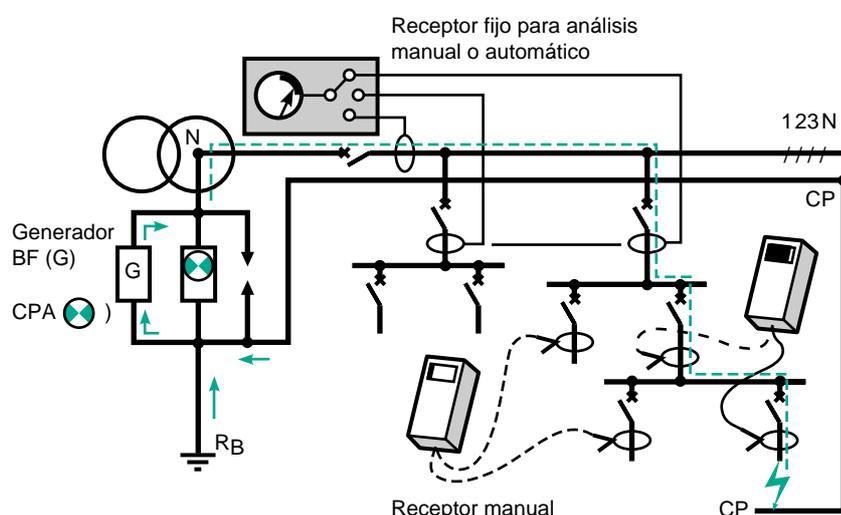


Fig. 13: La búsqueda puede hacerse con dispositivos sensibles a la señal inyectada, que pueden ser portátiles o fijos.

3 El segundo defecto de aislamiento en el esquema IT

Como se ha explicado en el capítulo anterior, la gran ventaja de explotar una red con el esquema IT consiste en la posibilidad de mantener la distribución eléctrica cuando se produce un defecto de aislamiento que afecta a un circuito. Esta ventaja ha sido perfectamente valorada por los editores de las normas que, para mantener alto el nivel de disponibilidad, recomiendan en las normas de instalación, señalar y buscar el primer defecto para no temer un segundo defecto; segundo defecto para el que también están previstas las protecciones a fin de garantizar el mismo nivel de seguridad para las personas que con los otros esquemas TN y TT.

En los dos apartados siguientes se estudian las corrientes de defecto y la tensión de contacto que dependen de la forma de conexión de las masas a tierra, pudiéndose dar dos casos:

- las masas de los receptores están todas interconectadas mediante un conductor de protección CP, que es el caso más frecuente,
- las masas no están interconectadas y se conectan a tomas de tierra diferentes (configuración que hay que evitar debido a problemas de CEM: Cuaderno Técnico nº 187).

3.1 Análisis del doble defecto de aislamiento

En este apartado, las corrientes de defecto y las tensiones de contacto se calculan considerando dos defectos francos de aislamiento sobre dos conductores activos diferentes (sobre una fase y el neutro, si el neutro está distribuido, o sobre dos conductores de fases diferentes, si el neutro no está distribuido) de dos circuitos de sección y longitud idénticas.

Esta hipótesis, que lleva a una corriente de defecto mínima, es la que habitualmente se utiliza para calcular las longitudes máximas protegidas por los dispositivos de protección contra cortocircuitos.

Tensión de contacto y corriente de defecto doble cuando las masas están interconectadas

Desde el momento en que se establece una corriente de defecto entre dos masas con defecto, circula una corriente por el conductor de fase y por el conductor de protección CP, que es el que establece la interconexión de las masas (**figura 3b**).

Esta corriente no está limitada más que por la impedancia del bucle de defecto que es igual a la suma de las impedancias de los conductores activos afectados y del circuito de las conexiones equipotenciales (CP). Existen diversos métodos de cálculo de las corrientes de defecto para una instalación eléctrica (Cuaderno Técnico nº 158).

Aquí utilizaremos el método convencional porque permite calcular los valores de la corriente de defecto y de la tensión de contacto sin tener que hacer excesivas hipótesis sobre las características de la instalación. Por tanto, en este Cuaderno Técnico, se aplicará este método para dar el orden de magnitud de las corrientes y tensiones que intervienen al producirse un defecto doble con el esquema IT.

Este método se basa en la hipótesis simplificadora que consiste en considerar que durante el defecto la tensión en el origen de la derivación considerada es igual al 80% de la tensión nominal de la instalación. Esto supone que la impedancia de la derivación considerada representa el 80% de la impedancia total del bucle de defecto y que la impedancia aguas arriba representa el 20%.

Para los cálculos que seguirán, tomaremos:

U' = tensión simple (= U_0 , si uno de los dos defectos está sobre el neutro distribuido),

o

U' = tensión compuesta (= $\sqrt{3} U_0$, si no está distribuido el neutro),

$R_a = \rho \frac{L}{S_a}$ = resistencia del conductor activo

(fase o neutro) del circuito en el que tiene lugar el defecto,

$$R_{CP} = \rho \frac{L}{S_{CP}} = \text{resistencia del conductor de}$$

protección del circuito,

S_a = sección del conductor activo,

S_{CP} = sección del conductor de protección,

L = longitud de los circuitos con defecto,

$$m = \frac{S_a}{S_{CP}} = \text{razón de las secciones de los}$$

conductores activos y del conductor de protección (normalmente ≤ 1).

■ Considerando que los conductores activos y el CP de las dos derivaciones defectuosas tienen secciones y longitudes idénticas y despreciando su reactancia, se tiene:

□ si uno de los defectos está sobre el neutro:

$$I_d = \frac{0,8 U_0}{2(R_a + R_{CP})}$$

o sea

$$I_d = 0,8 U_0 \frac{S_a}{2\rho (1+m) L}$$

□ si el defecto doble afecta a dos conductores de fase

$$I_d = 0,8 \sqrt{3} U_0 \frac{S_a}{2\rho (1+m) L}$$

■ La tensión de contacto correspondiente es: $U_C = R_{CP} I_d$, o sea:

□ si uno de los defectos está sobre el neutro

$$U_c = 0,8 U_0 \frac{m}{2(1+m)},$$

	Defectos en 2 derivaciones idénticas (con $m = 1$)	Defectos en un JdB y una derivación (con $m = 4$)
Defecto doble		
■ fase-neutro	$U_C = 46 \text{ V}$	$U_C = 73,6 \text{ V}$
■ fase-fase	$U_C = 79,7 \text{ V}$	$U_C = 127,5 \text{ V}$

Fig. 14: Tensiones de contacto durante un defecto doble, en una red de 230/400 V en ECT IT.

o bien,

□ si el defecto doble afecta a dos conductores de fase:

$$U_c = 0,8 \sqrt{3} U_0 \frac{m}{2(1+m)}.$$

Nota: este método no se puede aplicar a una instalación alimentada por un grupo electrógeno, porque durante el defecto la tensión en el origen de la red considerada es baja ($\ll 0,8 U_n$), puesto que la impedancia del alternador es alta respecto a las impedancias de la red que alimenta. En este caso, sea el que sea el ECT, sólo se pueden aplicar los métodos completos de cálculo electrotécnico, como por ejemplo los del método de las impedancias.

■ Ejemplo numérico

Los resultados presentados en la tabla de la **figura 14** confirman que un doble defecto de aislamiento es peligroso para la seguridad de las personas puesto que la tensión de contacto es superior a la tensión límite de seguridad U_L . Por tanto debe de quedar asegurada la desconexión mediante los correspondientes dispositivos automáticos de protección.

Tensión de contacto y corriente de defecto con un defecto doble cuando las masas no están interconectadas

En el caso de dos defectos que se producen en dos receptores conectados a tomas de tierra diferentes (**figura 3c**), la corriente de defecto I_d se cierra por tierra y queda limitada por las resistencias de las tomas de tierra R_A y R_B .

Un cálculo simple indica que este segundo defecto de aislamiento es también siempre peligroso (**figura 15**) y, por tanto, debe de eliminarse automáticamente e indica también que no debe de llegar a alcanzarse el umbral de disparo de los dispositivos de protección contra cortocircuitos.

	U_c	I_d
Defecto doble		
■ fase-neutro	115 V	11 A
■ fase-fase	200 V	20 A

Fig. 15: Corrientes de defecto y tensiones de contacto durante un defecto doble entre dos masas que tienen tomas de tierra diferentes, con $R_A = R_B = 10 \Omega$.

3.2 Eliminación del doble defecto de aislamiento

Caso con las masas de utilización interconectadas

Teniendo en cuenta la importancia de la corriente de defecto, semejante a una corriente de cortocircuito, la desconexión puede quedar asegurada por los dispositivos de protección automática contra cortocircuitos –DPCC–, si la longitud de los cables es compatible con sus umbrales de funcionamiento y si no, con los dispositivos diferenciales –DDR–.

Esta eliminación del defecto doble debe de hacerse respetando también otros imperativos que se aplican independientemente del tipo de DPCC instalado (fusibles o interruptor automático):

- las tensiones de contacto calculadas en el capítulo anterior, con cualquier DPCC, dejan pasar un cierto tiempo antes de eliminar el defecto. La norma CEI 60364, para simplificar el trabajo de los diseñadores de redes, da los tiempos de corte máximos en función de la tensión de servicio (**figura 16**),

- el corte omnipolar, incluido el del conductor de neutro, si se distribuye.

Esta exigencia se dicta por las posibles consecuencias:

- cortar únicamente la fase defectuosa de una derivación deja las máquinas trifásicas alimentadas con sólo dos fases,
- cortar el neutro expone a la tensión compuesta las cargas monofásicas, que en condiciones normales se alimentan con la tensión simple.
- La protección del conductor neutro, cuando se distribuye

La **figura 3b** muestra que con un defecto doble los dos DPCC ven pasar la corriente de defecto,

Red U_0 (V)	Tiempo máximo de corte (s)	
	Neutro no distribuido	Neutro distribuido (*)
127	0,4	1
230	0,2	0,5
400	0,06	0,2
>> 400	0,02	0,08

Fig. 16: Tiempo máximo de corte prescrito para el ECT IT por las normas de instalación (* para redes monofásicas).

pero cada uno sólo sobre uno de sus polos o sobre el neutro.

Este caso obliga a un control especial de las características de los DPCC, porque, si los cables de las dos derivaciones son de secciones semejantes, los dos DPCC participan por igual en el corte; pero si las secciones son diferentes, es posible que el corte lo efectúe uno solo de los DPCC: precisamente el de menor calibre. Por tanto, hay que asegurar que su poder de corte sobre una fase, evidentemente con $\sqrt{3} U_0$, sea superior a I_d . Por este motivo,

los fabricantes de interruptores automáticos indican los poderes de corte monofásico de sus aparatos según cada tensión nominal y la norma CEI 947-2 prescribe una secuencia de ensayos para los interruptores automáticos destinados a la protección de redes IT. Los aparatos que no cumplen las exigencias de estos ensayos deben de ser marcados: .

La protección debe de ser válida también para el conductor neutro, cuando su sección es inferior a la de los conductores de fase. Hay que indicar que, para proteger los cables de neutro cuya sección sea la mitad que la sección de los cables de fase, existen interruptores automáticos tetrapolares en los que el cuarto polo tiene la mitad de calibre.

También hay que destacar que los DPCC tetrapolares son cada vez más necesarios y con cualquier ECT (TN, TT o IT) debido a la proliferación de armónicos en las redes, pudiendo quedar el neutro sobrecargado con las corrientes del tercer armónico y sus múltiplos.

- Protección por fusibles

La zona de fusión de un fusible está comprendida entre dos curvas envolventes.

A partir de la expresión de la corriente I_d , establecida en el capítulo anterior y de la condición $I_{fus} < I_d$, es posible determinar la longitud máxima del circuito protegido.

- Si se distribuye el conductor neutro:

$$L_{m\acute{a}x} = \frac{0,8 U_0 S_1}{2\rho(1+m)I_{fus}}$$

- Si no se distribuye el conductor neutro:

$$L_{m\acute{a}x} = \frac{0,8\sqrt{3} U_0 S_{fase}}{2\rho(1+m)I_{fus}}$$

correspondiendo I_{fus} , a la corriente de fusión del fusible en el tiempo máximo dado por las normas.

Tiene que verificarse que este tiempo es perfectamente compatible con la protección de personas en caso de defecto doble.

Téngase presente que el uso de fusibles con el esquema IT choca normalmente con la necesidad de corte omnipolar, incluido el conductor neutro cuando está distribuido.

■ Protección con interruptor automático

La protección de personas queda asegurada cuando la corriente de defecto es superior al ajuste de las protecciones de corto retardo del interruptor automático.

Igual que con los fusibles, es posible determinar la longitud máxima de circuito protegido según la expresión de la corriente I_d establecida en el capítulo anterior y la condición $I_m < I_d$.

La longitud máxima de circuito protegido por un interruptor automático es:

□ con el conductor de neutro distribuido:

$$L_{\text{máx}} = 0,8 U_0 \frac{S_a}{2p(1+m)I_m}$$

□ sin distribuir el conductor de neutro:

$$L_{\text{máx}} = 0,8 \sqrt{3} U_0 \frac{S_a}{2p(1+m)I_m}$$

Nótese que, con el esquema IT, el hecho de distribuir el neutro, tanto si la protección se hace con fusibles como con interruptor automático, divide por $\sqrt{3}$ la longitud máxima protegida.

■ Mejora de las condiciones de disparo

Cuando las condiciones de desconexión por actuación de las protecciones no son satisfactorias (longitudes mayores que las longitudes máximas protegidas) se pueden tomar las siguientes precauciones:

□ disminuir el valor de I_m de los interruptores automáticos, pero teniendo presente que la selectividad amperimétrica entre interruptores automáticos puede reducirse,

□ aumentar la sección del conductor CP, de este modo, la impedancia del circuito de retorno

de corriente del defecto doble disminuye y permite aumentar la longitud máxima para la protección de personas. La tensión de contacto habrá disminuido, pero, por el contrario, los esfuerzos electrodinámicos sobre los cables aumentarán,

□ aumentar la sección de los conductores activos; esta solución es la preferida y, por añadidura, provoca el aumento de las corrientes de cortocircuito trifásico,

□ por último, hay una solución simple y que no necesita cálculos: es la utilización de DDR de baja sensibilidad en las derivaciones de gran longitud.

En el esquema IT, esta solución siempre es posible porque el CP está separado del conductor neutro, lo que no sucede en el caso del esquema TN-C.

Caso de masas de utilización que tengan tomas de tierra distintas

Cuando una instalación alimenta varios edificios diferentes y distanciados los unos de los otros, sus masas de utilización se encuentran frecuentemente conectadas a tomas de tierra separadas.

La impedancia de los recorridos de la corriente de defecto I_d queda incrementada con la resistencia de las dos tomas de tierra afectadas y los dispositivos de protección contra cortocircuitos no pueden asegurar la condición necesaria para la protección de personas (respecto al tiempo máximo de corte).

La solución más simple, de estudio y de instalación, es el uso de DDR. Su ajuste se hace con los mismos criterios que en el esquema TT.

Para aprovechar al máximo la continuidad del servicio que ofrece el esquema IT, hay que evitar que los DDR disparen con el primer defecto, evitando ajustar en un umbral demasiado bajo su $I\Delta n$, especialmente para los circuitos con capacidad de fuga significativa,

respetando siempre la inecuación: $I\Delta n < \frac{U_L}{R_A}$.

Los DDR utilizados en este último caso, tienen umbrales de disparo $I\Delta n$ normalmente comprendidos entre 3 y 30 A.

4 Características especiales del esquema IT

4.1 Sobretensiones en el esquema IT

Una red eléctrica puede estar sometida a sobretensiones de diversos orígenes. Ciertas sobretensiones de modo diferencial (entre conductores activos) afectan indistintamente a todos los ECT. El lector interesado en el tema puede ampliar su información leyendo el Cuaderno Técnico nº 179.

Este apartado estudia en especial las sobretensiones en modo común que afectan principalmente al esquema IT puesto que la red queda «aislada» de tierra:

- las sobretensiones debidas a defectos de aislamiento,
- las sobretensiones debidas a cebados internos en los transformadores MT/BT,
- las sobretensiones debidas a descargas de rayo en las redes MT aguas arriba,
- las sobretensiones debidas a descargas de rayo en los edificios de la instalación.

Todas estas sobretensiones han sido especialmente atendidas en la norma NF C 15-100 que exige la instalación de limitadores de sobretensión aguas abajo de los transformadores MT/BT y cuando hay riesgo de rayo (líneas aéreas).

Las sobretensiones debidas a defectos de aislamiento

- Ante un primer defecto de aislamiento, la tensión fase-tierra de las fases sanas pasa a tener, permanentemente, la tensión compuesta de la red.

Los equipos BT deben de estar dimensionados para soportar, durante el tiempo de búsqueda y reparación del defecto, una tensión fase/masa de $U_0 \sqrt{3}$ y no la tensión simple U_0 .

Éste es habitualmente el caso de:

- los filtros capacitativos «en Y» que tienen muchos aparatos electrónicos,
- el CPA de la instalación, cuando se conecta entre fase y tierra, porque no se dispone de neutro. Por tanto, para elegir el CPA, hay que comprobar, en los datos del fabricante, con qué tensión de red puede trabajar.

La norma CEI 60950 indica específicamente estas recomendaciones.

- Al presentarse un primer defecto, aparece una sobretensión cuyo valor puede alcanzar $2,7 \times \sqrt{2} U_0$ (siendo U_0 la tensión simple de la red BT). Con una red de 230/400 V, este valor es de 880 V, valor de sobretensión que no es peligroso para el equipamiento, cuyo aislamiento es de 1800 V (que es el valor que se exige a frecuencia industrial lado BT, según CEI 60364-4-442).

Téngase presente que estas sobretensiones no producen el cortocircuito permanente en el limitador de sobretensión.

La sobretensiones debidas a defectos de aislamiento con arcos intermitentes

Los defectos con arcos intermitentes (defectos de recebados o «restricting faults» o «arcing faults» en terminología anglosajona o «defecto intermitente» en el Vocabulario Electrotécnico Internacional) se comportan como una sucesión de defectos que se extinguen espontáneamente por sí mismos («transient faults»).

La experiencia y los estudios teóricos demuestran que los defectos de recebados pueden producir sobretensiones y provocar por tanto la destrucción del equipamiento. Este tipo de sobretensiones se observan sobre todo en las redes MT explotadas con conexión a tierra mediante una reactancia de limitación sintonizada (bobina Petersen). Estas sobretensiones se explican por una descarga incompleta de la capacidad homopolar en el momento del cebado del arco. La tensión homopolar aumenta, por tanto, con cada reencendido del arco. Con la hipótesis de un arco que se reenciende en el momento de tensión máxima fase-tierra de la fase defectuosa, la tensión homopolar aumenta a cada recebado, pudiéndose llegar a producir sobretensiones de 5 a 6 veces la tensión simple.

Aún más, con el esquema IT, la protección queda asegurada por el limitador de sobretensión y la presencia de una impedancia entre neutro y tierra favorece la descarga rápida de la capacidad homopolar.

Las sobretensiones debidas a un cebado interno en el transformador MT/BT

La norma CEI 60364-4-442 fija los valores de rigidez o resistencia a la tensión a frecuencia industrial de los materiales BT y su duración (figura 17).

■ cebado interno entre arrollamientos MT-BT. Este tipo de sobretensiones se producen a frecuencia de red.

Son poco frecuentes y su aparición «brusca» hace que el limitador de sobretensión, cuya tensión segura de recebado está fijada a un mínimo de 2,5 veces la tensión tipo (NF C 63-150), o sea, por ejemplo de 750 V para un limitador colocado en el neutro de una red de 230/400 V, ponga inmediatamente la red BT a tierra y evite que alcance el potencial MT.

■ cebado interno MT-masa, también llamado «cebado de retorno»

Tensiones alternas admisibles sobre los equipos BT	Tiempo de corte (s)
$U_0 + 250 \text{ V}$ (o sea: 650 V en IT) *	> 5
$U_0 + 1200 \text{ V}$ (o sea: 1600 V en IT) *	≤ 5

(*) Para una red IT, la tensión U_0 se sustituye por la tensión $\sqrt{3} U_0$.

Fig. 17: Sobrecargas de tensiones alternas admisibles sobre los materiales de una instalación BT en IT para una red 230/400 V.

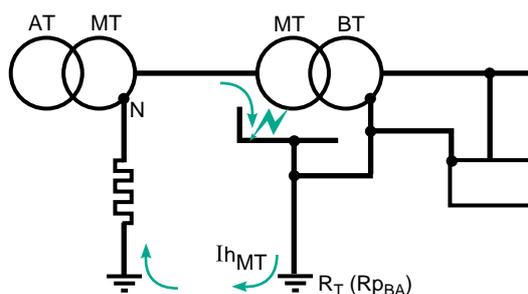


Fig. 18: Cuando las masas (MT) del centro de transformación y la toma de tierra del CP (BT) están conectadas a la misma toma de tierra, las masas de los receptores BT son llevadas al potencial $I_{h_{MT}} R_p$.

Cuando la masa del transformador y la red BT se conectan a la misma toma de tierra (figura 18) hay riesgo de perforación de los materiales BT si la tensión $R_p I_{h_{MT}}$ sobrepasa la rigidez dieléctrica de los equipos, siendo R_p la resistencia de la toma de tierra e $I_{h_{MT}}$ la corriente homopolar debida al cebado lado MT.

Una solución consiste en conectar las masas de la instalación BT a una toma de tierra eléctricamente distinta de la de las masas del centro de transformación.

Pero esta separación es, en la práctica, difícilmente factible debido al mallado de las masas en el centro de transformación MT/BT.

Así, la CEI 60364-4-442 indica que las masas de la instalación BT pueden estar conectadas a la toma de tierra de las masas del centro de transformación, si la tensión $R_p I_{h_{MT}}$ se elimina en los tiempos indicados.

Las sobretensiones debidas a la descarga de rayo en la red MT aguas arriba

El rayo que cae en una red MT provoca una onda que se transmite a los conductores activos lado BT por un acoplamiento capacitativo entre los arrollamientos del transformador.

Si la instalación es en IT, el limitador de sobretensión absorbe la sobretensión que llega al conductor activo al que está conectado (neutro o fase) y se pone en cortocircuito si esta sobretensión es muy energética; la red se puede comparar entonces a una red TN-S. Diversas experiencias y medidas han permitido llegar a las siguientes conclusiones:

\hat{u} (kV)	F/F	F/CP	F/N	N/CP	CP/tierra profunda
Esquema:					
■ IT	0,38	4,35	0,20	4,30	1,62
■ TN-S	0,36	4,82	0,20	4,72	1,62

F: fase
N: neutro
CP: conductor de protección

Fig. 19: Sobretensiones, originadas por una onda de rayo, que se observan en el extremo de un cable de 50 m que alimenta un receptor resistivo.

- en el extremo de los cables de corta longitud (10 m) aparecen sobretensiones del orden de 2 kV, independientemente de la carga y del ECT,

- las sobretensiones más importantes son las que aparecen en los extremos de los cables cuyo extremo está abierto o que alimentan cargas que pueden provocar resonancia. Además, con un receptor resistivo, hay sobretensiones (figura 19) que resultan de los fenómenos de propagación y reflexión de ondas así como del acoplamiento capacitativo entre conductores.

Habida cuenta de la forma de onda de estas sobretensiones, el limitador de sobretensión actúa eficazmente para el conductor al que está conectado. Asimismo, independientemente del ECT, es muy recomendable instalar pararrayos en el origen de la red BT, entre todos los conductores activos y tierra si en la red aguas arriba existe el riesgo de descarga de rayo directa (caso de líneas aéreas) y obligatoriamente si este riesgo existe para la misma red BT.

El limitador de sobretensión cumple su función frente a los cebados MT/BT.

Sobretensiones debidas a la descarga de rayo en los edificios de la instalación

Esta sobretensión se debe al paso de la corriente de rayo por la toma de tierra del edificio, especialmente cuando la descarga se produce directamente en su pararrayos.

En este momento, toda la red de tierra eleva su potencial respecto a la tierra profunda. La red BT, puesta instantáneamente a tierra por el limitador de sobretensión, pasa del esquema IT al esquema TN-S si todas las masas de utilización están interconectadas. La energía de rayo derivada de esta forma puede ser muy importante y necesitar el cambio del limitador.

Para minimizar estas sobretensiones en una instalación eléctrica, es necesario que la equipotencialidad horizontal y vertical del edificio sea la mejor posible tanto en baja como en alta frecuencia. Es muy recomendable que exista un solo circuito de tierra (red CP) y también es muy importante que se utilicen canaletas metálicas para los cables muy bien interconectadas eléctricamente (trenzas).

4.2 Los limitadores de sobretensión

El apartado anterior explica por qué el limitador de sobretensión es un «accesorio imprescindible» del ECT IT y por qué, por tanto, las normas obligan a su uso. Además protege al CPA contra las sobretensiones.

Sus umbrales de descrestado de las sobretensiones a frecuencia industrial y de las sobretensiones transitorias de modo común están fijados en la norma NF C 63-150 (figura 20). Son inferiores a la rigidez que deben de tener los equipos utilizados en las redes BT (230/400 V).

Hay que conectarlo lo más cerca posible del transformador MT/BT entre el neutro y tierra, o entre la fase y tierra si el acoplamiento secundario del transformador es en triángulo o no hay salida de neutro.

Nota:

- el limitador no es necesario sobre la red aguas abajo del transformador BT/BT,
- la norma CEI 60364 no obliga al uso de limitadores de sobretensión, considerando que la probabilidad de defecto MT/BT es baja. Sin embargo, está demostrado que cuando se produce este defecto tiene normalmente consecuencias graves.

Tensión nominal de un limitador -U _n - (V) (NF C 63-150)	U _{cebado} (V) a frecuencia industrial	Con onda de choque 1,2/50	Ejemplo: limitador a escoger para una red 230/400 V ...
250	400 < U < 750	< 1750	... si conectado entre tierra y neutro .
440	700 < U < 1100	< 2500	... si conectado entre tierra y una fase .
660	1100 < U < 1600	< 3500	

Fig. 20: La tensión nominal de un limitador de sobretensión debe de estar adaptada a la tensión de red.

Funcionamiento

Un limitador de sobretensión está constituido por dos elementos conductores separados por una película aislante (figura 21).

Las sobretensiones impulsionales provocan el cebado entre los dos elementos conductores sin llegar a provocar el cortocircuito del limitador.

Las sobretensiones energéticas hacen fundir la película aislante, lo que permite el paso de una gran corriente a tierra. Entonces hace falta cambiar el cartucho cuyo cortocircuito señala el CPA como si fuera un defecto de aislamiento. Por otra parte, para buscar defectos con tensión, es práctico considerar esta conexión a tierra como si fuera una derivación más, puesto que esta conexión es normalmente inaccesible, como por ejemplo, cuando el limitador está colocado en la celda del transformador.

Característica importante

En el caso de que todas las masas de utilización estén perfectamente interconectadas, el doble defecto de aislamiento afecta por una parte al limitador de sobretensión que tenga el cebado y por otra a la ruptura del aislamiento sobre una fase que tenga cortocircuito. El limitador debe tener entonces una rigidez suficiente que corresponda con el tiempo de eliminación de la corriente de defecto (por ejemplo, soportar 40 kA durante 0,2 s para un limitador Cardew de la marca Merlin Gerin). En el caso, poco frecuente, de que el segundo defecto de aislamiento esté aguas arriba del interruptor automático de entrada, la eliminación del segundo defecto se hace, como para un cortocircuito aguas arriba del cuadro general BT, mediante las protecciones MT. Por este motivo, el ajuste de la temporización de la protección MT

del transformador, debe tener en cuenta la resistencia térmica [$f(I^2t)$] del limitador de sobretensión.

La sección del conductor de conexión aguas arriba y aguas abajo del limitador de sobretensión también debe de tener la misma capacidad térmica. El cálculo de esta sección viene dado en la norma francesa NF C 15-100.

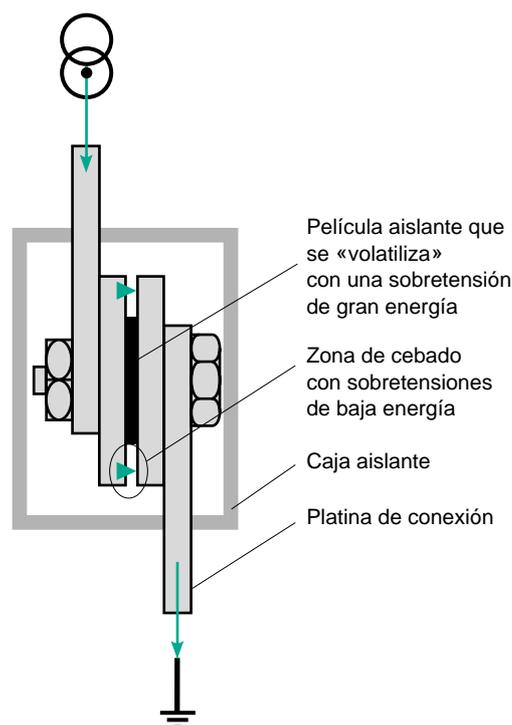


Fig. 21: Principio de un limitador de sobretensión (tipo Cardew de Merlin Gerin).

4.3 ¿Por qué utilizar una impedancia?

Puede conectarse una impedancia entre la red y tierra, normalmente entre el neutro del transformador y tierra. Su valor es de aproximadamente 1700 Ω a 50 Hz.

La impedancia sirve para reducir las variaciones de potencial entre red y tierra que tengan su origen en las perturbaciones provenientes de la MT o de las fluctuaciones de potencial de la tierra local. Se recomienda sobre todo para las redes cortas que alimentan aparatos de medida sensibles a este potencial, así como para las redes que están estrechamente unidas a buses de comunicaciones.

Observando la tabla de la figura 5, se aprecia que cuando la red es muy poco capacitativa (caso 1) la impedancia de neutro Z_N hace que aumente la corriente de defecto, que sin embargo, sigue siendo muy baja (≈ 250 mA en el caso de la figura 5); esta influencia es todavía menor cuando la red es muy capacitativa (casos 2 y 3). En la práctica, esta impedancia no influye más que débilmente en la tensión de contacto U_C que sigue siendo inferior a U_L en una red sana. Por último, la presencia de una resistencia en la impedancia permite reducir los riesgos de ferorrresonancia.

5 Ventajas e inconvenientes del esquema IT en BT

La ventaja principal de una red explotada con esquema IT es sin duda la continuidad de servicio que proporciona, puesto que no necesita cortar la alimentación con un primer defecto. Este capítulo analiza precisamente sus ventajas. Otro punto fuerte del esquema IT es la

seguridad que aporta contra los riesgos de incendio y en los circuitos de mando y control de máquinas-herramienta.

Pero para beneficiarse de todas estas ventajas, hay que tener en cuenta los límites de su utilización.

5.1 Una mayor disponibilidad

Un cálculo sencillo de probabilidades confirma esta ventaja para el esquema IT.

Se supone que la probabilidad de defecto de aislamiento en una instalación eléctrica es de un defecto cada tres meses (90 días), o sea,

$$\lambda = \frac{1}{90} \text{ días}$$

y la duración de búsqueda y reparación de la parte defectuosa es de un día, o sea, $\mu = 1$ día.

La técnica de gráficos de Markof da la representación de la **figura 22** y permite calcular que el tiempo medio entre dos fallos dobles es de 8190 días!

Lo que corresponde a una disponibilidad media de la energía 91 veces mayor con una red IT que con una red TN o TT.

Por tanto el esquema IT se prefiere en muchas instalaciones precisamente por esta ventaja, por ejemplo:

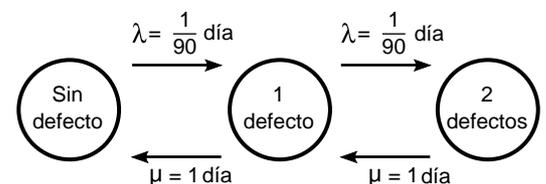


Fig. 22: Un gráfico de Markof muestra que la disponibilidad media de la energía es 91 veces mejor con una red IT que con una red TN o TT.

- hospitales,
- pistas de despegue de los aeropuertos,
- naves,
- factorías con proceso de fabricación continua,
- laboratorios,
- cámaras frigoríficas de almacenamiento,
- centrales eléctricas.

5.2 Mayor seguridad frente al riesgo de incendio

La electricidad es una causa frecuente de incendios.

Las normas fijan en 500 mA el umbral de este riesgo cuando hay defecto de aislamiento (JF C 15-100, parte 482.2.10). Este valor puede sobrepasarse mucho, especialmente con las corrientes erráticas que recorren las estructuras de los edificios cuando hay defectos con el esquema TN.

Nótese también que éste es el único ECT que controla el aislamiento del conductor neutro,

puesto que el esquema TN-S puede convertirse inadvertida y peligrosamente en esquema TN-C cuando se produce un defecto neutro-CP, lo que provoca un importante aumento del riesgo de incendio.

Por este motivo en ciertos establecimientos con riesgo de incendio y explosión se utiliza el esquema IT puesto que la corriente del primer defecto es especialmente baja (capítulo 1).

Por otra parte, recuérdese que fue en las minas con grisú donde se utilizaron por primera vez los CPA.

5.3 Medios de paro en los circuitos de mando y control

El esquema de actuación de los relés de la **figura 23** con esquema TN, representa tres defectos de aislamiento posibles que, cuando son francos, provocan la parada inmediata de la explotación; parada inmediata cuyas consecuencias materiales y económicas rara vez son despreciables. Estos defectos tienen las mismas consecuencias que con el esquema TT.

Especialmente los defectos **c** y **d** que provocan el disparo de la protección general impidiendo cualquier maniobra posterior, como por ejemplo, la orden de cambio de sentido en un transbordador!

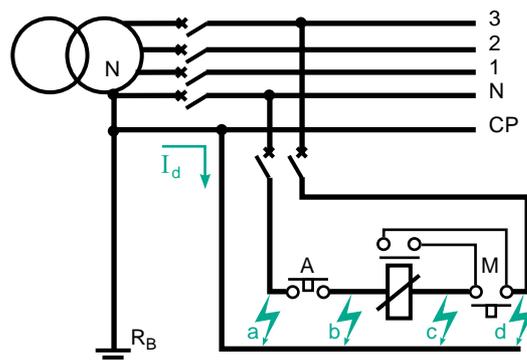
Por otra parte, estos mismos «primeros defectos» que pueden provocar riesgos de funcionamiento y hasta accidentes con los esquemas TN y TT, no tienen secuelas con el esquema IT, salvo que se produzcan como segundo defecto, lo que es muy poco probable (apartado 5.1).

Estos ejemplos muestran que aunque la seguridad de las personas por riesgo eléctrico queda asegurada con todos los ECT, incluido el uso de muy bajas tensiones de seguridad, en ciertos casos, la seguridad de personas por riesgo mecánico puede no quedar asegurada.

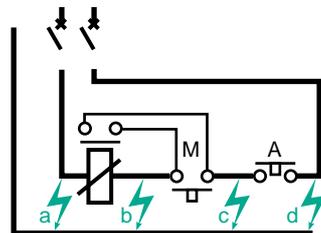
El cableado de estos circuitos requiere un cuidado mucho mayor con los esquemas TT y TN que con el esquema IT, puesto que este último avisa del incidente (primer defecto de aislamiento) y así previene de los riesgos eléctrico y mecánico. Precisamente los CPA se utilizan cada vez más para supervisar las redes de automatismos.

Es frecuente aconsejar una solución adicional, especialmente con los automatismos con relés para dispositivos electrónicos sensibles a las perturbaciones electromagnéticas, consistente en alimentar separadamente los circuitos de mando y control mediante transformadores BT/BT con arrollamientos separados.

A pesar de todo, como ya se ha dicho en el capítulo 2, la utilización del esquema IT tiene sus límites que se describirán en el próximo apartado.



El defecto **a** no es detectable.
El defecto **b** impide la función de parada.
Los defectos **c** y **d** provocan un cortocircuito.



El defecto **a** no es detectable.
Los defectos **b**, **c** y **d** provocan un cortocircuito.

Fig. 23: Según el esquema instalado, un circuito de control-mando puede estar afectado por varios tipos de defectos de aislamiento que provocan siempre una parada de la explotación con los esquemas TT y TN.

5.4 Límites y precauciones de empleo del esquema IT

Los límites de utilización del esquema IT afectan a los receptores y a las redes.

Límites debidos a los receptores

■ con un gran acoplamiento capacitativo a tierra (presencia de filtros)

Diversos equipos con filtros capacitativos (**figura 24**) tienen, dependiendo de su número,

el mismo handicap que las redes extensas que utilizan el esquema IT.

Estas fugas capacitativas tienen una particularidad respecto a la capacidad distribuida esencialmente debida a los cables de una red, y es que pueden estar desequilibrados. Un ejemplo claro lo constituyen los equipos de ofimática: ordenadores, monitores e impresoras,

Equipo	Capacidad red/tierra
Micro-ordenador	de 20 nF a 40 nF
SAI	40 nF
Variadores de velocidad	70 nF
Tubos fluorescentes (en grupos de 10)	20 nF

Fig. 24: Valores capacitivos indicativos de los filtros de AF que incorporan diversos equipos.

conectados a una misma derivación monofásica. Hay que saber que los filtros antiparasitarios (obligatorios según la directiva europea sobre CEM) instalados en estos aparatos producen en monofásica corrientes de fuga permanentes a 50 Hz que pueden alcanzar 3,5 mA por aparato (CEI 950); estas corrientes de fuga se suman si los aparatos están conectados a una misma fase.

Para que no se produzcan disparos intempestivos (figura 25) sobre todo cuando los DDR instalados son de umbral bajo, la corriente de fuga permanente no puede sobrepasar 0,17 I Δ n en esquema IT. En la práctica, se aconseja no alimentar más de tres ordenadores completos con un mismo DDR de 30 mA.

Este inconveniente existe también con los esquemas TT y TN.

Recuérdese:

□ para la seguridad de las personas ($U_C \leq U_L$) el límite que no hay que rebasar es de $3C \leq 70 \mu F$,

□ para el control de aislamiento, los CPA con inyección de corriente continua no son afectados por estas capacidades.

Téngase presente que si los aparatos se conectan a las tres fases, estas corrientes capacitativas se anulan mutuamente cuando están equilibradas (suma vectorial).

■ Con una pequeña resistencia de aislamiento

Es sobre todo el caso de hornos de inducción y soldadura con arco, pero también el de cables muy viejos.

Una baja resistencia de aislamiento equivale a un defecto permanente de aislamiento: el esquema IT se «transforma» en esquema TN o TT, con un CPA permanentemente en alarma.

Límites debidos a las características físicas de las redes

Las «fugas capacitativas» importantes perturban el control del aislamiento con los CPA a inyección de corriente alterna y la búsqueda del primer defecto con un generador «de muy baja frecuencia» (capítulo 2). Durante un defecto de aislamiento, pueden también provocar la

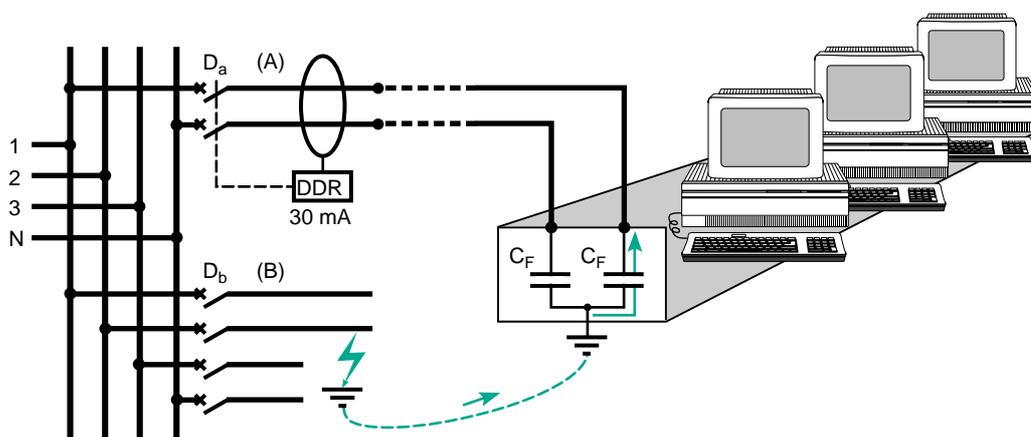


Fig. 25: En esquema IT, la circulación de corrientes capacitativas puede provocar disparos intempestivos de los DDR que suelen llamarse «disparos por simpatía». Aquí, si hay un defecto en la derivación B, el interruptor automático D_a situado en una derivación muy capacitativa (con varios filtros) puede disparar en lugar de D_b.

circulación de corrientes diferenciales susceptibles de provocar disparos intempestivos, llamados «por simpatía», de los DDR situados en las salidas de gran longitud o muy capacitivas (Cuaderno Técnico nº 114).

Por tanto, el esquema IT no se aconseja para redes extensas, que tengan derivaciones largas, por ejemplo para la distribución de energía en varios edificios separados unos de otros.

Caso de redes con alimentación de emergencia

Independientemente de la fuente de tensión que esté en servicio, el poder alimentar una red con diversas fuentes requiere asegurar la detección del primer defecto y la desconexión con el segundo.

■ La supervisión continua del aislamiento de la red con cualquiera de las fuentes de alimentación obliga a estudiar perfectamente la colocación del CPA. Según su emplazamiento, la supervisión del aislamiento puede ser parcial (figura 26).

No es aconsejable la conexión permanente de dos CPA en las posiciones A y B, porque se influyen mutuamente durante la conexión.

En cambio, la posición C podría ser aceptable, si el acceso a las fuentes de alimentación está reservado al personal experimentado, pero, en el momento de efectuar una conmutación de fuentes existe el riesgo de constatar la existencia de un defecto previo en la nueva

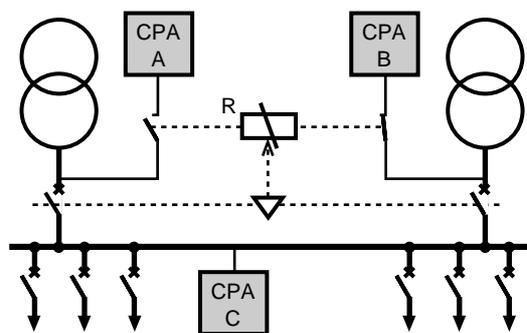


Fig. 26: Supervisión de aislamiento en diversas partes de una red con una fuente de emergencia.

fuelle. Es por tanto preferible prever un CPA en cada fuente [A y B] con un conjunto de relés [R] que impida el funcionamiento simultáneo de los dos aparatos en un mismo circuito.

Existen también nuevos sistemas de control de aislamiento que utilizan el intercambio de informaciones mediante buses digitales y que se adaptan automáticamente a la configuración de la red, evitando el sistema de relés que suele ser complicado (figura 27).

■ El disparo con el segundo defecto, independientemente de la fuente de tensión, necesita, como con el esquema TN, verificar la compatibilidad de los DPCC con las corrientes de defecto presuntas; especialmente cuando la fuente de sustitución es un grupo electrógeno. En efecto, la corriente de cortocircuito que proporciona es muy inferior a la de un transformador MT/BT alimentado por las redes de distribución pública, por tanto, el umbral de actuación de los DPCC debe preverlo.

Una primera solución consistiría en bajar el umbral de estas protecciones, pero entonces las posibilidades de selectividad amperimétrica se reducirían. Una segunda respuesta, más fácil, es prever DDR de baja sensibilidad.

■ Con Alimentación Estática Ininterrumpida –SAI–

Las dificultades que se encuentran son las mismas que con un GE. Únicamente hay que decir que la supervisión del aislamiento es en este caso más compleja, puesto que depende de las diferentes configuraciones de la explotación que puede tener un SAI.

En la práctica

En todos estos casos en los que hay condiciones especiales de utilización, la solución más adecuada es limitar el uso del esquema IT únicamente a las redes que alimentan equipos que obligan a una gran disponibilidad de la energía.

■ En una instalación existente, para mejorar esta continuidad de servicio, hay que identificar las derivaciones con bajo aislamiento y alimentarlas independientemente, por ejemplo, con un esquema TN, reservando la red con esquema IT para las utilidades más exigentes. Esta solución necesita la instalación

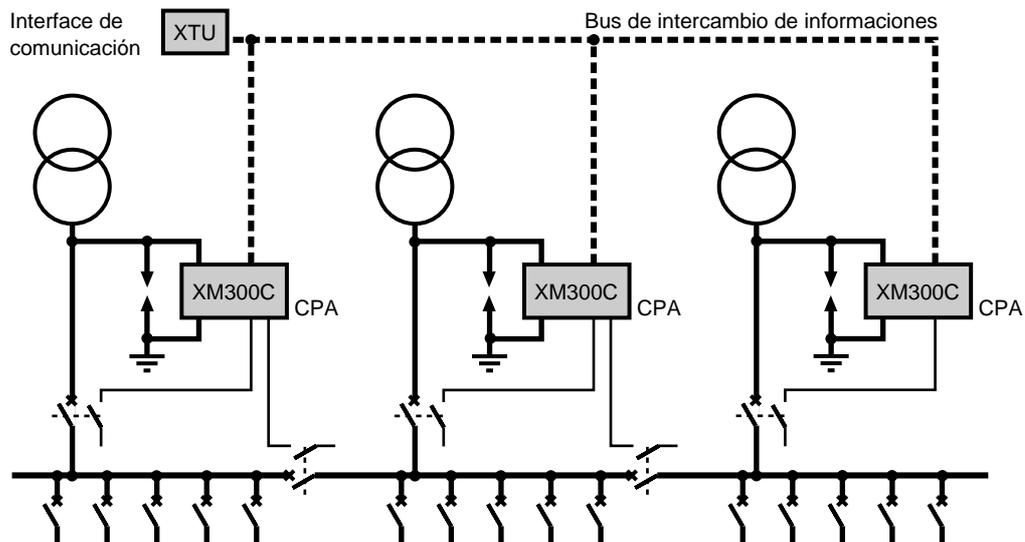


Fig. 27: Sistema de supervisión de aislamiento de diversas partes de una red con varias fuentes (Vigilohm System de Merlin Gerin).

de un nuevo transformador o BT/BT o directamente MT/BT según las potencias necesarias. Una solución similar puede utilizarse para alimentar máquinas que tengan problemas en explotación IT.

■ Para una instalación nueva, la distribución eléctrica con el esquema IT requiere prever desde el principio las necesidades de continuidad del servicio. Es preferible, para reducir la incidencia de la capacidad de la red respecto a tierra, limitar la extensión de esta red a un solo edificio por ejemplo.

Por último, si se necesita la tensión simple, la distribución del conductor neutro deberá supervisarse muy seriamente, puesto que:

- el aislamiento del neutro ha de estar supervisado,
- la utilización de interruptores automáticos de curva B o G y de DDR de baja sensibilidad permite simplificar el estudio de las protecciones, ... y evita la instalación, y por tanto el coste adicional, de un transformador específico o una línea especial.

6 Conclusión

La evolución de los diferentes ECT debe seguir la evolución de las necesidades de los usuarios de la energía eléctrica.

6.1 La disponibilidad: una necesidad creciente que hay que satisfacer

Con todos los equipos informáticos, automáticos y de control y mando, todos los centros de producción importantes (industriales, comerciales...) exigen una mayor disponibilidad de energía eléctrica.

Esta energía actualmente se considera como un simple producto al cual se aplican los criterios de calidad entre los que el más importante es la disponibilidad.

Para que los usuarios aprovechen esta mejora de la disponibilidad, esta demanda, que ya tienen en cuenta los distribuidores de energía, debe de

estar también integrada en el diseño de las nuevas instalaciones de distribución internas y privadas... Es aquí donde el esquema de conexión a tierra IT toma toda su importancia señalizando siempre el primer defecto (no peligroso) y permitiendo su reparación.

Pero para que una red se beneficie de todas las cualidades del esquema IT, el diseñador debe de implicarse mucho en el funcionamiento de la futura red y conocer perfectamente los equipos que hay que alimentar.

6.2 El esquema IT encuentra su verdadero emplazamiento

Utilizable en muchas instalaciones eléctricas

El esquema IT se presenta como utilizable en un gran número de instalaciones eléctricas de los países industrializados, excepto para ciertas aplicaciones (ejemplo: hornos de arco, viejos circuitos de alumbrado) y en ciertas situaciones (por ejemplo: medios húmedos, redes muy extensas) que presentan normal o frecuentemente un bajo nivel de aislamiento. Estos países disponen en efecto de electricistas competentes y en suficiente número para poder intervenir rápidamente en una instalación (dentro de la jornada laboral), y además, sus infraestructuras permiten la instalación de la televigilancia.

Para los circuitos de distribución adaptados

La evolución de las necesidades de continuidad del servicio y la instalación de nuevas máquinas de características particulares, especialmente en el campo de la compatibilidad electromagnética –CEM–, hacen que a veces la alimentación eléctrica deba de efectuarse con circuitos de distribución adaptados. Así el desarrollo de redes privadas de distribución tiene diferentes sub-redes que tienen un ECT adecuado.

En estas condiciones el esquema IT garantiza sin problemas la continuidad del servicio requerida.

6.3 Ventajas de una mayor seguridad

El diseñador de la instalación debe también tener presentes los riesgos de incendio y explosión y responder a las exigencias de CEM (perturbaciones de las medidas y de las comunicaciones).

El esquema IT es el que tiene un mayor número de ventajas y consigue alcanzar mejor las necesidades específicas de los usuarios, como son:

- mejor CEM (interconexión de masas y, en principio, una sola toma de tierra),
- riesgo mínimo de incendio y explosión (bajas corrientes con el primer defecto).

Además, su empleo favorece la evolución de los materiales y equipos (CPA, aparatos de búsqueda, supervisor, ...) que permiten:

- anticiparse a las intervenciones (predicción),
- una búsqueda del primer defecto de aislamiento muy rápida (automatismo), e incluso a distancia (supervisión mediante buses o conexiones digitales),
- la preparación-previsión de las reparaciones (telediagnóstico).

6.4 En resumen

Evidentemente, después de leer este documento, cualquier lector, que deba escoger el esquema de conexión a tierra de una red de distribución eléctrica, entiende perfectamente la importancia de evaluar los imperativos ligados a los equipos utilizados y al entorno, pero también los imperativos que dependen de las condiciones de estudio de la instalación y de las ulteriores modificaciones.

Aquí es indispensable recordar brevemente cada uno de los ECT con sus ventajas e inconvenientes (**figura 28**).

Nota: En esta tabla, el coste de la instalación no se ha abordado, porque, el sobre coste eventual de un esquema IT (CPA, sistema de búsqueda del defecto), debe compararse con las pérdidas económicas que provoca una parada imprevista de la explotación con un primer defecto... y sopesarlo según la actividad.

	TT	TN-C	TN-S	IT
Seguridad de personas (instalación perfecta)	■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■
Seguridad de los bienes				
■ contra los riesgos de incendio	■ ■ ■	□	□ □	■ ■ ■
■ en protección de las máquinas contra defectos de aislamiento	■ ■ ■	□	□	■ ■ ■
Disponibilidad de la energía	□ □	□ □	□ □	■ ■ ■ ■
Compatibilidad electromagnética	□ □	□	□ □	□ □
Para efectuar la instalación y el mantenimiento				
■ competencia	■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■
■ disponibilidad	□	□ □	□ □	■ ■ ■

■ ■ ■ ■ excelente
 ■ ■ ■ bueno
 □ □ medio
 □ malo

Fig. 28: Resumen de ventajas e inconvenientes de los diferentes ECT.

7 Bibliografía

Normas y decretos

- CEI 60364: Instalación eléctrica en edificios.
- CEI 60479-1: Efectos de la corriente en el hombre y en los animales domésticos.
- CEI 60947-2: Aparatación BT –2ª parte–: interruptores automáticos.
- CEI 60950: Seguridad de los equipos de proceso de datos.
- CEI 61000: Compatibilidad electromagnética
- CEI 61557, NF EN 61557: Seguridad eléctrica en las redes de distribución BT de 1000 Vca y 1500 Vcc – Dispositivos de control, de medida y de supervisión de medidas de protección:
 - 6ª parte: Dispositivos diferenciales residuales en redes IT.
 - 8ª parte: Controladores de aislamiento para redes IT.
- NF C 15-100: Installations électriques à basse tension.

Cuadernos Técnicos Schneider:

- Puesta a tierra del neutro en redes industriales AT.
Cuaderno Técnico nº 62
F. SAUTRIAU
- Los dispositivos diferenciales residuales.
Cuaderno Técnico nº 114
R. CALVAS

- La compatibilidad electromagnética.
Cuaderno Técnico nº 149
F. VAILLANT
- Las perturbaciones armónicas en las redes industriales y su tratamiento.
Cuaderno Técnico nº 152
N. QUILLON, P. ROCCIA
- Cálculo de corrientes de cortocircuito.
Cuaderno Técnico nº 158
R. CALVAS, A. DUCLUZAUX, B. De METZ-NOBLAT, G. THOMASSET
- Los esquemas de conexión a tierra en BT (regímenes de neutro).
Cuaderno Técnico nº 172
R. CALVAS, B. LACROIX
- Los esquemas de conexión a tierra en el mundo y su evolución.
Cuaderno Técnico nº 173
R. CALVAS, B. LACROIX
- Perturbaciones de los sistemas electrónicos y esquemas de conexión a tierra.
Cuaderno Técnico nº 177
R. CALVAS
- Sobretensiones y limitadores de sobretensión en BT –coordinación del aislamiento en BT–.
Cuaderno Técnico nº 179
Ch. SERAUDIE
- Cuadro General BT inteligente.
Cuaderno Técnico nº 186
A. JAMMES
- Coexistencia de corrientes fuertes y corrientes débiles.
Cuaderno Técnico nº 187
R. CALVAS, J. DELABALLE