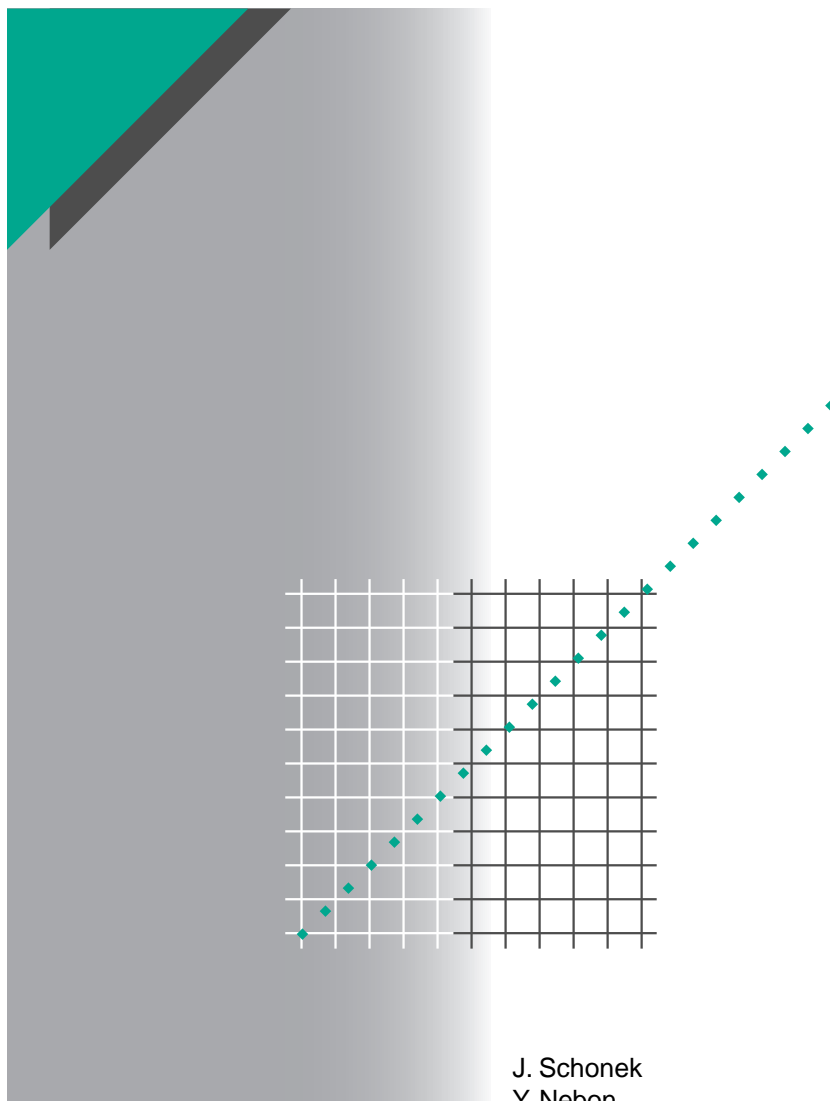


Cuaderno Técnico nº 204

Protecciones BT y variadores de velocidad (convertidores de frecuencia)



J. Schonek
Y. Nebon

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>

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 204 de Schneider Electric».

Cuaderno Técnico nº 204

Protecciones BT y variadores de velocidad (convertidores de frecuencia)



Jacques SCHONEK

Ingeniero ENSEEIHT y Doctor-Ingeniero por la Universidad de Toulouse, participó entre 1980 y 1995 en el diseño de los variadores de velocidad de la marca Telemecanique.

Después fue gerente de la actividad Filtrado de Armónicos. Actualmente es responsable de Aplicaciones y Redes Electrotécnicas en la Oficina de Estudios de Anticipación de la Dirección de Distribución Eléctrica de Schneider Electric.



Yves NEBON

En 1969 entró en la empresa Merlin Gerin, donde trabajó durante 14 años en las oficinas de estudio de BT, mientras continuaba su formación profesional obteniendo sucesivamente varios diplomas y alcanzando finalmente el título de Ingeniero. Después ocupó diferentes puestos en diversas aplicaciones BT.

Desde 1995 tiene a su cargo el marketing de la gestión y evolución de las gamas de productos de distribución eléctrica BT de la marca Merlin Gerin en la sociedad Schneider Electric.

Trad.: J.M. Giró

Original francés: mayo 2002

Versión española: octubre 2004



Protecciones BT y variadores de velocidad (convertidores de frecuencia)

El objetivo de este Cuaderno Técnico es explicar los fenómenos particulares observados en las instalaciones de BT cuando se produce una sobrecarga o un fallo eléctrico en los circuitos equipados con variadores de velocidad.

Se ofrecen diversas recomendaciones para asegurar la protección de las personas y de los bienes, y para mejorar la continuidad del servicio.

Índice

1 Variadores de velocidad del tipo «convertidor de frecuencia» para motores asíncronos	1.1 Descripción	p. 5
	1.2 Necesidad de protecciones adaptadas	p. 8
2 Protecciones contra sobrecargas	2.1 Protecciones integradas en los variadores	p. 9
	2.2 Protecciones exteriores a los variadores	p. 10
3 Protección de las personas	3.1 Los riesgos vinculados a los defectos de aislamiento	p. 12
	3.2 Recordatorio de los esquemas de conexión a tierra	p. 13
	3.3 Utilización de los DDR según el ECT	p. 15
	3.4 Protección integrada en los variadores contra los defectos a tierra	p. 16
	3.5 Defectos de aislamiento y variadores de velocidad	p. 17
4 Protecciones que hay que asociar con los variadores (tabla resumen)		p. 22
5 Fenómenos particulares	5.1 Corrientes de fuga de alta frecuencia	p. 23
	5.2 Corrientes de fuga al conectar	p. 25
	5.3 Defecto a la salida del variador con un esquema TT o TN	p. 26
	5.4 Fallo en la salida del variador con un esquema IT	p. 28
	5.5 Corriente de defecto con componente continua	p. 29
6 Recomendaciones de elección y de instalación	6.1 Elección de los DDR (figura 49)	p. 31
	6.2 Elección de los CPA	p. 31
	6.3 Prevención de disfunciones	p. 32
Bibliografía		p. 33

1 Variadores de velocidad del tipo «convertidor de frecuencia» para motores asíncronos

1.1 Descripción

Objetivo

El objetivo de los variadores de velocidad del tipo «convertidor de frecuencia» es alimentar a los motores asíncronos trifásicos para conseguir características de funcionamiento

radicalmente diferentes a las de su utilización normal a amplitud y frecuencia constantes (motores alimentados directamente con la tensión de red). El cuadro de la **figura 1** presenta las ventajas de estos dispositivos.

Motor asíncrono	... en uso normal	... con variador de velocidad
Corriente de arranque	Muy elevada, del orden de 6 a 8 veces la corriente nominal en valor eficaz, 15 a 20 veces en valor de pico	Limitado en el motor (en general: cerca de 1,5 veces la corriente nominal)
Par de arranque, C_d	Elevado y no controlado; del orden de 2 a 3 veces el par nominal, C_n	Del orden de 1,5 veces el par nominal, C_n , y controlado durante toda la aceleración
Arranque	Brusco; con duración que sólo depende de las características del motor y de la carga arrastrada (par resistente, inercia)	Progresivo, sin brusquedades y controlado (rampa lineal de velocidad, por ejemplo)
Velocidad	Variando ligeramente según la carga (próxima a la velocidad de sincronismo, N_s)	Variación posible desde cero hasta un valor superior a la velocidad de sincronismo, N_s
Par máximo, C_m	Elevado, del orden de 2 a 3 veces el par nominal, C_n	Elevado y disponible en toda la gama de velocidades (del orden de 1,5 veces el par nominal)
Frenado eléctrico	Relativamente complejo, necesita protecciones y un esquema especial	Fácil
Inversión del sentido de giro	Fácil, pero después de parar el motor	Fácil
Riesgo de bloqueo	Sí, en caso de exceso de par (par resistente > C_m), o en caso de subtenensión	No
Funcionamiento del motor en el plano par-velocidad	Figura 2	Figura 3

Fig. 1: Tabla comparativa de las características de funcionamiento, que demuestra el gran interés de los variadores de velocidad del tipo «convertidor de frecuencia».

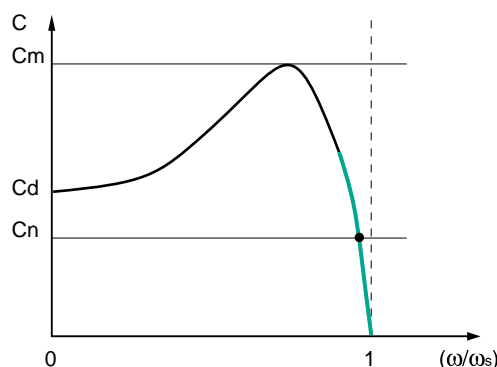


Fig. 2: Gráfica par-velocidad de un motor alimentado en directo. La zona de funcionamiento del motor en el plano par-velocidad está limitada a la parte verde de la curva.

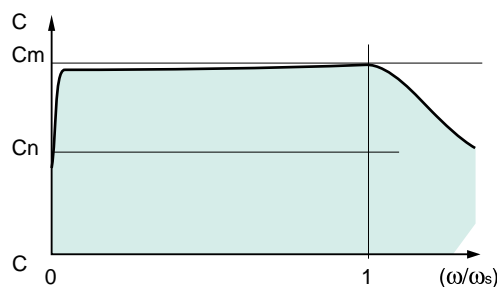


Fig. 3: Gráfica par-velocidad de un motor alimentado con un convertidor de frecuencia. En este caso, la zona de funcionamiento del motor en el plano par-velocidad está representada en verde.

Principio

Consiste en suministrar al motor una onda de tensión con una amplitud y frecuencia variables, pero manteniendo la relación **tensión/frecuencia sensiblemente constante**.

La generación de esta onda de tensión la realiza un dispositivo electrónico de potencia cuyo esquema de principio se representa en la **figura 4**.

El convertidor consta de:

- un puente rectificador de diodos, mono o trifásico, conectado a un condensador, lo que constituye una fuente de tensión continua (Bus de tensión continua, Bus dc, o Bus cc),
- un puente ondulator, generalmente con IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), alimentado con la tensión continua y que genera una onda de tensión alterna de amplitud y frecuencia variables mediante la técnica de «Modulación de Ancho de Impulsos» o PWM («Pulse Width Modulation»),

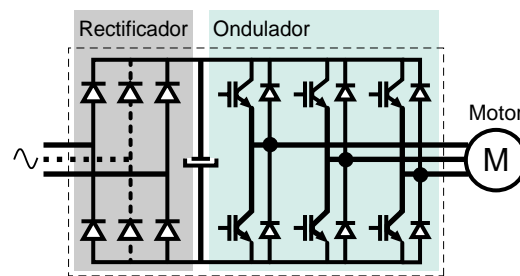


Fig. 4: Esquema de principio de un convertidor de frecuencia.

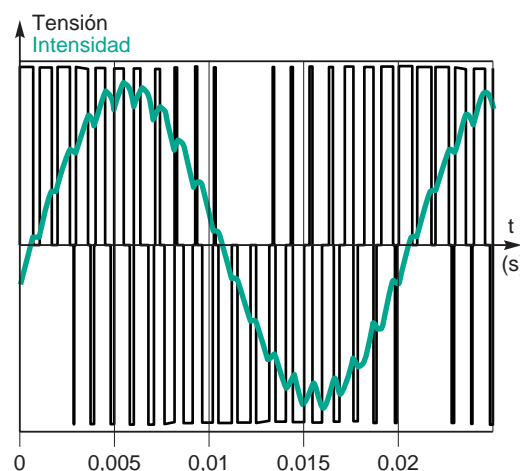


Fig 5: Tensión, mediante PWM, y corriente en los bobinados de la máquina.

■ una unidad de mando que da la orden de conducción a los IGBT con arreglo a las consignas dadas por el operador (orden de marcha, sentido de giro, consigna de velocidad) y de la medida de las magnitudes eléctricas (tensión de red, corriente del motor).

El principio PWM utilizado en el puente ondulator consiste en aplicar sobre los bobinados del motor una sucesión de impulsos de tensión, de amplitud igual a la tensión continua suministrada por el rectificador, pero modulados en anchura para crear una tensión alterna de amplitud variable.

Las curvas representadas en la **figura 5** son unos ejemplos de tensión entre fases y de corriente en un bobinado de la máquina (suponiendo que los bobinados están conectados en triángulo).

Características de la corriente absorbida por el variador

■ Forma de onda

□ En caso de alimentación trifásica

El puente rectificador combinado con el condensador de filtrado toma de la red una corriente no sinusoidal; la **figura 6** representa su gráfica, y la **figura 7**, su espectro armónico.

El valor típico del índice de distorsión armónica THD es del 40%.

Hay que señalar que este índice de distorsión se obtiene añadiendo unas inductancias de línea que provocan una caída de tensión comprendida entre el 3 y el 5%. Si no se instalan estas inductancias de línea, la distorsión de corriente es mayor: puede alcanzar el 80% en ausencia total de inductancia en el variador.

□ En caso de una alimentación monofásica

La corriente absorbida se representa en la **figura 8** y su espectro en la **figura 9**. El valor típico de la tasa de distorsión armónica, THD, es del 80%.

Nótese que este índice de distorsión también se obtiene por inclusión de una inductancia de línea que provoca una caída de tensión comprendida entre el 3 y el 5%. En ausencia de esta inductancia de línea, la distorsión de corriente es mayor: puede sobrepasar el 100% en ausencia total de inductancia en el variador.

■ Variación de la corriente de línea según el punto de funcionamiento del motor

Puesto que la corriente fundamental absorbida por el variador está prácticamente en fase con la tensión, la corriente es proporcional a la potencia eléctrica absorbida de la red. Teniendo en cuenta los rendimientos, esta corriente es pues proporcional a la potencia mecánica suministrada por el motor. La potencia mecánica es igual al producto del par por la velocidad. Así pues, a velocidad reducida, la potencia mecánica es pequeña. De lo que se deduce que la corriente absorbida de la red por el variador es baja cuando el motor gira a baja velocidad, aunque éste desarrolle un par elevado y absorba una gran corriente.

Referencias normativas

Existen dos normas que se refieren especialmente al diseño de los variadores de velocidad

■ CEI 61800-3 «Accionamientos eléctricos de potencia a velocidad variable – Parte 3: Norma de producto en relación con la CEM».

■ NF EN50178 «Equipo electrónico utilizado en las instalaciones de potencia».

La conformidad con esta norma permite el marcado CE según la directiva europea «Baja Tensión». Señalar que esta norma da también indicaciones para la instalación de estos productos.

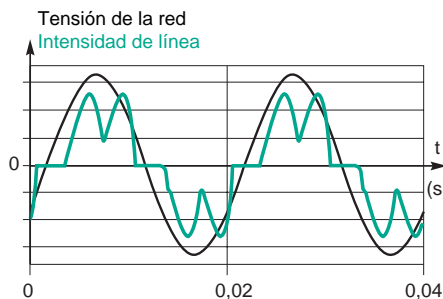


Fig. 6: Intensidad absorbida y tensión simple de la red (alimentación trifásica).

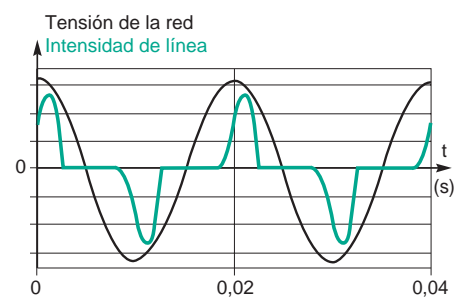


Fig. 8: Intensidad absorbida y tensión simple de la red (alimentación monofásica).

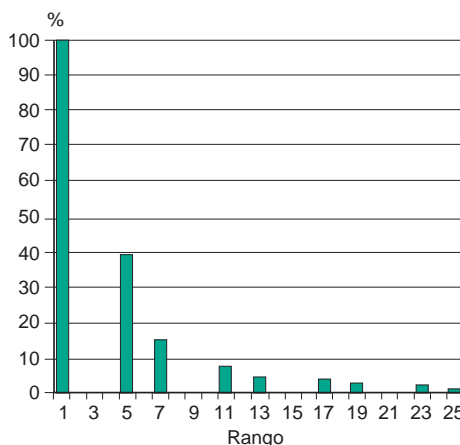


Fig. 7: Espectro de la intensidad absorbida de la red (alimentación trifásica).

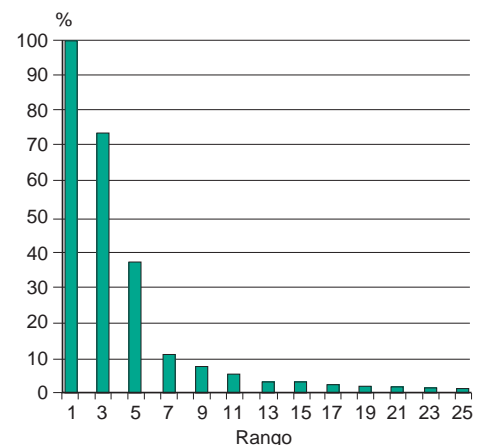


Fig. 9: Espectro de la intensidad absorbida de la red (alimentación monofásica).

1.2 Necesidad de protecciones adaptadas

Las características descritas anteriormente, tanto tecnológicas (circuitos electrónicos de potencia) como de funcionamiento del motor asociado con un variador, demuestran la necesidad de prever protecciones adaptadas para la explotación adecuada de estos equipos.

La realización de los variadores con tecnología electrónica permite la integración de varias de estas protecciones con una reducción de costes.

Evidentemente estas protecciones no reemplazan a las que son necesarias al principio de cada circuito, según los reglamentos de instalación vigentes, y que son «exteriores» a los variadores.

En los capítulos siguientes se describe el funcionamiento de todas las protecciones instaladas.

2 Protecciones contra sobreintensidades

Las protecciones habituales contra sobreintensidades (interruptores automáticos o fusibles) están principalmente previstas para intervenir en dos casos:

- Para proteger una instalación del riesgo de cortocircuito.

- Para evitar los riegos debidos a sobrecargas de un circuito o a unas intensidades de explotación mayores que las que soportan los conductores (juegos de barras y cables) y los aparatos de mando y protección.

La tecnología de los variadores de velocidad permite asegurar electrónicamente algunas de estas funciones.

2.1 Protecciones integradas en los variadores

Protección de sobrecarga del motor

Los variadores modernos aseguran la protección del motor contra las sobrecargas:

- mediante una limitación instantánea de la corriente eficaz a, aproximadamente, 1,5 veces la corriente nominal,
- mediante un cálculo permanente del I^2t , teniendo en cuenta la velocidad (puesto que la inmensa mayoría de los motores son autoventilados, el enfriamiento, a baja velocidad, es menos eficaz).

Nótese que, cuando una línea sólo alimenta a un motor y su variador, esta protección contra sobrecargas del motor asegura a la vez la protección del conjunto de los aparatos y del cableado.

Protección contra los cortocircuitos en el motor o en la línea aguas abajo del variador

En caso de cortocircuito entre fases a la salida del variador (en bornes del motor o en un lugar cualquiera de la línea entre el variador y el motor), se detecta la sobreintensidad en el variador y se envía muy rápidamente una orden de bloqueo a los IGBT. La corriente de cortocircuito (**figura 10**) se interrumpe en algunos microsegundos, lo que asegura la protección del variador. Esta corriente, muy breve, es suministrada esencialmente por el condensador de filtrado asociado al rectificador, y por tanto es inapreciable en la línea de alimentación.

Otras protecciones integradas en los variadores

Los variadores disponen de otras funciones de autoprotección contra:

- los recalentamientos de sus componentes electrónicos que podrían significar su destrucción. Un captador colocado en un

disipador térmico provoca la parada del variador, cuando la temperatura sobrepasa un cierto umbral,

- los huecos de tensión de la red: esta protección es necesaria para evitar cualquier funcionamiento inadecuado de los circuitos de control y del motor, así como cualquier sobreintensidad peligrosa cuando la tensión de red retoma su valor normal,
- las sobretensiones a frecuencia industrial de la red: se trata de evitar las eventuales destrucciones de sus componentes,
- el corte de una fase (para los variadores trifásicos): porque la alimentación monofásica que sustituye a la alimentación trifásica produce un aumento de la corriente absorbida.

Acción de las protecciones integradas

Todas ellas provocan, en caso de defecto, el bloqueo del variador y la parada del motor en «rueda libre». En estos casos, un relé integrado en el variador ordena la apertura del contactor de línea, lo que asegura el corte de la alimentación.

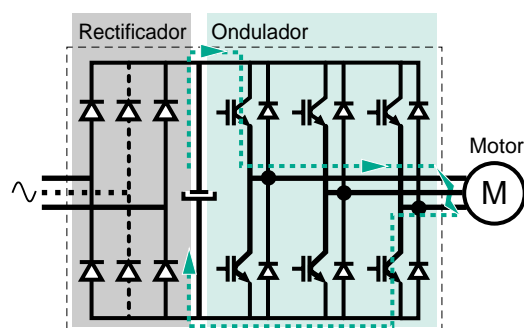


Fig.10: Cortocircuito aguas abajo del variador.

2.2 Protecciones exteriores a los variadores

Además de las necesidades expuestas en las primeras líneas de este capítulo, estas protecciones contra las sobreintensidades están también previstas para intervenir en caso de defecto interno del variador (destrucción del puente rectificador, por ejemplo): el dispositivo de protección de la línea asegura el corte de la corriente de defecto.

Nota: aunque este dispositivo normalmente no pueda proteger los componentes del variador, su apertura automática limita las consecuencias de tales defectos.

Emplazamiento de los dispositivos

Todas estas protecciones se definen para un circuito que con frecuencia se asemeja al de la **figura 11**:

- al principio del circuito, una protección individual contra sobreintensidades, a menudo asociada a un contactor,

- sin dispositivo de corte aguas abajo del variador. En esta figura se detallan las funciones que asignadas a los diferentes aparatos (interruptor automático, contactor y variador).

Estas asociaciones (interruptor automático, contactor y variador) propuestas por los constructores se denominan «salida-motor». Debido a las protecciones integradas en los variadores, estas asociaciones aseguran completamente una coordinación de tipo 2 en el caso de cortocircuito aguas abajo del variador. «Coordinación de tipo 2» significa que, en caso de cortocircuito:

- no se admite ningún daño ni pérdida de ajuste,
- se debe conservar el aislamiento,

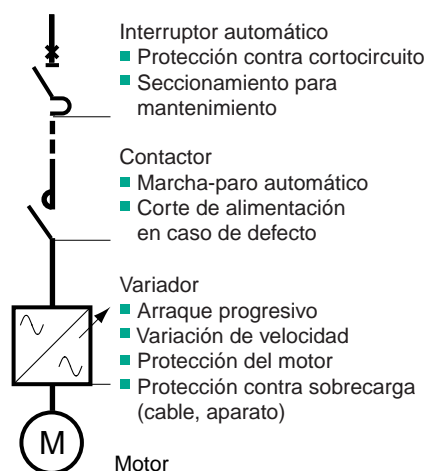


Fig.11: Esquema recomendado para la protección contra sobreintensidades.

- la salida-motor debe de estar en situación de funcionar después de suprimir el cortocircuito,

- se admite el riesgo de soldadura de los contactos del contactor si éstos se pueden separar fácilmente.

Si hay riesgo de cortocircuito aguas arriba del variador, para asegurar la coordinación de tipo 2, hay que utilizar las tablas de coordinación suministradas por los constructores de las protecciones situadas aguas arriba.

Nota: Con los variadores, no se producen picos de corriente al conectar la tensión; por tanto, el dispositivo de protección no ha de estar sujeto a ninguna exigencia especial.

Cálculo del calibre de los interruptores automáticos y de los contactores

Se determina con arreglo a la corriente de línea absorbida por el variador. Ésta se calcula a partir de:

- la potencia mecánica nominal del motor,
- la tensión nominal de alimentación,
- el rendimiento del motor y del variador,
- la sobrecarga permanente admisible, de 1,1 Cn a par constante y de 1,05 Cn a par variable,
- los armónicos, puesto que la corriente no es sinusoidal.

El valor eficaz de la corriente, en función de la tasa de distorsión, se obtiene por la fórmula:

$$I_{rms} = I_1 \sqrt{1 + THD^2}$$

Así, con THD = 140%,

$$I_{rms} = 1,08 I_1.$$

La corriente fundamental, I_1 , está prácticamente en fase con la tensión. El valor típico de la corriente absorbida por el variador, cuando alimenta un motor que funciona en su punto nominal (aplicación a par constante), se calcula por la fórmula:

$$I_{rms} = 1,08 I_1 \approx 1,08 \times 1,1 \frac{P_{mot}}{\sqrt{3} U} \frac{1}{\eta_{mot}} \frac{1}{\eta_{var}}$$

Siendo:

P_{mot} potencia nominal del motor

U tensión entre fases

η_{mot} rendimiento del motor

η_{var} rendimiento del variador

■ Ejemplo:

Potencia del motor: 15 kW

Tensión de la red: 400 V

η_{mot} : 0,95

η_{var} : 0,97

de donde resulta: $I_{rms} = 27,9 \text{ A}$

Dos casos particulares

■ Alimentación de motores en paralelo

En este caso, la protección de sobrecarga integrada en el variador no puede asegurar la protección de cada motor. En efecto, uno de los motores puede encontrarse en sobrecarga, mientras que la corriente absorbida por el conjunto de los motores no sobrepasa la corriente nominal del variador. Así pues, cada uno de los motores debe de estar protegido con su relé térmico (**figura 12**).

A pesar de todo se recomienda mantener activa la protección de sobrecarga integrada en el variador, con el fin de asegurar la protección de los cables aguas arriba.

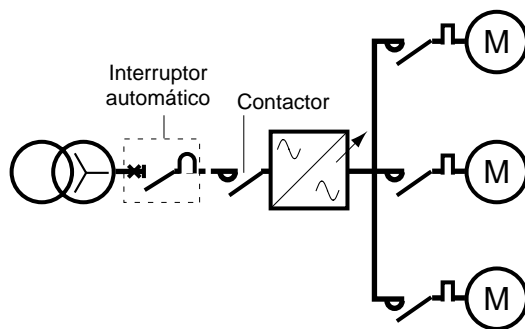


Fig.12: Protección de sobrecarga de varios motores alimentados por el mismo variador.

■ Inhibición de la protección de sobrecarga integrada en el variador

Para ciertas aplicaciones que exigen imperativamente una continuidad de explotación, puede inhibirse la protección de sobrecarga del variador.

Entonces, la protección de los cables y del equipo, que debe de quedar asegurada aguas arriba, necesita una protección de sobrecarga obligatoriamente asociada con el interruptor automático de la salida-motor (**figura 13**).

En este caso se recomienda un sobredimensionado del 20% del cable y del equipo.

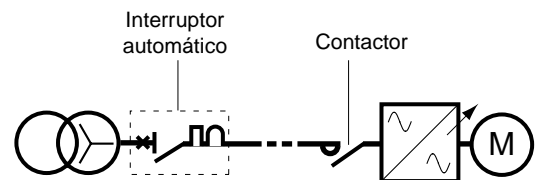


Fig. 13: Inhibición de la protección de sobrecarga integrada en el variador.

3 Protección de las personas

3.1 Los riesgos vinculados a los defectos de aislamiento

Un defecto de aislamiento, cualquiera que sea su causa, presenta riesgos para

- la seguridad de las personas (riesgo de choque eléctrico),
- la seguridad de los bienes (riesgo de incendio o de explosión debido a un calentamiento puntual excesivo),
- la disponibilidad de la energía eléctrica (desconexión de una parte de una instalación para eliminar el defecto).

Refiriéndose a la protección de las personas, las normas y los reglamentos distinguen dos tipos de contactos peligrosos y precisan las medidas correspondientes de protección.

El contacto directo

Contacto de personas con conductores activos (fase o neutro) o piezas conductoras habitualmente bajo tensión (figura 14).

La protección contra este riesgo normalmente se asegura por el aislamiento de las partes activas, por medio de barreras, pantallas o envoltentes (según CEI 60364-4-41 ó NF C 15-100). Estos dispositivos tienen un carácter preventivo y pueden fallar. Para paliar este riesgo, se utiliza una medida de protección complementaria con corte automático, que consiste en detectar cualquier corriente de «fuga a tierra» susceptible de circular a través de una persona, y que no retorna a la fuente a través de los conductores activos. Su umbral de disparo se fija en **30 mA en corriente alterna** (CEI 60364-4-41 ó NF C 15-100) y 60 mA en corriente continua.

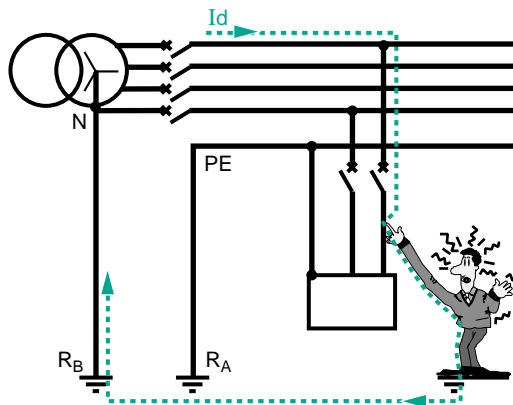
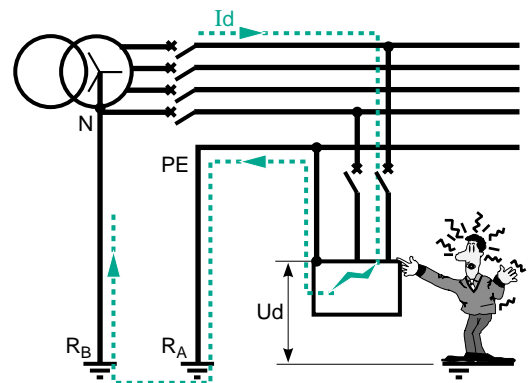


Fig. 14: Contacto directo.

El contacto indirecto

Contacto de personas con masas conductoras, normalmente sin potencial, puestas accidentalmente bajo tensión. La aparición de esta tensión se debe al fallo del aislamiento de un aparato o de un conductor que tiene un defecto de aislamiento (figura 15).

Este riesgo eléctrico depende de la tensión de contacto que aparece entre la masa del equipo con defecto y la tierra u otras masas conductoras próximas. Para definir las protecciones que hay que instalar, las normas presentan diferentes esquemas de instalación según las conexiones eléctricas entre los conductores activos, las masas y la tierra. Para más explicaciones ver el Cuaderno Técnico n° 172.



Cuando hay un contacto con una carga puesta accidentalmente en tensión (U_d), el umbral de riesgo está fijado por la tensión límite de seguridad U_L .

Así, con

R_A = resistencia de puesta a tierra de las masas de la instalación,

R_B = resistencia de puesta a tierra del neutro, el umbral de funcionamiento ($I\Delta n$) del dispositivo de protección debe ser tal que:

$$U_d = R_A \cdot I\Delta n \leq U_L, \text{ y, por tanto,}$$

$$I\Delta n \leq U_L / R_A.$$

(Cuaderno Técnico n° 114).

Fig. 15: Contacto indirecto.

3.2 Recordatorio de los esquemas de conexión a tierra

Para las redes BT, existen tres tipos de esquemas de conexiones a tierra –ECT–, comúnmente llamados regímenes de neutro.

Se diferencian por la puesta a tierra o no del punto neutro de la fuente de tensión, y por el punto de conexión de las masas (figura 16). La elección del régimen de neutro depende de las características de la instalación y de las condiciones y las exigencias de explotación.

Para más detalles ver también los Cuadernos Técnicos siguientes:

- n° 173 – Los esquemas de las conexiones a tierra en el mundo y su evolución,
- n° 178 – El esquema IT (neutro aislado) de los esquemas de conexión a tierra en BT.

Esquema TT

En este tipo de esquema, llamado «neutro a tierra»:

- el neutro de la fuente se conecta a una toma de tierra distinta de la de las masas,
- todas las masas protegidas por el mismo dispositivo de corte deben estar conectadas a la misma toma de tierra.

Es el caso típico de la distribución pública en Francia.

El esquema TT obliga a efectuar el corte inmediato de la alimentación, porque todo defecto de aislamiento puede presentar un riesgo de electrocución.

Esquema TN

El principio de este esquema, llamado «puesta al neutro», es que todo defecto de aislamiento provoca un cortocircuito monofásico fase-neutro. El corte inmediato también es necesario. Este esquema permite utilizar las protecciones acostumbradas de sobrecorriente para proteger contra los defectos de aislamiento. En este tipo de esquema:

- el punto neutro BT de cada fuente se conecta directamente a tierra,
- todas las masas de la instalación se conectan a tierra (y, por tanto, al neutro) mediante un conductor de protección:
 - CP distinto (separado) del conductor de neutro, es el esquema TN-S,
 - o CPN común con conductor de neutro, es el esquema TN-C.

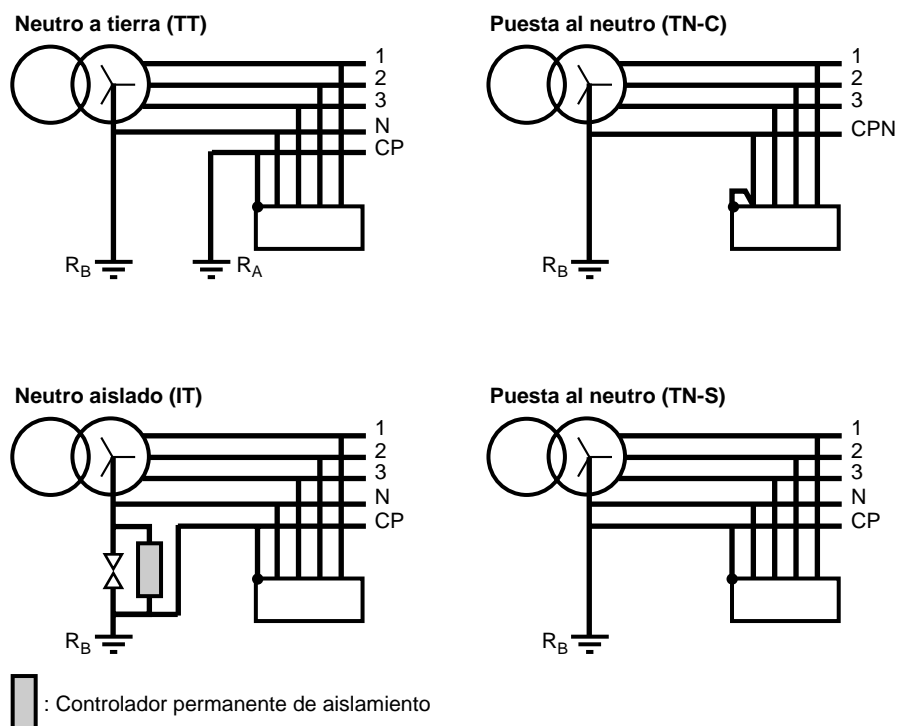


Fig. 16: Los tres tipos de esquemas normalizados de conexión a tierra.

Nota: No se recomienda el esquema TN-C para la alimentación de los dispositivos electrónicos debido a la posible circulación de corrientes armónicas en el conductor de neutro que es también el conductor de protección.

Esquema IT

En este tipo de esquema llamado «con neutro aislado»:

- el neutro del transformador está:
 - o aislado de tierra (neutro aislado),
 - o conectado a tierra a través de una impedancia elevada (neutro impedante),
- todas las masas de la instalación están interconectadas y conectadas a tierra.

En el esquema IT, el primer defecto de aislamiento no exige el corte, lo que permite que la instalación continúe funcionando normalmente. Sin embargo, hay que detectar este defecto, señalarlo y repararlo rápidamente, antes de que aparezca un segundo defecto de aislamiento sobre otro conductor activo, lo que requeriría necesariamente un corte inmediato. Por este motivo, el sistema IT tiene la cualidad de proporcionar la mejor continuidad de la alimentación (Cuaderno Técnico n° 178).

Necesidad de medios específicos de detección

El valor de la corriente de defecto de aislamiento entre fase y tierra (en modo común) depende del esquema de conexión a tierra. A menudo, su valor es demasiado pequeño para que sea detectado y eliminado por las protecciones de sobrecorrientes convencionales (protección térmica o magnética de un interruptor automático) como es el caso con los esquemas TT e IT.

Existen dos dispositivos particularmente orientados a la protección de las personas: los Dispositivos de corriente Diferencial Residual –DDR– y los Controles Permanentes de Aislamiento –CPA–.

■ Los DDR

□ Principio de los DDR (figura 17).

En ausencia de defecto de aislamiento, la suma de las corrientes en los conductores activos es nula y el toroide no está sometido a ninguna fuerza magnetomotriz.

En caso de defecto de aislamiento, esta suma ya no es nula y la corriente de defecto induce en el toroide una fuerza magnetomotriz que genera una corriente en su bobina. Si sobrepasa el umbral fijado durante una duración superior a la eventual temporización, entonces se transmite una orden de apertura al dispositivo de corte.

Para más detalles, ver el Cuaderno Técnico n° 114: «Los dispositivos diferenciales de corriente residual en BT».

□ Tipos de DDR

La norma CEI 60755 distingue tres tipos de protecciones diferenciales:

AC: para las corrientes alternas sinusoidales.

A: para las corrientes alternas que tienen una componente continua (figura 18). Estos aparatos están indicados para la detección de corrientes monofásicas rectificadas.

B: para las corrientes continuas. Estos aparatos están indicados para todo tipo de corriente y son necesarios, en particular, para las corrientes trifásicas rectificadas.

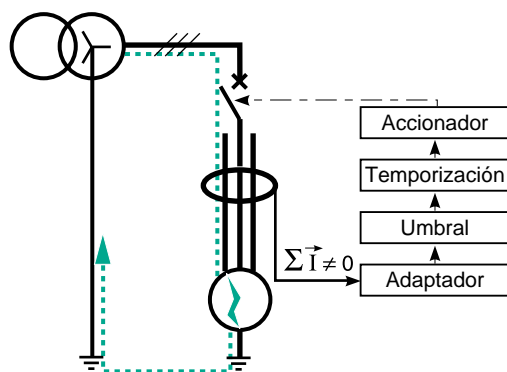


Fig. 17: Principio de un DDR.

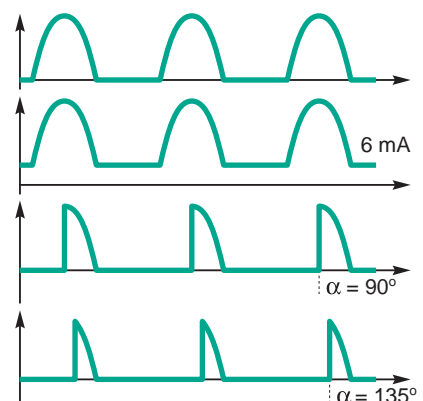


Fig. 18: Formas de onda que caracterizan a los DDR tipo A.

□ Los CPA

El principio de un CPA consiste en inyectar una tensión, alterna o continua, entre la red y la tierra (**figura 19**). La medida de la corriente que atraviesa el controlador permite el cálculo de la resistencia de aislamiento cuando esta corriente es continua, así como la de la impedancia red/tierra cuando esta corriente es alterna.

Estas medidas asociadas a dispositivos ajustables, permiten diversas alarmas, como por ejemplo la de disminución progresiva del aislamiento (para mantenimiento predictivo) o de un defecto a tierra que necesita una rápida intervención (antes de un segundo defecto).

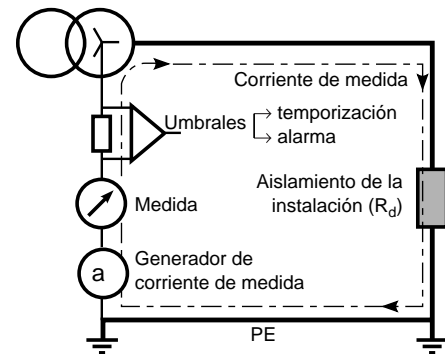


Fig. 19: Principio de un CPA.

3.3 Utilización de los DDR según el ECT

El Cuaderno Técnico n° 172: «Los esquemas de conexión a tierra en BT (régimen de neutro)» trata más ampliamente este tema.

Todos los ECT

Los DDR se utilizan como protección complementaria contra los riesgos de contacto directo. En ciertos países son incluso obligatorios aguas arriba de los enchufes ≤ 32 A, con un umbral de disparo ≤ 30 mA (por ejemplo, en Francia, según la norma NF C 15-100 §532.26).

Los DDR de sensibilidad menor o igual a 500 mA (CEI 60364 §482) también se recomiendan para vigilar los circuitos de alimentación eléctrica en las zonas con riesgo de incendio.

Esquema TT

La utilización de DDR es el único medio que permite detectar bajas corrientes de defecto. En efecto, la impedancia de un defecto no se conoce con certeza y puede ser elevada (las masas de utilización pueden tener tomas de tierra distintas y no siempre están interconectadas).

Esquema TN-S o TN-CS

La utilización de DDR permite prescindir de comprobaciones sobre el valor de la corriente en caso de defecto.

Estos DDR ordenan también el corte de los circuitos cuando la corriente de defecto queda limitada por una gran longitud de cable y, esta corriente de defecto no es suficiente para disparar las protecciones contra sobrecorriente. En este caso, el umbral de disparo de los DDR puede elevarse (baja sensibilidad) desde algunos amperios hasta algunas decenas de amperio.

Nota: Según la CEI 60364:

- no debe utilizarse un dispositivo de protección de corriente diferencial-residual en el esquema TN-C,
- cuando se utiliza un dispositivo de protección de corriente diferencial-residual en un esquema TN-C-S, no debe utilizarse un conductor CPN aguas abajo.

Esquema IT

En un esquema IT, los DDR se utilizan en los dos casos siguientes:

- Si la corriente de cortocircuito (debida a un 2º defecto) puede no ser suficiente para activar la protección contra los defectos entre fases, por ejemplo en las salidas que alimentan a receptores alejados.
- En el caso de grupos de receptores conectados individualmente a tierra (grupos de masas no interconectadas).

3.4 Protección integrada en los variadores contra los defectos a tierra

Cuando la red tiene un esquema TN, un defecto entre una salida del variador y la tierra provoca una sobreintensidad importante por la interconexión de las masas (**figura 20**). Igual que en el caso de un cortocircuito entre fases, esta sobreintensidad se detecta y se envía una orden de bloqueo a los IGBT.

En cambio, en este caso, la corriente de defecto circula por la línea de alimentación, pero durante un tiempo muy corto (algunos centenares de microsegundos). Interviene entonces el dispositivo integrado de protección.

El aislamiento galvánico del variador se obtiene por la apertura del contactor de línea. Este dispositivo no asegura en todos los casos la protección de las personas contra los contactos indirectos. En efecto, la impedancia del defecto puede limitar la corriente a un valor inferior a los límites de la protección del variador, lo que ocurre generalmente en esquema TT. Es necesario, pues, un DDR de 300 mA.

En el caso de una red IT, el primer defecto no provoca circulación de corriente y el variador continúa funcionando normalmente.

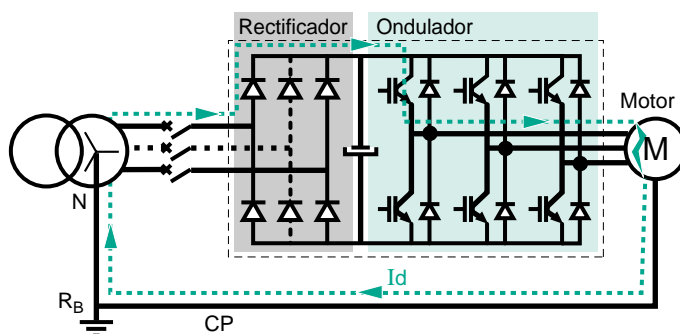


Fig. 20: Defecto a tierra en la salida del variador.

3.5 Defectos de aislamiento y variadores de velocidad

Contacto directo

En los circuitos que incluyen variadores de velocidad, el contacto directo puede producirse en diversos puntos (figuras 21 y 22).

■ Esquemas TT y TN-S

En caso de fallo de otras medidas de protección contra los contactos, o de imprudencia de los usuarios, puede preverse una protección complementaria aguas arriba del variador constituida por un DDR de una sensibilidad de 30 mA.

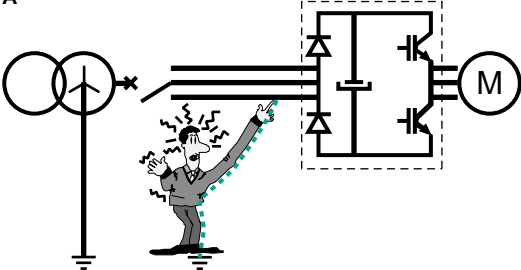
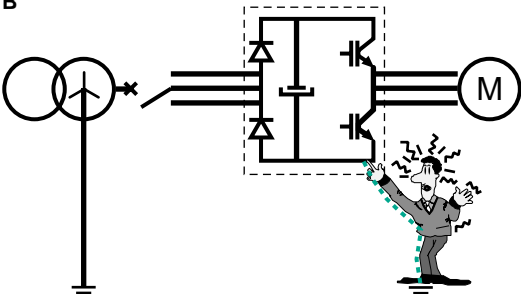
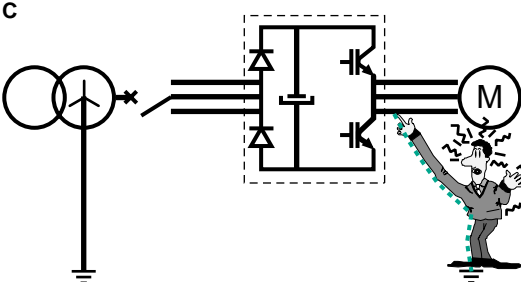
Riesgo de contacto directo	Tensión de contacto	Protección complementaria
<p>Aguas arriba del variador</p> <p>A</p> 	Tensión fase-neutro	DDR 30 mA
<p>En el bus CC</p> <p>B</p> 	Tensión red rectificada	
<p>Aguas abajo del variador</p> <p>C</p> 	Tensión de salida del variador	

Fig. 21: Tensiones presentes en caso de contacto directo con los esquemas TT y TN-S.

■ Esquema IT con primer defecto de aislamiento presente en la red

En las tres situaciones específicas del esquema IT reflejadas en la **figura 22**, no es aplicable ninguna protección por corte automático: la corriente de defecto no puede distinguirse de la corriente normal de funcionamiento. Esto subraya la importancia que los instaladores deben prestar al cableado de estas máquinas para garantizar la primera protección, que es el aislamiento de las partes activas.

Observaciones

- La advertencia es idéntica para cada una de estas situaciones cuando los dos defectos (de aislamiento y contacto directo) se entrecruzan.
- Cuando diversos variadores se alimentan de la misma red, se puede considerar que los buses DC de los diferentes variadores están al mismo potencial. Por tanto, defectos localizados sobre variadores diferentes pueden tener las mismas consecuencias que si estuvieran localizados en un mismo variador.

Riesgo de contacto directo	Tensión de contacto	Protección complementaria
<p>A</p>	Tensión de red rectificada	No hay protección posible con corte automático
<p>B</p>	Tensión de salida del variador	
<p>C</p>		

Fig. 22: Distintas situaciones específicas en una red con un esquema IT que implican un defecto de aislamiento y a la vez una persona en contacto directo.

Contacto indirecto

■ Esquemas TT y TN-S

Las situaciones de contacto indirecto se representan en la **figura 23**.

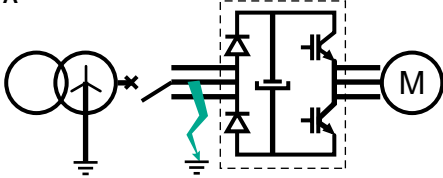
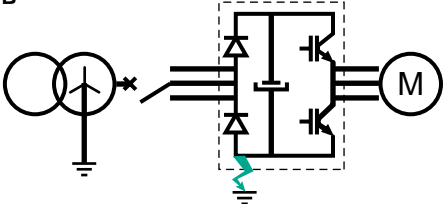
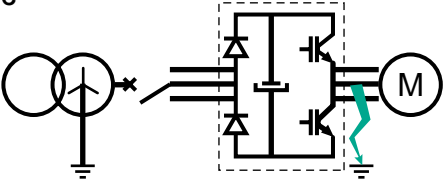
Situación	Efecto... (riesgo...)	Protección afectada con esquema TT	Protección afectada con esquema TN-S
A 	Sobreintensidad aguas arriba del variador	DDR	De máxima corriente situada aguas arriba
B 	Sobreintensidad a través de un diodo del puente rectificador; la corriente de defecto es una corriente rectificada (riesgo de destrucción)	DDR inmunizado al paso de la corriente continua	
C 	Sobreintensidad a través de un diodo del puente rectificador y de un IGBT (riesgo de destrucción en función del tipo de protección -cortocircuito- integrada en el variador)	Interna del variador o DDR	Interna del variador o de máxima corriente situada aguas arriba; pero un cable de gran longitud, abajo del variador, puede enmascarar el defecto; en este caso se aconseja un DDR

Fig. 23: Diversos defectos de aislamiento con los esquemas TT y TN-S.

■ Esquema IT

Con este esquema hay que tener en cuenta la presencia de dos defectos simultáneos.

El cuadro de la **figura 24** detalla los defectos posibles y sus consecuencias.

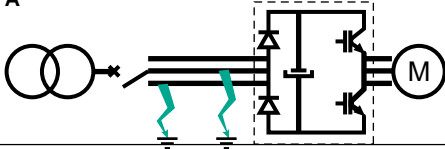
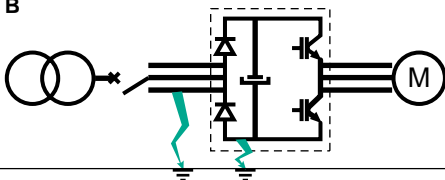
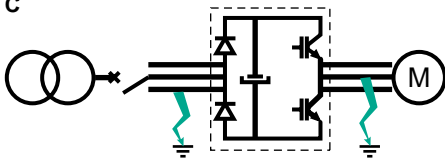
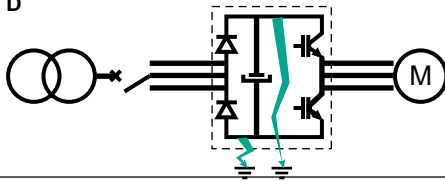
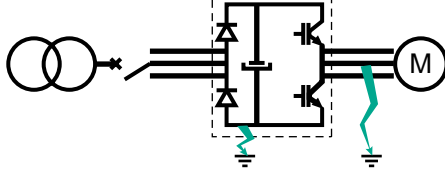
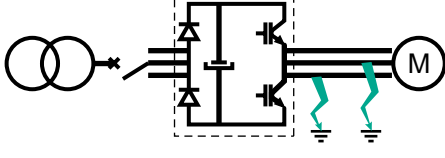
Situación	Efecto.... (riesgo...)	Protección afectada
A 	Sobreintensidad aguas arriba del variador	De máxima corriente, situada aguas arriba
B 	Sobreintensidad a través de un diodo del puente rectificador (riesgo de destrucción)	De máxima corriente, situada aguas arriba
C 	Sobreintensidad a través de un diodo del puente rectificador y de un IGBT (riesgo de destrucción en función del tipo de protección -cortocircuito- integrada en el variador)	Interna del variador o de máxima corriente situada aguas arriba, pero un cable de gran longitud aguas abajo del variador puede enmascarar el defecto
D 	Cortocircuito en el bus cc (riesgo de destrucción del puente rectificador)	De máxima corriente, situada aguas arriba
E 	Cortocircuito en bornes de un IGBT (riesgo de destrucción del IGBT opuesto, en función del tipo de protección -cortocircuito- integrada en el variador)	Interna del variador o de máxima corriente situada aguas arriba
F 	Sobreintensidad en la salida del rectificador	Interna del variador

Fig. 24: Distintas situaciones con dos defectos francos o poco impedantes en un esquema IT.

■ Caso particular de los motores alimentados por circuitos distintos que contienen cada uno un variador y cuyas masas tienen tomas de tierra distintas.

Cuando una instalación alimenta varios equipos alejados unos de otros, sus masas de utilización se conectan a menudo a tomas de tierra separadas. En este caso, la impedancia del circuito recorrido por la corriente de defecto aumenta debido a la resistencia de las tomas de tierra afectadas.

La condición necesaria para la protección de las personas (respeto de los tiempos máximos de corte) no puede asegurarse más que con dispositivos de protección contra los cortocircuitos. La solución habitual, muy simple de estudio y de instalación, es el empleo de DDR (Cuaderno Técnico nº 178) colocados al

principio de cada circuito que contiene una puesta a tierra distinta (**figura 25**). Estos DDR no deben verse afectados por el paso de una corriente continua.

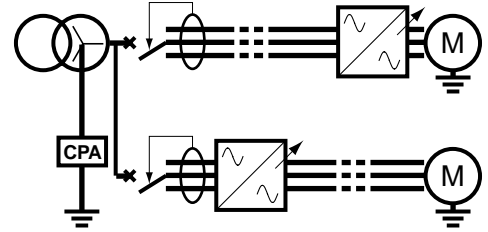


Fig. 25: Situación de los DDR para proteger, en esquema IT, dos salidas que tienen tomas de tierra distintas.

4 Protecciones que hay que asociar con los variadores (tabla resumen)

Resumiendo los capítulos anteriores, el cuadro siguiente permite conocer las funciones de protección que satisface el variador, y si es

necesario, complementarlas con dispositivos exteriores al variador como interruptores automáticos, relés de sobrecarga y DDR.

Protección a asegurar	Protección generalmente asegurada por el variador	Protección exterior
Sobrecarga del cable	Sí = (1)	Inútil si (1)
Sobrecarga del motor	Sí = (2)	Inútil si (2)
Cortocircuito aguas abajo	Sí	
Calentamiento del variador	Sí	
Sobretensión	Sí	
Bajada de tensión	Sí	
Corte de fase	Sí	
Cortocircuito aguas arriba		Interruptor automático (disparo por cortocircuito)
Defecto interno		Interruptor automático (disparo por cortocircuito y sobrecarga)
Defecto a tierra aguas abajo (contacto indirecto)	Autoprotección del variador	DDR ≥ 300 mA
Defecto por contacto directo		DDR ≤ 30 mA

5 Fenómenos particulares

El objetivo de este capítulo es analizar los fenómenos particulares, vinculados al funcionamiento de los convertidores de

frecuencia, que influyen en el funcionamiento de los dispositivos de protección DDR y CPA.

5.1 Corrientes de fuga de alta frecuencia

La forma de la tensión generada por el variador, y en particular la presencia de frentes de tensión generadas por la conmutación de los IGBT, origina las corrientes de fuga de alta frecuencia que circulan por los cables de alimentación.

Sus recorridos

Estos frentes de tensión se aplican entre los bornes de las diferentes capacidades del circuito (**figura 26**):

Cc: capacidad de los componentes IGBT entre conductores y envolvente conectada a tierra,

Cm: capacidad entre los bobinados motor y tierra (función de la potencia del motor),

Cr: capacidad entre la red de alimentación y tierra (en cortocircuito si el neutro está conectado a tierra),

Cs: capacidad entre los conductores de salida y la tierra (función del tipo y de la longitud de los cables),

Cy: capacidad del antiparasitado a la entrada del variador.

Así pues, a través de estas capacidades circulan unas corrientes. Las más significativas se representan en la **figura 27**.

Sus características

Estas corrientes pueden alcanzar varios amperios en valor instantáneo y varias decenas o centenares de miliamperios en valor eficaz.

El espectro y la amplitud de estas corrientes dependen a la vez de la frecuencia del PWM (entre 1 y 20 kHz) y las características de la instalación

- alimentación: impedancia de línea, esquema de conexión a tierra,

- tipo y longitud del cable del motor (blindado, sin blindar, conductor de protección),

- potencia del motor.

En las **figuras 28 y 29** se representa la forma y el espectro de las corrientes de AF en la entrada del variador (cuando no hay defecto), con un PWM a 4 kHz.

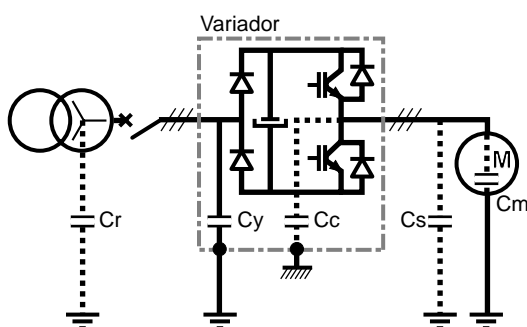


Fig. 26: Capacidades del circuito.

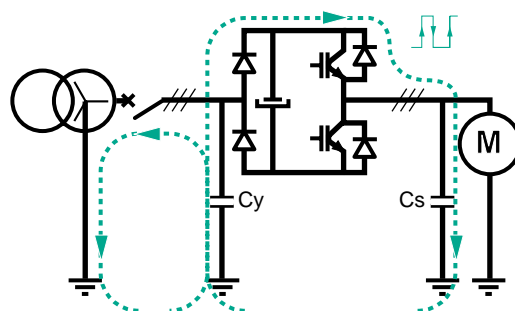


Fig. 27: Circulación de las corrientes de fuga de Alta Frecuencia.

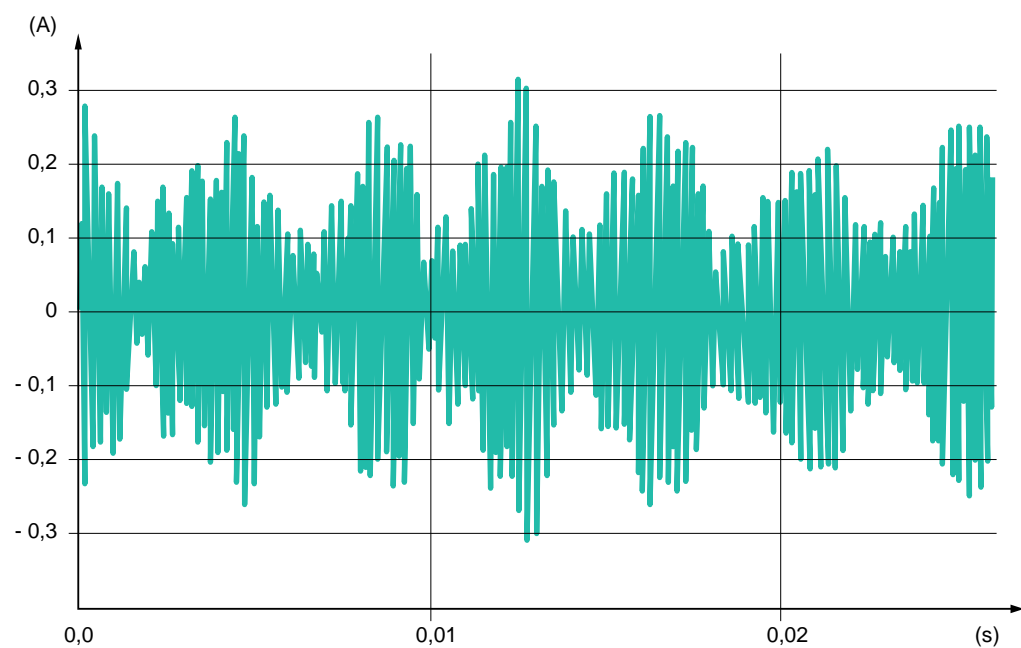


Fig. 28: Corrientes de fuga de Alta Frecuencia.

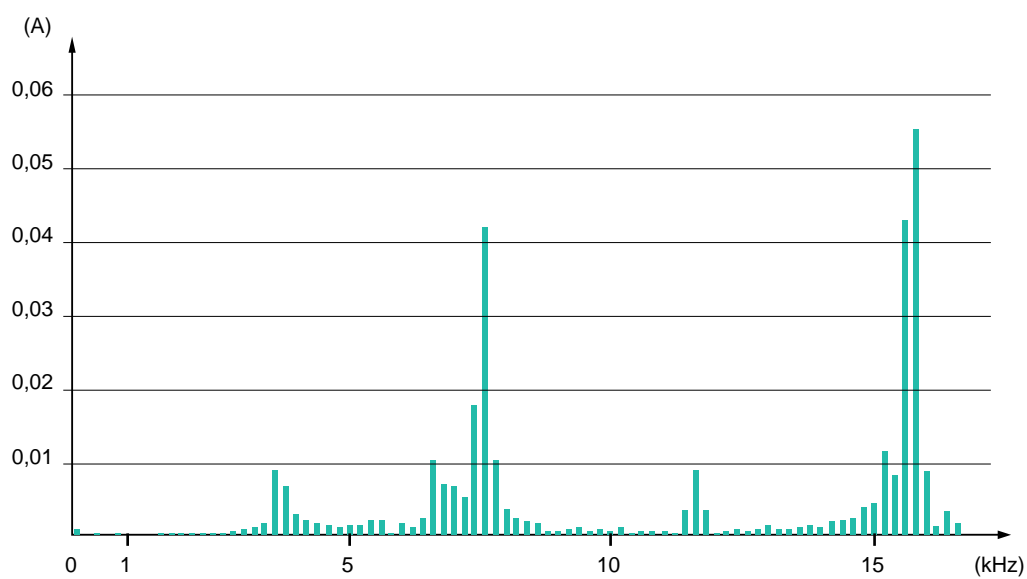


Fig. 29: Espectro de la corriente de fuga.

Su incidencia:
riesgo de perturbación de los DDR

■ Disparos intempestivos

Estas corrientes pueden ser el origen de mal funcionamiento de los dispositivos diferenciales residuales (DDR) ya que recorren los conductores rodeados por los toros de medida. La medida de la corriente diferencial puede pues resultar perturbada, en particular cuando el cable de conexión variador-motor es de gran longitud y/o las capacidades entre fases y tierra son elevadas (**figura 30**).

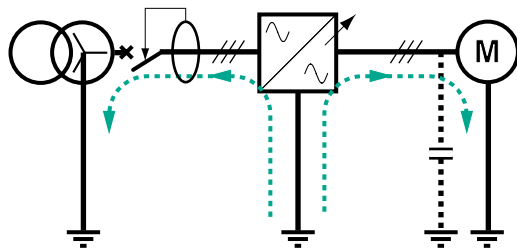


Fig. 30: Perturbación de un DDR por las corrientes de fuga de Alta Frecuencia.

La solución

El dispositivo de medida debe incluir un circuito de filtrado para tener en cuenta sólo el componente de baja frecuencia de la señal (**figura 31**).

En ciertas situaciones extremas, pueden resultar necesarias unas precauciones suplementarias, que se presentan al final de este Cuaderno Técnico.



Fig. 31: DDRs que incorporan un filtrado de corrientes AF (Vigirex RH99M y RH99P - marca Merlin Gerin).

5.2 Corrientes de fuga al conectar

Su origen

En la entrada de los convertidores de frecuencia generalmente se colocan unos condensadores para asegurar su inmunidad frente a las perturbaciones AF presentes en la red y para reducir sus emisiones AF. Su capacidad es aproximadamente de 10 a 100 nF.

Estos condensadores provocan unas corrientes diferenciales residuales (**figura 32**) a la puesta en tensión, así como en funcionamiento normal.

Su incidencia:
riesgo de disparos intempestivos

Para un aparato en funcionamiento normal, estas corrientes son pequeñas (de 0,5 a 3,5 mA). En cambio, en un equipo industrial con múltiples variadores pueden provocar disparos intempestivos de DDR.

La solución

Corresponde al fabricante de los equipos al instalador: consiste en limitar el número de variadores alimentados por el mismo DDR.

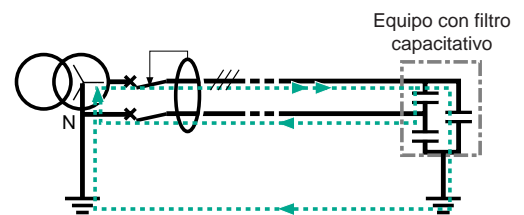


Fig. 32: Corriente de fuga que recorre los condensadores de entrada de los equipos.

5.3 Defecto a la salida del variador con un esquema TT o TN

Riesgo de electrocución

La corriente de defecto contiene una componente a la frecuencia de la modulación (PWM) y corrientes AF creadas por las oscilaciones de las capacidades parásitas, pero los peligros de las corrientes AF se conocen poco. El documento CEI 60479-2 da indicaciones, en particular sobre la variación del umbral de fibrilación cardíaca.

Esta curva (figura 33) muestra que el factor de frecuencia, que es la relación entre la corriente a la frecuencia f con la corriente a la frecuencia de 50/60 Hz para el mismo efecto fisiológico considerado, aumenta con la frecuencia.

Permite pues un umbral de disparo más elevado para frecuencias de corriente superiores a 50 Hz. Esta variación de umbral se realiza técnicamente con un filtrado.

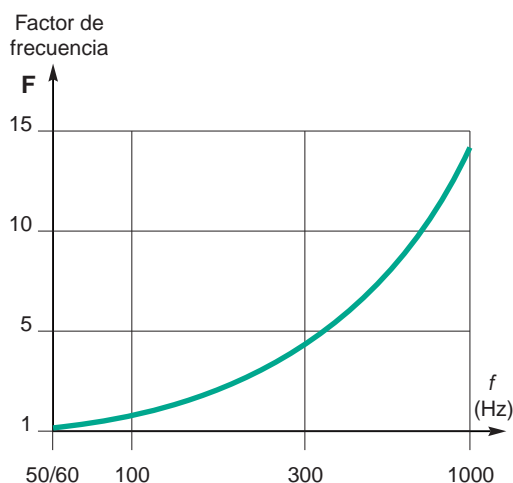


Fig. 33: Variación del umbral de fibrilación cardíaca en función de la frecuencia (según CEI 60479-2).

Forma de la corriente de defecto

En caso de defecto franco a tierra a la salida del variador, con un esquema TN, la sobrentensidad provoca el disparo de la protección interna del variador o de las protecciones de máxima corriente situadas aguas arriba.

Si este defecto de aislamiento es impedante, es posible que no se sobrepase el umbral de disparo de la protección de máxima corriente, por lo que hay que instalar un DDR para asegurar esta protección.

Como ya se ha visto anteriormente, el buen funcionamiento de un DDR depende de las corrientes de defecto que atraviesan su captador tórico, ahora bien, en el caso de la figura, estas corrientes no son perfectamente sinusoidales. Es posible analizar la forma de onda de la corriente de defecto homopolar estudiando el esquema equivalente simplificado de la figura 34.

Las tensiones V1 y V2 causan la circulación de una eventual corriente de defecto, como se ilustra en la figura 35.

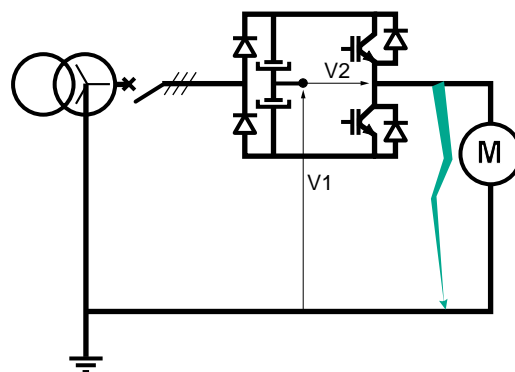


Fig. 34: Tensión de defecto.

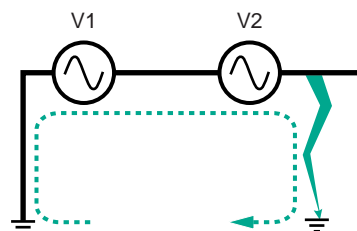


Fig. 35: Corriente de defecto.

La tensión V1, entre el neutro de la alimentación trifásica y el punto medio del rectificador tiene una frecuencia fundamental de 150 Hz (figura 36).

La tensión V2 (figura 37), entre el punto medio del rectificador y una fase de salida es el resultado de la modulación de PWM; contiene pues una componente a baja frecuencia igual a la frecuencia de salida del variador (40 Hz en este ejemplo) y una componente a la frecuencia del PWM (1 kHz en este ejemplo).

El resultado de todo ello es una corriente de defecto que contiene el conjunto de estas componentes:

- 150 Hz,
- frecuencia de salida del variador,
- frecuencia de modulación y sus armónicos.

Su forma se representa en la figura 38.

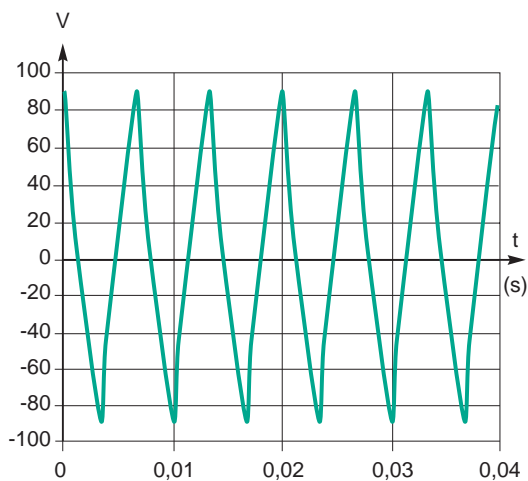


Fig. 36: Tensión del punto neutro del rectificador en trifásica.

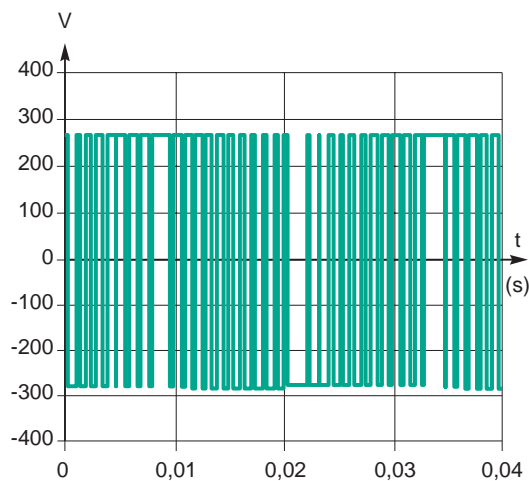


Fig. 37: Tensión de salida de la etapa onduladora.

Esta corriente de defecto también contiene las corrientes AF mencionadas en los párrafos precedentes, pero se han omitido aquí con la intención de simplificar las ilustraciones.

Según la frecuencia de funcionamiento del motor, la amplitud de las diferentes componentes evolucionan tal como se ilustra en la figura 39:

- El valor eficaz de la corriente permanece constante, así como la componente de 150 Hz.
- Las componentes a la frecuencia de alimentación del motor y a la frecuencia del PWM varían de manera opuesta una a la otra.

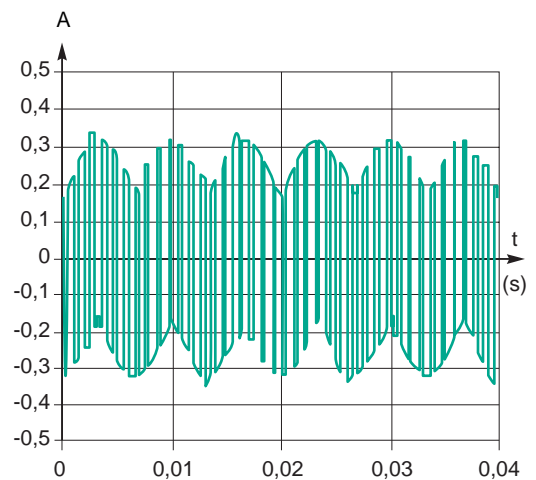


Fig. 38: Corriente de defecto en alimentación trifásica.

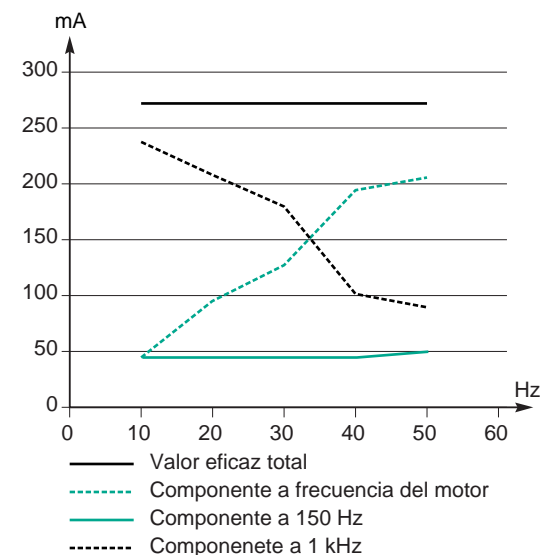


Fig. 39: Evolución de las componentes de la corriente de defecto.

En el caso de una alimentación monofásica, la forma de la corriente de defecto se representa en la **figura 40**. Nótese la presencia de una componente a 50 Hz y no a 150 Hz como con alimentación trifásica.

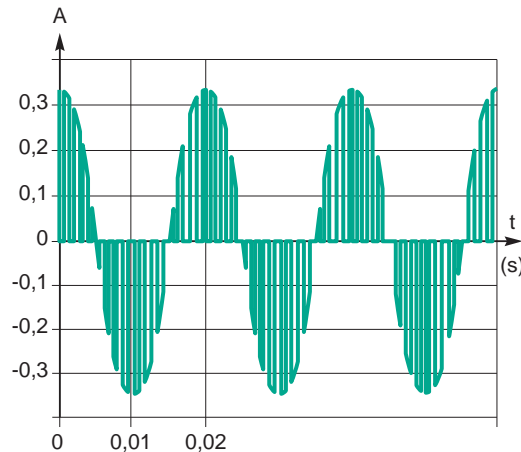


Fig. 40: Corriente de defecto en alimentación monofásica.

La solución

La forma compleja de la corriente de defecto obliga a utilizar DDRs de tipo A (**figura 41**).



Fig. 41: Ejemplo de DDR de tipo A adaptable a un interruptor automático BT (Bloque Vigí C60-300 mA - Merlin Gerin).

5.4 Fallo en la salida del variador con un esquema IT

Fluctuación rápida de la tensión red-tierra

En régimen IT, un defecto a tierra en la salida del variador no necesita el disparo, pero provocará una fluctuación rápida de la tensión de red con relación a tierra.

En efecto, contrariamente al esquema TN, el potencial de la red no está fijado, y va a seguir las fluctuaciones impuestas por el PWM, lo que se representa en el esquema de la **figura 42**.

Por tanto, el conjunto de los receptores conectados a la red está sometido a las mismas fluctuaciones, incluyendo fuertes gradientes de tensión (**figura 43**). Estos gradientes pueden significar el deterioro de los filtros capacitivos conectados entre la red y tierra.

Las soluciones

Con el fin de mejorar la Compatibilidad Electromagnética, no se aconseja la utilización de filtros CEM en las redes con esquema IT (Norma CEI 61800-3).

Una solución adecuada, cuando se necesita la reducción de las emisiones AF, es la colocación de un filtro CEM sin conexión a tierra en la entrada del variador.

Para eliminar el fenómeno de fluctuación rápida de tensión, se recomienda la instalación de un filtro «seno» en la salida del variador: elimina cualquier gradiente elevado de tensión que pueda aparecer en el motor o en el cable de alimentación.

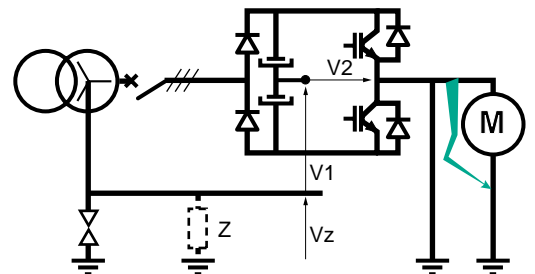


Fig. 42: Defecto a tierra en régimen IT.

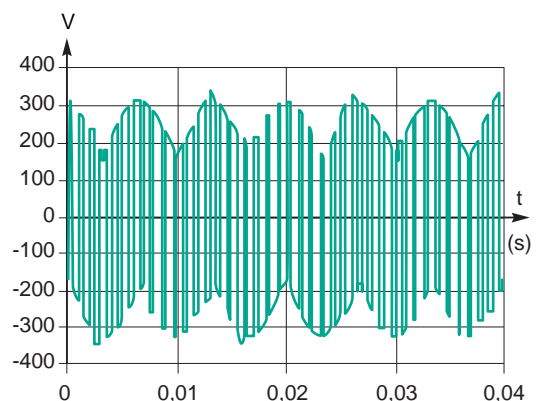


Fig. 43: Fluctuación del potencial del neutro de la red (V_z).

5.5 Corriente de defecto con componente continua

Descripción

Los dispositivos usuales de protección son adecuados para la medida de las corrientes de defecto en corriente alterna. No obstante, los defectos de aislamiento sobre el bus DC del variador o sobre el circuito de disipación de la energía de frenado (función cumplida por una resistencia R_f habitualmente exterior a los variadores) provocan la circulación de una corriente con componente continua (figura 44); con una alimentación trifásica (figura 45), con una alimentación monofásica (figura 46).

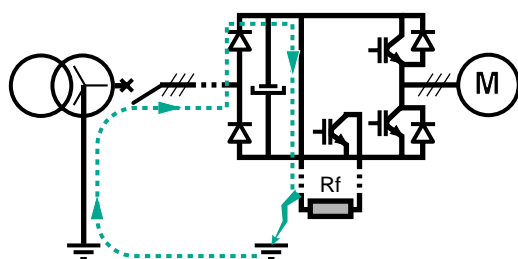


Fig. 44: Defecto entre la resistencia de frenado y tierra.

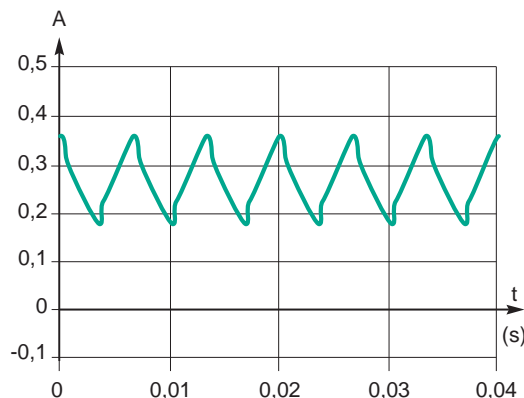


Fig. 45: Corriente en caso de defecto en la resistencia de frenado, para una alimentación trifásica y una resistencia de defecto de 1 k Ω .

La solución

A pesar de esta componente continua los dispositivos de protección deben permanecer operacionales.

Si se puede producir un defecto de aislamiento en el bus DC, o en el circuito de la resistencia de frenado, es necesario utilizar un DDR de tipo B, cuando el variador se alimenta en trifásica. Si se alimenta en monofásica, es preferible instalar un DDR de tipo A.

Regla práctica de asociación de DDRs

■ En el primer caso, con un esquema IT (figura 47), la corriente de defecto tiene una componente continua. Por tanto, el DDRa que asegura la protección complementaria contra el contacto directo debe ser sensible a este tipo de corriente.

■ En el segundo caso (figura 48), se colocan dos DDR en cascada.

En caso de defecto en el bus DC, la corriente de defecto puede ser insuficiente para activar el DDR2. En cambio, esta corriente de componente continua puede ser suficiente para saturar el toro de medida del DDR1, impidiéndole actuar ante un defecto en otra salida.

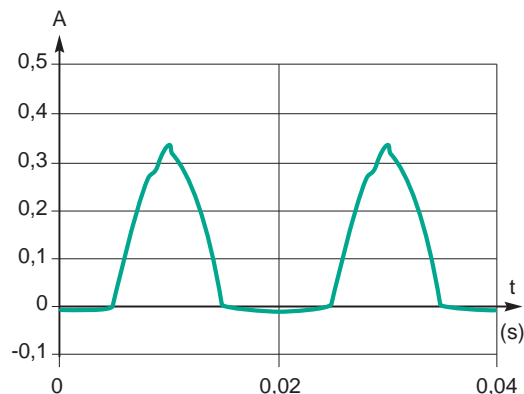


Fig. 46: Corriente en caso de defecto en la resistencia de frenado, para una alimentación monofásica y una resistencia de defecto de 1 k Ω .

■ Por tanto, la regla es:

Si la corriente de defecto puede tener una componente continua, es necesario un DDR de tipo A o B, según la alimentación. Entonces todos los DDR por los cuales pueda circular esta corriente deben ser de tipo idéntico, A o B.

Esta condición debe cumplirse, en particular:

- en caso de que estos DDR estén colocados en serie,
- en esquema IT, porque a los DDR pueden afectarles defectos dobles que se produzcan en diferentes salidas.

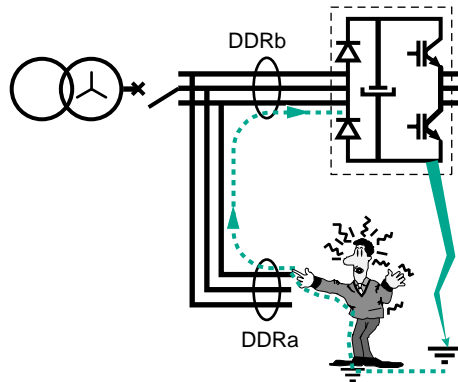


Fig. 47: Riesgo de cegado del DD Ra.

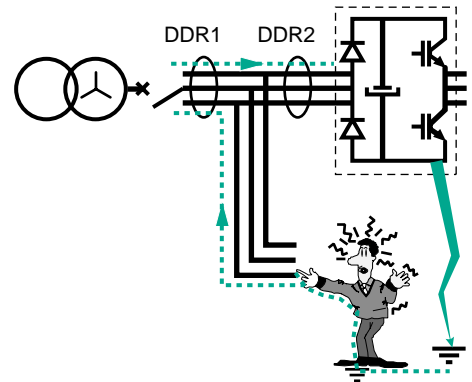


Fig. 48: Riesgo de cegado del DDR1.

6 Recomendaciones de elección y de instalación

Este capítulo, a partir de los principios que se enumeran a continuación, ofrece recomendaciones prácticas que responden a la pregunta: ¿cómo proteger adecuadamente un circuito con variadores de velocidad?

- Principio de implantación de los dispositivos de protección contra sobrecorrientes (cortocircuito y sobrecarga) tratados en el capítulo 2.

- Principio de protección de las personas, objetivo del capítulo 3.

- Otros fenómenos particulares, tratados en el capítulo precedente.

6.1 Elección de los DDR (figura 49)

	Protección...			
	...contra un contacto indirecto		...contra un contacto directo	
Alimentación	Trifásica	Monofásica	Trifásica	Monofásica
Características de los equipos y la instalación	Sin doble aislamiento del bus cc	Con doble aislamiento del bus cc	Sin es necesaria una medida de protección adicional contra riesgo de fallo de otras medidas de protección contra contactos o en caso de imprudencia del usuario (normas de instalación)	
ECT: TT (o IT con masas no interconectadas)	Tipo B, baja sensibilidad (≥ 300 mA)	Tipo A, baja sensibilidad (≥ 300 mA)	Tipo A (30 mA), o Tipo B (30 mA) si la resistencia de frenado está accesible	Tipo A (30 mA)
ECT: TN-S	Tipo A, baja sensibilidad (≥ 300 mA) [*]			
ECT: IT				

[*] El defecto de aislamiento se presenta como un cortocircuito. La desconexión debe de quedar normalmente asegurada por la protección contra cortocircuitos, pero se aconseja la utilización de un DDR en caso de riesgo de no disparo de las protecciones de corriente máxima.

Fig. 49: Tipos de DDR en función del ECT y de la protección deseada.

Recomendaciones particulares:

- Instalar un DDR para cada variador.

- Prever un DDR como medida de protección complementaria contra un contacto directo cuando la resistencia de frenado sea accesible.

6.2 Elección de los CPA

Los CPA con inyección de corriente continua pueden ser «engañados» por un defecto que tenga una tensión continua entre red y tierra. Según la polaridad de esta tensión, el nivel de aislamiento aparecerá falsamente ampliado o disminuido.

Así pues, en las redes que alimentan, sin separación galvánica, equipos que contienen buses DC como los variadores de velocidad, sólo se pueden utilizar CPA con inyección de corriente alterna.

Sin embargo, en caso de defecto en la salida de un convertidor de frecuencia, la medida de aislamiento puede resultar falseada (figura 50). En efecto, el convertidor se comporta como una fuente de tensión de amplitud y frecuencia

variables. Esta tensión se añade a la tensión de medida inyectada por el CPA. Si la frecuencia de esta tensión es próxima a la de la frecuencia de medida, esta medida resulta falseada.

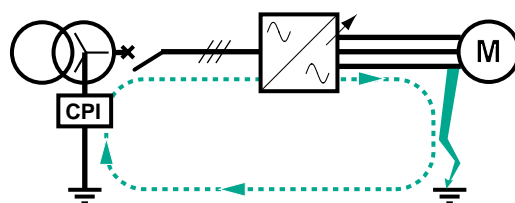


Fig. 50: Perturbación de la medida del CPA.

6.3 Prevención de disfunciones

Las perturbaciones mencionadas en los párrafos precedentes pueden provocar disparos intempestivos de las protecciones. Para una buena continuidad de servicio es recomendable seguir las indicaciones que se señalan a continuación.

Precauciones en relación con los DDR

- Escoger un modelo adecuado, que incluya:
 - un filtrado de las corrientes AF,
 - una temporización (evita los disparos debidos a la carga de las capacidades parásitas en el momento de la conexión). No es posible la temporización para los aparatos de 30 mA. En este caso escoger aparatos inmunizados contra los disparos intempestivos, por ejemplo DDR con inmunidad reforzada de la gama **s.i.** (Marca Merlin Gerin).
 - Aumentar, si es posible, el umbral de disparo respetando los valores límites fijados para la protección de las personas.
- Estas precauciones completan las reglas dadas en el apartado 5.5 referentes a la asociación de los DDR.

Precauciones en relación con los CPA

Escoger un modelo adecuado:

- del tipo de inyección de corriente alterna, o
- de impulsos codificados, permitiendo despreocuparse de la frecuencia de salida del variador.

Precauciones relacionadas con la instalación

La instalación de los convertidores debe hacerse conforme a las normas EN 50178 y CEI 61800-3.

Pueden resultar necesarias ciertas precauciones suplementarias:

- reducir en lo posible las capacidades a tierra, para esto:
 - evitar los cables blindados cuando el entorno de utilización lo permita,
 - reducir la longitud de cable entre el variador y el motor,
 - efectuar un cableado siguiendo las reglas del arte,
 - evitar los filtros CEM o escoger filtros con capacidades pequeñas (en particular en régimen IT),
- Reducir la frecuencia del PWM (reducción del número de conmutaciones por segundo y por tanto reducción del valor eficaz de las corrientes AF),
- Repartir los variadores entre varios DDR (para no reunir las corrientes de fuga),
- Colocar un filtro «seno» en la salida del variador (eliminación de los gradientes de tensión aplicados a los cables),
- Utilizar un transformador de aislamiento y colocar el DDR aguas arriba (separación del circuito perturbado mediante el variador de su red de alimentación).

Bibliografía

Normas «de productos»

- CEI 60479: Guía de los efectos de una corriente que pasa a través del cuerpo humano.
- CEI 60755: Reglas generales relativas a los dispositivos de protección de corriente diferencial residual.
- CEI 60947-2: Aparata de baja tensión - Parte 2: interruptores automáticos.
- CEI 61008: Interruptores automáticos de corriente diferencial residual para usos domésticos y análogos.
- CEI 61009: Interruptores automáticos para usos domésticos y análogos.
- CEI 61800-3: Accionamientos eléctricos de potencia a velocidad variable - Parte 3 Norma de producto relativa a CEM.
- EN 50178, NF EN 50178, UNE-EN 50178: Equipo electrónico para uso en instalaciones de potencia.
- UTE C 60-130: Dispositivos de protección de corriente diferencial residual.
- NF C 61-420: Pequeños interruptores diferenciales.
- NF C 62-411: Material de conexión y análogos, interruptores diferenciales para paneles de control de las instalaciones de primera categoría.

Normas «de instalación»

- CEI 60364, NF C 15-100: Instalaciones eléctricas de baja tensión.

Cuadernos Técnicos Schneider Electric

- Los Dispositivos Diferenciales Residuales en BT.
R. CALVAS. Cuaderno Técnico nº 114.
- Protección de las personas y las alimentaciones estáticas sin corte.
J-N. FIORINA. Cuaderno Técnico nº 129.
- Los esquemas de conexión a tierra en BT (régimen de neutro).
B. LACROIX y R. CALVAS. Cuaderno Técnico nº 172.
- Los esquemas de conexión a tierra en el mundo y su evolución.
B. LACROIX y R. CALVAS. Cuaderno Técnico nº 173.
- Perturbaciones de los sistemas electrónicos y los esquemas de conexión a tierra.
R. CALVAS. Cuaderno Técnico nº 177.
- El esquema IT (neutro aislado) de conexión a tierra en BT.
F. JULLIEN y I. HEREDERO. Cuaderno Técnico nº 178.
- Coexistencia corrientes fuertes - corrientes débiles.
R. CALVAS y J. DELABALLE. Cuaderno Técnico nº 187.