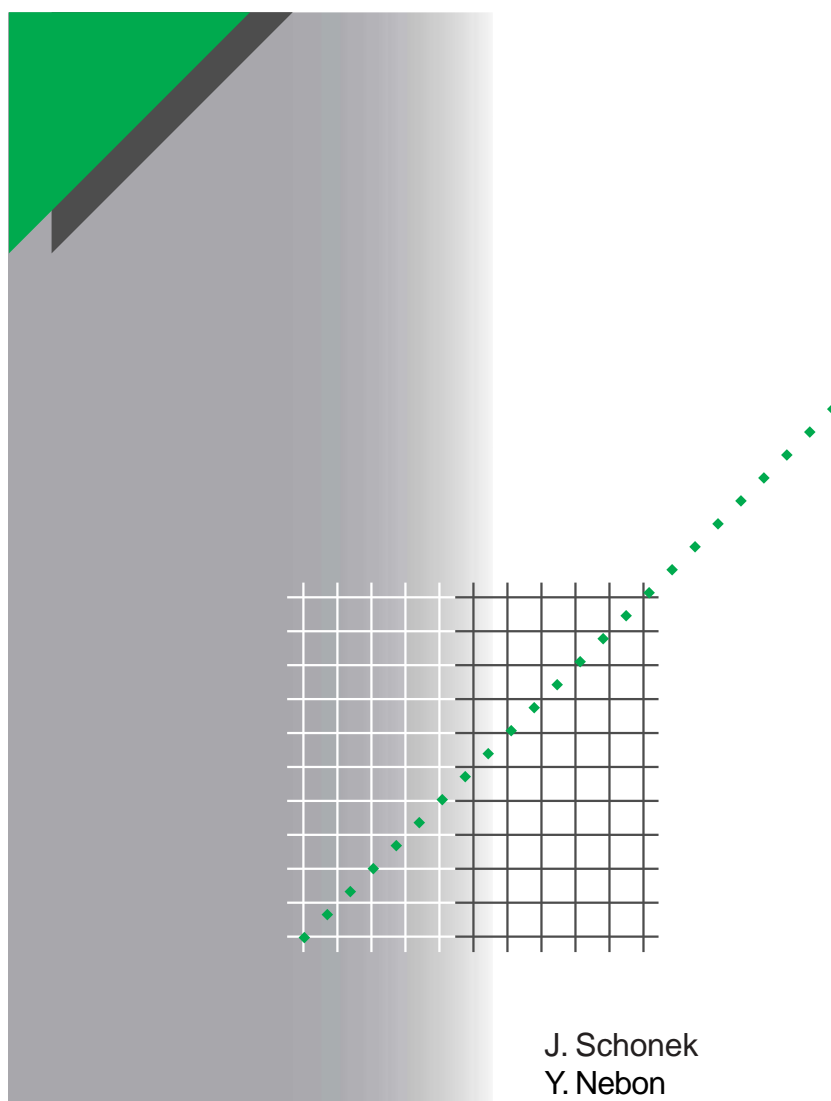
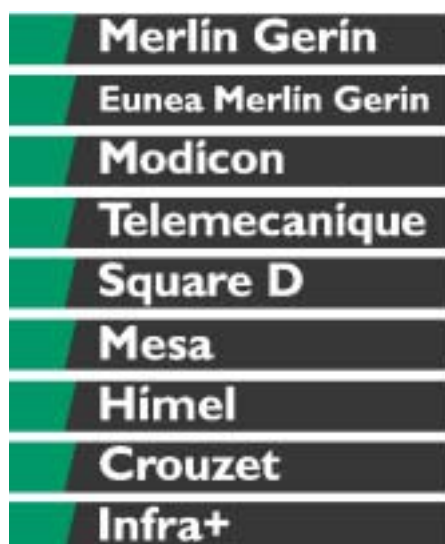


# Cuaderno Técnico nº 204

**Protecciones BT y variadores de velocidad** (convertidores de frecuencia)





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

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

Puede accederse a estas publicaciones en Internet:

<http://www.schneiderelectric.es>

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

Centro de Formación Schneider

C/ Miquel i Badia, 8 bajos

08024 Barcelona

Telf. (93) 285 35 80

Fax: (93) 219 64 40

e-mail: [formacion@schneiderelectric.es](mailto:formacion@schneiderelectric.es)

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

### **Advertencia**

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

La reproducción total o parcial de este Cuaderno Técnico está autorizada haciendo la mención obligatoria: «Reproducción del Cuaderno Técnico nº 140 de Schneider Electric».



# Cuaderno Técnico nº 204

## Protecciones BT y variadores de Velocidad (convertidores de frecuencia)

---



**Jacques SCHONEK**

Ingeniero ENSEEIHT y Doctor - Ingeniero de 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**

Habiendo entrado en la empresa Merlin Gerin en 1969, trabajó durante 14 años en las oficinas de estudio de Baja Tensión, mientras continuaba su formación profesional obteniendo sucesivamente varios diplomas y alcanzando el título de ingeniero. Después ocupó diferentes puestos en las actividades Baja Tensión.

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

---

Traducción española:  
Luis Miret. Abril 2002.

CT 204(e) edición francesa diciembre de 2001







# Protecciones BT y variadores de velocidad (convertidores de frecuencia)

El objeto de este Cuaderno Técnico es explicar los fenómenos particulares observados en las instalaciones de BT cuando hay una sobrecarga o un fallo eléctrico en los circuitos equipados con variadores de velocidad. Se dan distintas recomendaciones para asegurar la protección de las personas y de los bienes, así como para la mejora de la continuidad del servicio.

<b>1 Variadores de velocidad de tipo « convertidores de frecuencia » para motores asincrónicos</b>	1.1 Descripción	p. 4
	1.2 Necesidad de protecciones adaptadas	p. 7
<b>2 Protecciones contra sobreintensidades</b>	2.1 Protecciones integradas en los variadores	<b>p. 20</b>
	2.2 Protecciones exteriores a los variadores	p. 22
<b>3 Protección de las personas</b>	3.1 Los riesgos vinculados a los defectos de aislamiento	<b>p. 11</b>
	3.2 Recordatorio sobre los esquemas de conexiones a la tierra	p. 12
	3.3 Utilización de los DDR según el ECT	p. 14
	3.4 Protección integrada en los variadores contra los defectos a tierra	p. 14
	3.5 Defectos de aislamiento y variadores de velocidad	p. 15
<b>4 Protecciones que hay que asociar con los variadores</b>	<b>4.1 Tabla resumen</b>	<b>p. 19</b>
<b>5 Fenómenos particulares</b>	5.1 Corrientes de fuga de alta frecuencia	<b>p. 20</b>
	5.2 Corrientes de fuga al poner en tensión	p. 22
	5.3 Defecto a la salida del variador con un esquema TT o TN	p. 23
	5.4 Fallo a la salida del variador con un esquema IT	p. 25
	5.5 Corriente de defecto con componente continua	p. 26
<b>6 Recomendaciones de elección y de instalación</b>	6.1 Elección de los DDR	<b>p. 28</b>
	6.2 Elección de los CPI	p. 28
	6.3 Prevención de los malos funcionamientos	p. 29
<b>Bibliografía</b>		<b>p. 30</b>



# 1 Variadores de velocidad de tipo « convertidores de frecuencia» para motores asincrónicos

## 1.1 Descripción

### Objetivo

El objetivo de los variadores de velocidad del tipo «convertidores de frecuencia» es alimentar a los motores asíncronos trifásicos para conseguir características de funcionamiento radicalmente diferentes a las de su utilización normal (motores alimentados en directo por la tensión de red), a amplitud y frecuencia constantes. El cuadro de la figura 1 presenta las ventajas de estos dispositivos.

### Principio

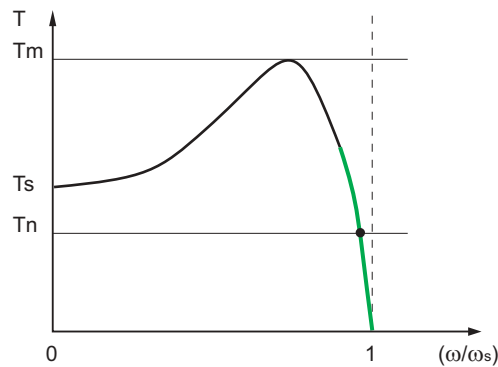
Consiste en suministrar al motor una onda de tensión a amplitud y frecuencia variables, manteniendo la relación **tensión / frecuencia sensiblemente constante**.

La generación de esta onda de tensión la realiza un dispositivo electrónico de potencia cuyo esquema de principio está ilustrado en la figura 4.

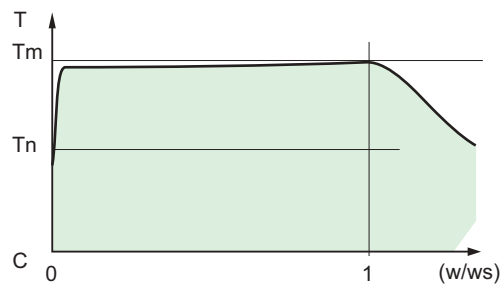
Motor asíncrono	... en uso normal	...con variador de velocidad
Corriente de arranque	Muy elevada, del orden de 6 a 8 veces la corriente nominal en valor eficaz, 15 - 20 veces en valor cresta	Limitado en el motor (en general: cerca de 1,5 veces la corriente nominal)
Par de arranque $C_d$	Elevado y no 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	Brutal, cuya duración 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 de la velocidad de sincronismo $N_s$ )	Variación posible a partir de 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 disponible para todo el rango de velocidades (del orden de 1,5 veces el par nominal)
Frenado eléctrico	Relativamente complejo, necesita protecciones y un esquema particular	Fácil
Inversión del sentido de marcha	Fácil solamente después de parada motor	Fácil
Riesgo de bloqueo	Sí, en caso de exceso de par (par resistente > $C_m$ ), o en caso de bajada de tensión	No
Funcionamiento del motor en el plano par-velocidad	Cf. fig. 2	Cf. fig. 3

Fig. 1: comparación de las características de funcionamiento que demuestran el gran interés de los variadores de velocidad de tipo « convertidores de frecuencia ».





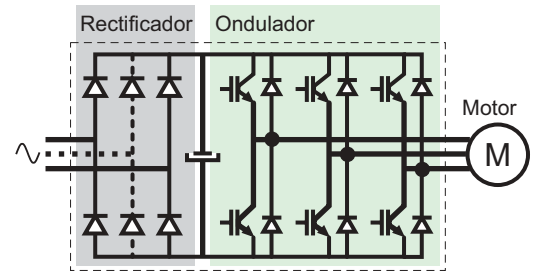
*Fig. 2: Diagrama par-velocidad de un motor alimentado en directo. La zona de funcionamiento del motor en el plano par-velocidad está limitada a la parte verde de la curva.*



*Fig. 3: Diagrama par-velocidad de un motor alimentado por convertidor de frecuencia. Aquí la zona de funcionamiento del motor en el plano par-velocidad está representada en verde.*

El convertidor comprende:

- un puente rectificador mono o trifásico de diodos conectados a un condensador formando una fuente de tensión continua (Bus de tensión continua o Bus DC),
- un puente ondulatorio generalmente con IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), alimentado por la tensión continua y que genera una onda de tensión alterna de amplitud y frecuencia variables por la técnica de « Modulación de Anchura de Impulsos » o PWM,
- una unidad de mando que suministra las órdenes de conducción a los IGBT con arreglo a las consignas dadas por el operador (orden de marcha, sentido de marcha, consigna de velocidad) y de la

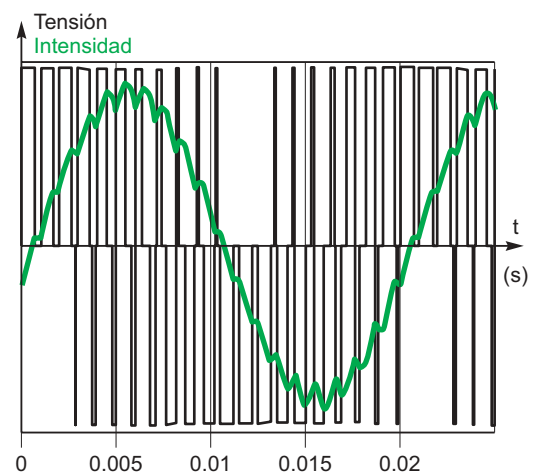


*Fig. 4: Esquema de principio de un convertidor de frecuencia.*

medida de magnitudes eléctricas (tensión red, corriente motor).

El principio del PWM utilizado en el puente ondulatorio 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. Los impulsos son 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 corriente en un bobinado de la máquina (suponiendo los bobinados conectados en triángulo).



*Fig 5: Tensión con PWM y corriente por los bobinados de la máquina.*



### Características de la corriente absorbida por el variador

#### ■ Forma de onda

#### □ En el caso de una alimentación trifásica

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

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

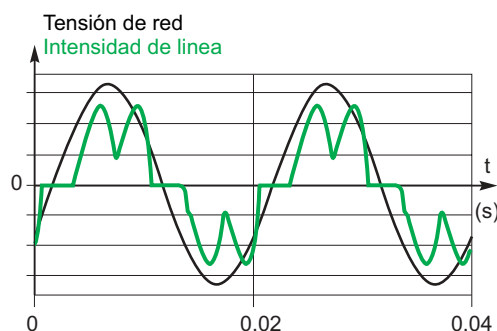
Hay que señalar que este índice de distorsión se obtiene añadiendo unas inductancias de línea que provocan una caída de tensión comprendida entre el 3 y el 5 %. En ausencia de estas inductancias de línea,

la distorsión de corriente es superior: puede alcanzar el 80 % en ausencia total de inductancia en el variador.

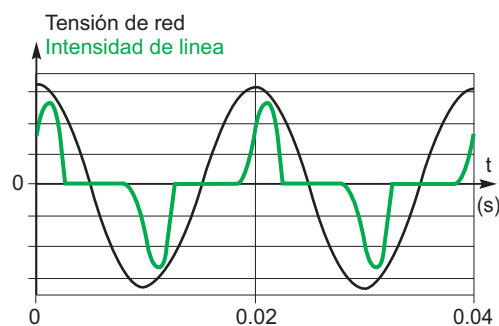
#### □ En el caso de una alimentación monofásica

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

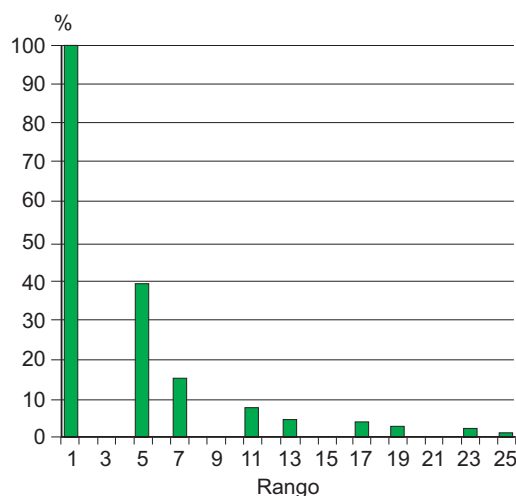
Nótese que este índice de distorsión también se obtiene por inclusión de una inductancia de línea que provoca una caída de tensión comprendida entre el 3 y 5 %. En ausencia de esta inductancia de línea, la distorsión de corriente es superior: puede sobrepasar el 100 % en ausencia total de inductancia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



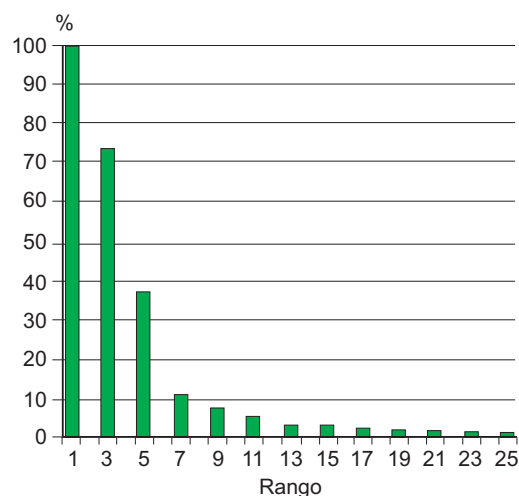
**Fig. 6** Intensidad absorbida y tensión simple de la red (alimentación trifásica)



**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)



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

La corriente fundamental absorbida por el variador prácticamente está en fase con la tensión, de modo que 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 pequeña cuando el motor gira a velocidad reducida, aunque éste desarrolla un par elevado y absorbe una corriente elevada.

### Referencias normativas

Dos normas 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.

## 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) principalmente están 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 (conjuntos 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:

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

Nótese que cuando una línea sólo alimenta a un motor y su variador, esta protección de sobrecarga del motor asegura simultáneamente la protección de sobrecarga del conjunto equipo y cableado.

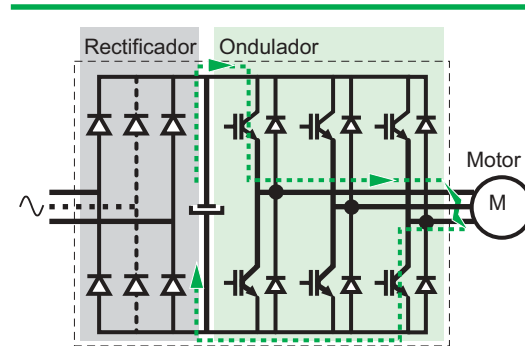
#### Protección contra los cortocircuitos en el motor o en la línea aguas abajo del variador

En caso de cortocircuito entre fases a la salida de 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 (cf. **fig. 10**) se interrumpe en algunos microsegundos, lo que asegurará la protección del variador. Esta corriente muy breve es suministrada esencialmente por el condensador de filtrado asociado con el rectificador, y es pues 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 sobre disipador térmico provoca la parada del



**Fig.10.** Cortocircuito aguas abajo del variador

variador, cuando la temperatura sobrepasa un cierto umbral.

■ los huecos de tensión de la red: esta protección es necesaria para evitar algún funcionamiento inadecuado de los circuitos de control y del motor, así como toda 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 en monofásico que sustituye a la alimentación en trifásico provoca 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 manda la apertura del contactor de línea que asegura el corte de la alimentación.

Además de las necesidades expuestas en las primeras líneas de este capítulo, estas protecciones contra las sobreintensidades



## 2.2 Protecciones exteriores a los variadores

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.

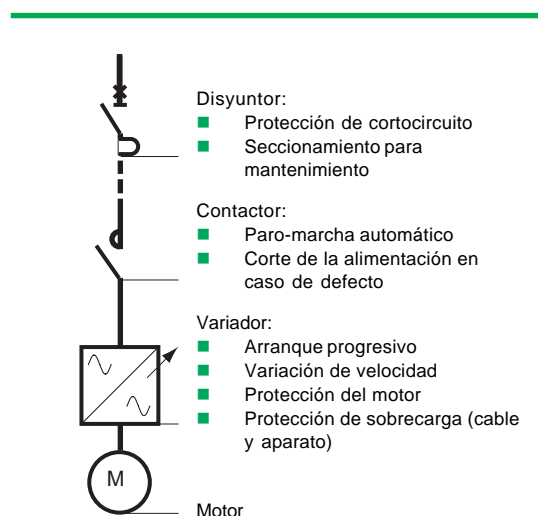
**Nota:** aunque este dispositivo normalmente no pueda proteger los componentes del variador, su apertura automática limita las consecuencias de tales defectos.

### Emplazamientos de los dispositivos

Todas estas protecciones se definen para un circuito que con frecuencia se presenta según la **figura 11**:

- al principio del circuito, una protección individual contra sobrecorrientes, a menudo asociada con un contactor,
- sin dispositivo de corte aguas abajo del variador.

En esta figura se indican las funciones incluidas en los diferentes aparatos (interruptor automático, contactor y variador).



**Fig.11:** Esquema recomendado para la protección contra sobrecorrientes

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 verdaderamente 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,
- la salida-motor debe hallarse en situación de funcionar después de suprimir del 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 un variador, no hay ninguna punta de corriente a la puesta en tensión, por tanto el dispositivo de protección no ha de estar sujeto a ninguna exigencia especial.

### Cálculo del calibre de los interruptores y de los contactores

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

- de la potencia mecánica nominal del motor,
- de la tensión nominal de alimentación,
- del rendimiento del motor y del variador,
- de la sobrecarga permanente admisible de 1,1 Cn a par constante y de 1,05 Cn a par variable,
- de 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

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

Así, con  $\text{THD} = 140\%$ ,  $I_{\text{rms}} = 1,08I_1$

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

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

Con:

$P_{\text{mot}}$	Potencia nominal del motor
$U$	Tensión entre fases
$\eta_{\text{mot}}$	Rendimiento del motor
$\eta_{\text{var}}$	Rendimiento del variador



■ Ejemplo:

Potencia del motor: 15 kW

Tensión de la red: 400 V

$\eta_{\text{mot}}$ : 0,95

$\eta_{\text{var}}$ : 0,97

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

**Dos casos particulares**

■ Alimentación de motores en paralelo

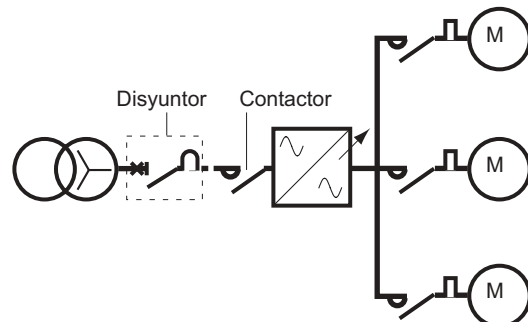
En este caso, la protección de sobrecarga integrada en el variador no puede asegurar la protección de cada motor. En efecto, uno de los motores puede encontrarse en sobrecarga, mientras que la corriente absorbida por el conjunto de los motores no sobrepase la corriente nominal del variador. Así pues un relé térmico debe proteger individualmente a cada uno de los motores (cf. **fig. 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.

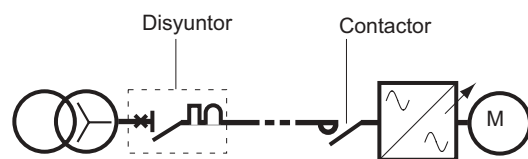
■ Protección de sobrecarga integrada en el variador inhibida

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

La protección de los cables y del equipo, que hay que asegurar desde aguas arriba, necesita entonces una protección de sobrecarga obligatoriamente asociada con el interruptor automático de la salida-motor (cf. **fig. 13**). En este caso se recomienda un sobredimensionado del 20 % del cable y del equipo.



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



**Fig. 13:** Protección de sobrecarga integrada en el variador, inhibida



## 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 shock eléctrico),
- La seguridad de los bienes (riesgo de incendio o de explosión debido a un calentamiento excesivo en un punto),
- 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 (cf. [fig. 14](#)).

La protección contra este riesgo normalmente se asegura por el aislamiento de las partes activas, por medio de barreras, pantallas o envolventes (según CEI 60364-4-41 o 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

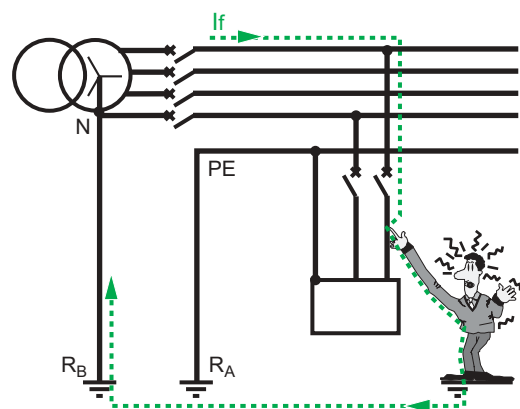


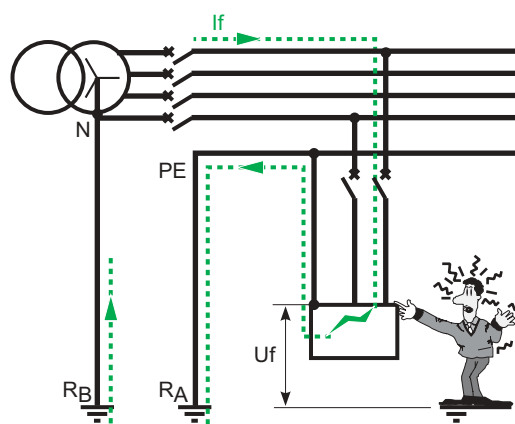
Fig. 14 Contacto directo

(CEI 60364-4-41 o NF C 15-100) y 60 mA en corriente continua.

#### El contacto indirecto

Contacto de personas con masas conductoras, normalmente sin potencial, puestas accidentalmente bajo tensión. Esta puesta en tensión resulta del fallo del aislamiento de un aparato o de un conductor que tiene un defecto de aislamiento (cf. [fig. 15](#)).

Este riesgo eléctrico es función de la tensión de contacto que aparece entre la masa del equipo en defecto y la tierra u otras masas conductoras situadas en las cercanías. 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 seguridad 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:

$$U_d = R_A \cdot I_{\Delta n} \leq U_L$$

Y, por tanto,

Para más detalles, leer el Cuaderno Técnico n° 114)

Fig. 15: Contacto indirecto



## 3.2 Recordatorio sobre los esquemas de conexiones a la tierra

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

Difieren en la puesta a tierra o no del punto neutro de la fuente de tensión y por el modo de conexión de las masas (cf. fig. 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<sup>1</sup>.

El esquema TT impone el corte inmediato 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 sobreintensidad 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 al neutro) por un conductor de protección:
- PE distinto del conductor de neutro, es el esquema TN-S,
- o PEN común con conductor de neutro, es el esquema TN-C.

**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 por una impedancia elevada (neutro impedante),

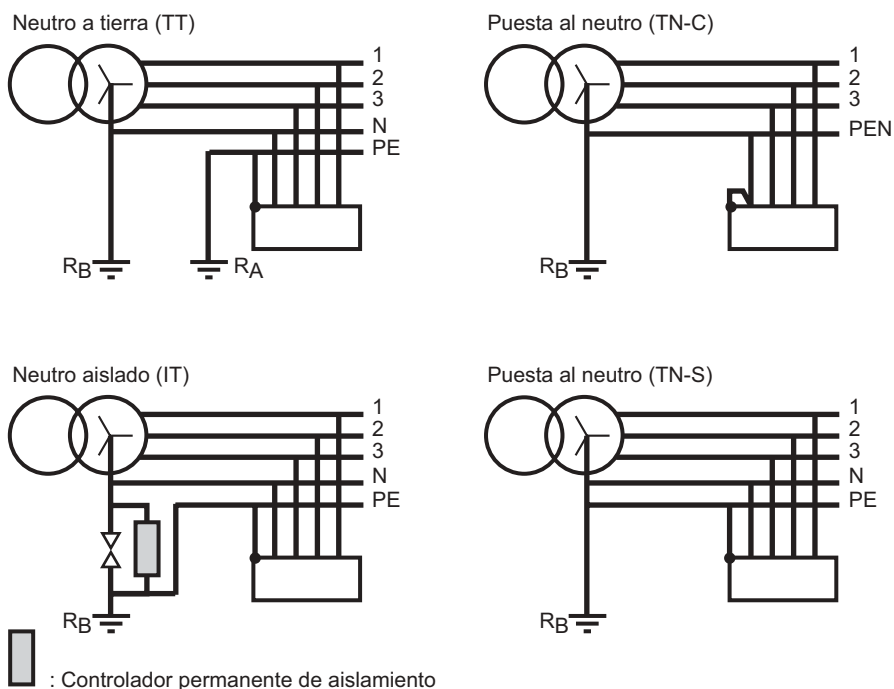


Fig. 16: Los tres tipos de esquemas normalizados de conexión a tierra



■ 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. No obstante debe detectarse este defecto, señalarlo y repararlo rápidamente, antes de que aparezca un segundo defecto de aislamiento sobre otro conductor activo, cosa que entonces requeriría un disparo inmediato. Este sistema proporciona al esquema IT la mejor continuidad de alimentación (Ver también el 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 (protección térmica o magnética de un interruptor automático) como es el caso con los esquemas TT y 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 - CPI-.

#### ■ Los DDR

□ Principio de los DDR ( figura 17).

En ausencia de defecto de aislamiento, la suma vectorial de las corrientes en los conductores activos es nula y el toro 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 toro 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 ».

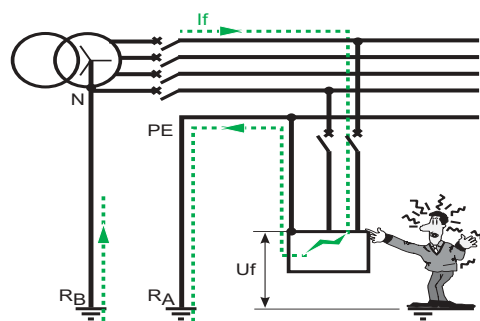


Fig. 17 Principio de un DDR

#### □ 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 un componente continua (cf. fig. 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.

#### ■ Los CPI

El principio de un CPI consiste en inyectar una tensión, alterna o continua, entre la red y la tierra (cf. fig. 19). La medida de la corriente que atraviesa al 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 con dispositivos con umbrales permiten diversas alarmas, por ejemplo de disminución progresiva del aislamiento par mantenimiento predictivo, o de un defecto a tierra que necesita una intervención rápida (antes del segundo defecto).

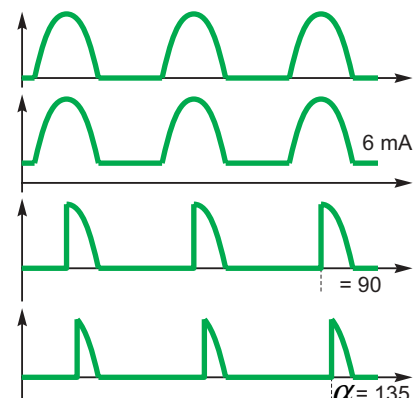


Fig. 18 Formas de ondas que caracterizan a los DDR tipo A

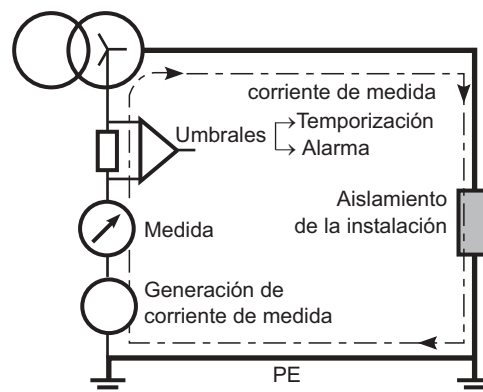


Fig. 19: Principio de un CPI



### 3.3 Utilización de los DDR según el ECT

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

#### Todos los ECT

Los DDR se utilizan en 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 inferior 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 corrientes pequeñas de defecto. En efecto, la impedancia de un defecto no se conoce con certeza y puede ser elevada (las masas de utilización tienen 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.

También mandan el corte de los circuitos cuando la corriente de defecto queda limitada por una gran longitud de cable y no es suficiente para activar las protecciones de sobreintensidad. El umbral de disparo de los DDR puede entonces elevarse (sensibilidad baja), de algunos amperios a algunas decenas de amperios.

**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 PEN 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 2° defecto) puede no ser suficiente para activar la protección contra los defectos entre fases, por ejemplo en las salidas que alimentan a receptores alejados.

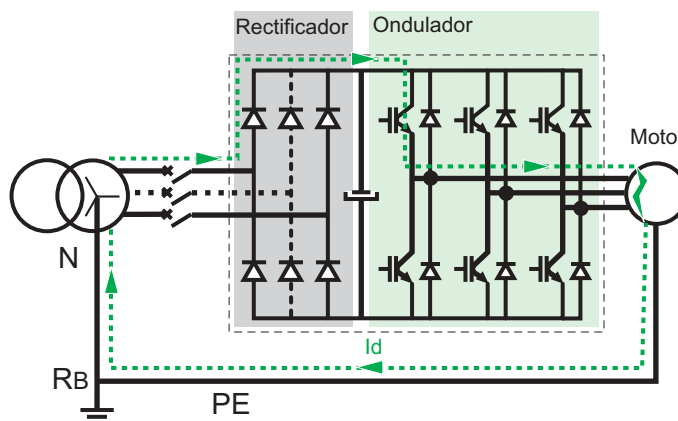
- En el caso de grupos de receptores conectados individualmente a tierra (grupos no interconectados de masas).

Cuando la red tiene un esquema TN, un defecto entre una salida del variador y la

### 3.4 Protección integrada en los variadores contra los defectos a tierra

tierra provoca una sobreintensidad importante por la interconexión de las masas (cf. **fig. 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). El dispositivo integrado de protección interviene entonces. El aislamiento galvánico del variador se obtiene por la



**Fig. 20:** Defecto a tierra a la salida



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 y generalmente es el caso con

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.

### 3.5 Defectos de aislamiento y variadores de velocidad

**Contacto directo**  
En los circuitos que incluyen variadores de velocidad, hay varias situaciones posibles de contacto directo (cf. 21 más abajo y fig. 22 en la página siguiente).  
■ Esquemas TT y TN-S

Para el caso de fallo de otras medidas de protección contra los contactos, o para una imprudencia de los usuarios, puede estar prevista una protección complementaria por encima del variador y asegurada por un DDR de umbral 30 mA.

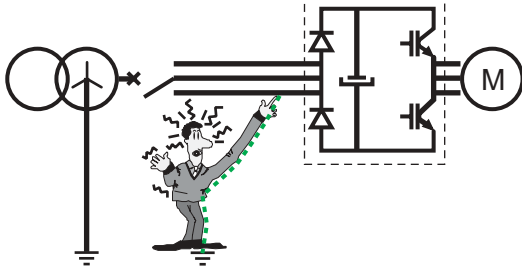
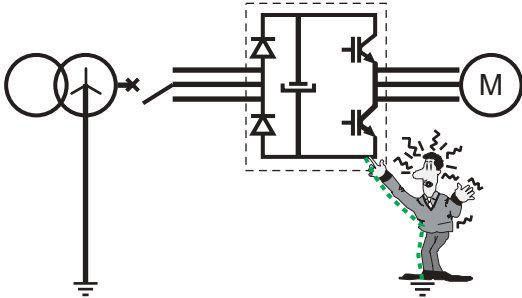
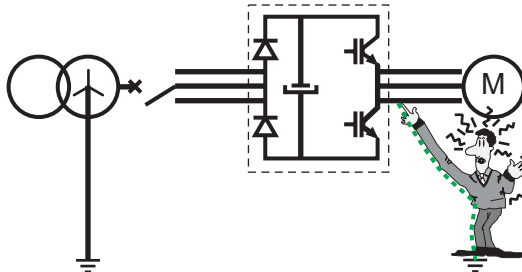
Riesgo de contacto directo	Tensión de contacto	Protección complementaria
<b>Aguas arriba del variador</b> <b>A</b> 	Tensión fase – neutro	DDR 30 mA
<b>En el bus DC</b> <b>B</b> 	Tensión de red rectificada	
<b>Aguas abajo del variador</b> <b>C</b> 	Tensión de salida del variador	

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

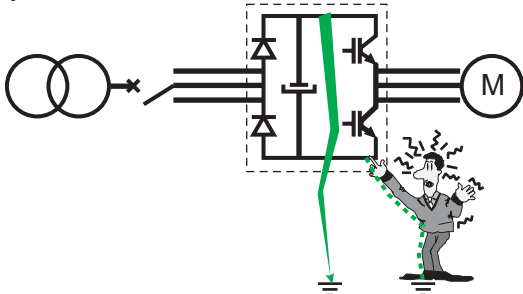
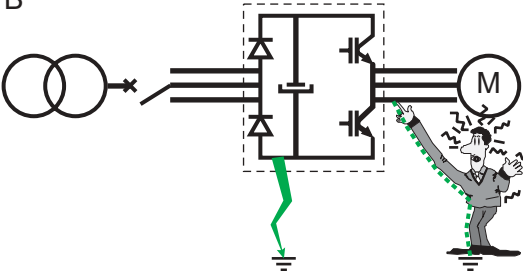
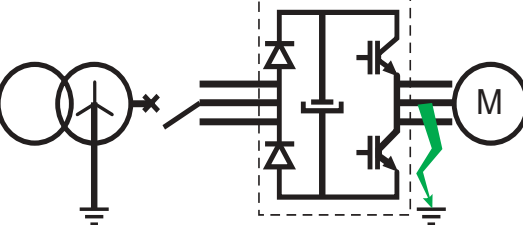
Riesgo de contacto directo	Tensión de contacto	Protección complementaria
<p>A</p> 	Tensión de red rectificada	No hay protección posible con corte automático
<p>B</p> 	Tensión de salida del variador Tensión de	
<p>C</p> 		

Fig. 22: Distintas situaciones específicas en una red con esquema IT y que conllevan un primer defecto de aislamiento y una persona en contacto directo.

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 aportar al cableado de estas máquinas con el fin de garantizar la precaución de base 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 permutan.
- Cuando diversos variadores se alimentan de la misma red, se puede considerar que los buses DC de los diferentes variadores están al mismo potencial. Defectos localizados sobre variadores diferentes tienen pues las mismas consecuencias que si estuviesen localizados sobre el mismo variador.

### Contacto indirecto

#### ■ Esquemas TT y TN-S

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

#### ■ Esquema IT

Con este esquema hay que tener en cuenta la presencia de dos defectos simultáneos. El cuadro de la **figura 24** de la página siguiente detalla los diferentes defectos posibles así como sus consecuencias.

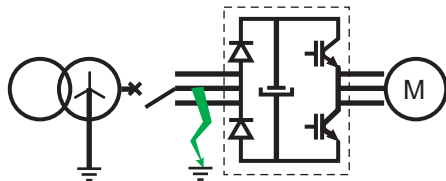
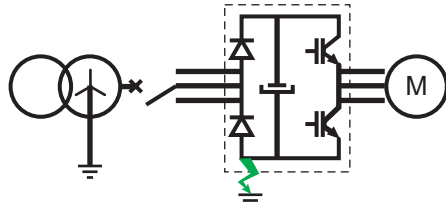
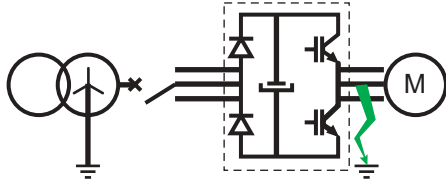
Situación	Efecto... (riesgo ...)	Protección afectada con un esquema TT	Protección afectada con un esquema TN-S
<b>A</b> 	Sobreintensidad aguas arriba del variador	DDR	De intensidad máxima, situada aguas arriba
<b>B</b> 	Sobreintensidad a través de un diodo del puente rectificador, la corriente de defecto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

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



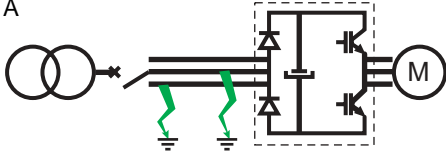
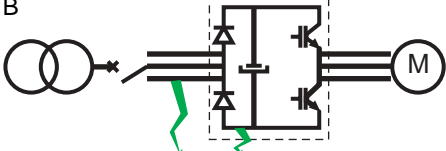
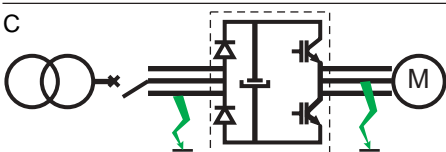
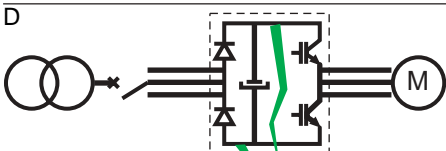
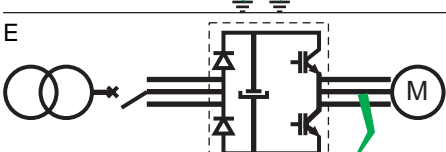
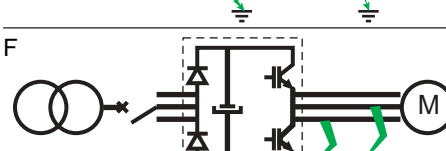
Situación	Efecto... (riesgo ...)	Protección afectada
<b>A</b> 	Sobreintensidad aguas arriba del variador	De intensidad máxima, situada aguas arriba
<b>B</b> 	Sobreintensidad a través de un diodo del puente rectificador, ( riesgo de destrucción)	De intensidad máxima, situada aguas arriba
<b>C</b> 	Sobreintensidad a través de un diodo del puente rectificador y de un IGBT (riesgo de destrucción en función del tipo de protección de cortocircuito integrada en el variador)	Interna del variador o de intensidad máxima, situada aguas arriba, pero una longitud importante del cable aguas abajo del variador puede enmascarar el defecto
<b>D</b> 	Cortocircuito en el bus de continua (riesgo de destrucción del puente rectificador)	De intensidad máxima, situada aguas arriba
<b>E</b> 	Cortocircuito en los bornes de un IGBT (riesgo de destrucción del IGBT opuesto, en función del tipo de protección de cortocircuito integrada en el variador)	Interna del variador o de intensidad máxima, situada aguas arriba,
<b>F</b> 	Sobreintensidad a la salida del variador	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 a menudo se conectan a tomas de tierra separadas. Entonces 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 acostumbrada y muy simple de estudio y de instalación, es el empleo de DDR (Leer el Cuaderno Técnico n

° 178) colocados al principio de cada circuito que contiene una puesta a tierra distinta (cf. fig.25). Estos DDR no deben sufrir perturbación por el paso de una corriente continua.

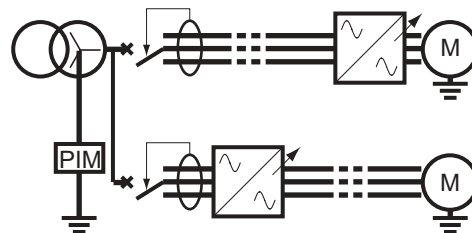


Fig. 25: Situación de los DDR para proteger, en esquema IT, dos salidas que tienen tomas de tierra distintas.



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

Sintetizando los capítulos precedentes, el cuadro siguiente permite conocer las funciones de protección que satisface el variador, y si es necesario completarlas con

dispositivos exteriores al variador tales como interruptor automático, relé de sobrecarga, y DDR.

Protección a asegurar	Protección generalmente asegurada por el variador	Protección exterior
Sobrecarga cable	Sí = (1)	Inútil si (1)
Sobrecarga 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 (Descon. cortocircuito)
Defecto interno		Interruptor automático (Descon. Cortocircuito y sobrecarga)
Defecto a tierra aguas abajo (Contacto indirecto)	Autoprotección del variador	DDR <sup>3</sup> 300 mA
Defecto por contacto directo		DDR £ 30 mA



## 5 Fenómenos particulares

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

frecuencia, que tienen un impacto sobre los dispositivos de protección DDR y CPI.

### 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 generados por la conmutación de los IGBT, está en el origen de unas 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 (cf. **fig. 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.

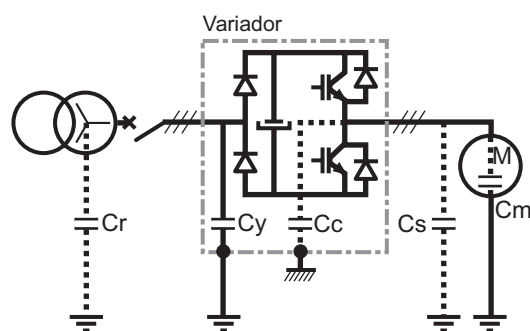


Fig. 26: Capacidades del circuito

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

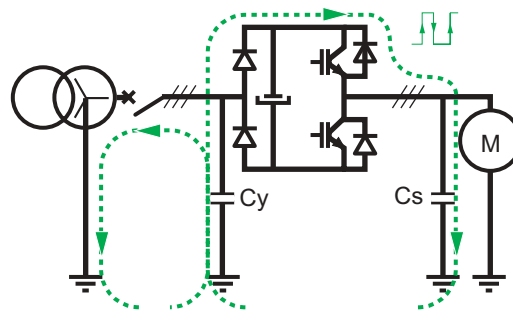


Fig. 27: Circulación de las corrientes de fuga de Alta Frecuencia

#### 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.

La forma y el espectro de las corrientes HF a la entrada del variador (cuando no hay defecto), para un PWM a 4 kHz, se representan en las **figuras 28 y 29**.



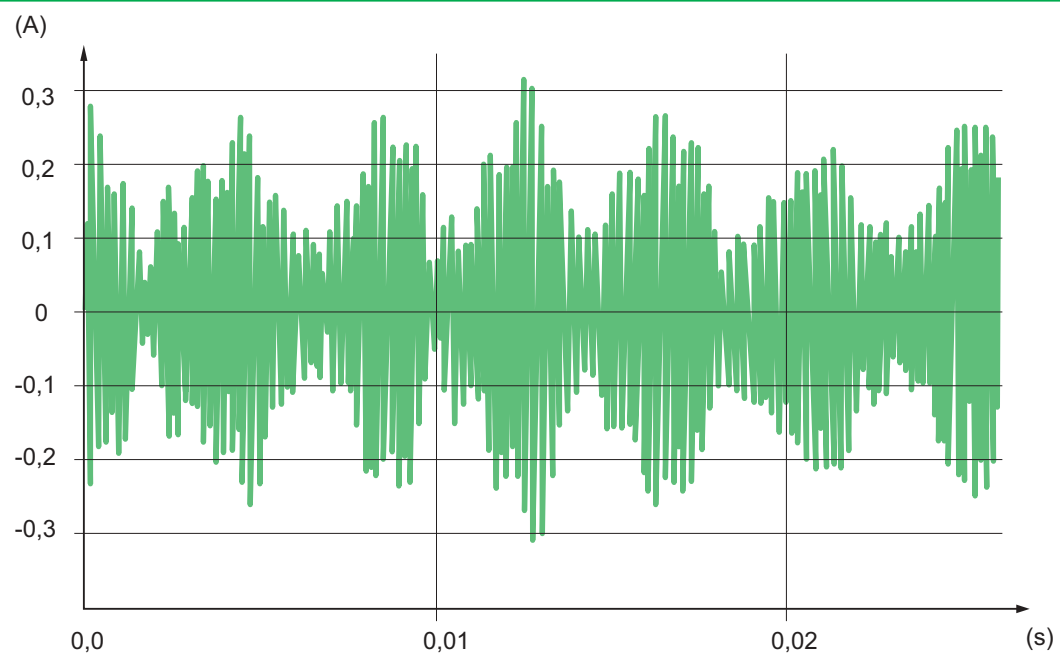


Fig. 28: Corrientes de fuga de Alta Frecuencia.

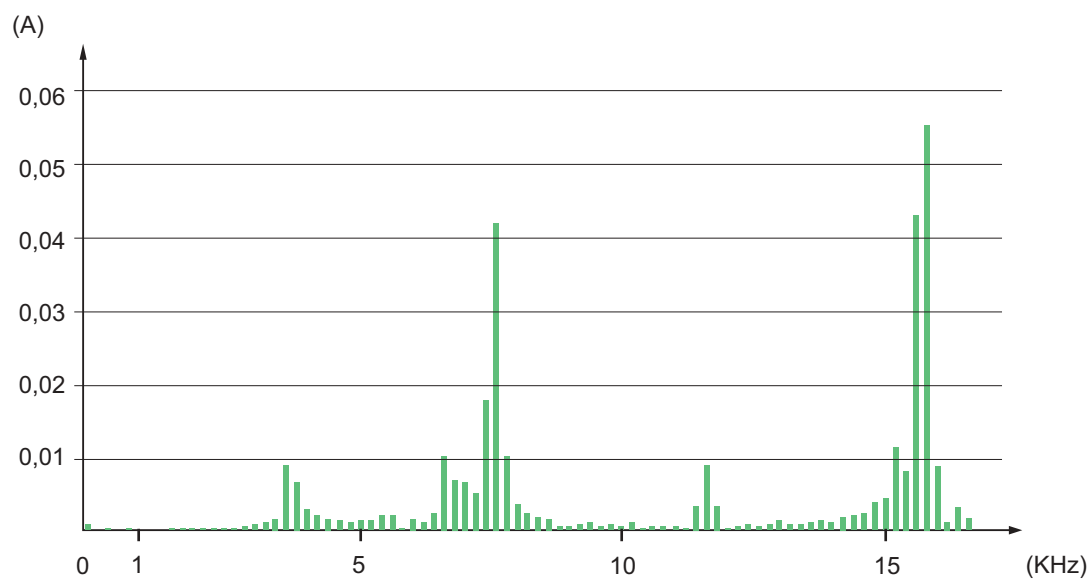


Fig. 29: Espectro de corriente de fuga.

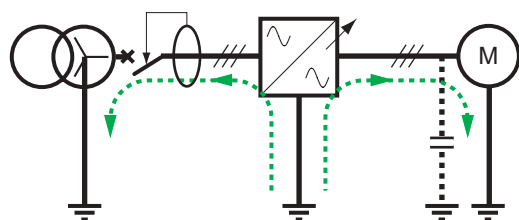


### Su incidencia:

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 (cf. **fig. 30**).

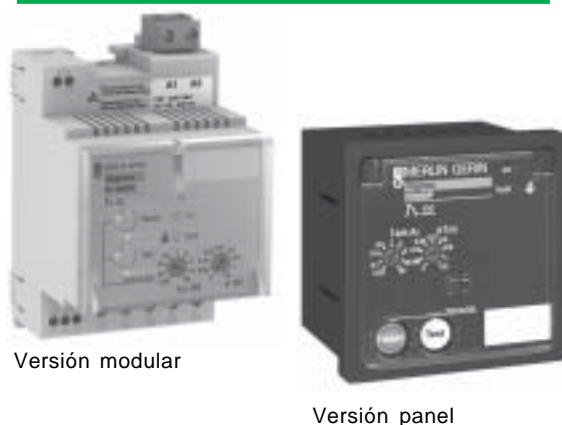


**Fig. 30:** Perturbación de un DDR por las corrientes de fuga de Alta Frecuencia.

### 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<sup>1</sup> (cf. **fig. 31**).

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



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

## 5.2 Corrientes de fuga al poner en tensión

### Su origen

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

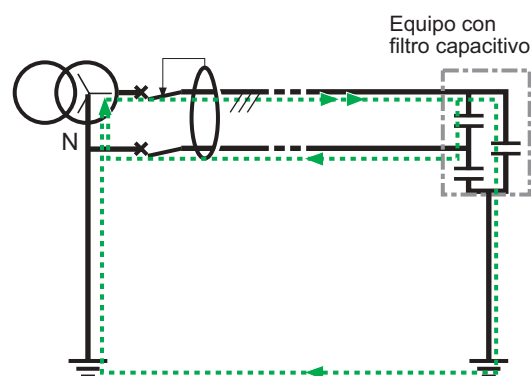
Estos condensadores provocan unas corrientes diferenciales residuales (cf. **fig.32**) a la puesta en tensión, así como en funcionamiento normal.

### 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 están en condiciones de provocar disparos intempestivos de DDR.

### La solución

Es de la incumbencia del fabricante de equipos o del instalador: consiste en limitar el número de variadores alimentados por el mismo DDR<sup>2</sup>.



**Fig. 32** Corriente de fuga recorriendo los condensadores de entrada de los equipos

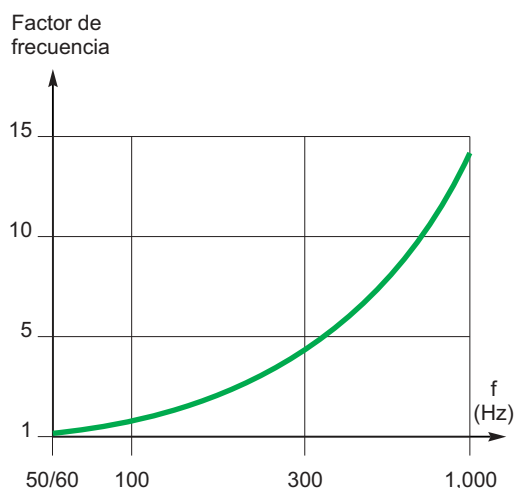


## 5.3 Defecto a la salida del variador con un esquema TT o TN

### Riesgo de electrocución

La corriente de defecto contiene un componente a la frecuencia del PWM así como corrientes HF creadas por las oscilaciones de las capacidades parásitas, pero los peligros de las corrientes HF se conocen bastante mal. El documento CEI 60479-2 da indicaciones, en particular sobre la variación del umbral de fibrilación cardiaca. Esta curva (cf. **fig. 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.



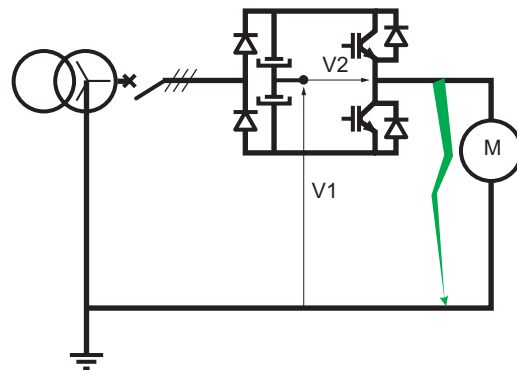
**Fig. 33:** Variación del umbral de fibrilación cardiaca en función de la frecuencia (según CEI 60479-2).

### Forma de la corriente de defecto

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

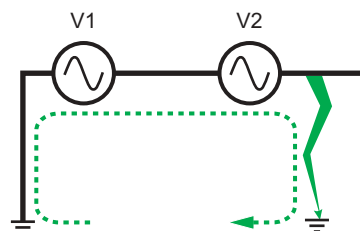
Si este defecto de aislamiento es impedante, es posible que no se sobrepase el umbral de la protección de máximo de corriente, por lo que hay que instalar un DDR para asegurar esta protección.

Como ya se ha visto anteriormente, el buen funcionamiento de un DDR depende de las corrientes de defecto que atraviesan a 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**.



**Fig. 34:** Tensión de defecto.

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



**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 (cf. fig. 36).

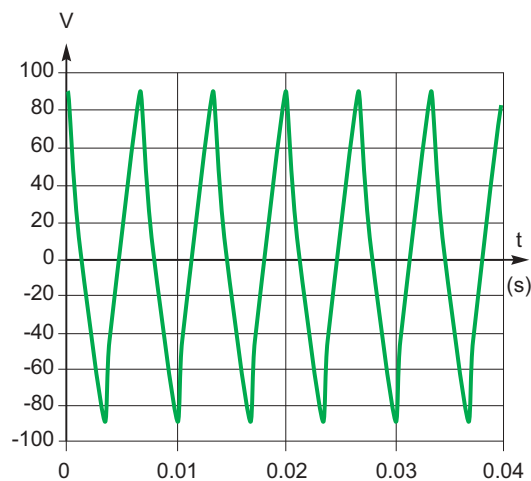


Fig. 36: Tensión del punto neutro del rectificador en trifásico

La tensión V2 (cf. fig. 37), entre el punto medio del rectificador y una fase de salida es el resultado del PWM; contiene pues una componente a frecuencia baja 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).

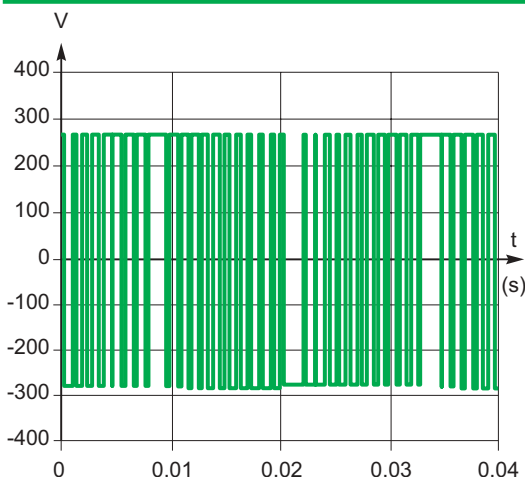


Fig. 37: Tensión de salida de la etapa onduladora

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, así como sus armónicos.

Su forma se representa en la figura 38. Esta corriente de defecto también contiene las corrientes HF mencionadas en los párrafos precedentes, pero omitidas aquí con la intención de simplificar las ilustraciones.

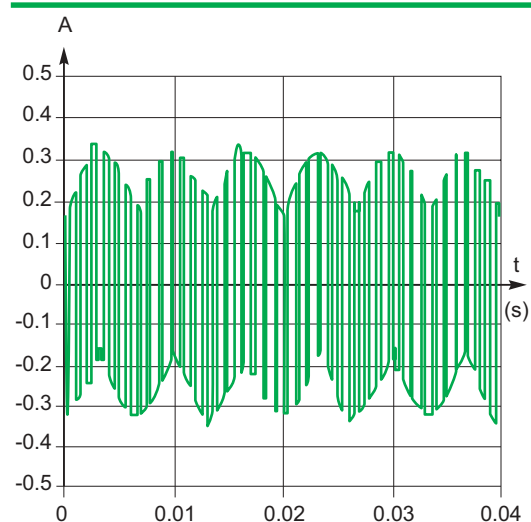


Fig. 38: Corriente de defecto en alimentación trifásica

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.

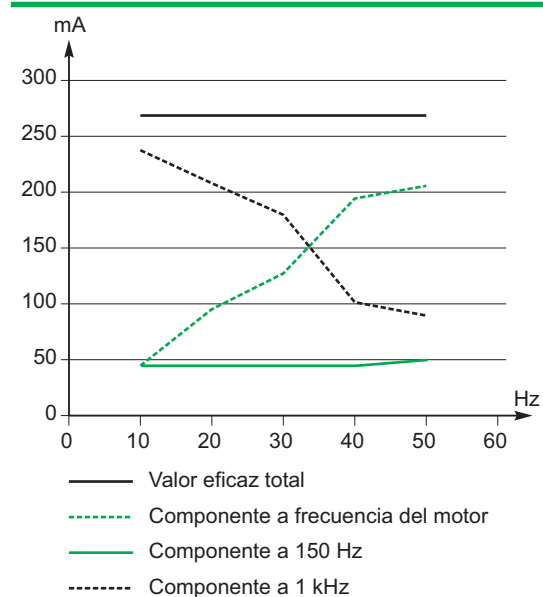
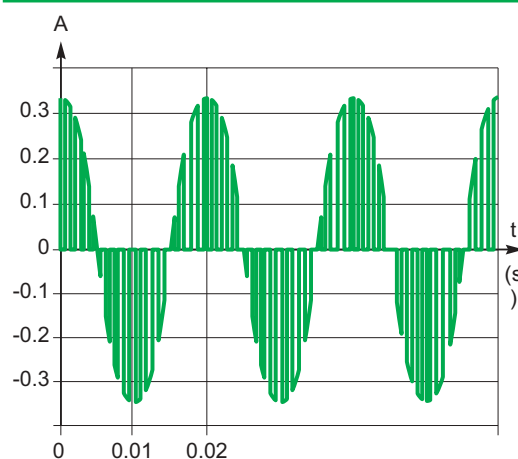


Fig. 39: Evolución de las componentes de la corriente de defecto



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 en la alimentación trifásica.



**Fig. 40:** Corriente de defecto en alimentación monofásica.

La solución

La forma compleja de la corriente de defecto necesita la utilización de DDR de tipo A<sup>3</sup> (cf. **fig. 41**)



**Fig. 41:** Ejemplo de DDR de tipo A adaptable a un disyuntor BT (Bloque Vigi C60-300 mA – Merlin Gerin).

## 5.4 Fallo a la salida del variador con un esquema IT

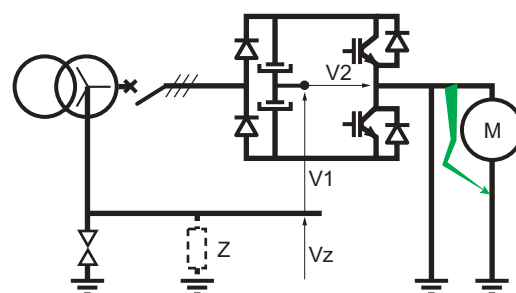
### Fluctuación rápida de la tensión red-tierra

En régimen IT, un defecto a tierra a la salida del variador no necesita el disparo, pero provocará una fluctuación rápida de la tensión de red con relación a la 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. Esto se ilustra en el esquema de la **figura 42**.

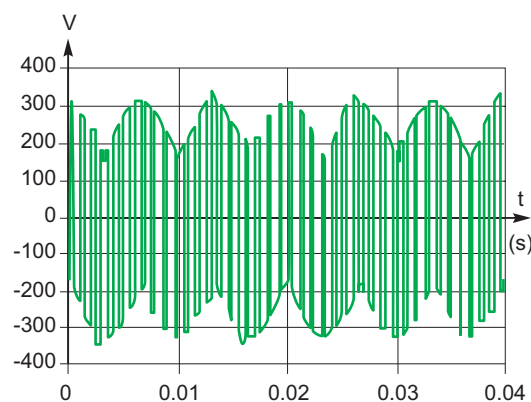
Por tanto, el conjunto de los receptores conectados a la red está sometido a las mismas fluctuaciones, incluyendo fuertes gradientes de tensión (cf. **fig.43**). Estos gradientes pueden significar el deterioro de los filtros capacitivos conectados entre la red y la tierra.

### Las soluciones

Para mejorar la Compatibilidad Electromagnética, no se aconseja la utilización de filtros CEM en las redes en esquema IT (cf. norma CEI 61800-3). Cuando es necesaria la reducción de las emisiones HF, una solución adecuada es colocar en la entrada del variador un filtro CEM sin conexión a tierra. Para eliminar el fenómeno de fluctuación rápida de tensión, se recomienda la instalación de un filtro «seno» a la salida del variador: elimina cualquier gradiente elevado de tensión aplicado sobre el motor y sobre el cable de alimentación.



**Fig. 42:** Defecto a tierra en régimen IT



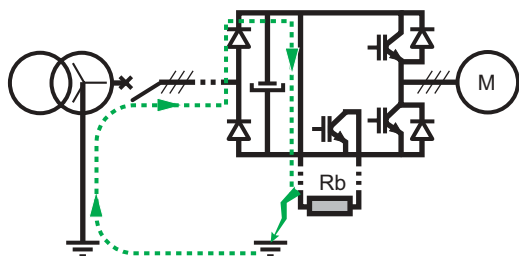
**Fig. 43** Fluctuación del potencial ( $V_z$ ) del neutro de la red.



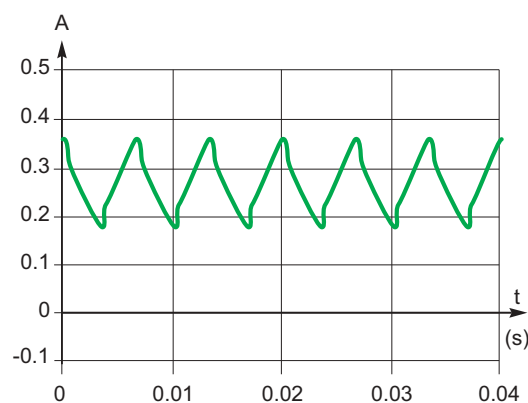
## 5.5 Corriente de defecto con componente continua

### Descripción

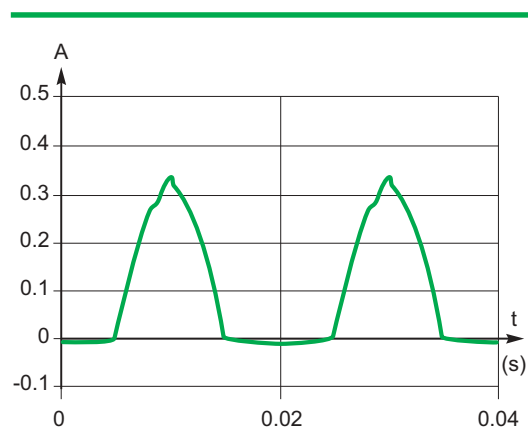
Los dispositivos usuales de protección son adecuados para la medida de corrientes de defecto alterno. No obstante, los defectos de aislamiento sobre el bus DC del variador o sobre el circuito de disipación de la energía de frenado (función cumplida por una resistencia  $R_f$  habitualmente exterior a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



**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 igual a 1 kW



**Fig. 46:** Corriente en caso de defecto en la resistencia de frenado, para una alimentación monofásica y una resistencia de defecto igual a 1 kW

### La solución

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

Si es posible un defecto de aislamiento sobre el bus DC, o sobre el circuito de la resistencia de frenado, es necesario utilizar DDR de tipo B cuando se alimenta el variador en trifásico. Cuando se alimenta en monofásico, interesa montar un DDR de tipo A.

### Regla práctica de asociación de DDR

- En el primer caso, con un esquema IT, ilustrado en la **figura 47**, la corriente de defecto tiene componente continua. El DDRa que asegura la protección complementaria contra el contacto directo debe pues ser sensible a este tipo de corriente.
- En el segundo caso (cf. **fig. 48**), se colocan en cascada dos DDR. 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 en caso de un defecto que ocurra en otra salida.



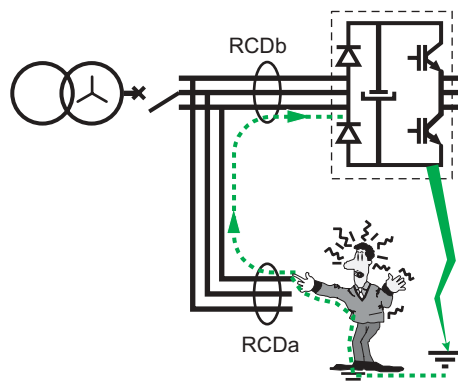


Fig. 47: Riesgo de cegamiento del DDRa

■ La regla es pues la siguiente:  
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.

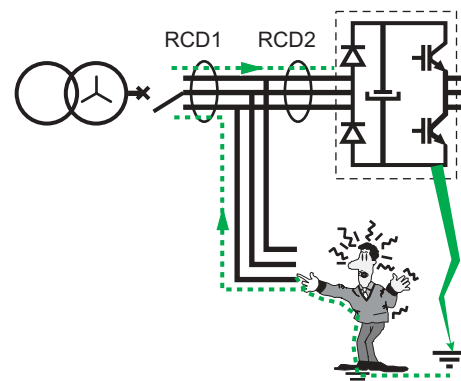


Fig. 48: Riesgo de cegamiento del DDR1

Esta condición debe cumplirse, en particular:

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



## 6 Recomendaciones de elección y de instalación

A partir de los principios

- de implantación de los dispositivos de protección de sobrecorrientes (cortocircuito y sobrecarga) tratados en el capítulo 2,
- de protección de las personas, objeto del capítulo 3,

■ y los fenómenos particulares expuestos en el capítulo precedente, este capítulo ofrece recomendaciones prácticas que responden a la pregunta: ¿cómo proteger bien un circuito que contiene variadores de velocidad?

### 6.1 Elección de los DDR (cf. fig. 49)

	Protección		
	...contra un contacto indirecto		... contra un contacto directo
Alimentación	Trifásica	Monofásica	Trifásica
Características materiales y de instalación	Sin doble aislamiento del bus DC	Con doble aislamiento del bus DC	Es posible que se necesite una medida de protección complementaria para el caso de riesgo de fallo de otras medidas de protección contra los contactos directos o para el caso de imprudencia de los usuarios (cf. normas de instalación)
ECT: TT (o IT con masas no interconectadas)	Tipo <b>B</b> , de baja sensibilidad ( $\geq 300$ mA)	Tipo <b>A</b> de baja sensibilidad ( $\geq 300$ mA)	Tipo <b>B</b> 30 mA
ECT: TN-S	Tipo <b>A</b> de baja sensibilidad ( $\geq 300$ mA) [*]		Tipo <b>A</b> 30 mA
ECT: IT			

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

#### Recomendaciones particulares:

- Conectar sólo un único variador a cada DDR,
- Prever un DDR como medida de

protección complementaria contra un contacto directo cuando la resistencia de frenado sea accesible.

### 6.2 Elección de los CPI

Los CPI con inyección de corriente continua pueden ser “engañados” por un defecto que presenta 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 CPI con inyección de corriente alterna.

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

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

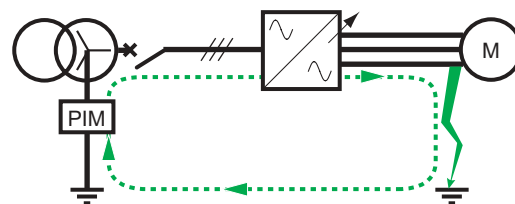


Fig. 50 Perturbación de la medida del CPI.



## 6.3 Prevención de los malos funcionamientos

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<sup>4</sup>, que incluya:
  - un filtrado de las corrientes HF,
  - una temporización (evita los disparos debidos a la carga de las capacidades parásitas en el momento de la puesta en tensión). 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 CPI

- 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 permite,
  - 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 HF),
- Repartir los variadores entre varios DDR (para no reunir las corrientes de fuga),
- Colocar un filtro «seno» a la salida del variador (eliminación de los gradientes de tensión aplicados sobre los cables),
- Utilizar un transformador de aislamiento y colocar el DDR aguas arriba (separación del circuito perturbado por 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, EN 60947-2, UNE-EN 60947-2:: Aparata de baja tensión – Parte 2: interruptores automáticos.
- CEI 61008, EN 61008, UNE-EN 61008: interruptores automáticos de corriente diferencial residual para usos domésticos y análogos.
- CEI 61009, EN 61009, UNE-EN 61009: Interruptores automáticos para actuar por corriente diferencial residual, con dispositivo de protección contra sobrecorrientes incorporado, para usos domésticos y análogos (AD).
- CEI 61800-3: EN 61800-3, UNE EN-61800-3: accionamientos eléctricos de potencia a velocidad variable - Parte 3 Norma de producto relativa a CEM, incluyendo métodos de ensayo específicos.
- 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 a baja tensión.

## Cuadernos Técnicos Schneider Electric

- Los Dispositivos Diferenciales Residuales en BT. R. CALVAS, Cuaderno Técnico n ° 114.
- Protección de las personas y las alimentaciones estáticas sin corte. J-N. FIORINA, Cuaderno Técnico n ° 129.
- Los esquemas de conexión a tierra en BT (regímenes de neutro). B. LACROIX y R. CALVAS, Cuaderno Técnico n ° 172.
- Los esquemas de conexión a tierra en el mundo y su evolución. B. LACROIX y R. CALVAS, Cuaderno Técnico n ° 173.
- Perturbaciones de los sistemas electrónicos y los esquemas de conexión a tierra. R. CALVAS, Cuaderno Técnico n ° 177.
- El esquema IT (neutro aislado) de conexión a tierra en BT. F. JULLIEN y I. HEREDERO, Cuaderno Técnico n ° 178.
- Coexistencia corrientes fuertes - corrientes débiles. R. CALVAS y J. DELABALLE, Cuaderno Técnico n ° 187.

## (Footnotes)

<sup>1</sup> NOTA DEL TRADUCTOR: Este circuito de filtrado ya está incluido en los interruptores diferenciales superinmunizados **si** de Merlin Gerin.

<sup>2</sup> Nota del Traductor: La utilización de interruptores diferenciales superinmunizados **si** de Merlin Gerin permite incrementar el número de variadores alimentados por un solo DDR.

<sup>3</sup> NOTA DEL TRADUCTOR: Nuevamente, en estos casos es aconsejable utilizar interruptores diferenciales superinmunizados **si** de Merlin Gerin.

<sup>4</sup> NOTA DEL TRADUCTOR: Los interruptores superinmunizados **si** de Merlin Gerin ya incorporan de serie tanto el filtro de HF como una acumulación de energía.



