



El convertidor de cinco niveles

La tecnología ANPC-5L y el accionamiento ACS 2000

FREDERICK KIEFERNDORF, MICHAEL BASLER, LEONARDO SERPA, JAN-HENNING FABIAN, ANTONIO COCCIA, GERALD SCHEUER – La electrónica de potencia moderna ha revolucionado el suministro y la utilización de la energía eléctrica. En el campo de los accionamientos, la posibilidad de seleccionar de forma arbitraria e incluso continua la frecuencia y la amplitud de la tensión de salida de un inversor ha mejorado sustancialmente la eficiencia y el control de la energía. Los inversores sintetizan la tensión de corriente alterna (CA) conmutando entre distintos niveles de tensión de corriente continua (CC) con una frecuencia alta mediante el empleo de semiconductores. La forma de onda que se crea así es

distinta de la sinusoidal ideal debido a esta configuración rectangular de la conmutación. Esa diferencia puede ser suficiente para limitar el uso de esas unidades en muchas aplicaciones que requieren una mayor calidad de la corriente alterna. Una forma de hacer que las ventajas de eficiencia energética de los accionamientos lleguen a una mayor variedad de aplicaciones es aumentar el número de niveles de tensión de CC disponibles. La unidad ACS 2000 de ABB va más allá de los tres niveles que se utilizan normalmente y trabaja con cinco. Además, gracias a su ingeniosa topología, evita muchos de los problemas que, por otra parte, hacen complejos los convertidores de cinco niveles.

gas añadidas (lo que excluye la utilización de muchos motores de los catálogos usuales) o no pueden emplearse esos convertidores en las aplicaciones existentes. Por lo tanto, existe una gran necesidad de un convertidor que pueda generar una salida más próxima a la sinusoidal ideal.

Niveles del inversor

El inversor más sencillo es el convertidor de dos niveles. Se llama de dos niveles porque únicamente puede aplicar dos niveles de tensión: la tensión de alimentación de CC y su inversa. El convertidor de tres niveles de punto neutro fijo (NPC) es una ampliación de este concepto que aplica además la tensión del punto neutro →1a y produce las configuraciones de conmutación del tipo mostrado en →1c.

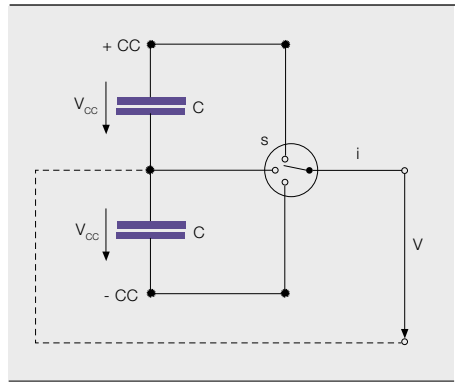
Se han diseñado convertidores que avanzan un poco más y producen cinco niveles de tensión. Sin embargo, esos circuitos suelen ser mucho más complejos. Por ejemplo, si el suministro de CC exige cinco niveles de tensión en lugar de tres, serán precisos más diodos y condensadores de fijación y los correspondientes circuitos de control y carga. Un método alternativo es conectar convertidores en serie. Esto también contribuye a complicar el circuito de alimentación de CC debido a la necesidad de aislar galvánicamente las alimentaciones y, por lo tanto, de usar costosos transformadores. Estas soluciones pueden ser aceptables para niveles de potencia altos, pero la parte baja de la media tensión requiere soluciones más sencillas.

ABB se propuso resolver estos problemas y encontró una solución que genera cinco niveles sin añadir complejidad a la alimentación de CC. Una alimentación de CC de tres niveles no puede producir por sí sola cinco niveles de tensión, por lo que el circuito precisa un condensador extra para cada fase de salida. Pero la solución que ABB ha creado ingeniosamente mantiene cargado este condensador sin necesidad de un circuito de control especial.

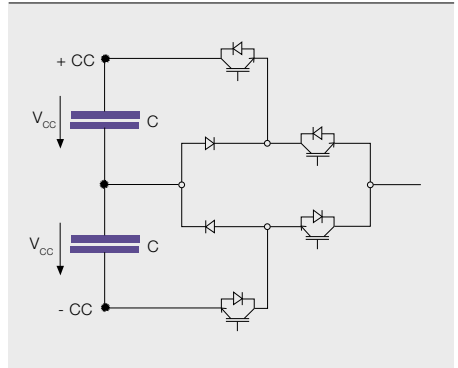
El ANPC-5L

Los conceptos básicos del convertidor de 5 niveles de punto neutro fijo activo (ANPC-5L) se presentan en →2a. El condensador de fase C_{ph} se mantiene cargado a la mitad de la tensión de los condensadores de la conexión de CC, es decir, a una cuarta parte de la tensión total de la misma. El principio general es que se puede considerar el circuito como un convertidor NPC de tres niveles más un condensador extra. Este condensador de fase

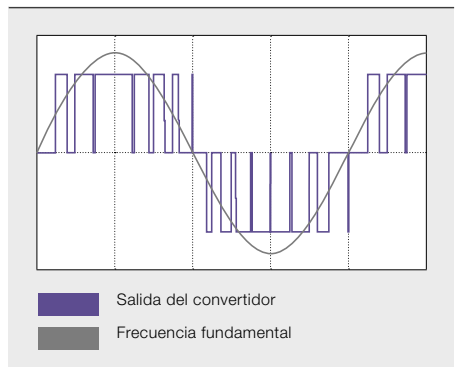
1 Los principios básicos de un convertidor NPC (solamente se muestra una fase)



1a Principio de funcionamiento



1b Circuito



1c Onda de tensión (ejemplo)

Un inversor (un circuito que convierte la CC en CA) funciona según el principio de conmutación entre distintos niveles de tensión de CC. La tensión de salida no presenta por ello la forma de una onda sinusoidal de CA, sino una configuración de impulsos rectangulares de alta frecuencia que trata de parecerse a la onda sinusoidal con la mayor precisión posible →1c. Una analogía sería una fotografía digital de baja resolución. La fotografía no tiene un parecido exacto con el objeto que describe, pues el escaso número de píxeles limita el detalle que se puede representar. La posibilidad de aproximarse a una onda sinusoidal ideal mediante impulsos rectangulares está asimismo limitada por el número de niveles de tensión disponibles. Sin embargo, a diferencia de la fotografía, el problema no es solamente una cuestión de estética: que la forma no sea la sinusoidal ideal provoca la presencia de armónicos (corrientes y tensiones de alta frecuencia) que pueden tener efectos que van desde sobrecargas en el aislamiento y los cojinetes de apoyo de los motores a interferencias con otros equipos. Se pueden utilizar filtros para uniformizar la salida absorbiendo los armónicos que causan problemas, pero ello supone a la vez un incremento de costes y una causa de pérdidas añadida. Para abordar los efectos de estos armónicos, o bien se diseñan motores que soporten las sobrecar-

El ANPC-5L precisa solamente un condensador más por fase que un convertidor NPC de tres niveles.

se conecta en serie con el convertidor de tres niveles cuando sea necesario y proporciona dos niveles intermedios más de salida.

La alimentación de CC es idéntica a la de un convertidor NPC de tres niveles. La celda 1 de →2b es claramente similar en su topología a un convertidor NPC de tres niveles →1b. De forma similar a un circuito de ese tipo, los dispositivos de conmutación IGBT (transistor bipolar de puerta aislada) de la celda 1 soportan la mitad de la tensión de la conexión de CC. Gracias a que el condensador añadido está cargado a un cuarto de la tensión de la conexión de CC, los IGBT de las celdas 2 y 3 soportan esta tensión inferior. Esta utilización de los dispositivos con cargas inferiores contribuye a la sencillez del convertidor. La elegancia del diseño se hace aún más evidente cuando se considera que únicamente precisa un condensador más por fase que un convertidor NPC de tres niveles. El convertidor ofrece funcionalidad total de cuatro cuadrantes (se puede hacer la conversión en ambas direcciones).

Funcionamiento del ANPC-5L

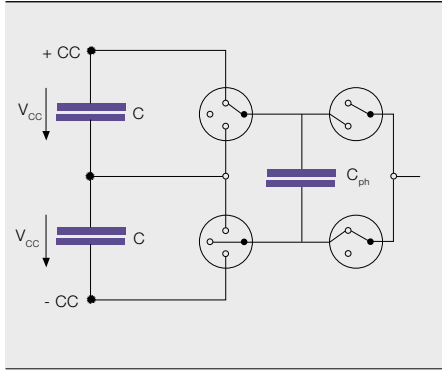
Los dispositivos de conmutación de la celda 1 (en →2b) trabajan de forma complementaria, con S1 y Snp2 trabajando conjuntamente (y de la misma forma S4 y Snp1). Los aparatos de la celda 2 trabajan en oposición, al igual que los de celda 3. El número total de estados de conmutación por fase se muestra en → 3.

En total, son posibles ocho estados. Puesto que el convertidor solamente tiene cinco niveles de salida, algunos estados son redundantes. Sin embargo, en vez de deducir de ello que algunos estados del convertidor no se utilizan jamás, el estudio de → 3 revela que para dos de los tres pares de estados redundantes, es decir, V1/V2 y V5/V6, se pueden conseguir efectos opuestos en la carga del condensador de fase. → 4 compara V5 y V6 y muestra la forma en que V6 resta VDC/2 de la tensión de la conexión de CC, mientras que V5 suma ese valor a la tensión del punto neutro. En consecuencia, la corriente que atraviesa el condensador de fase va en la dirección opuesta. Esta característica se puede utilizar para mantener la tensión necesaria en el condensador de fase sin ningún otro circuito de carga.

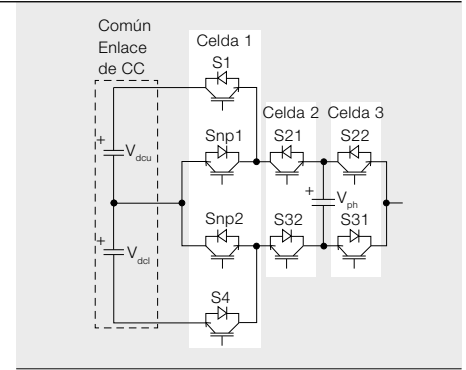
El ACS 2000

La unidad ACS 2000 utiliza dos convertidores adosados de cinco niveles (B2B). La

2 Principio en que se basa el convertidor ANPC-5L (sólo se muestra una fase)



2a Principio de funcionamiento



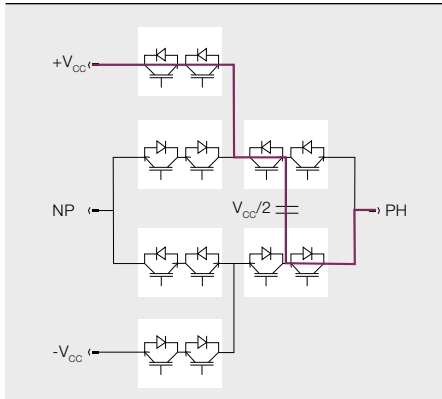
2b Circuito

El condensador C_{ph} se mantiene cargado a la mitad de la tensión del condensador del enlace de CC.

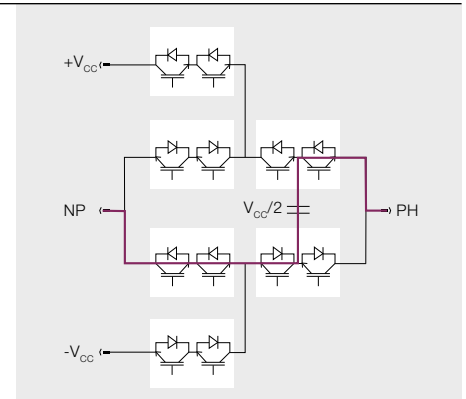
3 Estados de fase del convertidor ANPC-5L

Celda 3				Celda 2		Celda 1		Nivel de salida	Desfase de tensión	Efecto sobre C _{ph}		Efecto sobre V _{np}		Vector de cambio
S4	Snp2	Snp1	S1	S32	S21	S31	S22			i>0	i<0	i>0	i<0	
1	0	1	0	1	0	1	0	-2	-V	0	0	0	0	V0
1	0	1	0	1	0	0	1	-1	-V/2	-	+	0	0	V1
1	0	1	0	0	1	1	0	-1	-V/2	+	-	-	+	V2
1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	-	+	V3
0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	-	+	V4
0	1	0	1	1	0	0	1	+1	V/2	-	+	-	+	V5
0	1	0	1	0	1	1	0	+1	V/2	+	-	0	0	V6
0	1	0	1	0	1	0	1	+2	V	0	0	0	0	V7

4 Dos trayectorias distintas de la corriente que producen la misma tensión de salida.



4a Estado de cambio V6 desde → 3



4b Estado de cambio V5 desde → 3

La dirección opuesta de la corriente en C_{ph} permite mantener la carga de este condensador.

configuración básica del ACS 2000 se presenta en →5.

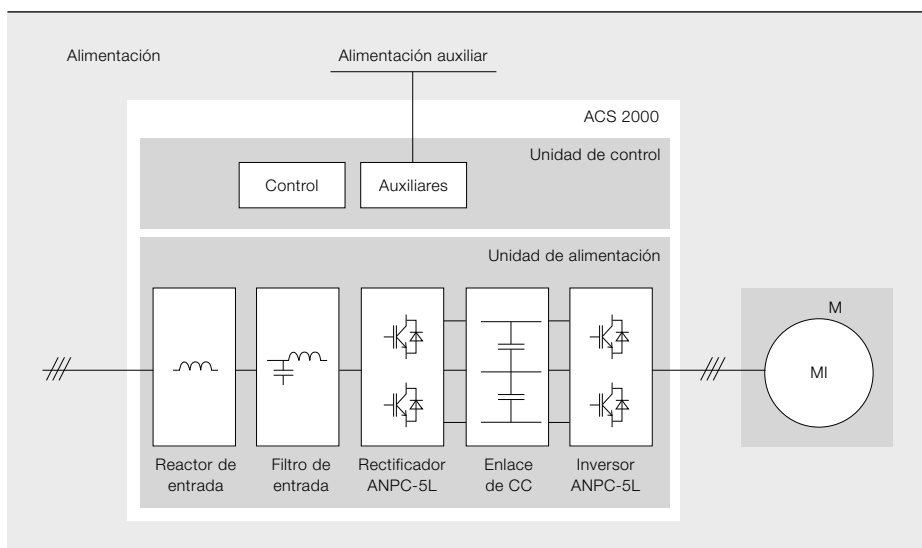
Diseño mecánico

El ACS 2000 sin transformadores →6 se ha diseñado para maximizar el tiempo de funcionamiento gracias a su construcción modular. Los componentes están dimensionados para que cumplan la vida de servicio esperada y se ha facilitado en la parte delantera el acceso a todos los componentes críticos. El diseño por cajones de los módulos de fase facilita una sustitución rápida y segura en caso de avería.

Un componente clave del concepto modular es el módulo de fase →7.

El módulo incluye los componentes principales de una fase del convertidor (como se muestra en →2b), incluidos los semiconductores de potencia, la unidad de puerta y el condensador de fase. Además, el módulo incluye una tarjeta de interfaz con el control del nivel superior, así como los equipos de medida de intensidad y tensión. Esto permite una interconexión sencilla, ya que únicamente se precisa una conexión de alimentación y un enlace de fibra óptica. Las conexiones que llevan corriente se realizan mediante enchufes de contacto.

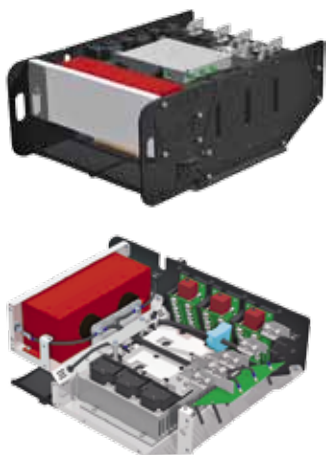
5 Configuración básica de la unidad ACS 2000



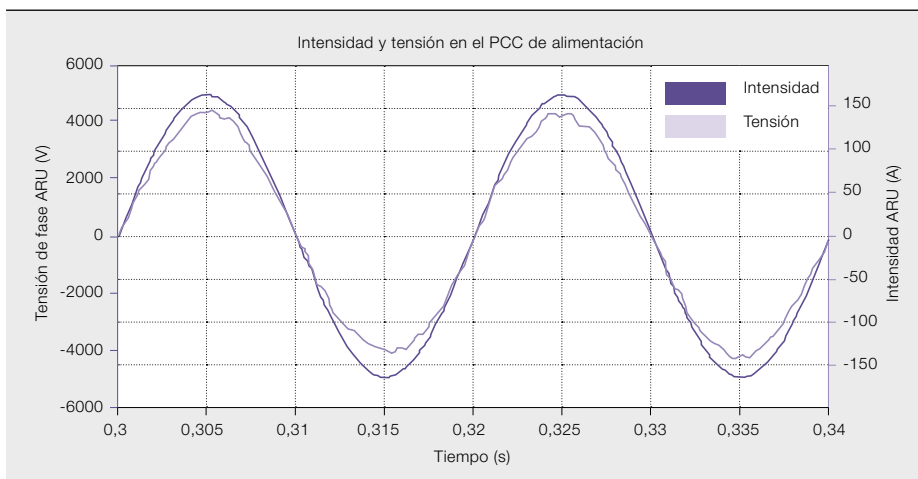
6 Unidad ACS 2000 sin transformador de 800 kW 6kV



7 Módulo de fase de la ACS 2000



8 Tensión e intensidad de la entrada del accionamiento que ilustra el funcionamiento con un factor de potencia unitario



El ACS 2000 sin transformadores se ha diseñado para maximizar el tiempo de funcionamiento gracias a su construcción modular.

Gracias a esta sencillez, el usuario puede cambiar un módulo en minutos.

Pruebas

Se ha probado el ACS 2000 en configuración B2B. Se instalaron dos unidades de accionamiento ACS 2000: el DUT (dispositivo sometido a prueba) y un inversor de carga. Las dos unidades fueron alimentadas desde una conexión a la red trifásica común y se conectaron a sus correspondientes máquinas eléctricas (que compartían un mismo eje). Una consecuencia práctica de esta interconexión es que la alimentación solamente tiene que cubrir las pérdidas del sistema de accionamiento. Como ambas unidades (DUT e inversor de carga) eran ACS 2000, era posible observar simultáneamente los modos de propulsión y generación. También se realizaron pruebas B2B a largo plazo para verificar la alta fiabilidad de las unidades.

Prestaciones de entrada y salida

Las prestaciones del rectificador se muestran en →8.

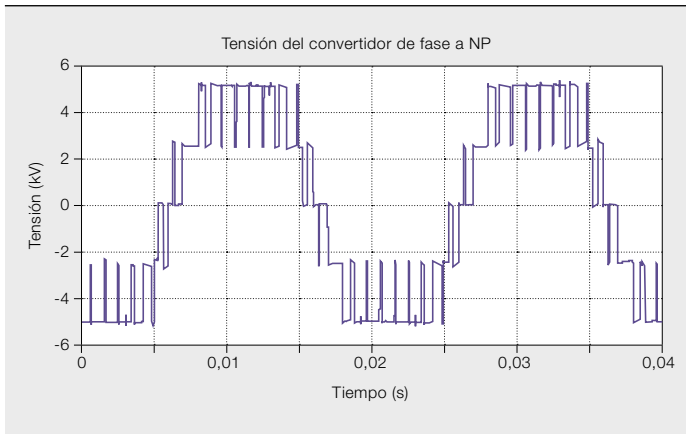
El inversor de cinco niveles entrega al motor una tensión entre fases de nueve niveles. Las formas de onda usuales de tensión y corriente se muestran en →9.

El nuevo inversor de cinco niveles produce una salida que está razonablemente cerca de la forma sinusoidal y que cumple los requisitos para el accionamiento de motores diseñados para la conexión directa en línea (DOL) sin necesidad de reducir sus características.

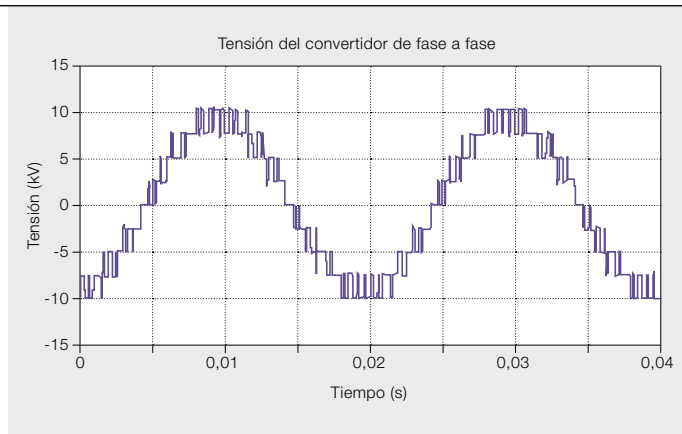
Funcionamiento en caso de cortes de alimentación

Se puede utilizar la combinación de la tecnología multinivel ANPC 5L y el comportamiento dinámico de control directo del par para evitar la desconexión del accionamiento, incluso en el caso de que se produzca un corte de la corriente de red que

9 Formas de onda de la tensión a partir de las mediciones



9a Onda de 5 niveles (fase a neutro)



9b Onda de 9 niveles (fase a fase)

dure varios segundos. También puede seguir funcionando cuando algunas de las alimentaciones auxiliares dejan de funcionar durante un tiempo limitado. La máxima duración admisible para un corte de corriente depende de la carga, de la máquina y del punto de trabajo antes de que se produjera el corte de suministro.

Durante el desarrollo de la operación en caso de fallo, la tensión de la conexión de CC se mantiene en un nivel especificado para mantener la magnetización de la máquina. Para ello, se devuelve la energía de la masa giratoria del motor y la carga a través del inversor para compensar las pérdidas y mantener la tensión de la conexión

Las mediciones de campo realizadas en una instalación real del cliente se muestran en →10.

El corte de la alimentación de la red duró un segundo. →10a muestra cómo bajan hasta cero la tensión de la red y la corriente de entrada. En →10c, se regenera el par del motor durante el corte para mantener la tensión de la conexión de CC →10b. Cuando vuelve la tensión de la red, el par vuelve rápidamente al modo de propulsión.

Aplicaciones y logros

El ACS 2000 está diseñado para diversos campos de aplicaciones en varias industrias dentro del mercado de accionamientos de uso general, como se muestra en →11.

El accionamiento que ha ganado un premio

En diciembre de 2010, la empresa de consultoría, Frost and Sullivan otorgó al ACS 2000 el Premio Europeo 2010 a la Innovación para Nuevos Productos de Accionamientos de Media Tensión. Frost y Sullivan expresó que “el producto presenta ven-

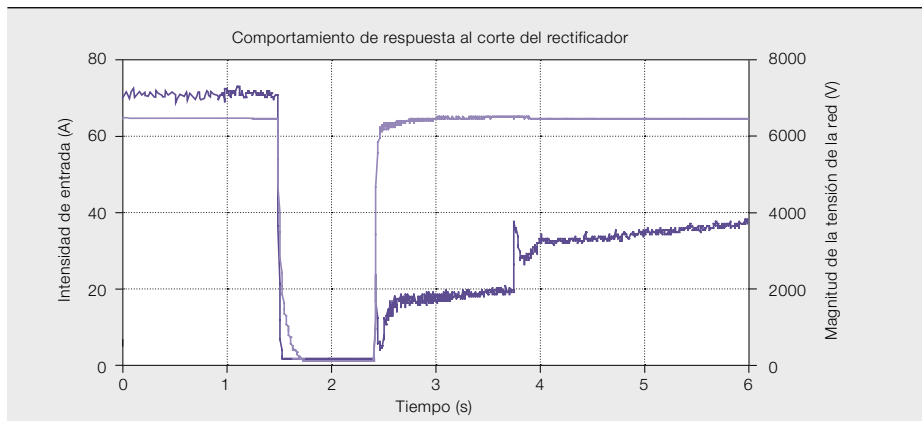
El nuevo inversor de cinco niveles produce una salida que cumple los requisitos para el accionamiento de motores diseñados para la conexión directa en línea (DOL) sin necesidad de reducir sus características.

Se puede utilizar la combinación de la topología multinivel ANPC 5L y el comportamiento dinámico de control directo del par para evitar la desconexión del accionamiento, incluso en el caso de que se produzca un corte de la corriente de red que dure varios segundos.

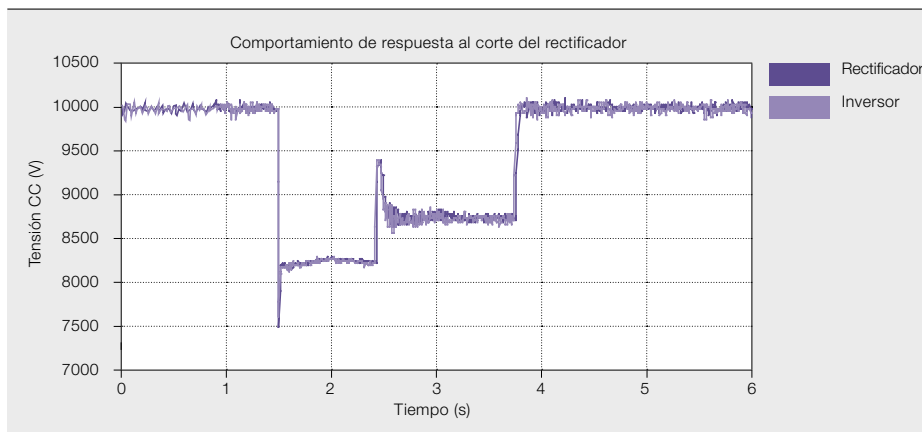
de CC. Se puede mantener el modo de marcha en caso de fallo mientras la masa giratoria tenga la energía suficiente para atender estas necesidades. Cuando se recupera la tensión de la alimentación de la red, comienza inmediatamente la aceleración de la máquina hasta la velocidad deseada.

tajas tales como conexiones de alimentación con línea flexible, menores armónicos, consumo de energía reducido, facilidad de instalación y puesta en servicio, alta fiabilidad y menor coste de propiedad. El único accionamiento con topología de inversor de fuente de tensión (VSI), diseño sin transformadores y control IGBT multi-

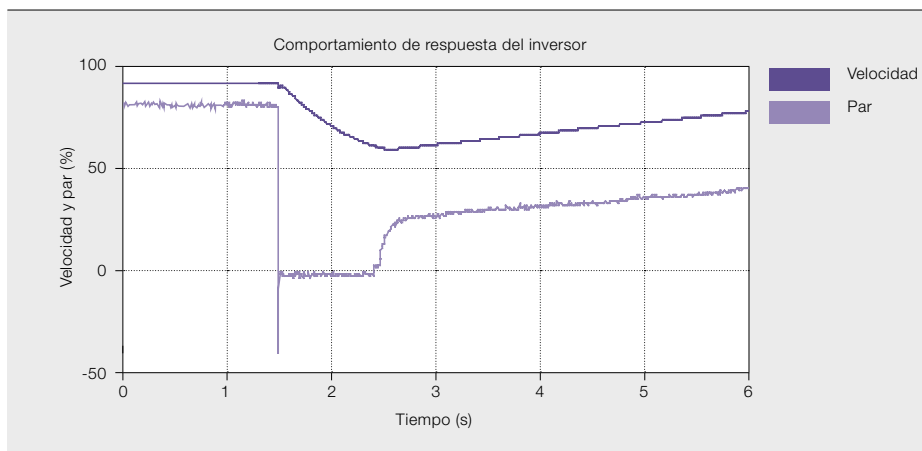
10 Supervivencia a un corte breve: medida del modo de respuesta al corte



10a Alimentación



10b Tensión del enlace de CC



10c Comportamiento

11 Sectores y aplicaciones de destino del ACS 2000

Sectores	Aplicaciones
Cemento, minería, minerales	Cintas transportadoras, trituradores, molinos, ventiladores y bombas
Química, petróleo y gas	Bombas, compresores, extrusores, mezcladores y sopladores
Metales	Ventiladores y bombas
Pasta y papel	Ventiladores, bombas, depuradoras, bombas de vacío y picadoras
Generación de electricidad	Ventiladores, bombas, cintas transportadoras y molinos de carbón
Agua	Bombas
Otras aplicaciones	Pruebas y túneles de viento

nivel patentado, el ACS 2000, marca un hito en el segmento de accionamientos de media tensión (MV) [...] El producto ofrece una serie de características de valor añadido, como sencillez de instalación, puesta en servicio y funcionamiento. Estos atributos son cruciales desde el punto de vista del usuario final."

Frederick Kieferndorf

Leonardo Serpa

Jan-Henning Fabian

Antonio Coccia (anteriormente en ABB)

ABB Corporate Research

Baden-Dättwil, Suiza

frederick.kieferndorf@ch.abb.com

leonardo.serpa@ch.abb.com

jan-henning.fabian@ch.abb.com

Michael Basler

Power Electronics and Medium Voltage Drives

New Berlin, WI, Estados Unidos

michael.basler@us.abb.com

Gerald Scheuer

Power Electronics and Medium Voltage Drives

Turgi, Suiza

gerald-a.scheuer@ch.abb.com

Lecturas recomendadas

La parte técnica de este artículo se basa en un documento presentado en el simposio de Pisa en junio de 2010.

Debido a problemas de espacio, el presente artículo se acortó considerablemente con respecto al documento original; se recomienda a los lectores interesados en más detalles que lean la versión original [1].

Los autores desean reconocer las aportaciones de compañeros actuales y anteriores al desarrollo de esta tecnología: P. Barbosa, N. Celanovic, M. Winkelkemper, F. Wildner, C. Haed-erli, P. Steimer, J. Steinke y muchos otros.

Referencias

[1] Kieferndorf, F.; Basler, M.; Serpa, L. A.; Fabian, J.-H.; Coccia A.; Scheuer, G.A. (junio de 2010). ANPC-5L technology applied to medium-voltage variable-speed drives applications. Paper presented at the International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Pisa, Italia. CD-ROM Proceedings.

Imagen del título

Los accionamientos aparecen en todas partes en centrales e industrias y se presentan en todas las categorías de potencia, desde pequeños ventiladores hasta grandes trituradoras. La imagen corresponde a la central eléctrica de Torrevaldaliga Norte en Italia.