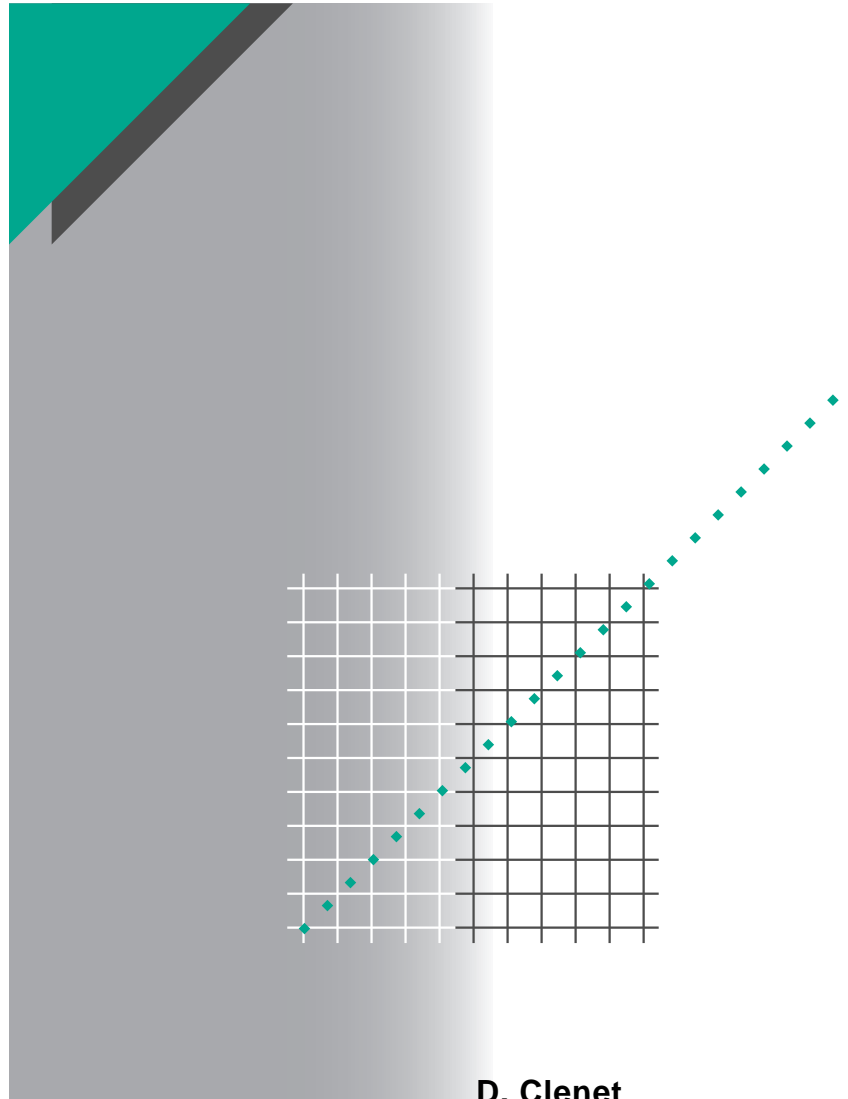


# Cuaderno Técnico nº 208

## Arrancadores y variadores de velocidad electrónicos



D. Clenet



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](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 208 de Schneider Electric».

# Cuaderno Técnico nº 208

## Arrancadores y variadores de velocidad electrónicos



### Daniel CLENET

Diplomado en la Escuela Nacional de Ingenieros de Brest en 1969. Después de una primera experiencia en variación de velocidad en la sociedad Alstom, ingresó en 1973 en Telemecanique en la actividad de variadores de velocidad como ingeniero de desarrollo. Ha centrado su trabajo sobre los variadores de velocidad para motores de corriente continua destinados al mercado de máquinas-herramienta, variadores para carretillas de mantenimiento; también ha participado en el desarrollo de los primeros variadores de velocidad para motores asíncronos.

Su experiencia en las aplicaciones se deriva de los contactos con los clientes usuarios y de la actividad como jefe de proyecto en el Departamento de Aplicaciones Industriales de Schneider Electric. A él se debe el lanzamiento del variador Altivar en USA en los años 86 a 90.

Trad.: J.M. Giró

Original francés: noviembre 2003

Versión española: septiembre 2004



# Arrancadores y variadores de velocidad electrónicos

El arranque directo sobre la red de distribución de los motores asíncronos es la solución más extendida y frecuentemente la más conveniente para una gran variedad de máquinas. Sin embargo, puede presentar inconvenientes que lleguen a ser perjudiciales en ciertas aplicaciones e incluso hasta incompatibles con el funcionamiento deseado de la máquina:

- corriente de arranque que puede alterar la marcha de otros aparatos conectados en la misma red,
- sacudidas mecánicas al arrancar, inaceptables para la máquina y para el confort y seguridad de los usuarios,
- imposibilidad de controlar la aceleración y deceleración,
- imposibilidad variar la velocidad.

Los arrancadores y los variadores de velocidad eliminan estos inconvenientes. La tecnología electrónica les ha proporcionado mayor flexibilidad y ha ampliado su campo de aplicación. Pero todavía queda elegir bien.

El objetivo de este Cuaderno Técnico es dar a conocer mejor estos dispositivos para facilitar su definición durante el diseño de los equipos y para mejorar y, hasta sustituir, un conjunto motor-dispositivo de mando y de protección.

<b>1 Recordatorio</b>	1.1 Historia	<b>p. 5</b>
	1.2 Revisión: las principales funciones de los arrancadores y variadores de velocidad electrónicos	p. 5
<b>2 Los principales modos de funcionamiento y principales tipos de variadores electrónicos</b>		<b>p. 7</b>
	2.1 Los principales modos de funcionamiento	p. 7
	2.2 Los principales tipos de variadores	p. 9
<b>3 Estructura y componentes de los arrancadores y variadores electrónicos</b>		<b>p. 11</b>
	3.1 Estructura	p. 11
	3.2 Componentes	p. 12
<b>4 Variador-regulador para motor de corriente continua</b>		<b>p. 15</b>
	4.1 Principio general	p. 15
	4.2 Modos de funcionamiento posibles	p. 16
<b>5 Convertidor de frecuencia para motor asíncrono</b>		<b>p. 17</b>
	5.1 Principio general	p. 17
	5.2 Funcionamiento en U/f	p. 18
	5.3 Control vectorial	p. 19
	5.4 Regulador de tensión para motor asíncrono	p. 22
	5.5 Motovariadores síncronos	p. 24
	5.6 Motovariadores paso a paso	p. 24
<b>6 Funciones complementarias de los variadores de velocidad</b>		<b>p. 26</b>
	6.1 Opciones de diálogo	p. 26
	6.2 Las funciones integradas	p. 26
	6.3 Las tarjetas opcionales	p. 27
<b>7 Conclusión</b>		<b>p. 28</b>

# 1 Recordatorio

## 1.1 Historia

Para arrancar los motores eléctricos y controlar su velocidad, han sido una primera solución los reostatos de arranque, los variadores mecánicos y los grupos giratorios (especialmente el Ward Leonard); posteriormente los arrancadores y variadores electrónicos se han impuesto en la industria como la solución moderna, económica, fiable y sin mantenimiento.

Un variador o arrancador electrónico es un convertidor de energía cuya misión es controlar la que se proporciona al motor. Los arrancadores electrónicos se destinan exclusivamente a los motores asíncronos. Forman parte de la familia de los reguladores de tensión. Los variadores de velocidad aseguran una aceleración y deceleración progresivas y permiten fijar con precisión la velocidad en las condiciones de explotación. Los variadores de velocidad son similares a los rectificadores controlados para alimentar a los motores de corriente continua, pero los destinados a alimentar motores de corriente alterna son convertidores de frecuencia.

Históricamente, el variador para motor de corriente continua fue la primera solución propuesta. Los avances de la electrónica de potencia y de la microelectrónica han permitido la construcción de convertidores de frecuencia fiables y económicos. Los convertidores de frecuencia modernos permiten la alimentación de motores asíncronos estándar con prestaciones análogas a los mejores variadores de velocidad de corriente continua. Ciertos constructores proponen incluso motores asíncronos con variadores de velocidad electrónicos montados en una envolvente con bornes adaptados; esta solución se propone para conjuntos de baja potencia (algunos kW). Al final de este Cuaderno Técnico se comenta la evolución reciente de los variadores de velocidad y la tendencia que siguen los fabricantes. Esta evolución amplía notablemente la oferta y las posibilidades de los variadores.

## 1.2 Revisión: las principales funciones de los arrancadores y variadores de velocidad electrónicos

### Aceleración controlada

La aceleración del motor se controla mediante una rampa de aceleración lineal o en «S». Generalmente, esta rampa es controlable y permite por tanto elegir el tiempo de aceleración adecuado para la aplicación.

### Variación de velocidad

Un variador de velocidad no puede ser al mismo tiempo un regulador. En este caso, es un sistema, rudimentario, que posee un mando controlado mediante las magnitudes eléctricas del motor con amplificación de potencia, pero sin bucle de realimentación: es lo que se llama «en bucle abierto».

La velocidad del motor se define mediante un valor de entrada (tensión o corriente) llamado consigna o referencia. Para un valor dado de la consigna, esta velocidad puede variar en función de las perturbaciones (variaciones de la tensión de alimentación, de la carga, de la temperatura).

El margen de velocidad se expresa en función de la velocidad nominal.

### Regulación de velocidad

Un regulador de velocidad es un dispositivo controlado (figura 1). Posee un sistema de mando con amplificación de potencia y un bucle de alimentación: se denomina, «bucle abierto».

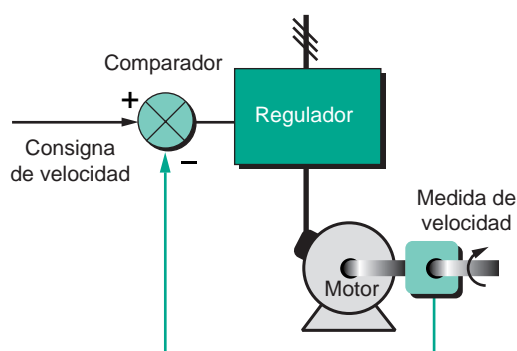


Fig. 1: Principio de funcionamiento de la regulación de velocidad.

La velocidad del motor se define mediante una consigna o referencia.

El valor de la consigna se compara permanentemente con la señal de alimentación, imagen de la velocidad del motor. Esta señal la suministra un generador tacométrico o un generador de impulsos colocado en un extremo del eje del motor.

Si se detecta una desviación como consecuencia de una variación de velocidad, las magnitudes aplicadas al motor (tensión y/o frecuencia) se corrigen automáticamente para volver a llevar la velocidad a su valor inicial.

Gracias a la regulación, la velocidad es prácticamente insensible a las perturbaciones.

La precisión de un regulador se expresa generalmente en % del valor nominal de la magnitud a regular.

#### **Deceleración controlada**

Cuando se desconecta un motor, su deceleración se debe únicamente al par resistente de la máquina (deceleración natural). Los arrancadores y variadores electrónicos permiten controlar la deceleración mediante una rampa lineal o en «S», generalmente independiente de la rampa de aceleración.

Esta rampa puede ajustarse de manera que se consiga un tiempo para pasar de la velocidad de régimen fijada a una velocidad intermedia o nula:

- Si la deceleración deseada es más rápida que la natural, el motor debe desarrollar un par resistente que se debe sumar al par resistente de la máquina; se habla entonces de frenado eléctrico, que puede efectuarse reenviando energía a la red de alimentación, o disipándola en una resistencia de frenado.
- Si la deceleración deseada es más lenta que la natural, el motor debe desarrollar un par superior al par resistente de la máquina y continuar arrastrando la carga hasta su parada.

#### **Inversión del sentido de giro**

La mayoría de los variadores actuales tienen implementada esta función. La inversión de la secuencia de fases de alimentación del motor se realiza automáticamente o por inversión de la consigna de entrada, o por una orden lógica en un borne, o por la información transmitida a mediante una red.

#### **Frenado**

Este frenado consiste en parar un motor pero sin controlar la rampa de desaceleración. Con los arrancadores y variadores de velocidad para motores asíncronos, esta función se realiza de forma económica inyectando una corriente continua en el motor, haciendo funcionar de forma especial la etapa de potencia. Toda la energía mecánica se disipa en el rotor de la máquina y, por tanto, este frenado sólo puede ser intermitente. En el caso de un variador para motor de corriente continua, esta función se realiza conectando una resistencia en bornes del inducido.

#### **Protecciones integradas**

Los variadores modernos aseguran tanto la protección térmica de los motores como su propia protección. A partir de la medida de la corriente y de una información sobre la velocidad (si la ventilación del motor depende de su velocidad de rotación), un microprocesador calcula la elevación de temperatura de un motor y suministra una señal de alarma o de desconexión en caso de calentamiento excesivo.

Además, los variadores, y especialmente los convertidores de frecuencia, están dotados de protecciones contra:

- los cortocircuitos entre fases y entre fase y tierra,
- las sobretensiones y las caídas de tensión,
- los desequilibrios de fases,
- el funcionamiento en monofásico.

## 2 Los principales modos de funcionamiento y principales tipos de variadores electrónicos

### 2.1 Los principales modos de funcionamiento

Los variadores de velocidad pueden, según el convertidor electrónico, o hacer funcionar un motor en un solo sentido de rotación, y se llaman «unidireccionales», o en los dos sentidos de la marcha, y se llaman entonces «bidireccionales».

Los variadores son «reversibles» cuando pueden recuperar la energía del motor al funcionar como generador (modo frenado). La reversibilidad se obtiene o retornando la energía hacia la red (puente de entrada reversible), o disipando la energía recuperada en una resistencia con un chopper de frenado.

La **figura 2** muestra las cuatro situaciones posibles de la gráfica par-velocidad de una máquina resumidas en la tabla que le acompaña.

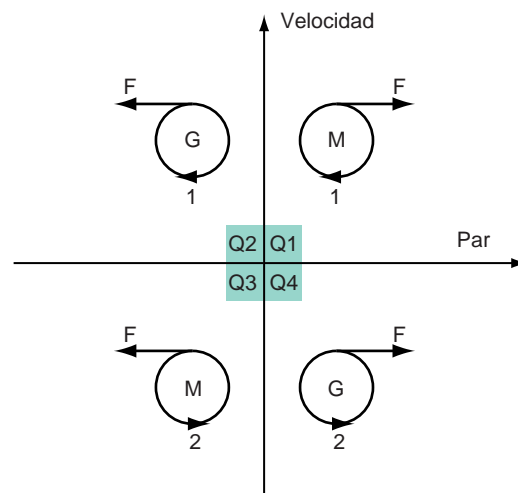
Hay que indicar que cuando la máquina funciona como generador recibe una fuerza de arrastre. Este estado se utiliza especialmente

para el frenado. La energía cinética disponible en el eje de la máquina, o se transfiere a la red de alimentación, o se disipa en las resistencias, o, para pequeñas potencias, en la misma máquina, como pérdidas.

#### Variador unidireccional

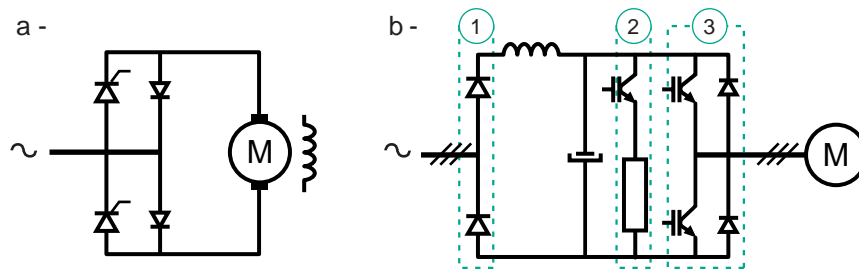
Este tipo de variador, la mayor parte de veces no reversible, se emplea para:

- un motor cc, con un convertidor directo (ca → cc) con un puente mixto con diodos y tiristores (**figura 3a**),
- un motor ca, con un convertidor indirecto (con transformación intermedia en cc) con un puente de diodos a la entrada seguido de un convertidor de frecuencia que hace funcionar la máquina en el primer cuadrante (**figura 3b**). En algunos casos este montaje puede utilizarse en bidireccional (cuadrantes 1 y 3).



Sentidos rotación	Funcionamiento	Par -C-	Velocidad -n-	Producto C.n	Cuadrante
1 (horario)	Como motor	sí	sí	sí	1
	Como generador		sí		2
2 (antihorario)	Como motor			sí	3
	Como generador	sí			4

**Fig. 2:** Los cuatro estados posibles de una máquina en su gráfica par-velocidad.



**Fig. 3:** Esquema de principio: **[a]** convertidor directo con puente mixto; **[b]** convertidor indirecto con (1) puente de entrada de diodos (2) unidad de frenado (resistencia y chopper) (3) convertidor de frecuencia.

Un convertidor indirecto que tiene un chopper de frenado y una resistencia convenientemente dimensionada sirven perfectamente para un frenado momentáneo (ralentización de una máquina elevadora cuando el motor debe desarrollar un par de frenado al bajar para retener la carga).

En caso de funcionamiento prolongado del motor con una carga que lo arrastre, es imprescindible un convertidor reversible, porque la carga es entonces negativa, por ejemplo, en el motor utilizado al frenar en un banco de pruebas.

#### Variador bidireccional

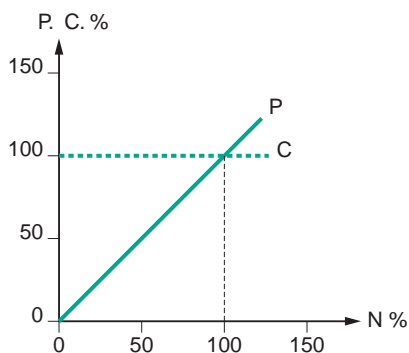
Este tipo de variador puede ser un convertidor reversible o no reversible.

Si es reversible, la máquina funciona en los cuatro cuadrantes y puede permitir un frenado importante.

Si es no reversible, sólo funciona en los cuadrantes 1 y 3.

#### Funcionamiento a par constante

Se denomina funcionamiento a par constante cuando las características de la carga son tales, que, en régimen permanente, el par solicitado es sensiblemente constante sea cual sea la velocidad (figura 4). Este modo de funcionamiento se utiliza en las cintas transportadoras y en las amasadoras. Para este tipo de aplicaciones, el variador debe tener la capacidad de proporcionar un par de arranque importante (1,5 veces o más el par nominal) para vencer los rozamientos estáticos y para acelerar la máquina (inercia).

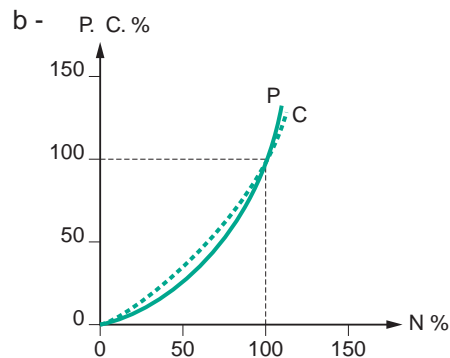
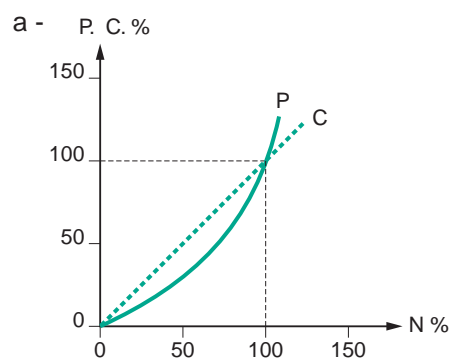


**Fig. 4:** Curva de funcionamiento a par constante.

#### Funcionamiento a par variable

Se denomina funcionamiento a par variable cuando las características de la carga son tales que en régimen permanente, el par solicitado varía con la velocidad. Es en concreto el caso de las bombas volumétricas con tornillo de Arquímedes cuyo par crece linealmente con la velocidad (figura 5a) o las máquinas centrífugas (bombas y ventiladores) cuyo par varía con el cuadrado de la velocidad (figura 5b).

Para un variador destinado a este tipo de aplicaciones, es suficiente un par de arranque mucho menor (en general 1,2 veces el par nominal del motor). Muy frecuentemente dispone de funciones complementarias como la posibilidad de omitir las frecuencias de resonancia correspondientes a las vibraciones indeseables de la máquina. Es imposible funcionar más allá de la frecuencia nominal de la máquina porque sería una carga insoportable para el motor y el variador.



**Fig. 5:** Curva de funcionamiento a par variable.



### Funcionamiento a potencia constante

Es un caso particular del par variable. Se denomina funcionamiento a potencia constante cuando el motor proporciona un par inversamente proporcional a la velocidad angular (figura 6).

Es el caso, por ejemplo, de una enrolladora cuya velocidad angular debe disminuir poco a poco a medida que aumenta el diámetro de la bobina por acumulación de material. Es también el caso de los motores de huso de las máquinas herramienta.

El margen de funcionamiento a potencia constante es por definición limitado: a baja velocidad, por la corriente proporcionada por el variador, y a gran velocidad, por el par disponible del motor. En consecuencia, el par motor disponible con los motores asíncronos y la capacidad de conmutación de las máquinas de corriente continua deben ser comprobados.

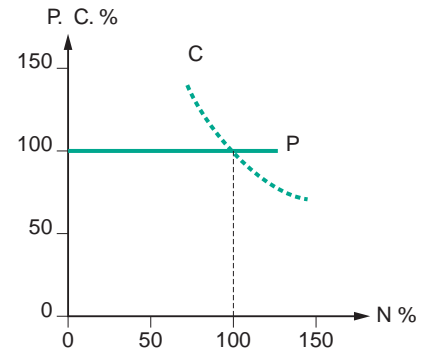


Fig. 6: Curva de funcionamiento a potencia constante.

## 2.2 Los principales tipos de variadores

En este capítulo se citan únicamente los variadores más frecuentes y los montajes tecnológicos más usuales.

Existen numerosos esquemas de variadores de velocidad electrónicos: cascada hiposíncrona, cicloconvertidores, conmutadores de corriente, choppers... El lector interesado encontrará una descripción exhaustiva en las obras «Entraînement électrique à vitesse variable» (autores Jean Bonal y Guy Séguier) y «Utilisation industrielle des moteurs à courant alternatif» (autor Jean Bonal) de Editions Tec et Doc.

### Rectificador controlado para motor de corriente continua

Proporciona, a partir de una red de corriente alterna monofásica o trifásica, una corriente continua con control del valor medio de la tensión.

Los semiconductores de potencia constituyen un puente de Graëtz, monofásico o trifásico (figura 7). El puente puede ser mixto (diodos/tiristores) o completo (sólo tiristores). Esta última solución es la más frecuente porque permite un mejor factor de forma de la corriente suministrada.

El motor de corriente continua más utilizado tiene la excitación separada, salvo para pequeñas potencias, en las que suelen usarse frecuentemente motores de imán permanente.

La utilización de este tipo de variadores de velocidad se adapta bien a todas las aplicaciones. Los únicos límites vienen

impuestos por el propio motor de corriente continua, en especial por la dificultad de conseguir velocidades elevadas y la necesidad de mantenimiento (sustitución de las escobillas). Los motores de corriente continua y sus variadores asociados han sido las primeras soluciones industriales. Después de más de una década, su uso va en constante disminución en beneficio de los convertidores de frecuencia. En efecto, el motor asíncrono es a la vez más robusto y más económico que un motor de corriente continua. Contrariamente a los motores de corriente continua, los asíncronos se han estandarizado con envoltorio IP55, siendo por tanto prácticamente insensibles al entorno (goteo, polvo y ambientes peligrosos).

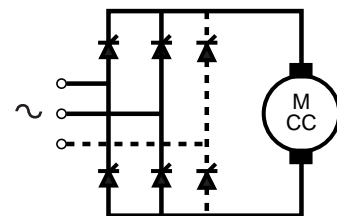


Fig. 7: Esquema de un rectificador controlado para motor de cc.

### Convertidor de frecuencia para motor asíncrono

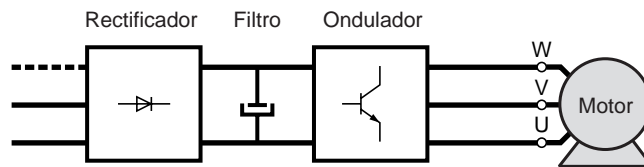
Suministra, a partir de una red de corriente alterna de frecuencia fija, una tensión alterna trifásica, de valor eficaz y frecuencia variables (**figura 8**). La alimentación del variador puede ser monofásica para pequeñas potencias (orden de magnitud de algunos kW) y trifásica para los mayores. Ciertos variadores de pequeña potencia aceptan indistintamente tensiones de alimentación mono y trifásicas. La tensión de salida del variador es siempre trifásica. De hecho, los motores asíncronos monofásicos no son adecuados para ser alimentados mediante convertidores de frecuencia.

Los convertidores de frecuencia alimentan los motores de jaula estándar con todas las ventajas

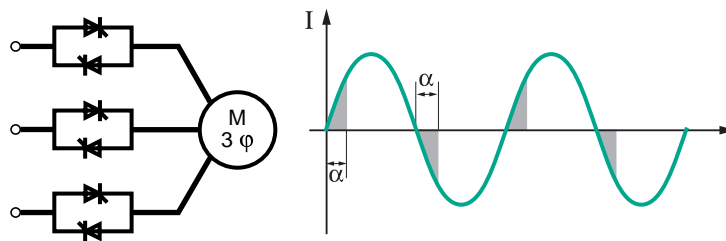
de estos motores: estandarización, bajo coste, robustez, estanqueidad, ningún mantenimiento. Puesto que estos motores son auto-ventilados, el único límite para su empleo es el funcionamiento a baja velocidad porque se reduce esta ventilación. Si se requiere este funcionamiento hay que prever un motor especial con una ventilación forzada independiente.

### Regulador de tensión para el arranque de motores asíncronos

Suministra, a partir de una red de corriente alterna, una corriente alterna de frecuencia fija igual a la de la red, mediante el control del valor eficaz de la tensión, modificando el ángulo de retardo de disparo de los semiconductores de potencia (dos tiristores montados en antiparalelo en cada fase del motor) (**figura 9**).



**Fig. 8:** Esquema de principio de un convertidor de frecuencia.



**Fig. 9:** Arrancador para motor asíncrono y forma de onda de la corriente de alimentación.

## 3 Estructura y componentes de los arrancadores y variadores electrónicos

### 3.1 Estructura

Los arrancadores y variadores de velocidad electrónicos se componen de dos módulos generalmente montados en una misma envolvente (**figura 10**):

- un módulo de control que controla el funcionamiento del aparato,
- un módulo de potencia que alimenta el motor con energía eléctrica.

#### El módulo de control

En los arrancadores y variadores modernos, todas las funciones se controlan mediante un microprocesador que gestiona la configuración, las órdenes transmitidas por un operador o por una unidad de proceso y los datos proporcionados por las medidas como la velocidad, la corriente, etcétera.

Las capacidades de cálculo de los microprocesadores, así como de los circuitos dedicados (ASIC) han permitido diseñar algoritmos de mando con excelentes prestaciones y, en particular, el reconocimiento de los parámetros de la máquina arrastrada. A partir de estas informaciones, el microprocesador gestiona las rampas de aceleración y deceleración, el control de la velocidad y la limitación de corriente, generando las señales de control de los componentes de potencia. Las protecciones y la seguridad son procesadas por circuitos especializados (ASIC) o están integradas en los módulos de potencia (IPM).

Los límites de velocidad, las rampas, los límites de corriente y otros datos de configuración, se

definen usando un teclado integrado o mediante PLC (sobre buses de campo) o mediante PC. Del mismo modo, los diferentes comandos (marcha, parada, frenado...) pueden proporcionarse desde interfaces de diálogo hombre/máquina, utilizando autómatas programables o PC.

Los parámetros de funcionamiento y las informaciones de alarma, y los defectos pueden verse mediante displays, diodos LED, visualizadores de segmentos o de cristal líquido o pueden enviarse hacia la supervisión mediante un bus de terreno.

Los relés, frecuentemente programables, proporcionan información de:

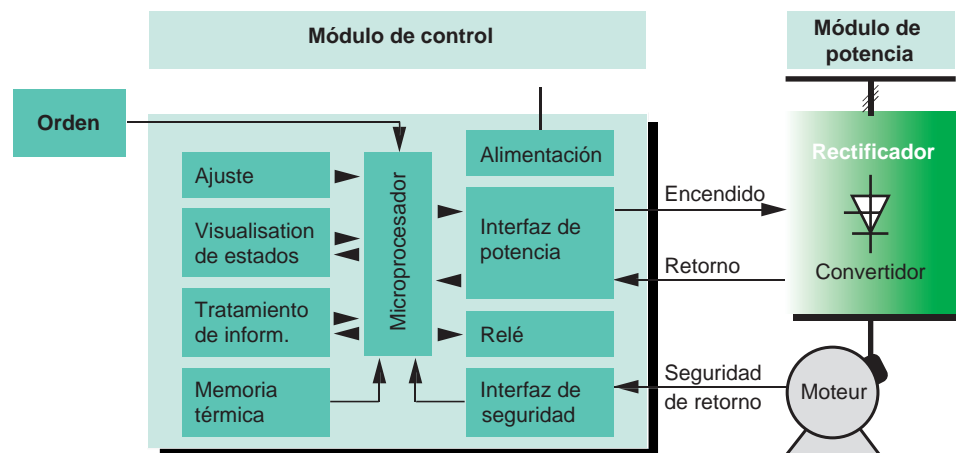
- fallos (de red, térmicos, de producto, de secuencia, de sobrecarga),
- vigilancia (umbral de velocidad, prealarma, final de arranque).

Las tensiones necesarias para el conjunto de circuitos de medida y de control son proporcionadas por una alimentación integrada en el variador y separadas galvánicamente de la red.

#### El módulo de potencia

El módulo de potencia está principalmente constituido por:

- componentes de potencia (diodos, tiristores, IGBT...),
- interfaces de medida de las tensiones y/o corrientes,
- frecuentemente de un sistema de ventilación.



**Fig. 10:** Estructura general de un variador de velocidad electrónico.

## 3.2 Componentes

Los componentes de potencia (**figura 11**) son semiconductores que funcionan en «todo o nada», comparables, por tanto, a los interruptores estáticos que pueden tomar dos estados: abierto o cerrado.

Estos componentes, integrados en un módulo de potencia, constituyen un convertidor que alimenta, a partir de la red a tensión y frecuencia fijas, un motor eléctrico con una tensión y/o frecuencia variables.

Los componentes de potencia son la clave de la variación de velocidad y los progresos realizados estos últimos años han permitido la fabricación de variadores de velocidad económicos.

### Repaso

Los elementos semiconductores, tales como el silicio, tienen una resistividad que se sitúa entre los conductores y los aislantes. Sus átomos poseen 4 electrones periféricos. Cada átomo se asocia con 4 átomos próximos para formar una estructura estable con 8 electrones.

Un semiconductor de tipo P se obtiene añadiendo al silicio puro una pequeña cantidad de un elemento que posea 3 electrones periféricos. Le falta, por tanto, un electrón para formar una estructura de 8 electrones, lo que se convierte en un exceso de carga positiva.

Un semiconductor de tipo N se obtiene añadiendo un elemento que posea 5 electrones periféricos. Por tanto, hay un exceso de electrones, es decir, exceso de carga negativa.

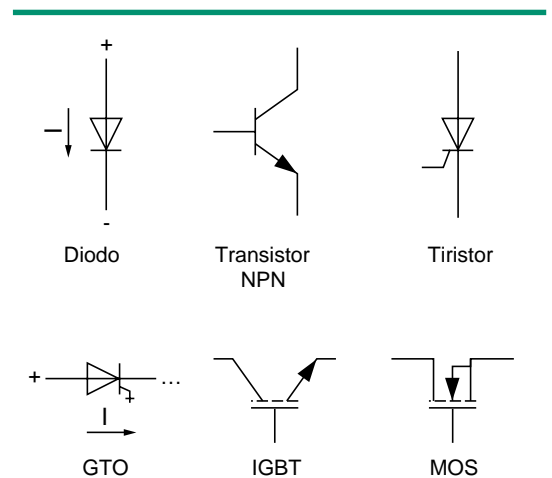
### El diodo

El diodo es un semiconductor no controlado que tiene dos zonas P (ánodo) y N (cátodo) y que no deja circular la corriente más que en un solo sentido, de ánodo a cátodo.

Conduce cuando el ánodo tiene una tensión positiva respecto al cátodo: se comporta entonces como un interruptor cerrado. Por el contrario, se bloquea y se comporta como un interruptor abierto si la tensión del ánodo es negativa respecto a la del cátodo.

El diodo posee las siguientes características principales:

- en estado de conducción
- una caída de tensión compuesta por una tensión umbral y una resistencia interna,
- una corriente máxima permanente admisible (orden de magnitud, hasta 5000 A, rms, para los componentes de mayor potencia),
- en estado de bloqueo o no conducción una tensión máxima admisible que puede sobrepasar los 5000 V de pico.



**Fig. 11:** Los componentes de potencia.

### El tiristor

Es un semiconductor controlado constituido por cuatro capas alternadas: PNPN.

Se comporta como un diodo al enviar un impulso eléctrico a un electrodo de mando llamado «puerta» o «gate». Este cierre (o encendido) no es posible si el ánodo está a una tensión más positiva que el cátodo.

El tiristor se bloquea cuando la corriente que lo atraviesa se anula.

La energía para el encendido o conducción que hay que suministrar a la puerta no depende de la corriente a controlar. Además, no es necesario mantener corriente en la puerta durante la conducción del tiristor.

El tiristor posee las siguientes características principales:

- en estado de conducción:
  - una caída de tensión compuesta de una tensión de umbral y de una resistencia interna,
  - una corriente máxima permanente admisible (orden de magnitud, hasta 5000 A rms para los componentes de mayor potencia).
- en estado de bloqueo:
  - una tensión inversa y directa máxima admisible, (que puede sobrepasar 5000 V de pico). En general las tensiones directas e inversas son iguales,
  - un tiempo de recuperación, que es el tiempo mínimo durante el cual no se puede aplicar una tensión positiva ánodo-cátodo so pena de que se produzca un reencendido espontáneo,
  - una corriente de puerta que permite la conducción del componente.

Hay tiristores para funcionar a la frecuencia de red y otros, llamados «rápidos», que pueden funcionar a algunos kHz, utilizando un circuito de extinción.

Los tiristores rápidos tienen a veces las tensiones de bloqueo directo e inverso asimétricas. En efecto, en los esquemas normales, están generalmente unidos a un diodo conectado en antiparalelo y los fabricantes de semiconductores utilizan esta particularidad para aumentar la tensión directa que el componente puede soportar en estado de bloqueo. Actualmente, estos componentes han sido sustituidos por el GTO, los transistores de potencia y sobre todo los IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).

### El tiristor GTO (Gate Turn Off thyristor)

Es una variante del tiristor rápido que tiene la particularidad de poder ser bloqueado por su puerta. Se envía una corriente positiva a la puerta o «gate», lo que produce el paso a conducción del semiconductor a condición de que el ánodo esté a una tensión más positiva que la del cátodo. Para mantener el GTO en estado de conducción y limitar la caída de tensión, la corriente de puerta debe mantenerse. El bloqueo se produce al invertir la polaridad de la corriente de puerta. El GTO se utiliza en los convertidores de muy gran potencia, porque es capaz de controlar grandes tensiones e intensidades (hasta 5000 V y 5000 A). Sin embargo, debido a los avances de los IGBT su tasa de mercado tiende a disminuir.

El tiristor GTO posee las siguientes características principales:

- en estado de conducción:
  - una caída de tensión compuesta de una tensión de umbral y una resistencia interna,
  - una corriente de mantenimiento destinada a reducir la caída de tensión directa,
  - una corriente permanente máxima admisible,
  - una corriente de bloqueo para provocar el corte de la corriente;
- en estado de bloqueo:
  - tensiones inversa y directa máximas admisibles, normalmente asimétricas, como en el caso de los tiristores rápidos y por los mismos motivos,
  - un tiempo de recuperación que es el tiempo mínimo durante el cual la corriente de extinción debe mantenerse so pena de que se produzca un reencendido espontáneo,
  - una corriente de puerta que permite el encendido del componente.

Los GTO pueden funcionar a frecuencias de algunos kHz.

### El transistor

Es un semiconductor bipolar controlado constituido por tres capas alternas PNP o NPN. Solamente deja pasar la corriente en un

sentido: del emisor al colector en tecnología PNP y del colector al emisor en tecnología NPN.

Los transistores de potencia capaces de funcionar con tensiones industriales son del tipo NPN, en montaje «Darlington». El transistor puede funcionar como amplificador. En este caso, el valor de la corriente que lo atraviesa es función de la corriente de mando que circula por la base. Pero puede también funcionar en conmutación (todo o nada) como un interruptor estático: abierto si no hay corriente de base, y cerrado en saturación. Este segundo modo de funcionamiento es el que se utiliza en los circuitos de potencia de los variadores.

Los transistores bipolares abarcan tensiones hasta 1200 V y soportan corrientes que pueden alcanzar los 800 A.

Este componente ha sido sustituido actualmente en los convertidores por el IGBT.

En el modo de funcionamiento que aquí nos interesa, el transistor bipolar tiene las siguientes características principales:

- en estado de conducción
  - una caída de tensión compuesta de una tensión de umbral y de una resistencia interna,
  - una corriente máxima permanente admisible,
  - una ganancia en corriente (para mantener el transistor saturado, la corriente inyectada en la base debe ser superior a la corriente que circula por el componente dividida por la ganancia),
- en estado de bloqueo, una tensión directa máxima admisible.

Los transistores de potencia utilizados en variación de velocidad pueden funcionar a frecuencias de algunos kHz.

### El IGBT

Es un transistor de potencia, controlado por una tensión aplicada a un electrodo llamado puerta «gate» aislada del circuito de potencia, de ahí su nombre «Insulated Gate Bipolar Transistor». Este componente necesita una energía mínima para hacer circular corrientes importantes.

Actualmente es el componente que se utiliza como interruptor «todo o nada» en la mayor parte de convertidores de frecuencia hasta potencias elevadas (del orden de MW). Sus características tensión-corriente son similares a las de los transistores bipolares, pero sus prestaciones en energía de mando y la frecuencia de conmutación son muy superiores a todos los otros semiconductores. Las características de los IGBT avanzan muy rápidamente y actualmente hay modelos disponibles para alta tensión (> 3 kV) y grandes corrientes (varios centenares de amperios).

El transistor IGBT tiene las siguientes características principales:

- una tensión de mando que permite la puesta en conducción o en bloqueo del componente;
- en estado de conducción

- una caída de tensión compuesta de una tensión de umbral y una resistencia interna,
- una corriente permanente máxima admisible;
- en estado de bloqueo, una tensión directa admisible máxima.
- Los transistores IGBT utilizados en variación de velocidad pueden funcionar a frecuencias de algunas decenas de kHz.

### El transistor MOS

Este componente funciona de manera completamente diferente a los anteriores, es decir, por modificación del campo eléctrico en un semiconductor obtenido al polarizar una puerta aislada, de ahí su nombre: «Métal Oxide Semiconductor». Su uso en variación de velocidad se limita a la utilización en baja tensión (variadores de velocidad alimentados por batería) o de baja potencia, porque la superficie de silicio necesaria para, en estado de conducción, obtener una tensión de bloqueo elevada con una pequeña caída de tensión es económicamente irrealizable.

El transistor MOS posee las características principales siguientes:

- una tensión de mando que permite el paso a conducción y el bloqueo del componente;
- en estado de conducción:
  - una resistencia interna,
  - una corriente permanente máxima admisible;
  - en estado de bloqueo, una tensión directa máxima admisible (que puede sobrepasar los 1000 V).

Los transistores MOS utilizados en variación de velocidad pueden funcionar con frecuencias de algunos centenares de kHz. Se encuentran casi siempre en las fuentes de alimentación conmutadas en forma de componentes discretos o de circuitos integrados que incluyen la parte de potencia (MOS), y la de los circuitos de mando y regulación.

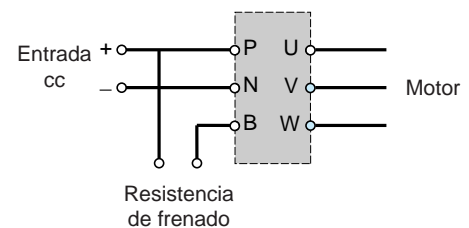
### El IPM (Intelligent Power Module)

Propiamente hablando, no es un semiconductor, sino un conjunto de transistores IGBT. Este módulo (**figura 12**) agrupa un puente ondulator con transistores de potencia IGBT y la electrónica de señal para el mando de los semiconductores, en una misma cápsula compacta:

- 7 componentes IGBT, de los cuales 6 son para el puente ondulator y 1 para el frenado,
- los circuitos de mando de los IGBT,
- 7 diodos de potencia «freewheel» asociados al IGBT para permitir la circulación de corriente,
- las protecciones contra los cortocircuitos, sobrecorrientes y sobrecalentamientos,
- el aislamiento galvánico de este módulo.

El puente rectificador a diodos es el que con más frecuencia se coloca en este módulo.

Este montaje de los IGBT es la mejor manera de solucionar la problemática de su cableado y su control.



**Fig. 12:** Módulo IPM (Intelligent Power Module).

## 4 Variador-regulador para motor de corriente continua

### 4.1 Principio general

El precursor de los variadores de velocidad para motores a corriente continua es el grupo Ward Leonard.

Este grupo, constituido por un motor de arranque, generalmente asíncrono y un generador de corriente continua de excitación regulable, alimenta uno o varios de los motores de corriente continua. La excitación se regula mediante un dispositivo electromecánico (Amplidyne, Rototrol, Regulex), o mediante un sistema estático (amplificador magnético o regulador electrónico). Actualmente, este dispositivo ha sido completamente abandonado en beneficio de los variadores de velocidad con semiconductores que efectúan de manera estática las mismas operaciones y con mejores prestaciones.

Los variadores de velocidad electrónicos se alimentan con una tensión fija a partir de una red de corriente alterna y proporcionan al motor una tensión continua variable. Un puente de diodos o un puente a tiristores, generalmente monofásico, permite alimentar el circuito de excitación.

El circuito de potencia es un rectificador. Puesto que la tensión a suministrar ha de ser variable, este rectificador debe de ser de tipo controlado, es decir, tener componentes de potencia cuya conducción pueda ser controlada (tiristores). La variación de la tensión de salida se obtiene limitando más o menos el tiempo de conducción durante cada semiperíodo. Cuanto más se retarda el encendido del tiristor respecto al cero de la semionda, más se reduce el valor medio de la tensión y por tanto también la velocidad del motor (recordemos que la excitación de un tiristor se corta automáticamente cuando la corriente pasa por cero).

Para los variadores de baja potencia, o los variadores alimentados por una batería de acumuladores, el circuito de potencia, a veces constituido por transistores de potencia (chopper), hace variar la tensión continua de salida ajustando el tiempo de conducción. Este modo de funcionamiento se denomina PMW (Pulse Width Modulation = Modulación por Ancho de Impulso).

#### Regulación

La regulación consiste en mantener con precisión la velocidad en el valor exigido a pesar de las perturbaciones (variación del par resistente, de la tensión de alimentación, de la temperatura).

Sin embargo, durante las aceleraciones o en caso de sobrecarga, la intensidad de corriente no debe alcanzar un valor peligroso para el motor o para el dispositivo de alimentación. Un bucle de regulación interno del variador mantiene la corriente en un valor aceptable. Este valor se puede regular para permitir el ajuste en función de las características del motor.

La velocidad de consigna se fija mediante una señal, analógica o digital, transmitida mediante un bus de terreno o cualquier otro dispositivo que proporcione una tensión imagen de esta velocidad deseada. La referencia puede ser fija o variar durante el curso del ciclo.

Estas rampas de aceleración y deceleración regulables aplican, de manera progresiva, la tensión de referencia correspondiente a la velocidad deseada; la evolución de esta rampa puede seguir todas las formas deseables. El ajuste de las rampas define la duración de la aceleración y de la deceleración.

En bucle cerrado, la velocidad real se mide permanentemente mediante una dinamo tacométrica o un generador de impulsos y se compara con la referencia. Si se constata una desviación, la electrónica de control realiza una corrección de la velocidad. La gama de velocidad se puede extender desde algunas vueltas por minuto hasta la velocidad máxima. En esta horquilla de variación, se obtienen fácilmente precisiones mejores que 1% con regulación analógica y mejores del 1/1000 con regulación digital, teniendo presentes todas las variaciones posibles (vacío/carga, variación de tensión, de temperatura, etcétera).

Esta regulación puede también efectuarse a partir de la medida de la tensión del motor, teniendo en cuenta la corriente que lo atraviesa. Las prestaciones son en este caso sensiblemente inferiores, tanto en cuanto a margen de velocidad como en precisión (algunos % entre marcha en vacío y marcha en carga).

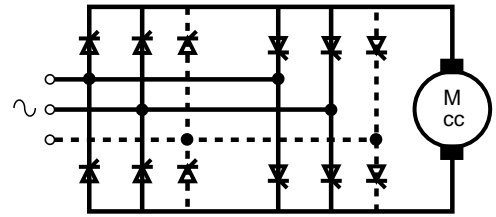
#### Inversión del sentido de giro y frenado por recuperación

Para invertir el sentido de marcha, hay que invertir la tensión de inducido. Esto puede realizarse mediante contactores (esta solución es actualmente obsoleta) o, con semiconductores, por inversión de la polaridad de salida de los variadores de velocidad o de la polaridad de la corriente de excitación.

Esta última solución se utiliza poco debido a la constante de tiempo del inductor.

Cuando se desea tener un frenado controlado o cuando la naturaleza de la carga lo impone (par mantenido), hay que reenviar la energía a la red. Durante el frenado, el variador funciona como ondulator; en otras palabras, la potencia que transmite es negativa.

Los variadores capaces de efectuar estas dos funciones (inversión y frenado por recuperación de energía) están dotados de dos puentes conectados en antiparalelo (**figura 13**). Cada uno de estos puentes permite invertir la tensión y la corriente así como el signo de la energía que circula entre la red y la carga.



**Fig. 13:** Esquema de un variador con inversor de marcha y con frenado por recuperación de energía para un motor de cc.

## 4.2 Modos de funcionamiento posibles

### Funcionamiento llamado a «par constante»

Con excitación constante, la velocidad del motor es función de la tensión aplicada al inducido del motor. La variación de velocidad es posible desde el paro hasta la tensión nominal del motor que se escogen en función de la tensión alterna de alimentación.

El par motor es proporcional a la corriente de inducido y el par nominal de la máquina puede obtenerse de forma continua a cualquier velocidad.

### Funcionamiento llamado a «potencia constante»

Cuando la máquina se alimenta a tensión nominal, es posible todavía aumentar su velocidad, reduciendo la corriente de excitación. En este caso, el variador de velocidad debe de tener un puente rectificador controlando que alimente el circuito de excitación. La tensión de inducido se mantiene entonces fija e igual a la tensión nominal y la corriente de excitación se ajusta para obtener la velocidad deseada.

La expresión de la potencia es:

$$P = E \cdot I$$

siendo:

E su tensión de alimentación,

I la corriente de inducido.

Por tanto, la potencia, para una corriente de inducido dada, es constante en toda la gama de velocidad, pero la velocidad máxima queda limitada por dos parámetros:

- el límite mecánico ligado al inducido y, en particular, la fuerza centrífuga máxima que puede soportar el colector,
- las posibilidades de conmutación de la máquina, en general más restrictivas.

Por consiguiente, para escoger un motor adecuadamente, hay que solicitar la información del fabricante, en especial en cuanto a su gama de velocidad a potencia constante.



## 5 Convertidor de frecuencia para motor asíncrono

### 5.1 Principio general

El convertidor de frecuencia, alimentado a tensión y frecuencia fijas por la red, suministra al motor, en función de las exigencias de velocidad, alimentación en corriente alterna a tensión y frecuencia variables.

Para alimentar correctamente un motor asíncrono a par constante, sea cual sea la velocidad, es necesario mantener el flujo constante. Por tanto, necesita que la tensión y la frecuencia varíen simultáneamente y en las mismas proporciones.

#### Constitución

El circuito de potencia está constituido por un rectificador y un ondulator, que a partir de la tensión rectificada, produce una tensión de amplitud y frecuencia variables (**figura 8**).

Para respetar la directiva CE –Comunidad Europea– y las normas asociadas, se coloca un filtro «de red» aguas arriba del puente rectificador.

El rectificador consta generalmente de un puente rectificador de diodos y de un circuito de filtro constituido por uno o varios condensadores en función de la potencia. Al conectar el variador, un circuito limitador controla la intensidad. Ciertos convertidores utilizan un puente de tiristores para limitar la corriente de carga de los condensadores de filtro, que se cargan con una tensión de un valor sensiblemente igual al valor de pico de la senoide de red (alrededor de 560 V en una red trifásica de 400 V).

Nota: A pesar de la existencia de circuitos de descarga, estos condensadores pueden conservar una tensión peligrosa en ausencia de la tensión de red. Una actuación en el interior de este tipo de dispositivos debe ser siempre efectuada por personas formadas y que conozcan perfectamente las precauciones de seguridad indispensables a tener en cuenta (circuito de descarga adicional o conocimiento del tiempo de espera).

El puente ondulator, conectado a estos condensadores, utiliza 6 semiconductores de potencia, normalmente del tipo IGBT y diodos asociados en «freewheel».

Este tipo de variador está destinado a la alimentación de los motores asíncronos de jaula. Así, el Altivar, de la Marca Telemecanique, permite crear una mini-red eléctrica a tensión y

frecuencia variables capaz de alimentar uno o varios motores en paralelo. Se compone de:

- un rectificador con condensadores de filtro,
- un ondulator con 6 IGBT y 6 diodos,
- un chopper o troceador que está conectado a una resistencia de frenado (en general exterior al equipo),
- los circuitos de mando de los transistores IGBT,
- una unidad de control gobernada por un microprocesador, que asegura el mando del ondulator,
- captadores internos para medir la corriente del motor, la tensión continua en bornes de los condensadores y, en ciertos casos, las tensiones presentes en el puente rectificador y en el motor, así como todas las magnitudes necesarias para el control y la protección del conjunto motor-variador,
- una alimentación para los circuitos electrónicos de baja intensidad,

Esta alimentación se efectúa mediante una fuente conmutada (switching) conectada en los bornes de los condensadores de filtro para aprovechar esta reserva de energía. Esta disposición permite al Altivar superar las fluctuaciones de la red y los cortes de tensión de corta duración, lo que le confiere notables prestaciones en presencia de redes muy perturbadas.

#### La variación de velocidad

La generación de la tensión de salida se obtiene por corte de la tensión rectificada por medio de impulsos cuya duración, por tanto anchura, se modula de manera que la corriente alterna resultante sea lo más senoidal posible (**figura 14**).

Esta técnica, conocida bajo el nombre de PWM (Pulse Width Modulation = Modulación de Ancho de Impulso), condiciona la rotación regular a baja velocidad y limita los calentamientos. La frecuencia de modulación que se aplica es un compromiso: debe de ser suficientemente elevada para reducir el rizado de corriente y el ruido acústico en el motor, pero sin que aumenten sensiblemente las pérdidas en el puente ondulator y en los semiconductores. La aceleración y la deceleración se regula mediante dos rampas.

### Las protecciones integradas

El variador se autoprotege y protege al motor contra calentamientos excesivos desconectándose hasta que se alcanza una temperatura aceptable.

Se desconecta también con cualquier perturbación o anomalía que pueda alterar el

funcionamiento del conjunto, como las sobretensiones o la subtensión, el fallo de una fase de entrada o de salida.

En ciertos calibres de rectificadores, el ondulator de troceado, el mando y las protecciones contra los cortocircuitos están integrados en un único módulo IPM –Intelligent Power Module–.

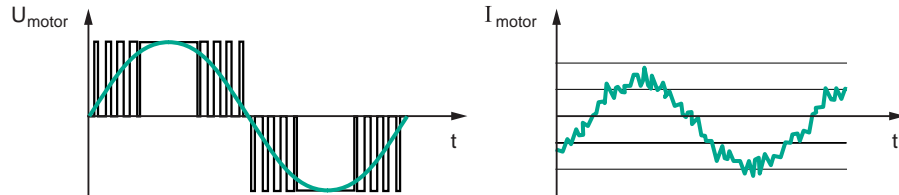


Fig. 14: La modulación de ancho de impulso.

## 5.2 Funcionamiento en U/f

En este tipo de funcionamiento, la referencia «velocidad» impone una frecuencia al ondulator, y por tanto al motor, que es la que determina la velocidad de rotación. La tensión de alimentación está en razón directa con la frecuencia (figura 15). Este funcionamiento se denomina frecuentemente funcionamiento con

U/f constante o funcionamiento escalar. Si no se efectúa ninguna compensación, la velocidad real varía con la carga, lo que limita el margen de funcionamiento. Se puede utilizar una compensación sencilla que tenga en cuenta la impedancia interna del motor y limite la pérdida de velocidad en carga.

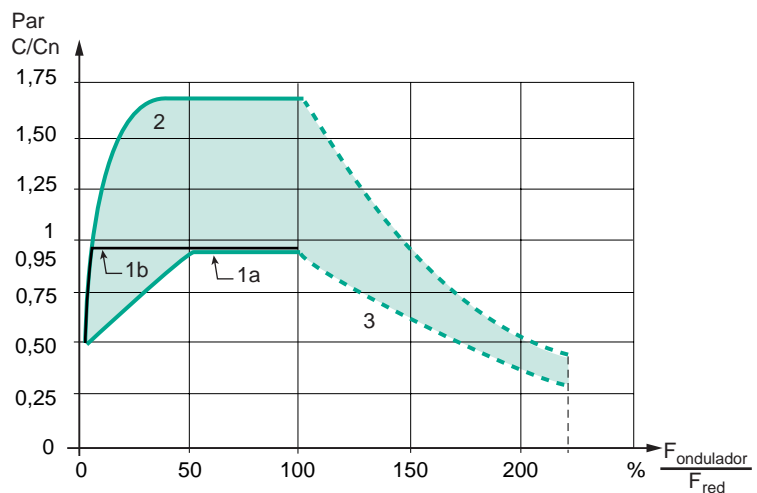


Fig. 15: Características de par de un variador (Altivar 66 - Telemecanique)

- 1.- par útil permanente: (a) motor autoventilado, (b) motor moto-ventilado
- 2.- sobrepas transitorio (< 1,7Cn durante 60 s). (Cn = par nominal)
- 3.- par con sobrevelocidad a potencia constante.

### 5.3 Control vectorial

Mediante diversos sistemas electrónicos, utilizando el denominado control vectorial de flujo, se mejoran mucho las prestaciones, (figura 16). La mayor parte de los variadores de velocidad modernos tienen integrada esta función en la versión estándar. En la mayor parte de aplicaciones, el conocimiento o valoración de los parámetros de la máquina permite omitir el captador de velocidad. En este caso, se puede utilizar un motor estándar con la única condición de evitar su funcionamiento prolongado a baja velocidad.

El variador elabora las informaciones necesarias a partir de las medidas de las magnitudes presentes en los bornes de la máquina (tensión y corriente).

Este modo de control proporciona prestaciones suficientes sin aumento del coste.

Para obtener estos resultados, deben de conocerse ciertos parámetros de la máquina. Al conectar, el operador de la máquina debe, ante todo, introducir las características de la placa del motor en los parámetros de reglaje del variador, tales como:

UNS: tensión nominal del motor,

FRS: frecuencia nominal del estator,

NCR: corriente nominal del estator,

NSP: velocidad nominal,

COS: coseno motor.

A partir de estos valores, el variador calcula las características del rotor:  $L_m$ ,  $T_r$  ( $L_m$ : inductancia magnética,  $T_r$ : momento del par).

#### Variador con control vectorial de flujo sin captador

Al conectarlo, un variador con control vectorial de flujo sin captador (tipo ATV58F -Telemecanique) se autoajusta, lo que le permite determinar los parámetros estáticos  $R_s$  y  $L_f$ . Esta medida puede hacerse con la carga mecánica acoplada. La duración varía en función de la potencia del motor (1 a 10 s). Estos valores se memorizan y permiten elaborar los criterios de mando.

El oscilograma de la figura 17 representa la aceleración de un motor, cargado a su par nominal, alimentado por un variador sin captador. Hay que indicar que se alcanza rápidamente, tanto el par nominal (menos de 0,2 s) como la linealidad de la aceleración. La velocidad nominal se alcanza en 0,8 segundos.

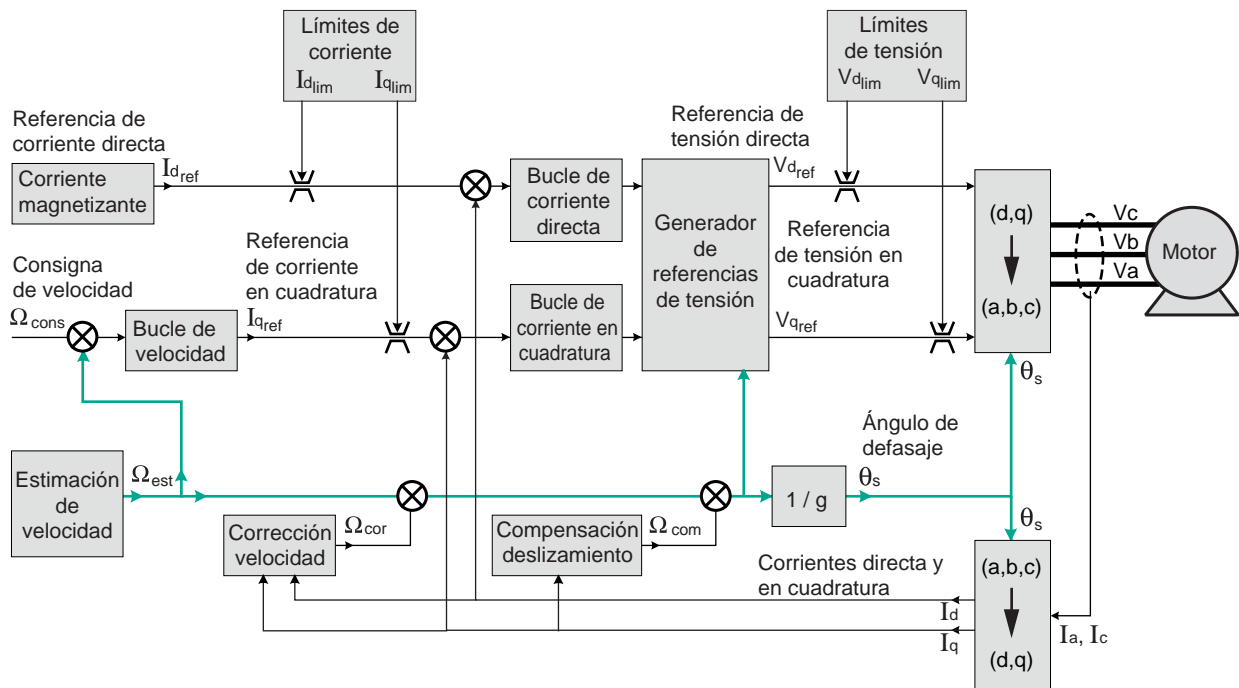


Fig. 16: Esquema de principio de un variador para control vectorial de flujo.

### Variador con control vectorial de flujo con bucle cerrado con captador

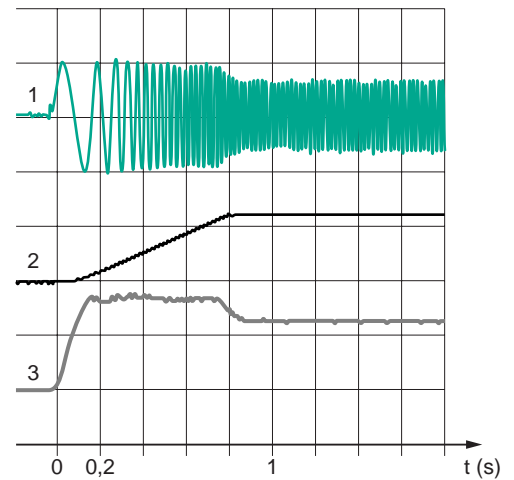
Otra posibilidad es el control vectorial de flujo con bucle cerrado con captador.

Esta aplicación utiliza la transformación de Park y permite el control independiente de la corriente ( $I_d$ ) asegurando el flujo en la máquina y la corriente ( $I_q$ ) asegurando el par (igual al producto  $I_d \cdot I_q$ ). El mando del motor es similar al de un motor de corriente continua.

Esta solución (figura 18) responde adecuadamente a aplicaciones con especiales exigencias como, gran dinámica durante los transitorios, precisión de velocidad y par nominal en el arranque.

Según el tipo de motor, el par nominal transitorio es igual a 2 ó 3 veces el par nominal. Además, la velocidad máxima llega a alcanzar frecuentemente el doble de la velocidad nominal, o incluso más si el motor lo permite mecánicamente.

Este tipo de control permite también bandas pasantes muy elevadas y prestaciones comparables e incluso superiores a las de los mejores variadores de corriente continua. En contrapartida, el motor utilizado no es de construcción estándar debido a la existencia del captador y, si se da el caso, la existencia especial de la ventilación forzada.



- 1 - corriente motor
- 2 - velocidad motor
- 3 - par motor

Fig. 17: Características de la conexión de un motor mediante un variador con control vectorial de flujo sin captador (tipo ATV58F - Telemecanique).

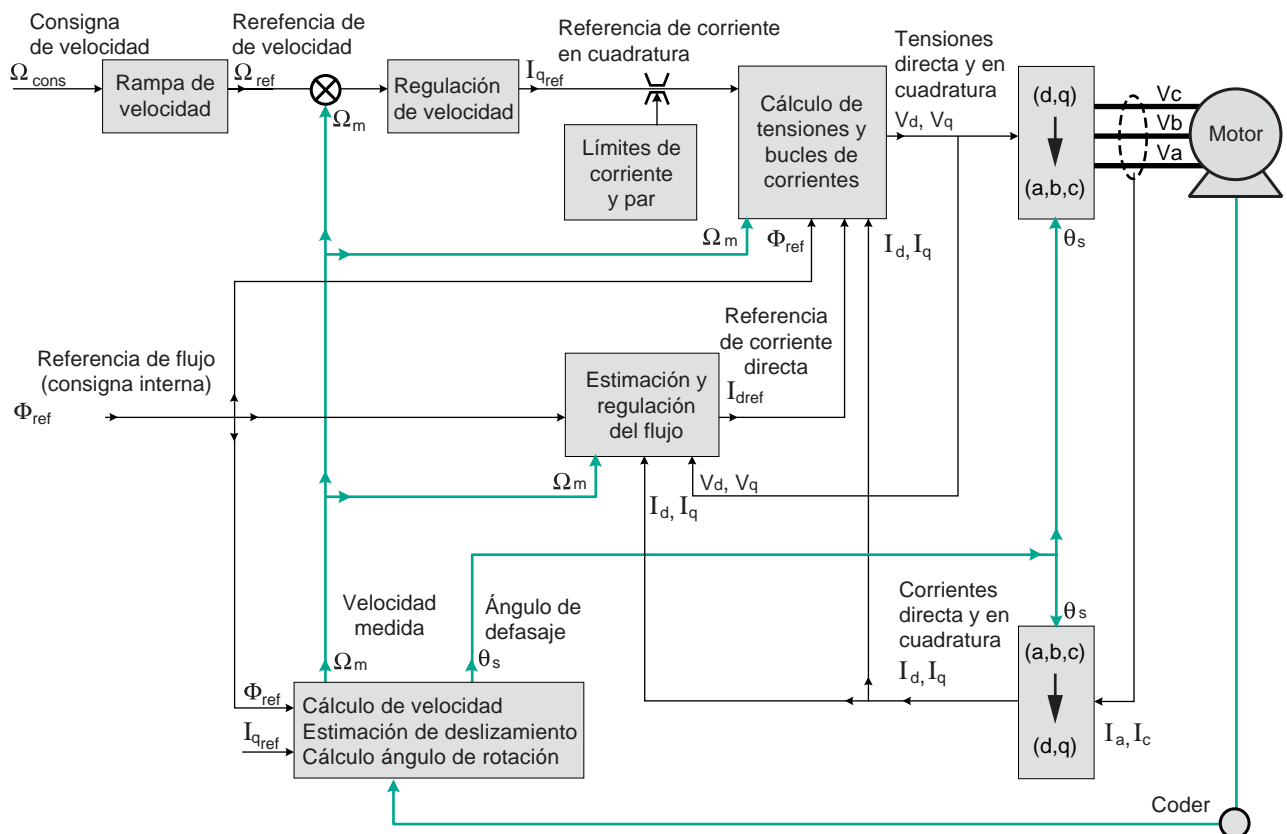
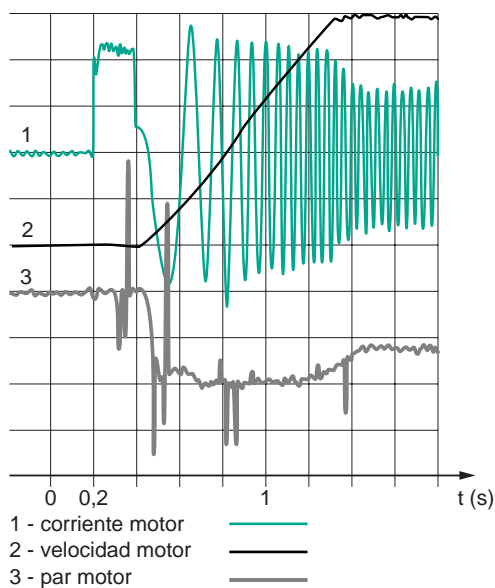


Fig. 18: Esquema de principio de un variador con control vectorial de flujo con captador.



**Fig. 19:** Oscilograma de puesta en funcionamiento de un motor, cargado a su par nominal, alimentado mediante un variador con control vectorial de flujo (tipo ATV58F - Telemecanique).

El oscilograma de la figura **figura 19** representa la aceleración de un motor, cargado con su par nominal, mediante un variador con control vectorial de flujo y con captador. La escala de tiempos es de 0,1 s/división. Es importante la mejora de prestaciones respecto al mismo producto sin captador. El par nominal se consigue en 80 ms y el tiempo de aumento de la velocidad, en las mismas condiciones de carga, es de 0,5 segundos.

En conclusión, la tabla de la **figura 20** compara las prestaciones de un variador en las tres configuraciones posibles.

### Inversión del sentido de marcha y frenado

Para cambiar el sentido de marcha, una orden externa (que puede proceder de una entrada dedicada a este fin, o de una señal que circule por el bus de comunicaciones) provoca la inversión en el orden de funcionamiento de los componentes del ordenador, y por tanto, el cambio del sentido de rotación del motor. Hay varias posibilidades de funcionamiento:

#### ■ 1<sup>er</sup> caso: inversión inmediata de mando de los semiconductores

Si, en el momento de invertir el sentido de giro, el motor está siempre en rotación, esto se traducirá en un deslizamiento importante y la corriente en el variador pasará a ser la máxima corriente posible (limitación interna). El par de frenado es bajo debido al gran deslizamiento y la regulación interna lleva la consigna de velocidad a un valor bajo. Cuando el motor alcanza la velocidad nula, la velocidad se invierte siguiendo la rampa. El excedente de energía no absorbido por el par resistente y los rozamientos se disipan en el rotor.

#### ■ 2<sup>o</sup> caso: inversión del sentido de mando de los semiconductores precedido de una deceleración con o sin rampa

Si el par resistente de la máquina es tal que la deceleración natural es más rápida que la de la rampa fijada por el variador, éste continúa proporcionando energía al motor. La velocidad disminuye progresivamente y se invierte.

Por el contrario, si el par resistente de la máquina es tal que la deceleración natural es menor que la de la rampa fijada por el variador, el motor se comporta como un generador hipersíncrono y devuelve energía al variador; pero la presencia del puente de diodos impide el reenvío de energía hacia la red: los condensadores de filtro se cargan, la tensión aumenta y el variador se bloquea. Para evitar esto, hay que disponer de una resistencia, conectada a los bornes de los condensadores para, mediante un chopper, limitar la tensión a un valor aceptable. El par de frenado sólo queda limitado por los condensadores del variador de velocidad: la velocidad disminuye progresivamente y se invierte.

Para este cometido, el fabricante del variador proporciona resistencias de frenado dimensionadas en función de la potencia del motor y de las energías a disipar. Puesto que, en la mayor parte de casos, el chopper se encuentra incluido en la configuración de origen del variador, un variador capaz de asegurar un frenado controlado sólo se distingue por la existencia de resistencias. Por tanto, este modo de frenado permite ralentizar un motor hasta su parada sin invertir necesariamente su sentido de rotación.

	Control escalar	Control vectorial de flujo	
		sin captador	con captador
Gama de velocidades	1 a 10	1 a 100	1 a 1000
Banda pasante	5 a 10 Hz	10 a 15 Hz	30 a 50 Hz
Precisión de velocidad	± 1%	± 1%	± 0,01%

**Fig. 20:** Conjunto de prestaciones de un variador en las tres configuraciones posibles (tipo ATV58F - Telemecanique).

### Frenado de ralentización por inyección de corriente continua

Puede hacerse fácilmente un frenado económico haciendo funcionar la etapa de salida del variador como chopper que inyecta una corriente continua en los arrollamientos. El par de frenado no está controlado y el frenado es poco eficaz, sobre todo a grandes velocidades, y por tanto, la rampa de deceleración tampoco está controlada. Sin embargo, es una solución práctica para disminuir el tiempo de parada natural de una máquina. Puesto que la energía se disipa en el rotor, este modo de funcionamiento debe ser ocasional.

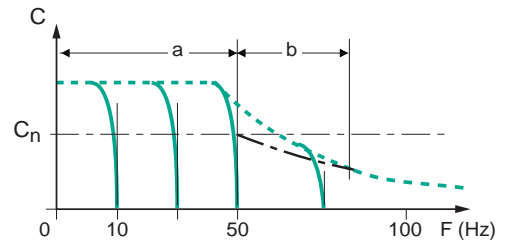
#### Los posibles modos de funcionamiento

##### ■ Funcionamiento a «par constante»

Como la tensión suministrada por el variador puede cambiar, y en la medida en que el flujo de la máquina es constante, (razón  $U/f$  constante o, mejor todavía, con el control vectorial de flujo), el par motor será aproximadamente proporcional a la corriente y será posible hacer funcionar la máquina en toda su gama de velocidades (figura 21). Sin embargo, no es posible el funcionamiento prolongado a par nominal y a baja velocidad más que si el motor tiene ventilación forzada, lo que requiere un motor especial. Los variadores modernos disponen de circuitos de protección que proporcionan una imagen térmica del motor en función de la corriente, de los ciclos de funcionamiento y de la velocidad de rotación: por tanto, la protección del motor queda completamente asegurada.

##### ■ Funcionamiento a «potencia constante»

Cuando la máquina se alimenta a su tensión nominal, es posible todavía aumentar su velocidad, alimentándola con una frecuencia



**Fig. 21:** Par de un motor asíncrono con carga constante alimentado con un convertidor de frecuencia

**[a]** - zona de funcionamiento a par constante,

**[b]** - zona de funcionamiento a potencia constante.

superior a la de la red de distribución. Sin embargo, puesto que la tensión de salida del convertidor no puede sobrepasar la de la red, el par disponible disminuye en función inversa al aumento de la velocidad (figura 21). Más allá de su velocidad nominal, el motor ya no funciona a par constante, sino a potencia constante ( $P = Cw$ ), en tanto que la característica natural del motor lo permita.

La velocidad máxima está limitada por dos parámetros:

- el límite mecánico que depende del rotor,
- la reserva de par disponible.

Para una máquina asíncrona alimentada a tensión constante, el par máximo varía con el cuadrado de la velocidad; el funcionamiento a «potencia constante» sólo es posible en un margen limitado de velocidad determinado por la característica del par propio de la máquina.

## 5.4 Regulador de tensión para motor asíncrono

Este dispositivo de variación de tensión, utilizado para alumbrado y calefacción, sólo puede utilizarse con motores asíncronos de caja resistente o de anillos (figura 22). Estos motores asíncronos son la mayor parte de veces trifásicos, y sólo ocasionalmente monofásicos para pequeñas potencias (hasta alrededor de 3 kW). Si no es imprescindible un par de arranque elevado, el regulador se utiliza frecuentemente como arrancador ralentizador progresivo; además, permite limitar la corriente de conexión, y por tanto la caída de tensión y las sacudidas mecánicas debidas a la aparición brusca del par motor.

Entre las aplicaciones más frecuentes pueden citarse el arranque de bombas centrífugas y los ventiladores, las cintas transportadoras, las escaleras automáticas, los centros de lavado automático de coches, las máquinas equipadas con correas... y como variación de velocidad, en

los motores de muy baja potencia o en los motores universales, como en los utilizados en las herramientas eléctricas portátiles. Pero para ciertas aplicaciones, como la variación de velocidad de pequeños ventiladores, los reguladores han desaparecido casi completamente para dejar paso a los convertidores de frecuencia, más económicos y en fase de explotación.

En el caso de las bombas, la función de ralentización permite también eliminar los golpes de ariete.

Pero, la elección de este dispositivo de variación de velocidad requiere ciertas precauciones. En efecto, cuando hay deslizamiento, las pérdidas en el motor son proporcionales al par resistente e inversamente proporcionales a la velocidad; ahora bien, el principio de funcionamiento de un regulador consiste en reducir el par motor reduciendo la tensión, para equilibrar el par

resistente con la velocidad deseada. El motor de jaula resistente (**figura 22b**) debe por tanto ser capaz, a baja velocidad, de disipar estas pérdidas (los pequeños motores de hasta 3 kW responden generalmente bien en estas condiciones). Para mayores potencias, hay que utilizar normalmente un motor moto-ventilador. Para los motores de jaula, las resistencias asociadas deben estar dimensionadas adecuadamente para soportar los ciclos de funcionamiento. La decisión la debe tomar un especialista que seleccionará el motor en función de sus ciclos de funcionamiento.

En el mercado se pueden encontrar tres tipos de arrancadores: o con una sola fase controlada para pequeñas potencias, o con dos fases controladas (la tercera queda en conexión directa). Los dos primeros sistemas sólo se utilizan en ciclos de funcionamiento poco severos debido a que su tasa de armónicos es mayor.

### Principio general

El circuito de potencia consta de 2 tiristores por fase montados en oposición (**figura 9**). La variación de tensión se consigue haciendo variar el tiempo de conducción de estos tiristores a lo largo de cada semiperíodo. Cuanto más se retrasa el disparo, menor es el valor de la tensión resultante.

El disparo de los tiristores se controla mediante un microprocesador que efectúa además las siguientes funciones:

- controla las rampas de subida en tensión y de disminución de la tensión ajustables; la rampa de deceleración sólo podrá seguirse si el tiempo de deceleración natural del sistema arrastrado es mayor;
- limitación de corriente graduable;
- sobre par de arranque;
- control de frenado por inyección de corriente continua,

- protección de los variadores contra las sobrecargas,

- protección del motor contra el sobrecalentamiento, debido a sobrecargas o a arranques demasiado frecuentes,

- detección de desequilibrios de red, de ausencia de fase o de defectos en los tiristores.

El cuadro de mando tiene un display que permite visualizar diversos parámetros de funcionamiento para ayudar en la instalación, explotación y mantenimiento.

Ciertos reguladores, como el Altistart (Telemecanique) pueden controlar el arranque y la deceleración:

- de un solo motor,

- de varios motores simultáneamente, dentro del límite de su calibre,

- de varios motores sucesivamente por conmutación. En régimen permanente, cada motor se alimenta directamente de la red mediante un contactor.

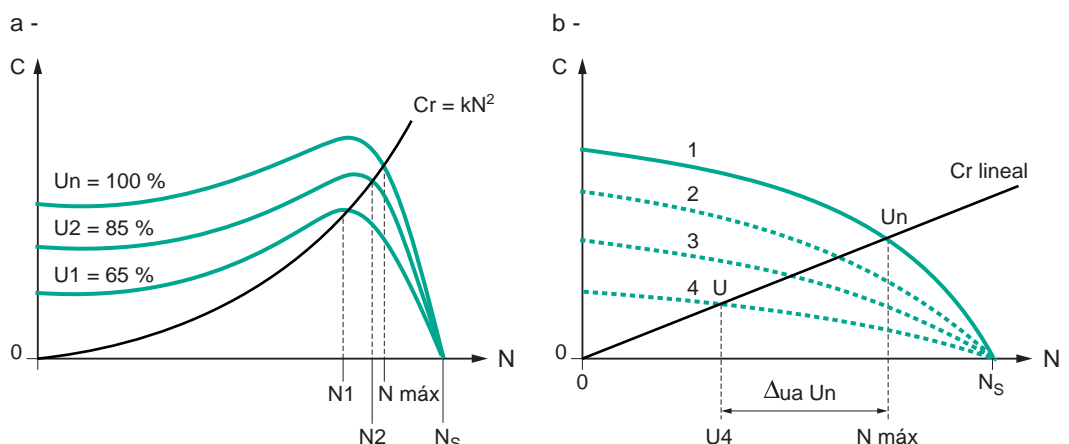
Sólo el Altistart dispone de un dispositivo, patentado, que mediante una estimación del par motor, permite efectuar aceleraciones y desaceleraciones lineales, y si es necesario, limitar el par motor.

### Inversión del sentido de giro y frenado

La inversión del sentido de giro se efectúa por inversión de la secuencia de fases de entrada del arrancador. El frenado se efectúa entonces a contracorriente y toda la energía se disipa en el rotor de la máquina. Por tanto, esta forma de funcionamiento debe ser intermitente.

### Frenado de ralentización por inyección de corriente continua

Puede efectuarse un frenado económico haciendo funcionar la etapa de salida del arrancador como rectificador que inyecta de esta



manera una corriente continua en los arrollamientos. El par de frenado no está controlado y el frenado es poco eficaz, sobre todo a grandes velocidades, y por tanto, la rampa de deceleración tampoco está

controlada. Sin embargo, es una solución práctica para disminuir el tiempo de parada natural de una máquina. Puesto que la energía se disipa en el rotor, este modo de funcionamiento debe ser ocasional.

## 5.5 Motovariadores síncronos

### Principio general

Los motovariadores síncronos (**figura 23**) están formados por un convertidor de frecuencia y un motor síncrono de imán permanente con captador.

Estos motovariadores se destinan a máquinas específicas como los robots o las máquinas-herramienta, en las que se requiere un pequeño volumen del motor, aceleraciones rápidas y una amplia banda pasante.

### El motor

El rotor del motor está hecho con imanes permanentes de tierras raras para obtener un campo elevado en un volumen reducido. El estator tiene un arrollamiento trifásico. Estos motores, para realizar aceleraciones muy rápidas, pueden soportar importantes corrientes de sobrecarga. Tiene también, estos motores, un captador para indicar al variador la posición angular de los polos del motor para asegurar la conmutación de los arrollamientos.

### El variador

En su constitución, el variador es similar a un convertidor de frecuencia: funciona de forma similar.

Está constituido también por un rectificador y un ondulator transistorizado para modulación de ancho de impulsos (PWM) que reconstruye la corriente de salida a su forma sinusoidal.

Es frecuente encontrar varios variadores de este tipo alimentados por una misma fuente de corriente continua. Así, en una



**Fig. 23:** Fotografía de un motovariador síncrono (Variador Lexium + motor, Schneider Electric).

máquina-herramienta, cada variador controla un motor que arrastra un eje de la máquina.

Una fuente de alimentación de corriente continua, común, alimenta en paralelo a todos estos variadores.

Este tipo de instalación permite poner a disposición del conjunto la energía procedente del frenado de uno de los ejes.

Como en los convertidores de frecuencia, una resistencia de frenado asociada a un chopper permite evacuar la energía de frenado en exceso.

Las funciones de control electrónico y las breves constantes de tiempo mecánicas y eléctricas, permiten aceleraciones y, muy frecuentemente, bandas pasantes muy elevadas, a la vez que una gran dinámica de velocidad.

## 5.6 Motovariadores paso a paso

### Principio general

Los motovariadores paso a paso se componen de una etapa de electrónica de potencia, similar en su diseño a la de un convertidor de frecuencia, y de un motor paso a paso (**figura 24**). Funcionan en bucle abierto (sin captador) y están destinados a aplicaciones de posicionamiento.

### El motor

El motor puede ser de reluctancia variable, de imanes permanentes o una combinación de los dos (Cuaderno Técnico nº 207 «Introducción a los motores eléctricos»).



## El variador

En su constitución, el variador es similar a un convertidor de frecuencia (rectificador, filtro y un puente formado por semiconductores de potencia).

Sin embargo su funcionamiento es sustancialmente diferente, puesto que su objetivo es inyectar una corriente constante en los arrollamientos. A veces utiliza la modulación por ancho de impulso (PWM) para conseguir las mejores prestaciones, en especial el tiempo de subida de corriente (figura 25), lo que permite ampliar su margen de funcionamiento.

El funcionamiento en micropasos (figura 26) permite multiplicar artificialmente el número de posiciones posibles del rotor generando escalones sucesivos en las bobinas durante cada secuencia. Las corrientes en las dos bobinas se asemejan a dos corrientes alternas defasadas  $90^\circ$ . El campo resultante es la composición vectorial de estos campos creados por las dos bobinas. Así, el rotor toma todas las

posiciones intermedias posibles. La gráfica representa las corrientes de alimentación de las bobinas B1 y B2; las posiciones del rotor quedan representadas por el vector.

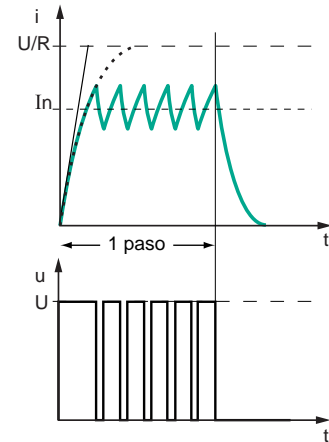


Fig. 25: Gráfica de la corriente resultante mediante control PWM (modulación de ancho de impulso).

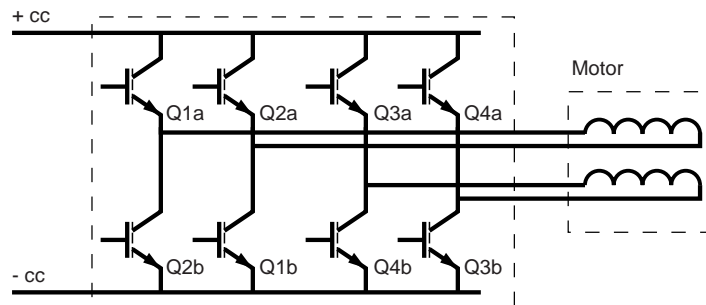


Fig. 24: Esquema de principio de un variador para motor bipolar paso a paso.

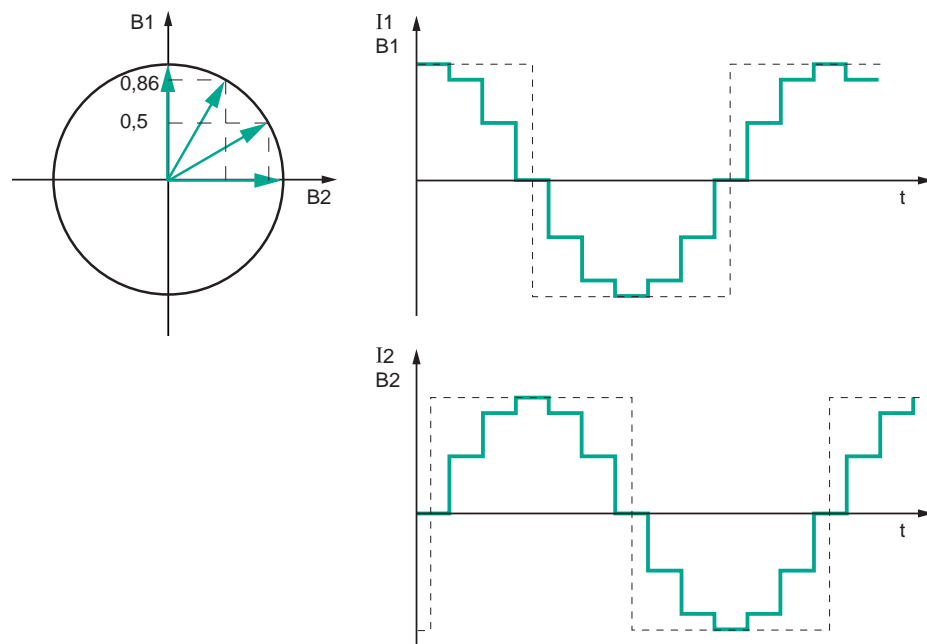


Fig. 26: Diagrama, curvas de intensidad y principio de escalonamiento para un control en «micropasos» de un motovariador paso a paso.

## 6 Funciones complementarias de los variadores de velocidad

### 6.1 Opciones de diálogo

Para poder asegurar un funcionamiento correcto del motor, los variadores tienen integrado un cierto número de captadores para supervisión de la tensión, de las corrientes «motor» y de su estado térmico. Estas informaciones, indispensables para el variador, pueden ser útiles para el usuario.

Los nuevos variadores y arrancadores tienen integradas funciones de diálogo que utilizan buses de terreno. Además, es posible generar informaciones que pueden ser utilizadas por un autómatas y un supervisor para controlar la máquina. De la misma manera, las informaciones que envía el autómatas retornan por el mismo canal.

De entre estos datos, se pueden citar:

- las consignas de velocidad,
- las órdenes de marcha y de paro,
- los ajustes iniciales del variador o las modificaciones de estos ajustes durante la operación,
- el estado del variador (marcha, parado, sobrecarga, defecto),
- las alarmas,
- el estado del motor (velocidad, par, intensidad, temperatura).

Estas opciones de comunicación se utilizan también para enlazar con un PC para poder simplificar los ajustes de puesta en servicio (telemando) y almacenar los ajustes iniciales.

### 6.2 Las funciones integradas

Para abarcar eficazmente una gran número de aplicaciones, los variadores tienen una cantidad importante de ajustes y reglajes, como:

- el tiempo de las rampas de aceleración y deceleración,
- la forma de las rampas (lineales, en S o en U),
- los cambios de rampas que permiten obtener varias rampas de aceleración o de deceleración para conseguir, por ejemplo, una aproximación muy suave,
- la reducción del par máximo controlado por una entrada lógica o por una consigna,
- la marcha paso a paso,
- la gestión del mando de un freno para aplicaciones de elevación,
- la elección de velocidades preseleccionadas,
- la existencia de entradas sumadoras que permiten sumar consignas de velocidad,
- la conmutación de referencias presentes en la entrada del variador,
- la presencia de un regulador PI para servocontrol simple (de velocidad o de caudal, por ejemplo),
- la parada automática al producirse un corte de red, pero efectuando el frenado del motor,
- la recuperación automática con búsqueda de la velocidad del motor para un arranque al vuelo,
- la protección térmica del motor a partir de una imagen generada en el variador,

- la posibilidad de conexión de sondas PTC integradas en el motor,
- la omisión de la frecuencia de resonancia de la máquina (la velocidad crítica se obvia para que resulte imposible su utilización),
- el bloqueo temporizado a baja velocidad en aplicaciones como bombeado en las que el fluido participa en su refrigeración para evitar el agarrotamiento.

Estas funciones, aunque propias de variadores sofisticados, se encuentran con frecuencia en las versiones estándar (**figura 27**).



**Fig. 27:** Fotografía de un variador que incluye numerosas funciones integradas (ATV58H - Telemecanique).

## 6.3 Las tarjetas opcionales

Para las aplicaciones más complejas, los fabricantes ofrecen tarjetas opcionales que permiten o funciones particulares, por ejemplo, el control vectorial de flujo con captador, o tarjetas específicas para una aplicación concreta. Entre ellas, por ejemplo:

- tarjetas de «conmutación de bombas» para instalar económicamente una estación de bombeo que, con un único variador alimente sucesivamente varios motores,
- tarjetas «multi-motores»,
- tarjetas «multi-parámetros» que permiten cambiar automáticamente los parámetros predefinidos del variador,

- tarjetas específicas desarrolladas bajo demanda de un usuario particular.

Ciertos fabricantes disponen también de tarjetas-autómata, integradas en el variador que facilitan aplicaciones simples. Entonces, el operador dispone de instrucciones de programación de entradas y salidas para la realización de pequeños automatismos pequeños, cuando no se justifica la existencia de un autómata.

## 7 Conclusión

La elección de un variador de velocidad depende especialmente de la naturaleza de la carga arrastrada y de las prestaciones previstas. Por tanto, cualquier elección o estudio deben de pasar por un análisis de las exigencias funcionales de los equipos y de las prestaciones exigidas por el motor en sí mismo.

La documentación de los fabricantes de variadores de velocidad utiliza siempre términos como par constante, par variable, potencia constante, control vectorial de flujo, variador reversible... Estos conceptos caracterizan todos los datos necesarios para deducir el tipo de variador el más adaptado a cada necesidad.

Una elección incorrecta del variador puede llevar a un funcionamiento decepcionante. Asimismo, hay que tener en cuenta la gama de velocidades necesaria para escoger convenientemente el conjunto variador-motor.

Todas las informaciones reunidas en este Cuaderno Técnico deben ayudar a hacer una buena elección al facilitar la consulta de la documentación de los fabricantes, o, lo que es más seguro todavía, dirigiéndose con toda la precisión técnica a los especialistas para seleccionar el variador que ofrezca mejor relación precio/prestaciones.