

Frenado eléctrico



1.	Introducción	5
1.1	Concepto general	5
1.2	Mapa de las aplicaciones de accionamientos en función de la velocidad y el par	5
2.	Evaluar la potencia de frenado	7
2.1	Principios generales del dimensionado del frenado eléctrico	7
2.2	Conceptos básicos de descripción de cargas	8
2.2.1	Par constante y par cuadrático	8
2.2.2	Cómo evaluar el par y la potencia de frenado	8
2.2.3	Resumen y conclusiones	12
3.	Soluciones de frenado eléctrico en accionamientos	13
3.1	Frenado de flujo del motor	13
3.2	Chopper de frenado y resistencia de frenado	14
3.2.1	El almacenamiento de energía en el convertidor de frecuencia	14
3.2.2	Principio del chopper de frenado	15
3.3	Configuración antiparalela de los puentes de tiristores	17
3.4	Configuración con puente IGBT	19
3.4.1	Principios generales de las unidades de regeneración IGBT	19
3.4.2	Regeneración IGBT: objetivos de regulación	19
3.4.3	Control directo del par en forma de control directo de la potencia	20
3.4.4	Dimensionado de una unidad de regeneración IGBT	22
3.5	CC común	22
4.	Evaluar el coste del ciclo de vida de distintos frenados eléctricos	24
4.1	Cómo calcular el coste directo de la energía	24
4.2	Cómo evaluar el coste de la inversión	24
4.3	Cómo calcular el coste del ciclo de vida	25
5.	Símbolos y definiciones	29
6.	Índice	30

1.1 Concepto general

En esta nueva guía técnica de ABB se describen las soluciones prácticas con las que se puede reducir la energía almacenada y volverla a transformar en energía eléctrica. El objetivo de esta guía consiste, asimismo, en dar orientaciones prácticas para distintas soluciones de frenado.

1.2 Mapa de las aplicaciones de accionamientos en función de la velocidad y el par

Las aplicaciones de accionamientos se pueden dividir en tres categorías principales en función de la velocidad y el par. La aplicación de accionamientos de CA más habitual es en un cuadrante, en la que la velocidad y el par siempre tienen la misma dirección: el flujo de la potencia (velocidad multiplicada por el par) va del inversor al proceso. En estas aplicaciones, que suelen ser de bombas y ventiladores, el par de la carga tiene un comportamiento cuadrático, por lo que se las suele llamar aplicaciones a par variable. Algunas aplicaciones en un cuadrante como las extrusoras o las cintas transportadoras son aplicaciones a par constante (el par de la carga no tiene por qué cambiar al cambiar la velocidad).

La segunda categoría son las aplicaciones en dos cuadrantes, en las que, sin que cambie la dirección de rotación, puede cambiar la dirección del par (el flujo de potencia puede ir del accionamiento al motor o viceversa). Un accionamiento en un cuadrante puede serlo en dos, por ejemplo, al decelerar un ventilador más rápido que de forma natural con las pérdidas mecánicas. En muchas industrias, un paro de emergencia puede precisar de un funcionamiento en dos cuadrantes aunque el proceso sea en un cuadrante.

La tercera categoría son las aplicaciones en cuatro cuadrantes en las que puede cambiar libremente la dirección de la velocidad y el par. Las más típicas son ascensores, cabrestantes y grúas, si bien muchos procesos de corte, plegado, tejeduría y bancos de pruebas de motores pueden necesitar que la velocidad y el par cambien repetidamente. También cabe mencionar procesos en un cuadrante en los que el flujo de potencia va principalmente de la maquinaria al inversor, como una bobinadora o una cinta transportadora descendente.

Por lo general, desde un punto de vista de ahorro de energía, un motor de CA con un inversor es mejor que los métodos de control mecánico como el estrangulamiento. Sin embargo, se presta menos atención al hecho de que muchos procesos pueden contar con un flujo de la potencia del proceso al accionamiento, aunque no se ha estudiado cómo utilizar esta energía de frenado de la forma más económica.

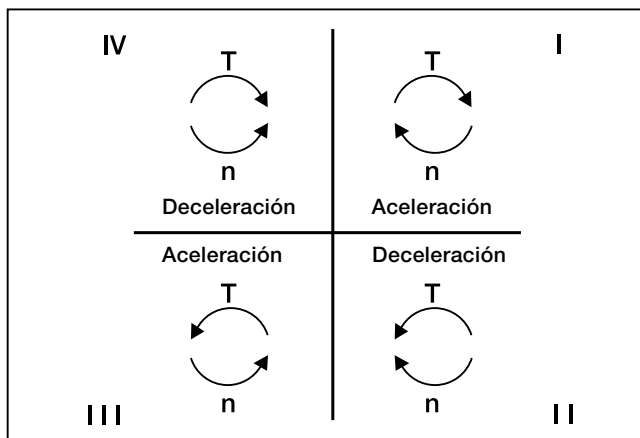


Figura 1.1 Mapa de las aplicaciones de accionamientos en función de la velocidad y el par.

Capítulo 2 - Evaluar la potencia de frenado

2.1 Principios generales del dimensionado del frenado eléctrico

La evaluación de la necesidad de frenado empieza por la mecánica. Normalmente se tiene que frenar el sistema mecánico en un tiempo concreto, o existen subciclos del proceso en los que el motor funciona en el generador a velocidad constante o ligeramente variable.

Es importante destacar que los dispositivos empleados en el frenado eléctrico se dimensionan en función de la potencia de frenado. La potencia mecánica de frenado depende del par y la velocidad de frenado, fórmula (2.1). Cuando mayor sea la velocidad, mayor será la potencia. Esta potencia se transmite a una tensión e intensidad determinadas. Cuanto mayor sea la tensión, menos intensidad se necesita para una misma potencia, fórmula (2.2). La intensidad es el componente principal que define el coste en accionamientos de CA de baja tensión.

En la fórmula (2.2) podemos observar la expresión $\cos\phi$. Esta expresión define la intensidad del motor empleada para magnetizar el motor. La intensidad de magnetización no crea ningún par y, por tanto, se ignora.

Por otra parte, esta intensidad de magnetización del motor no se toma de la fuente de alimentación de CA que alimenta al convertidor (la intensidad al inversor es menor que la intensidad al motor). Ello significa que, en la sección de alimentación, $\cos\phi$ suele ser aproximadamente 1,0. Cabe destacar en la fórmula (2.2) que se ha supuesto que no se produce ninguna pérdida cuando la potencia de CC se convierte en potencia de CA. En esta conversión se producen algunas pérdidas que se pueden ignorar en este contexto.

$$P_{\text{Mecánica}} = T * \omega = T * \frac{n}{60} * 2 \pi \quad (2.1)$$

$$P_{\text{Eléctrica}} = U_{\text{CC}} * I_{\text{CC}} = \sqrt{3} * U_{\text{CA}} * I_{\text{CA}} * \cos\phi \quad (2.2)$$

2.2 Conceptos básicos de descripción de cargas

Las cargas se suelen clasificar en cargas a par constante o a par cuadrático. Una carga a par cuadrático significa que el par de la carga es proporcional al cuadrado de la velocidad. También significa que la potencia es la velocidad elevada al cubo. En las aplicaciones a par constante, la potencia es directamente proporcional a la velocidad.

2.2.1 Par constante y par cuadrático

Par constante:

C: constante

$$T_{\text{Carga}} = C \quad (2.3)$$

$$P_{\text{Carga}} = T * \omega = C * \omega \quad (2.4)$$

Par cuadrático:

$$T_{\text{Carga}} = C * \omega^2 \quad (2.5)$$

$$P_{\text{Carga}} = T * \omega = C * \omega^2 * \omega = C * \omega^3 \quad (2.6)$$

2.2.2 Cómo evaluar el par y la potencia de frenado

En caso de funcionamiento en régimen permanente (α (aceleración angular) = cero) el par del motor tiene que hacer que el par de rozamiento corresponda proporcionalmente a la velocidad angular y al par de la carga a esa velocidad angular. El par y la potencia de frenado necesarios en función del tiempo varía mucho en estos dos tipos distintos de carga.

$$T_{\text{Motor}} = -[J * \alpha + \beta * \omega + T_{\text{Carga}}(\omega)] \quad (2.7)$$

Estudiamos primero el caso en que la carga es a *par constante* y el sistema de accionamiento no puede generar el par de frenado (accionamiento con funcionamiento en un cuadrante). Para calcular el tiempo de frenado necesario se puede aplicar la siguiente ecuación. Hay que fijarse en que la fórmula (2.7) destaca que el par necesario para la aceleración (o deceleración) inercial, el par de rozamiento y carga está en dirección opuesta al par del motor.

$$0 = -[J * \alpha + \beta * \omega + T_{\text{Carga}}(\omega)] \quad (2.8)$$

En la práctica es difícil definir exactamente el efecto del rozamiento. Al asumir que el rozamiento es igual a cero, el margen de error en el tiempo calculado es inexistente.

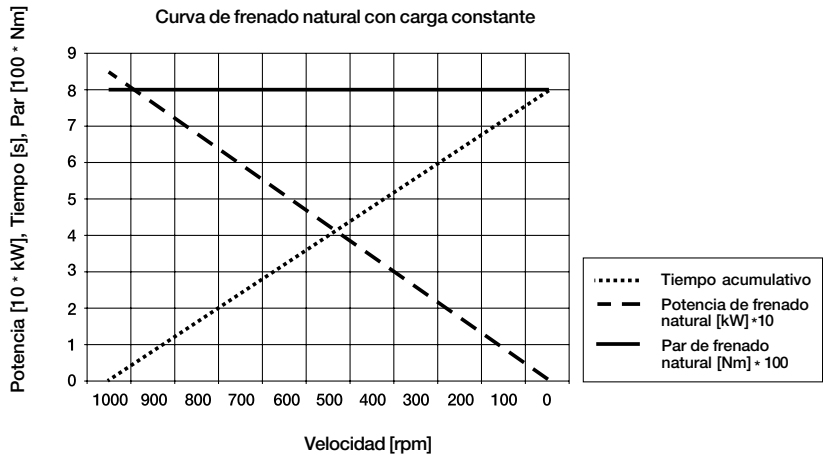


Figura 2.1 Tiempo de frenado acumulativo, potencia y par de frenado en función de la velocidad.

$$T_{Carga}(\omega) = J * \alpha = J * \frac{(\omega_{Arranque} - \omega_{Final})}{t} = J * \frac{(n_{Arranque} - n_{Final}) * 2 \pi}{t * 60} \quad (2.9)$$

Para despejar t se deriva la fórmula:

$$t = J * \frac{(n_{Arranque} - n_{Final}) * 2 \pi}{60 * T_{Carga}(\omega)} \quad (2.10)$$

Suponiendo que la inercia de la carga sea de 60 kgm² y que el par de la carga sea de 800 Nm en todo el rango de velocidades, con una carga a 1000 rpm y el par del motor puesto a cero, la carga pasa a velocidad cero en el tiempo:

$$t = J * \frac{(n_{Arranque} - n_{Final}) * 2 \pi}{60 * T_{Carga}(\omega)} = 60 * \frac{(1000 - 0) * 2 \pi}{60 * 800} = 7,85 \text{ s} \quad (2.11)$$

Esto es así en las aplicaciones en las que el par de la carga es constante al empezar el frenado. Cuando desaparece el par de la carga (por ej., al romperse una cinta transportadora) aunque no cambie la energía cinética de la mecánica, el par de la carga que deceleraría la mecánica no está activo. En tal caso, si el motor no está frenando, la velocidad sólo disminuirá como resultado del rozamiento mecánico.

Supongamos ahora que tenemos la misma inercia y el mismo par de la carga a 1000 rpm, pero que **el par de la carga cambia de forma cuadrática**. Si el par del motor se fuerza a cero, el par de la carga disminuye en proporción cuadrática a la velocidad. Si el tiempo de frenado acumulativo se presenta en función de la velocidad, vemos que el tiempo de frenado natural a la velocidad más baja (de 200 rpm a 100 rpm) aumenta de forma considerable en comparación con el cambio de velocidad de 1000 rpm a 900 rpm.

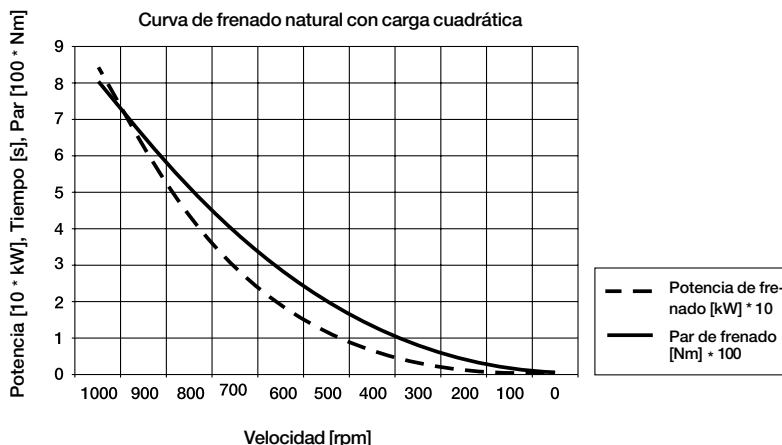


Figura 2.2 Curva de frenado natural para un par y una potencia de frenado en función de la velocidad de un ventilador de 90 kW.

Se puede trazar fácilmente una curva de frenado natural partiendo de la potencia y la velocidad en el punto nominal aplicando las fórmulas (2.5) y (2.6).

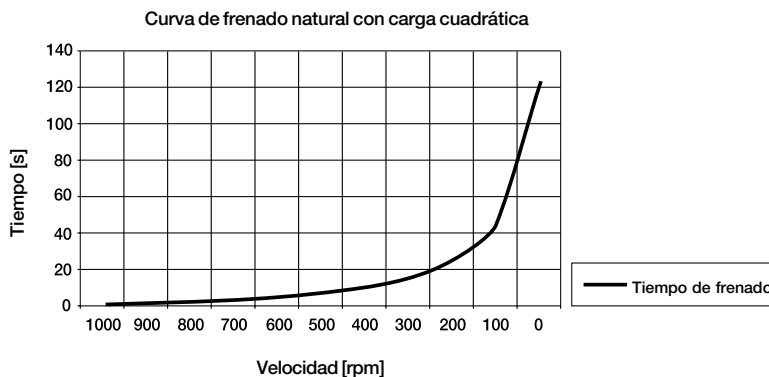


Figura 2.3 Tiempo de frenado acumulativo de un ventilador de 90 kW.

Ahora pensemos en un caso en el que se exige que el sistema mecánico frene en un tiempo determinado a partir de una velocidad concreta.

El ventilador de 90 kW tiene una inercia de 60 kgm². El punto de funcionamiento nominal del ventilador es 1000 rpm. El ventilador se tiene que parar en 20 segundos. El efecto de frenado natural provocado por las características de la carga es el máximo al principio del frenado. La energía máxima de la inercia se puede calcular con la fórmula (2.12). La potencia media de frenado se puede calcular dividiendo esta energía de frenado por el tiempo. Este valor es, por supuesto, muy conservador debido a que no se tienen en cuenta las características de carga del ventilador.

$$W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} * J * \omega^2 = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi \right)^2 = P * t \quad (2.12)$$

$$P = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi \right)^2 * \frac{1}{t} =$$

$$\frac{1}{2} * 60 * \left(\frac{1000}{60} * 2 \pi \right)^2 * \frac{1}{20} = 16,4 \text{ kW} \quad (2.13)$$

Quando se dimensiona el chopper de frenado para este valor de 16,4 kW y la capacidad de frenado del motor a una velocidad mayor es muy superior a 16,4 kW, el accionamiento debe incorporar una función de supervisión para obtener la máxima potencia de regeneración, función disponible en algunos accionamientos.

Si se desea optimizar el dimensionado del chopper de frenado para un tiempo de frenado concreto se puede empezar observando la figura (2.3). La velocidad pasa rápidamente de 1000 a 500 rpm sin frenado adicional. El efecto de frenado natural es el máximo al principio del frenado, lo que indica claramente que no hace falta empezar a frenar el motor con esta potencia de 16 kW. Tal como puede verse en la figura (2.3), la velocidad pasa de 1000 rpm a 500 rpm sin frenado adicional en menos de 10 segundos. En este punto temporal el par de la carga sólo es el 25% del nominal y la energía cinética que conserva el ventilador también es sólo el 25% de la energía a 1000 rpm. Si se repite a 500 rpm el cálculo realizado a 1000 rpm, puede verse que la potencia de frenado para una deceleración de 500 rpm a 0 rpm es aproximadamente igual a 8 kW. Tal como se ha dicho en cálculos anteriores, este valor también es conservador porque no se tiene en cuenta la curva de frenado natural provocada por las características de la carga.

En resumen, se consigue sin problemas un tiempo de deceleración de 20 segundos de 1000 rpm a 0 rpm con un chopper y una resistencia de frenado dimensionados para 8,2 kW. Fijando el límite de la potencia regenerativa del accionamiento a 8,2 kW se fija el nivel de la potencia de frenado a un nivel adecuado.

$$W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} * J * \omega^2 = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi \right)^2 = P * t \quad (2.14)$$

$$P = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi \right)^2 * \frac{1}{t} =$$

$$\frac{1}{2} * 60 * \left(\frac{500}{60} * 2 \pi \right)^2 * \frac{1}{10} = 8,2 \text{ kW} \quad (2.15)$$

2.2.3 Resumen y conclusiones

Existen dos tipos básicos de carga: a par constante y a par cuadrático.

Aplicación a par constante:

- La característica del par de la carga no depende de la velocidad. El par de la carga es aproximadamente el mismo en todo el rango completo de velocidades.
- La potencia aumenta linealmente a medida que aumenta la velocidad y viceversa.
- Aplicaciones a par constante típicas: grúas y cintas transportadoras.

Aplicación a par cuadrático:

- El par de la carga es proporcional al cuadrado de la velocidad.
- Cuando aumenta la velocidad, la potencia es igual a la velocidad al cubo.
- Aplicaciones a par cuadrático típicas: ventiladores y bombas.

Evaluación de la potencia de frenado:

- Las características de carga cuadrática significan una deceleración natural rápida entre el 50-100% de las velocidades nominales, lo que debe utilizarse al dimensionar la potencia de frenado necesaria.
- El par de la carga cuadrático significa que a velocidades bajas la deceleración natural se debe principalmente al rozamiento.
- La característica del par de la carga constante es una deceleración natural constante.
- La potencia de frenado depende del par y la velocidad al punto de funcionamiento concreto. Dimensionar el chopper de frenado basándose en la potencia máxima de frenado suele provocar un sobredimensionado.
- La potencia de frenado no depende de la intensidad (par) nominal del motor ni de la potencia tal cual.
- Si desaparece el par de la carga cuando empieza el frenado el efecto de frenado natural es reducido, lo que influye en el dimensionado del chopper de frenado.

Capítulo 3 - Soluciones de frenado eléctrico en accionamientos

Los accionamientos de CA modernos constan de un rectificador de entrada que convierte la tensión de CA en tensión de CC que se almacena en condensadores de CC. El inversor convierte a su vez la tensión de CC en tensión de CA alimentando al motor de CA a la frecuencia deseada. La potencia de proceso necesaria fluye a través del rectificador, de las barras de CC y el inversor hacia el motor. La cantidad de energía almacenada en los condensadores de CC es muy pequeña en comparación con la potencia necesaria, es decir, el rectificador tiene que dar constantemente la potencia que necesita el motor más las pérdidas del sistema de accionamiento.

3.1 Frenado de flujo del motor

El frenado de flujo es un método que se basa en las pérdidas del motor. Cuando se necesita frenado en el sistema de accionamiento, aumenta el flujo del motor y, asimismo, el componente de intensidad de magnetización empleado en el motor. Se puede controlar fácilmente el flujo mediante el principio de control directo del par (si se desea más información sobre el DTC véase la Guía técnica nº 1). Con el DTC se controla directamente el inversor para obtener el par y el flujo del motor deseados. Durante el frenado de flujo el motor está bajo control DTC, lo que asegura que se pueda frenar según la rampa de velocidad especificada. Este concepto es muy distinto al freno por inyección de CC que suele utilizarse en accionamientos. En el método por inyección de CC se inyecta intensidad de CC al motor para que se pierda el control del flujo del motor durante el frenado. El método de frenado de flujo con DTC permite que el motor pase rápidamente de frenar a actuar como motor cuando se necesite.

En el frenado de flujo el aumento de la intensidad significa un aumento de las pérdidas en el motor. La potencia de frenado también aumenta aunque no aumente la potencia de frenado aplicada al convertidor de frecuencia. El aumento de la intensidad genera un aumento de las pérdidas en las resistencias del motor. Cuando mayor sea la resistencia, mayor será la disipación de la energía de frenado en el motor. Normalmente, en motores de baja potencia (menos de 5 kW) la resistencia del motor es relativamente grande en relación con la intensidad nominal del motor. Cuanto mayor sea la potencia o la tensión del motor, menor será la resistencia del motor en relación con la intensidad del motor. Dicho de otro modo, el frenado de flujo alcanza su máxima eficacia en un motor de baja potencia.

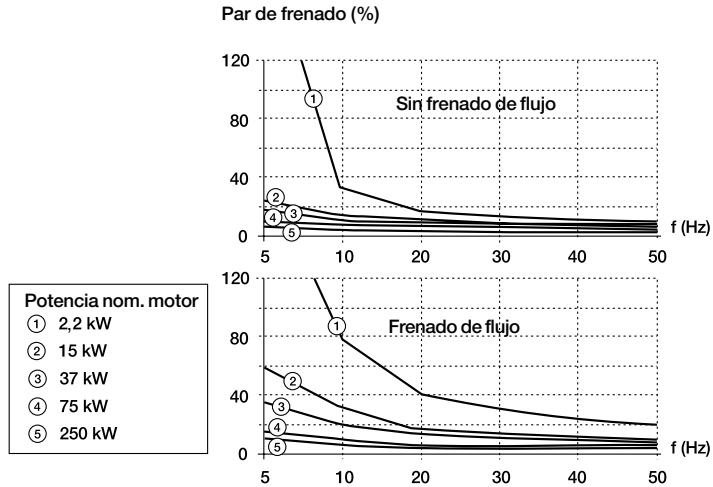


Figura 3.1 Porcentaje de par de frenado del motor del par nominal en función de la frecuencia de salida.

Principales ventajas del frenado de flujo:

- Con el método de control DTC no se necesitan componentes ni costes adicionales.
- El motor se controla durante el frenado, a diferencia del freno por inyección de CC que se suele usar en convertidores.

Principales desventajas del frenado de flujo:

- Mayor tensión térmica en el motor si se repite el frenado durante períodos breves.
- La potencia de frenado está limitada por las características del motor, como por ejemplo la resistencia.
- El frenado de flujo es útil principalmente en motores de baja potencia.

3.2 Chopper de frenado y resistencia de frenado

3.2.1 El almacenamiento de energía en el convertidor de frecuencia

En los accionamientos estándar el rectificador suele ser un rectificador de diodos de 6 pulsos o 12 pulsos que sólo puede suministrar alimentación desde la red de CA a las barras de CC, pero no al revés. Si cambia el flujo de la potencia como ocurre en las aplicaciones en dos o cuatro cuadrantes, la potencia suministrada por el proceso carga los condensadores de CC siguiendo la fórmula (3.1) y empieza a aumentar la tensión de bus de CC. La capacitancia C es un valor relativamente bajo en un accionamiento de CA que produce un rápido aumento de la tensión, tensión que sólo pueden soportar los componentes de un convertidor de frecuencia hasta un nivel determinado.

$$W = P * t = \frac{C * U_{cc}^2}{2} \quad (3.1)$$

$$U_{cc} = \sqrt{\frac{2 * W}{C}} = \sqrt{\frac{2 * P * t}{C}} \quad (3.2)$$

Se puede impedir un aumento excesivo de la tensión de bus de CC de dos formas: el inversor impide el flujo de potencia del proceso al convertidor de frecuencia. Ello se consigue limitando el par de frenado para mantener una tensión de bus de CC constante. Esta operación se denomina control de sobretensión y es una prestación estándar de la mayoría de accionamientos modernos. Sin embargo, ello significa que el perfil de frenado de la maquinaria no se realiza según la rampa de velocidad especificada por el usuario.

La capacidad de almacenamiento de energía del inversor suele ser muy poca. Por ejemplo, en un accionamiento de 90 kW la capacitancia suele ser de 5 mF. Si el accionamiento recibe alimentación de 400 V CA, las barras de CC tienen $1,35 * 400 = 565$ V CC. Suponiendo que los condensadores puedan soportar un máximo de 735 V CC, el tiempo en que se puede alimentar una potencia nominal de 90 kW al condensador de CC puede calcularse del siguiente modo:

$$t = \frac{C * U_{cc}^2}{2 * P} = \frac{5 * 10^{-3} * (735^2 - 565^2)}{2 * 90 * 10^3} = 6 \text{ ms} \quad (3.3)$$

Este rango de valores se aplica por lo general a todos los accionamientos de CA de baja tensión modernos con independencia de su potencia nominal. En la práctica ello significa que el regulador de sobretensión y su regulador 'bestia de carga' del par del motor de CA tiene que ser muy rápido. También la activación de la regeneración o del chopper de frenado tiene que ser muy rápida cuando se usa al configurar el accionamiento.

3.2.2 Principio del chopper de frenado

La otra posibilidad de limitar la tensión de bus de CC consiste en dirigir la energía de frenado hacia una resistencia a través de un chopper de frenado. El chopper de frenado es un conmutador eléctrico que conecta la tensión de bus de CC a una resistencia en la que la energía de frenado se transforma en calor. Los choppers de frenado se activan automáticamente cuando la tensión de bus de CC actual supera un nivel determinado según la tensión nominal del inversor.

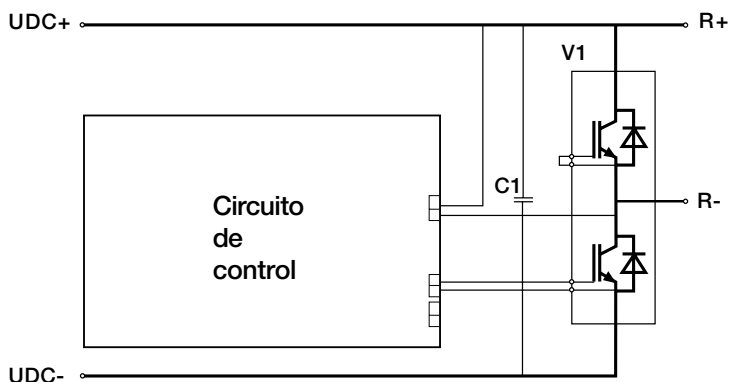


Figura 3.2 Ejemplo de diagrama de circuitos del chopper de frenado. UDC significa los terminales de las barras de CC y R los terminales de las resistencias.

Principales ventajas de la solución con el chopper y la resistencia de frenado:

- Construcción eléctrica sencilla y tecnología bien conocida.
- Inversión básica baja en el chopper y la resistencia.
- El chopper funciona aunque se pierda la alimentación de CA. Puede resultar necesario el frenado ante un fallo momentáneo de la red principal, como por ejemplo en ascensores u otras aplicaciones de alta seguridad.

Principales desventajas del chopper y la resistencia de frenado:

- Se pierde la energía de frenado si no se puede utilizar el aire calentado.
- El chopper y las resistencias necesitan más espacio.
- Puede necesitarse una mayor inversión en el sistema de recuperación de la refrigeración y calefacción.
- Los choppers de frenado se suelen dimensionar para un ciclo concreto, por ejemplo, 100% potencia 1/10 minutos, para tiempos de frenado más largos se necesita un dimensionado más exacto del chopper de frenado.
- Mayor riesgo de incendios debido al calentamiento de las resistencias y a la posible presencia de polvo y componentes químicos en el ambiente.
- La mayor tensión de bus de CC durante el frenado causa un mayor esfuerzo eléctrico al aislamiento del motor.

Cuándo se debe aplicar un chopper de frenado:

- El ciclo de frenado se necesita sólo de vez en cuando.
- La cantidad de energía de frenado en relación con la energía de actuación como motor es extremadamente pequeña.
- El frenado se necesita durante un fallo momentáneo de la red principal.

Cuándo hay que plantearse otras soluciones distintas a un chopper y una resistencia de frenado:

- Frenado continuo o repetido a intervalos regulares.
- La cantidad total de energía de frenado es elevada en relación con la energía de actuación como motor necesaria.
- La potencia de frenado instantáneo es alta, por ejemplo, varios centenares de kW durante varios minutos.
- El aire ambiente incorpora cantidades importantes de polvo u otros componentes potencialmente combustibles, explosivos o metálicos.

3.3 Configuración antiparalela de los puentes de tiristores

En un convertidor de frecuencia, los puentes rectificadores de diodos se pueden sustituir por los dos rectificadores controlados por tiristores en antifase. Esta configuración permite cambiar el puente rectificador según el flujo de potencia que se necesite en el proceso.

Los principales componentes de la unidad de alimentación por tiristores son dos puentes de tiristores de 6 pulsos. El puente directo convierte la alimentación trifásica de CA en CC. Suministra alimentación a los convertidores (inversores) mediante el circuito intermedio. El puente inverso convierte la CC en CA cuando se necesita desviar el poder de frenado del motor sobrante a la red de alimentación.

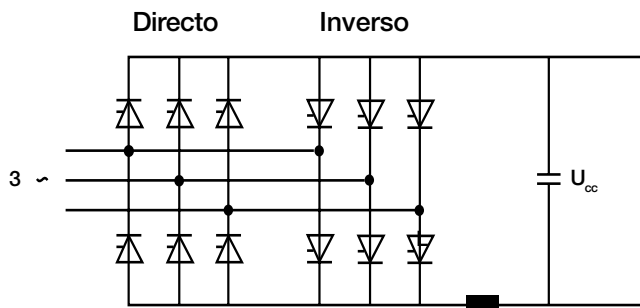


Figura 3.3 Diagrama lineal de una unidad de alimentación por tiristores antiparalela.

Sólo funciona uno de los puentes mientras el otro está bloqueado. El ángulo de disparo del tiristor se controla constantemente para mantener la tensión del circuito intermedio al nivel deseado. La selección del puente directo/inverso y el control de la tensión del circuito intermedio se basan en la determinación de la intensidad de alimentación, la tensión de alimentación y la tensión del circuito intermedio. La reactancia de CC filtra las crestas de intensidad del circuito intermedio.

Principales ventajas del puente de tiristores antiparalelo:

- Solución bien conocida.
- Inversión menor a la necesaria con una solución IGBT.
- La tensión de CC se puede regular a un valor inferior que la red, lo que en algunas aplicaciones especiales puede ser ventajoso.

Principales desventajas del puente de tiristores antiparalelo:

- La tensión de bus de CC siempre es inferior a la tensión de alimentación de CA para mantener un margen de conmutación. De este modo, la tensión alimentada al motor es más baja que la CA de entrada. Sin embargo, esto se puede solucionar utilizando un autotransformador elevador en la alimentación.
- Si la CA de alimentación desaparece se corre el riesgo de que se fundan los fusibles debido al fallo de conmutación de los tiristores.
- $\cos\phi$ varía con la carga.
- La distorsión armónica total es más alta que en las unidades IGBT regenerativas.
- La distorsión de la intensidad fluye a través de otras impedancias de la red y puede provocar una distorsión de la tensión no deseada en otros dispositivos alimentados desde el punto donde existe la distorsión de tensión.
- No se dispone de capacidad de frenado durante los fallos momentáneos de la red principal.

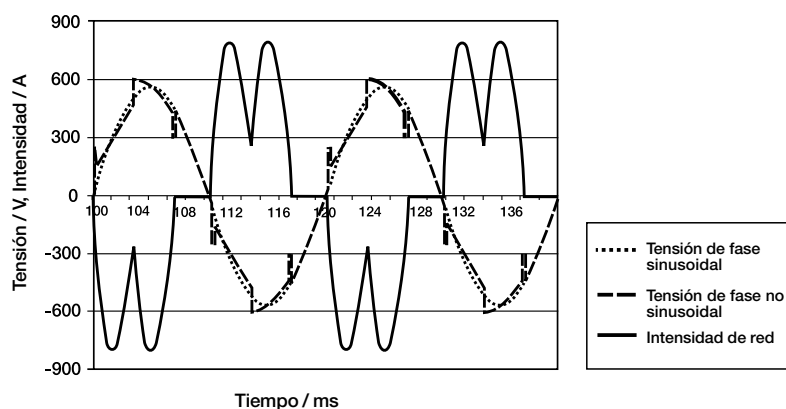


Figura 3.4. Ejemplo de ondas de tensión de intensidad y tensión de un puente antiparalelo durante el frenado.

3.4 Configuración con puente IGBT

3.4.1 Principios generales de las unidades de regeneración IGBT

La regeneración IGBT se basa en los mismos principios que la transmisión de energía en una red de distribución de energía. En una red de distribución de energía se conectan entre sí varios generadores y puntos de carga. Se puede suponer que en el punto de conexión la red de distribución de energía es un generador síncrono de gran tamaño con una frecuencia fija. El puente IGBT de entrada del accionamiento (más tarde la unidad convertidora) se puede considerar otro sistema de tensión de CA conectado a través de una reactancia al generador. El principio de la transmisión de energía entre dos sistemas de CA con una tensión U y conectados entre sí se puede calcular con la fórmula (3.4).

$$P = \frac{U_{\text{Linea}} * U_{\text{Rec}}}{X} \sin \delta \quad (3.4)$$

La fórmula indica que para transmitir la energía entre estos dos sistemas tiene que existir una diferencia de fase en el ángulo entre las tensiones de los dos sistemas de CA. Para controlar el flujo de la energía entre los dos sistemas se tiene que controlar el ángulo.

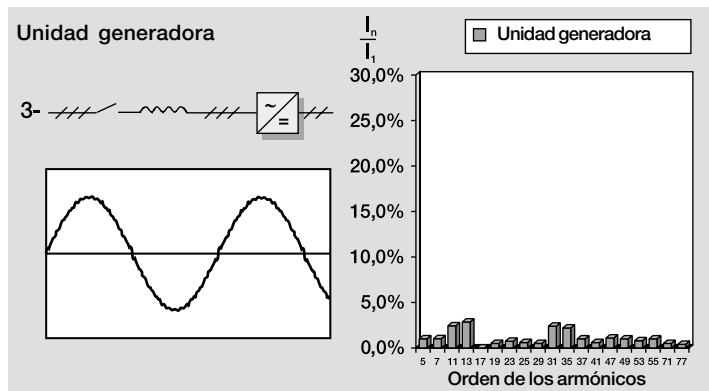


Figura 3.5. Onda de tensión de la intensidad de red y armónicos típicos de una unidad generadora IGBT.

3.4.2 Regeneración IGBT: objetivos de regulación

En las unidades de regeneración IGBT existen tres objetivos de regulación generales. El primero consiste en mantener estable la tensión de bus de CC con independencia del valor absoluto y la dirección del flujo de la potencia. Así se asegura que los inversores que alimentan motores de CA puedan funcionar óptimamente independientemente del punto de funcionamiento gracias a una tensión de bus de CC estable. La tensión de bus de CC es estable cuando el flujo de potencia hacia las barras de CC es igual al de salida de éstas. Esta regulación del flujo de potencia se consigue regulando el ángulo de potencia entre los dos sistemas de CA.

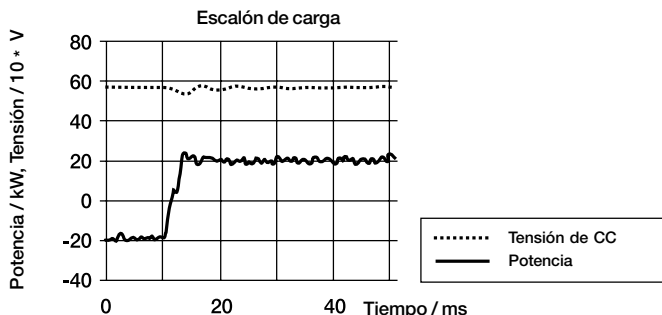


Figura 3.6. Cambio rápido de funcionamiento regenerativo a motor. La tensión de bus de CC es muy estable durante esta transición.

El segundo objetivo de regulación consiste en minimizar la intensidad de alimentación necesaria (funcionar a $\cos\phi = 1,0$), lo que se consigue regulando la tensión de salida de la unidad convertidora. En algunas aplicaciones se desea que la unidad convertidora IGBT también funcione a modo de carga inductiva o capacitativa.

El tercer objetivo de regulación es minimizar el contenido de armónicos de la intensidad de alimentación. Los principales criterios de diseño en este caso son el valor de la reactancia y que el método de regulación sea adecuado.

3.4.3 Control directo del par en forma de control directo de la potencia

El control directo del par (DTC) es una forma de regular un motor de CA alimentado por un inversor. El principio del control activa y desactiva los conmutadores IGBT directamente a partir de la diferencia entre el par actual del motor de CA y el par de referencia del usuario (Guía técnica nº 1). El mismo principio se aplica a una unidad convertidora que regula el flujo de potencia desde la red de alimentación al accionamiento y viceversa. La potencia se multiplica por el par por la frecuencia angular, que es constante en la red: controlar el par significa controlar el flujo de potencia.

$$P = \frac{U_l U_c}{X} \sin\delta = |T| |\omega| \tag{3.5}$$

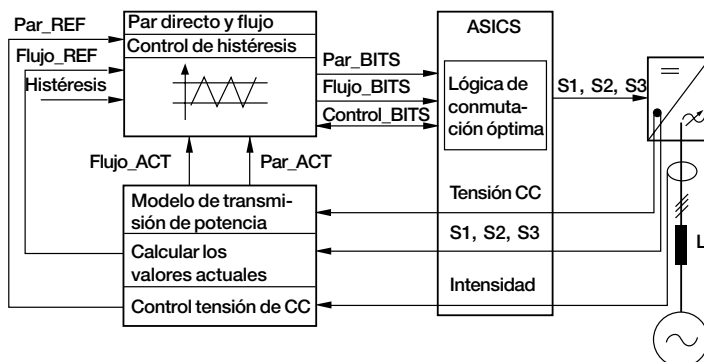


Figura 3.7. Diagrama de control fundamental de la unidad regenerativa IGBT con DTC.

El método de control DTC con la tecnología IGBT contribuye a que se generen pocos armónicos. Por ello, la unidad de alimentación IGBT puede sustituir a las configuraciones de alimentación de 12 pulsos o 18 pulsos en un cuadrante que se suelen utilizar para reducir los armónicos en la sección de alimentación. Una unidad de alimentación IGBT también es una solución, por tanto, en aquellos casos en los que el mayor problema son los armónicos y no cómo canalizar la energía de frenado.

Principales ventajas de una unidad de regeneración IGBT:

- Pocos armónicos en la alimentación tanto en actuación como motor como en regeneración.
- Dinámica alta durante los cambios rápidos de flujo en la sección de carga.
- Posibilidad de aumentar la tensión de CC más que la alimentación de CA de entrada, lo que puede usarse para compensar una red débil o aumentar la capacidad de par máximo del motor en la frecuencia de inicio de debilitamiento del campo.
- Compensación total de las caídas de tensión del sistema gracias a la posibilidad de sobrepasar de la tensión.
- Posibilidad de regular el factor de potencia.
- Funcionamiento con cortes de la red con sincronización automática a la rejilla.
- La tensión de bus de CC tiene aproximadamente el mismo valor durante la monitorización que durante el frenado. Sin esfuerzos de tensión adicionales ni aislamiento del bobinado del motor durante el frenado.

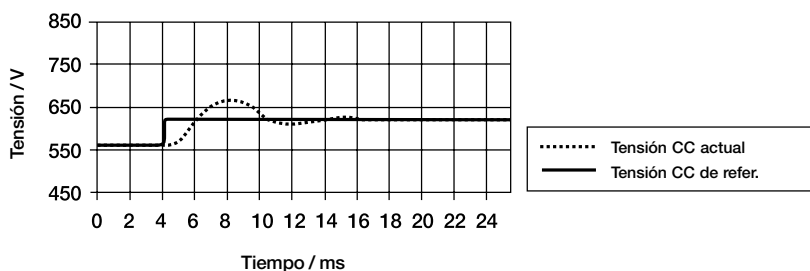


Figura 3.8. Posibilidad de sobrepasar de la tensión de alimentación.

Principales desventajas de una unidad de regeneración IGBT:

- Mayor coste de compra.
- No se dispone de la capacidad de frenado durante fallos momentáneos de la red principal.
- Armónicos de la tensión de alta frecuencia debido a la elevada frecuencia de conmutación. Estos componentes de la tensión de varios kilohertzios pueden excitar a los pequeños condensadores que se utilicen en otros dispositivos eléctricos. Con un diseño y disposición adecuados de los transformadores de alimentación de los distintos dispositivos se evitan estos fenómenos.

Cuándo se debe utilizar una unidad de regeneración IGBT:

- El frenado es continuo o se repite con regularidad.
- El poder de frenado es muy alto.
- Cuando se ahorra espacio es comparación con la solución a base de resistencias de frenado.
- Cuando los límites de los armónicos de red son cruciales.

3.4.4 Dimensionado de una unidad de regeneración IGBT

Para dimensionar la unidad IGBT se parte de la potencia necesaria. Supongamos que la potencia en el eje necesaria durante la actuación como motor es de 130 kW y que la potencia de frenado, de 100 kW. Para dimensionar la unidad de alimentación IGBT se selecciona el valor máximo de potencia de actuación como motor o de frenado, que en este caso es de 130 kW. La tensión del motor es de 400 V. El valor mínimo para la red de alimentación es de 370 V.

En este caso se puede usar el sobrepasar de tensión: se aumenta la tensión de bus de CC hasta una tensión de CA de 400 V. Sin embargo, la intensidad de alimentación necesaria se calcula partiendo del nivel 370. Suponiendo que existen pérdidas del 5% del sistema en el motor y el accionamiento, la potencia total necesaria de la rejilla es de 136,5 kW. La intensidad de alimentación se puede calcular con la fórmula:

$$I_{\text{ent}} = \frac{P}{\sqrt{3} * U_{\text{ent}}} = \frac{136,5 \text{ kW}}{\sqrt{3} * 370 \text{ V}} = 213 \text{ A} \quad (3.6)$$

La unidad de regeneración IGBT se selecciona partiendo únicamente de la intensidad calculada.

3.5 CC común

Cuando en un proceso hay varios accionamientos y un motor necesita capacidad de frenado mientras los demás funcionan como motor, la solución con barras de CC comunes es muy eficaz para reaprovechar la energía mecánica. Un sistema de accionamiento con barras de CC comunes consta de un rectificador de alimentación aparte que convierte CA en CC, e inversores que alimentan a motores de CA conectados a las barras de CC comunes (las barras de CC son el canal

que desplaza la energía de frenado de un motor en beneficio de los demás motores). En la figura (3.9) se indica la configuración básica de las barras de CC comunes.

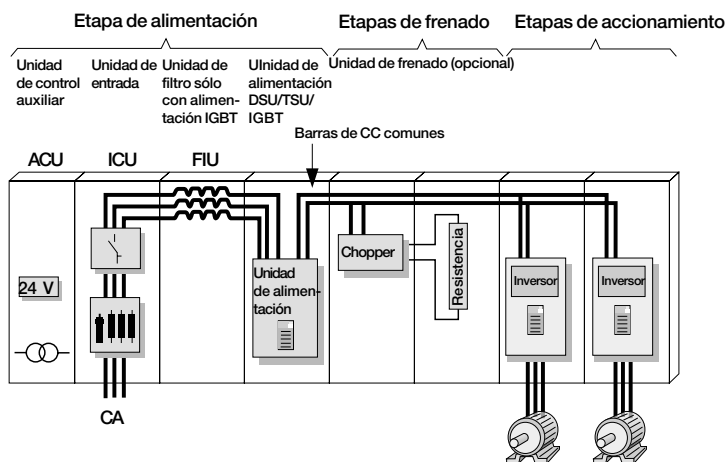


Figura 3.9. Configuración básica de las barras de CC comunes.

Principales ventajas de las barras de CC comunes:

- Flujo de potencia fácil de equilibrar entre accionamientos.
- Bajas pérdidas del sistema al convertir la energía de frenado gracias a las barras de CC comunes.
- Aunque la potencia de frenado instantáneo sea mayor que la potencia de actuación como motor, no se tienen que dimensionar el chopper y la resistencia de frenado para obtener una plena potencia de frenado.
- Si se necesita la potencia de frenado durante períodos prolongados se pueden usar varios rectificadores.

Principales desventajas de la solución con barras de CC comunes con un rectificador en un cuadrante:

- La potencia instantánea de actuación como motor tiene que ser mayor que o igual a la potencia de frenado.
- Se necesitan el chopper y la resistencia de frenado si la potencia de frenado instantáneo es mayor que la potencia de actuación como motor.
- Si hay pocos motores, el coste adicional de un inversor dedicado que desconecte el dispositivo de las barras de CC aumenta el coste de la inversión.

Cuándo utilizar la solución con barras de CC comunes con un rectificador en un cuadrante:

- El número de accionamientos es alto.
- La potencia de actuación como motor siempre es más alta que la potencia de frenado o sólo se necesita una potencia de frenado baja para el chopper de frenado.

Capítulo 4 - Evaluar el coste del ciclo de vida de distintos frenados eléctricos

Cada vez es más importante evaluar el coste del ciclo de vida total al invertir en productos para ahorrar energía. El accionamiento de CA se emplea para regular la velocidad y el par. Esta función básica de los accionamientos de CA significa ahorros en el consumo de energía en comparación con otros métodos de control. En las aplicaciones de bombas y ventiladores apenas se necesita el frenado. Sin embargo, los accionamientos de CA modernos se utilizan cada vez más en aplicaciones que necesitan frenado.

Antes hemos citado diversos criterios técnicos. A continuación se analizan los factores económicos de las distintas opciones de frenado eléctrico.

4.1 Cómo calcular el coste directo de la energía

El coste directo de la energía se puede calcular partiendo, por ejemplo, del precio de la energía y del tiempo y la potencia de frenado calculados por día. Si bien el precio de la energía varía según los países, se puede aplicar un precio aproximado de 0,05 euros por kilowatio-hora. 1 Euro ~ 1 USD. El coste anual de la energía se puede calcular con la fórmula:

$$\text{Coste} = \text{Ciclo Frenado (h/día)} * \text{Potencia media frenado (kW)} * \text{Precio Energía (Euros/kWh)} * 365 \quad (4.1)$$

Por ejemplo, un accionamiento de 100 kW funciona 8000 horas al año y frena con una potencia media de 50 kW durante 5 minutos cada hora, es decir, 667 horas al año. El coste directo anual de la energía de frenado es de 1668 Euros.

4.2 Cómo evaluar el coste de la inversión

Las inversiones necesarias para los distintos métodos de frenados varían. Deben evaluarse los siguientes componentes del coste de la inversión.

Chopper de frenado:

- El coste de la inversión adicional que representan el chopper y la resistencia de frenado más el coste del espacio adicional que se necesita para estos componentes.
- El coste de la inversión en ventilación adicional necesaria para el chopper de frenado.

Frenado eléctrico por tiristores o IGBT:

- Coste adicional de la inversión en el frenado regenerativo IGBT o por tiristores en comparación con el mismo accionamiento sin frenado eléctrico.

Barras de CC comunes:

- Coste adicional de la inversión en el chopper y la resistencia de frenado, incluyendo el espacio necesario para estos componentes en una solución con barras de CC comunes.
- Diferencia del coste de la inversión entre la solución con barras de CC comunes y un único accionamiento.

4.3 Cómo calcular el coste del ciclo de vida

El cálculo del coste del ciclo de vida apoya la decisión puramente económica al realizar una inversión. El precio de la energía y de los accionamientos varía según el país, la compañía eléctrica, el tamaño de la empresa, los tipos de interés, el tiempo durante el que se utiliza la inversión y la situación macroeconómica global. Los valores absolutos de los precios indicados en los siguientes ejemplos se usan únicamente para ilustrar los principios del cálculo.

Caso 1 - Frenado de vez en cuando

Imaginemos la siguiente aplicación:

La potencia continua de actuación como motor es de 200 kW a una velocidad de eje de 1500 rpm. En caso de que se emita un comando de paro de emergencia, la rampa tiene que disminuir en 10 segundos. Partiendo de la experiencia en el proceso, cada mes se activa un paro de emergencia. La inercia J del sistema de accionamiento es de 122 kgm². Cuando se activa el paro de emergencia se puede pasar por alto el par de la carga.

Cálculo del par de frenado necesario para el motor:

$$T = J * \frac{(\omega_{\text{Arranque}} - \omega_{\text{Final}})}{t} = J * \frac{(n_{\text{Arranque}} - n_{\text{Final}}) * 2 \pi}{t * 60} =$$
$$122 * \frac{(1500 - 0) * 2 \pi}{10 * 60} = 1915 \text{ Nm} \quad (4.2)$$

El par típico de un motor de 200 kW y 1500 rpm es de unos 1200 Nm. Un motor de CA normal regulado instantáneamente por un inversor puede funcionar a un par igual a un 200% del valor nominal. Para obtener pares más altos se necesita una intensidad de motor proporcionalmente más alta.

La potencia de frenado es la máxima al principio del ciclo de frenado.

$$P_{Fr, \max} = T * \omega = 1915 * \frac{1500}{60} * 2 \pi \approx 300 \text{ kW} \quad (4.3)$$

El chopper y la resistencia de frenado tienen que soportar instantáneamente la intensidad para una potencia de 300 kW. A continuación se calcula la potencia media de frenado.

$$W_{kin} = \frac{1}{2} * J * \omega^2 = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi \right)^2 = P * t \quad (4.4)$$

$$P = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi \right)^2 * \frac{1}{t} =$$

$$\frac{1}{2} * 122 * \left(\frac{1500}{60} * 2 \pi \right)^2 * \frac{1}{10} = 150,3 \text{ kW} \quad (4.5)$$

Coste de la resistencia de frenado:

El chopper de frenado necesario debe soportar una potencia máxima de frenado de 300 kW. Si el accionamiento tiene una función de limitación de potencia se puede dimensionar la resistencia de frenado según los 150,3 kW. El coste adicional del chopper y la resistencia de frenado es de 4000 Euros. La resistencia de frenado necesita 0,4 m² de espacio adicional. El coste del espacio es de 500 Euros/m².

Debido a la reducida energía total de calefacción y al uso del frenado en caso de emergencia, el coste de la refrigeración adicional se considera desdeñable.

El coste total adicional de la inversión se compone de:

- Chopper y resistencia de frenado en armario, 4000 Euros.
- Espacio de 0,4 m² * 500 Euros/m², 200 Euros.

El coste total de la energía perdida durante un frenado es:

$$\text{Coste} = \frac{10}{3600} (\text{h}) * \frac{300}{2} (\text{kW}) * 0,5 (\text{Euros/kWh}) = 0,02 \text{ Euros} \quad (4.6)$$

En este caso el coste de la energía de frenado es desdeñable.

Coste del accionamiento en cuatro cuadrantes:

El coste adicional de la inversión en un frenado eléctrico con puente de tiristores antiparalelo comparado con un accionamiento con chopper de frenado es de 7000 Euros. Tal como cabía esperar, el ahorro de energía no puede usarse como argumento para justificar la inversión adicional.

Caso 2 - Aplicación en grúas

Imaginemos la siguiente aplicación:

Grúa con una potencia de elevación de 100 kW. La grúa necesita plena potencia tanto en el motor como en el generador. El tiempo de funcionamiento de la elevación más largo puede ser de 3 minutos. El tiempo medio en servicio de la grúa durante un año es del 20%.

Coste del frenado por resistencia:

El chopper y la resistencia de frenado tienen que dimensionarse para un frenado continuo de 100 kW debido al tiempo máximo de frenado de 3 minutos. Normalmente, el dimensionado del chopper de frenado máximo se realiza para un tiempo de frenado de 1 minuto cada 10 minutos.

- Chopper y resistencia de frenado en armario: 7800 Euros.

La construcción mecánica de la grúa permite tener el chopper de frenado en armarios. No se necesita más espacio.

Se supone que el 50% del tiempo de servicio la grúa funciona en el lado del generador, un promedio de 2,4 h/día. El coste total de la energía desperdiciada es:

$$\text{Coste} = 2,4 \text{ (h/día)} * 100 \text{ (kW)} * 0,05 \text{ (Euros/kWh)} * 365 = 4380 \text{ Euros} \quad (4.7)$$

Coste del accionamiento en cuatro cuadrantes:

Para grúas se recomienda el accionamiento IGBT en cuatro cuadrantes.

El coste adicional de la inversión en el frenado eléctrico con un puente de entrada IGBT en comparación con el accionamiento con chopper de frenado es de 4000 Euros.

El cálculo de la amortización directa indica que con una inversión adicional de 4000 Euros se obtiene el mismo ahorro de energía durante el primer año de uso.

Case 3 - Aplicación en una centrífuga

Imaginemos la siguiente aplicación:

Centrífuga de azúcar con motor de 6 polos y una potencia nominal de 160 kW. El motor necesita todo el par durante un período de 30 segundos para acelerar el cesto cargado hasta una velocidad máxima de 1100 rpm, la centrífuga separa la solución de la carga durante 30 segundos a alta velocidad. Una vez se seca la carga el motor decelera la

centrífuga tan rápido como le es posible para permitir su descarga y recarga.

En un ciclo por lotes los tiempos de carga, separación y descarga son fijos, con lo que la única oportunidad de aumentar la producción consiste en aumentar las velocidades de aceleración y deceleración. Esto se consigue utilizando un accionamiento IGBT en cuatro cuadrantes, ya que se puede aplicar una sobretensión de enlace de CC para su funcionamiento en el rango de frecuencia de inicio de debilitamiento del campo (de 1000 a 1100 rpm). Así se pueden ahorrar unos 3 segundos por ciclo, con lo que se reduce el tiempo de ciclo de 110 segundos a 107 segundos. Ello permite aumentar la producción, lo que significa que se mejora la productividad del proceso. La ventaja de precio que representa el IGBT es del 10%.

Capítulo 5 - Símbolos y definiciones

B: Coeficiente de rozamiento

C: Constante o coeficiente

CA: Corriente o tensión continua

CC: Corriente o tensión continua

$\cos\phi$: Coseno del ángulo eléctrico entre la tensión y la intensidad fundamental

FP: Factor de Potencia, que se define como $FP = P/S$ (potencia/voltamperio) = $I_1 / I_s * FPD$ (Con una intensidad sinusoidal, FP es igual al FPD).

FPD: Factor de Potencia de Desplazamiento, definido como $\cos\phi_1$; ϕ_1 es el ángulo de fase entre la intensidad de frecuencia fundamental usada por el equipo y el componente de frecuencia fundamental de la tensión de alimentación.

I: Intensidad [en Amperios, A]

J: Inercia [kgm²]

n: Velocidad de rotación [revoluciones por minuto, rpm]

P: Potencia [en Vatios, W]

T: Par (Newton metro, Nm)

t: Tiempo

THD: La Distorsión Armónica Total en la intensidad es:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{40} I_k^2}}{I_1} \quad (5.1)$$

donde I_1 es el valor efectivo de la intensidad de la frecuencia fundamental. La THD en tensión se puede calcular de forma similar.

U: Tensión [V]

W: Energía [en Julios, J]

ω : Velocidad angular [radianes/segundo, 1/s]

- A**
almacenamiento de energía 14, 15
- B**
bombas 12
- C**
CC común 22, 23, 25
centrífuga 27
cintas transportadoras 12
control de sobretensión 15
control directo del par 13, 20
 $\cos\phi$ 7, 18, 29
chopper de frenado 11, 12, 15, 16, 17, 23, 24, 25, 26, 27
- D**
distorsión armónica 18, 29
- E**
en cuatro cuadrantes 5
en dos cuadrantes 5
en un cuadrante 5, 8, 21, 23
- F**
frenado de flujo 13, 14
frenado natural 10, 11, 12
frenado por inyección de CC 13
- G**
grúa 12, 27
- I**
IGBT 18, 19, 20, 21, 22, 24, 27, 28
impedancia 18, 20
inercia 9, 10, 25, 29
inversor 13, 15, 16, 19, 20, 23, 25
- P**
par constante 8, 12
par cuadrático 8, 12
potencia de CA 7
potencia de CC 7
potencia de frenado 7, 11, 12, 13, 15, 17, 22, 23, 26
puente de tiristores 17, 18, 26
- R**
rectificador 13, 14, 17, 22, 23
rozamiento 8, 9, 12
- S**
sobredimensionado 12
- U**
unidad convertidora 19, 20
- V**
ventiladores 12



ABB Industria, S.A.

Polígono Industrial del S.O.
08192 - Sant Quirze del Vallès
Barcelona

España

Teléfono 93 728 8700

Fax 93 712 4243

Internet <http://www.abb.com/motors&drives>



Copyright © ABB Automation Group Ltd, 2001 3BFE 64455575 R0106 Especificaciones sujetas a cambio sin previo aviso.

ES 27.03.2001

441
Impreso 014