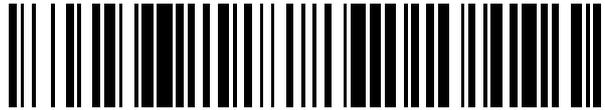


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 404 039**

51 Int. Cl.:

H02P 3/24	(2006.01)
H02P 6/24	(2006.01)
H02P 21/00	(2006.01)
B60L 7/10	(2006.01)
B60L 15/02	(2006.01)
B60L 15/20	(2006.01)
H02P 25/02	(2006.01)
B60L 11/18	(2006.01)
H02P 3/02	(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.09.2008 E 08802674 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.01.2013 EP 2201672**

54 Título: **Procedimiento y sistema de control para el control de una máquina síncrona eléctrica**

30 Prioridad:

27.09.2007 DE 102007046289

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

23.05.2013

73 Titular/es:

**L-3 COMMUNICATIONS MAGNET-MOTOR GMBH
(100.0%)
PETERSBRUNNER STRASSE 2
82319 STARNBERG, DE**

72 Inventor/es:

**HÖHN, HARRY;
LAY, LARS y
BIEBACH, JENS**

74 Agente/Representante:

UNGRÍA LÓPEZ, Javier

ES 2 404 039 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento y sistema de control para el control de una máquina síncrona eléctrica

5 La presente invención se refiere a un procedimiento para el control de una máquina síncrona eléctrica, así como a un sistema de control para el control de una máquina síncrona eléctrica con un dispositivo de control, que puede conectarse con un dispositivo de alimentación eléctrica para el suministro de corriente a un sistema de estator eléctrico de la máquina. Además, la invención se refiere a un vehículo con al menos una máquina síncrona para el accionamiento del vehículo y con un sistema de control de este tipo, así como a un producto de programa de ordenador, que es adecuado para la realización de un procedimiento de este tipo.

10 Una máquina síncrona y un sistema para el control de una máquina síncrona de este tipo se usa por ejemplo en un vehículo eléctrico. Por un vehículo accionado por electricidad se entiende aquí un medio de traslación o transporte, en el que el par de accionamiento se pone a disposición mediante el campo magnético de uno o varios motores síncronos trifásicos (realización giratoria o lineal) y se transmite mecánicamente a la superficie, en la que tiene lugar el movimiento. Es habitual que la máquina eléctrica transmita el par de forma directa (motor integrado al cubo de la rueda sin engranaje, motor lineal) o que lo transmita mediante un engranaje conectado en serie (motor integrado al cubo de la rueda con engranaje, motor central con distintas formas de engranaje para la transmisión del par).

15 Para los medios de traslación es característico el requerimiento de un par positivo o negativo determinado según la necesidad de aceleración o desaceleración (aceleración negativa). Cuando se pretende acelerar el vehículo, el par positivo se elige de tal modo que una velocidad deseada se consiga en el tiempo deseado. La especificación del valor del par positivo se realiza p.ej. mediante el pedal del acelerador. Si se desea una desaceleración, se emite el comando para un par negativo. Este comando puede especificarse p.ej. con el pedal del freno.

20 Si la transmisión de los pares se produce en varios puntos a la superficie en la que tiene lugar el movimiento, los pares individuales han de elegirse de tal modo que se favorezca un estado estable del vehículo. Es decir, se intenta impedir pares gear. Para impedir pares gear, la transmisión del par se realiza normalmente de forma simétrica respecto al eje longitudinal del vehículo. Esto es el caso p.ej. en vehículos en los que por eje actúan unos pares sobre ruedas que presentan el mismo valor en la misma dirección de marcha.

25 Para que la máquina síncrona trifásica pueda desplegar el par completo, la frecuencia y la posición de fase de la corriente que alimenta deben corresponder a la frecuencia de polo y la posición de polo del rotor o inducido. Para poner a disposición un sistema trifásico síncrono con la posición de fase correcta, se usa p.ej. un convertidor electrónico basado en semiconductores de potencia. En la máquina síncrona trifásica, en el funcionamiento síncrono en condiciones lineales del sistema existe una proporcionalidad directa entre la corriente aplicada y el par alcanzado. Esta proporcionalidad se aprovecha para realizar mediante una especificación de la misma intensidad de corriente en motores de un eje pares iguales. Para la especificación precisa de pares es necesario un regulador de corriente rápido. Este regulador de corriente puede estar conectado en cascada con otras regulaciones, como p.ej. una regulación de la velocidad.

30 La necesidad de una simetría de pares no sólo existe al acelerar el vehículo sino también al frenar. Al frenar se forma un par que se opone a la dirección de movimiento actual del vehículo y de la máquina, transformándose la energía cinética del vehículo y de la máquina en energía eléctrica. Esta desaceleración hace que la máquina alcance la velocidad cero. En este momento, el par debe dosificarse exactamente de tal modo que compensa completamente las fuerzas externas del vehículo.

35 En muchos casos, una regulación de la velocidad no es óptima. La regulación de la velocidad tiene conectada en cascada típicamente una regulación de la corriente, de modo que todas las ruedas establecen un par constante según la especificación del pedal de freno. Por lo tanto, las ruedas que se encuentran en un terreno suelto pueden resbalar, mientras que las ruedas en terreno firme aún ruedan. Es difícil realizar una adaptación de la fuerza de frenado al terreno. También es problemático elegir los parámetros de ganancia del regulador de velocidad, puesto que éstos dependen p.ej. de factores como la masa del vehículo, que varía según el estado de carga, el coeficiente de adherencia entre neumático y firme, que depende del terreno actual, así como de la elección de los neumáticos, la posición de las ruedas en la zona delantera o trasera del vehículo y de la cuesta hacia abajo o hacia arriba de la calzada. Si entre la máquina y el punto de ataque del par existe también un engranaje con un juego característico, existe el peligro de que los flancos de los dientes sufran daños por los bruscos cambios de carga del engranaje.

40 El estado de la técnica divulga:

45 El documento US 6 124 645 A describe un procedimiento de control para un vehículo eléctrico en el que el objetivo es mantener el vehículo parado en una cuesta hacia arriba sin accionar el pedal de acelerador. Aquí, al detectarse una parada del vehículo, se conmuta a un mecanismo de regulación para realizar una regulación de los pares, de modo que el vehículo se mantiene parado.

50

55

60

65

El objeto del documento EP 1 555 748 A es detectar un desplazamiento angular entre una posición de polo magnético de un motor síncrono y una posición de referencia de un codificador incremental. Para ello, se detiene la posición del polo magnético del motor en una posición estable mediante una excitación CC para ajustar a continuación el codificador correspondientemente. La corriente del estator se ajusta en I_d e $I_q = 0$, variando el valor de la corriente I_d a lo largo del tiempo, en particular, reduciéndose. El efecto así conseguido es que se acorta el tiempo hasta que el rotor del motor llegue a pararse.

En Schröder, D. "Synchron-Vollpolmaschine ohne Dämpferwicklung, Steuerbedingungen", Elektrische Antriebe 2, Regelung von Antrieben, Springer, páginas 530-571, 1 de enero de 1995 está descrito un procedimiento para la regulación de máquinas síncronas.

En el documento US 2004/0178754 A1 están descritos un dispositivo y un procedimiento para mantener un vehículo eléctrico o híbrido y eléctrico en una cuesta hacia arriba. El dispositivo comprende una máquina trifásica que acciona el vehículo. La máquina se acciona mediante un convertidor con modulación de ancho de pulso, que presenta varios semipuentes, que están conectados respectivamente con distintas fases de la máquina. La estrategia del funcionamiento usa distintos modos de conexión para minimizar y distribuir la pérdida de potencia entre los disyuntores en el convertidor y en las fases de la máquina.

La presente invención tiene el objetivo de indicar un procedimiento para el control de una máquina síncrona eléctrica y un sistema de control correspondiente, que sea adecuado para mantener un vehículo accionado parado, en gran medida sin movimientos oscilantes.

El objetivo se consigue mediante un procedimiento para el control de una máquina síncrona eléctrica según la reivindicación 1. Además, la invención se refiere a un vehículo con al menos una máquina síncrona eléctrica para el accionamiento del vehículo y con un sistema de control según las características de la reivindicación 8, así como a un producto de programa de ordenador según la reivindicación 9, que presenta segmentos de código de software adecuados para la realización de un procedimiento de control de este tipo, cuando están almacenados en un sistema de control para el control de una máquina síncrona eléctrica. El producto de programa de ordenador también puede ser sustituido por un circuito programado por conexiones según la reivindicación 10 que tiene la misma funcionalidad.

En particular, la invención se refiere a un procedimiento para el control de una máquina síncrona eléctrica con un estator y un rotor con las siguientes etapas: La máquina se hace funcionar con un par de desaceleración, de modo que se reduce una velocidad de rotor de la máquina, controlándose el movimiento del rotor de la máquina. Al detectarse una inversión de dirección o una velocidad del rotor aproximadamente igual a cero, pasándose a un modo de parada se ajusta al menos una magnitud de alimentación eléctrica de un sistema de estator eléctrico de la máquina de tal modo que al principio del modo de parada se establece un par interior efectivo de la máquina que es reducido en comparación con el par de desaceleración. La magnitud de alimentación eléctrica se ajusta de este modo hasta que se ajuste, moviéndose el rotor y bajo la influencia de un par exterior que actúa sobre la máquina un equilibrio de pares estable entre el par exterior y el par interior de la máquina.

Por consiguiente, según la invención se obtiene un control de parada de máquinas síncronas eléctricas en realización giratoria o lineal, en el que tras haberse realizado la desaceleración con par regulado o fuerza regulada al alcanzarse la velocidad cero se conmuta a un modo de parada especial, en el que se ajusta un equilibrio de pares o fuerzas estable en el punto de intersección de dos curvas características de pares/fuerzas, de modo que el vehículo se mantiene parado a pesar de actuar una fuerza exterior.

Aquí, el objetivo es oponer una resistencia al vehículo tras la inversión de la dirección de movimiento, que aumenta a medida que aumenta la distancia recorrida. Sin intervenciones mediante control o regulación se ajusta en este caso un estado, en el que los pares que accionan y frenan están en equilibrio, manteniéndose parado el vehículo.

En particular, en el modo de parada se mantiene sustancialmente constante una posición de fase de la magnitud de alimentación eléctrica respecto al sistema de estator. En una forma de realización, la magnitud de alimentación eléctrica se ajusta de tal modo que al principio del modo de parada un par interior efectivo de la máquina pasa a ser aproximadamente igual a cero.

Aquí, pueden ajustarse de forma definida la posición de fase y el valor de la magnitud de alimentación eléctrica mediante una posición del rotor válida durante la inversión de la dirección o con la velocidad igual a cero de la máquina y una especificación del par de desaceleración.

Como magnitud de alimentación eléctrica se aplica, por ejemplo, un patrón de corrientes al estator de la máquina, en particular un patrón de corrientes de fase sustancialmente constantes. El patrón de corrientes forma según una forma de realización un vector de corriente en representación de índice espacial que se aplica al principio del modo de parada de tal modo que se ajusta una posición de fase del vector de corriente de aproximadamente -90° eléctricamente respecto a la dirección de movimiento del índice espacial de la tensión de rotor inducida después de la parada y, por lo tanto, de forma retardada (encendido retardado).

En las reivindicaciones subordinadas se indican otras realizaciones y variantes ventajosas de la invención.

A continuación, la invención se explicará más detalladamente con ayuda de las figuras representadas en el dibujo. Muestran:

- 5 La figura 1 una representación esquemática de un sistema de accionamiento con una máquina síncrona eléctrica en forma de una máquina de campo giratorio, que es controlada y alimentada por un sistema de control con un convertidor de frecuencia;
- 10 la figura 2 una representación esquemática de magnitudes eléctricas en un funcionamiento de parada según la invención, siendo generadas las magnitudes eléctricas por la máquina de campo giratorio o el sistema de control según la figura 1 en una representación de índice espacial;
- 15 la figura 3 otra representación esquemática de magnitudes eléctricas en un modo de parada según la invención, siendo generadas las magnitudes eléctricas por la máquina de campo giratorio o por el sistema de control según la figura 1 en una representación de índice espacial;
- la figura 4 una representación esquemática de valores reales de corrientes de fase de estator correspondientes.

20 En la figura 1 se muestra una representación esquemática de un sistema de accionamiento con una máquina síncrona eléctrica en forma de una máquina de campo giratorio 2, que es controlada y alimentada por un sistema de control 1 con un convertidor de frecuencia 3. Las siguientes reflexiones respecto al control de la máquina de campo giratorio 2 son válidas de forma análoga también para un control de una máquina síncrona en una realización lineal, en la que el estator y el rotor están realizados correspondientemente como estator o rotor lineales.

25 El convertidor de frecuencia 3 está realizado de forma conocida como convertidor indirecto con la tensión de circuito intermedio U_d , pudiendo usarse en principio también otros tipos de convertidores de frecuencia. El convertidor de frecuencia 3 es controlado por un mecanismo de conmutación 9, que controla las válvulas de corriente 31 del convertidor de frecuencia 3 según la especificación del control, es decir, las abre o cierra correspondientemente. En el rotor de la máquina 2 actúa una carga 10, por ejemplo mediante un eje de un vehículo.

35 Es conocido que las máquinas de campo giratorio pueden regularse tanto en las coordenadas del rotor como en las del estator. La regulación de la corriente en las coordenadas del estator tiene la ventaja que no debe realizarse una transformación de coordenadas. Los valores reales de la corriente se transmiten al regulador de corriente 7 como son medidos. Puesto que el valor teórico y real son respectivamente magnitudes alternas dinámicas, se exigen requisitos estrictos del regulador 7. El uso de un regulador PI lineal no es posible debido a las magnitudes alternas. No obstante, es posible realizar regulaciones de alta calidad en coordenadas de estator mediante el uso de reguladores de histéresis no lineales. Una transformación de coordenadas dado el caso necesaria y una transformación inversa de coordenadas se realiza en un dispositivo de transformación de coordenadas 6 correspondiente o en un dispositivo de transformación inversa de coordenadas 8.

45 Cuando se transforman las corrientes sinusoidales del estator en el sistema de coordenadas del rotor, pueden ser tratadas como magnitudes iguales separadas según la parte activa y reactiva (coordenadas cartesianas). Estas coordenadas también pueden transformarse en coordenadas polares, de modo que la corriente del estator I se describe con el valor de su vector y el ángulo de fase φ correspondiente. Con las magnitudes iguales adecuadas como valor teórico (I_w , con w para parte activa e I_B , con b para parte reactiva o $|I|$ y φ) puede realizarse en el regulador de corriente 7 una regulación lineal con parte P, I y dado el caso también D.

50 El uso de las propiedades especiales de la máquina síncrona permite la realización de una función de mantenimiento/parada, que funciona sin regulador de posición o de velocidad. La máquina síncrona desarrolla a continuación el par máximo, cuando el campo magnético de la excitación y la corriente eléctrica forman un ángulo de 90° . La tensión inducida U_{EMK} y la corriente de fase tienen en este caso un ángulo de fase de 0° eléctricamente (motor) o de 180° eléctricamente (generador).

55 Para establecer sincronidad entre el campo de excitación y la corriente en el arrollamiento de estator, se usa en el presente caso un transmisor de posición 4, con ayuda del cual puede sincronizarse el convertidor de frecuencia 3 que alimenta con la máquina 2 que se mueve. Este sensor debería tener la propiedad de un transmisor de posición absoluta. Un sistema de resolvidor cumple estos requisitos. En muchos casos, el resolvidor está dispuesto de tal modo que suministra en el lugar de la amplitud de tensión de la fase U la señal de ángulo cero.

60 Cuando se forma la primera derivación de la señal de posición en función del tiempo, resulta la velocidad v , con la que gira el rotor de la máquina 2. Para detectar la parada, puede aprovecharse el cambio de signo de la velocidad v . Es posible una detección dinámicamente mejor de la parada, si se valora el cambio de dirección entre la cuenta adelante y la cuenta atrás del resolvidor. Para ello, unos circuitos de evaluación del resolvidor ponen a disposición en parte una información sobre la dirección de giro usándose un canal de salida especial.

65

Transformación en coordenadas polares del rotor:

Las figuras 2 y 3 muestran un sistema con tensión inducida y corriente de estator en representación de coordenadas de rotor. Puesto que el sistema se mueve con el rotor, las dos magnitudes eléctricas son fijas. En primer lugar se supone que el rotor se mueve en la dirección de giro positiva y que un par de frenado M_B (par interior de la máquina) se opone a esta dirección de movimiento, de modo que la máquina trabaja como generador.

Como magnitud de alimentación eléctrica se aplica en el presente ejemplo de realización un patrón de corrientes con corrientes de estator i_u, i_v, i_w a las que se aplican tres fases sustancialmente simétricas u, v, w al estator de la máquina 2 (véase la figura 1 en relación con la figura 4), de las que resulta en conjunto una corriente total de estator I en una representación de índice espacial conocida con amplitud y posición de fase, como está representado en las figuras 2 y 3.

En particular, el patrón de corrientes forma un vector de corriente I en la representación de índice espacial en el llamado sistema de coordenadas DQ fijo del rotor, que se aplica al principio del modo de parada de tal modo que se ajusta una posición de fase del vector de corriente I de aproximadamente -90° eléctricamente respecto a la dirección de movimiento del índice espacial de la tensión inducida del rotor U_{EMK} tras la parada, por lo que es retardado (encendido retardado).

El ángulo de fase indica la diferencia actual entre la posición que suministra el resolvidor y la posición actual del rotor, así como el vector de corriente del estator I . Puesto que la corriente I junto con la tensión inducida U_{EMK} define la potencia de la máquina, el ángulo se refiere en muchos casos a la tensión inducida U_{EMK} . Si el resolvidor se posiciona en caso de una dirección de giro positiva de forma equifásica respecto a la tensión inducida U_{EMK} , en caso de una inversión de la dirección de giro se produce un desplazamiento de fase de 180° .

En primer lugar, se supone que el vehículo se encuentra en un proceso de frenado y la dirección de movimiento es matemáticamente positiva, es decir, va en el sentido contrario de las agujas del reloj (fig. 2a). Puesto que el vector de corriente I está en oposición directa (desplazamiento de fase de 180°) respecto a la tensión inducida U_{EMK} , la máquina desarrolla el par máximo posible M_P con este valor de la corriente. Al accionar el pedal de freno, el conductor puede determinar el valor del vector de corriente I y, por lo tanto, la intensidad de la desaceleración. Se supone que el vehículo está justo en el momento anterior a la parada. En el sistema de coordenadas del rotor, el vector de corriente no cambia su posición. Si el punto de trabajo requiere un funcionamiento con shuntado, la corriente activa es superpuesta por una componente de corriente reactiva, que se adelanta a la tensión inducida (encendido adelantado). La corriente que resulta por la superposición vectorial de la corriente activa y reactiva permanece en su posición respecto a la tensión inducida mientras que se mantiene este grado de shuntado.

Cuando la velocidad pasa por cero, es decir, cuando se cambia el signo, también cambia la dirección del vector U_{EMK} (figura 2b) y se realizan las siguientes acciones:

En caso de detectarse una inversión de la dirección o de una velocidad v del rotor de aproximadamente igual a cero, pasándose a un modo de parada, el vector de la corriente I del sistema de estator eléctrico de la máquina se ajusta de tal modo que al principio del modo de parada se forma un par M_B interior efectivo de la máquina que es reducido en comparación con el par de desaceleración M_P . El vector de corriente I se ajusta durante el tiempo necesario hasta que se ajuste un equilibrio de pares estable entre el par exterior M_A y el par interior M_B de la máquina, moviéndose el rotor y bajo la influencia de un par exterior M_A que actúa sobre la máquina.

En particular, en el presente caso se gira el vector de corriente I en la dirección matemáticamente positiva, es decir, en el sentido contrario de las agujas del reloj eléctricamente 90° ajustándose de este modo una posición de fase de -90° eléctricamente respecto a la nueva dirección de movimiento de la tensión inducida. Para ello, se mantiene constante el valor del vector de corriente y el ángulo de fase cambia correspondientemente. El valor del vector de corriente I depende de la intensidad del accionamiento del pedal de freno. El par máximo efectivo en una posición determinada del pedal de freno es M_P . La posición de fase entre los vectores tiene como consecuencia que el par va inmediatamente hacia cero cuando se produce la conmutación. Si todos los pares exteriores son iguales a cero en este momento, el vehículo quedará parado.

La nueva posición del vector de corriente I se congela, es decir, el convertidor de frecuencia 3 es controlado de tal modo por el dispositivo de control 5 (figura 1) que el vector de corriente I se mantiene en la misma posición respecto al estator. Para este fin se almacena el ángulo actual del resolvidor. En el estado del par máximo de frenado, se realizan todos los cálculos basados en el ángulo almacenado del resolvidor teniéndose en cuenta un giro de fase de 90° . En el sistema de coordenadas del rotor, esto tiene como consecuencia que el vector de corriente I se mueve respecto al vector de tensión fijo U_{EMK} cuando gira el rotor. Si ahora el vector de tensión U_{EMK} se mueve cada vez más en la dirección opuesta al vector de corriente I , el par que frena M_B de la máquina aumenta. Esto puede ser el caso, por ejemplo, cuando el vehículo ha subido una cuesta y se ha frenado en la cuesta. El vehículo tiene una energía proporcional a un momento de inercia de masa actuando la fuerza de arrastre de la pendiente en el vehículo. Después de haberse transformado la energía cinética durante el frenado en otras energías, el vehículo rodaría hacia atrás si siguiera existiendo la fuerza de arrastre de la pendiente y sin un par de frenado una vez

alcanzada la parada. El valor máximo del par resultaría nuevamente para el caso de que el vector de corriente I y el vector de tensión U_{EMK} estuvieran dispuestos en una recta.

5 En el modo de parada, el vector de tensión U_{EMK} puede barrer una zona de 0° eléctricamente o de 180° eléctricamente ($M=0$) hasta 90° eléctricamente ($M=M_P$), sin que el vector de corriente I cambie su posición en las coordenadas de estator. Si para todos los pares exteriores que actúan sobre el vehículo $M_A:0 \leq M_A \leq M_P$, resulta un estado de equilibrio de $M_A = M_B$, en el que el vehículo llega a pararse. Este comportamiento puede compararse con una balanza de resorte cargada, en la que el cuerpo a pesar alcanza tras un recorrido de tensión del resorte determinado el estado de equilibrio con la fuerza de resorte del balance, siempre que su peso no sobrepase el alcance de medición. Puesto que la zona de frenado se extiende entre el par cero y un valor de par que se orienta por la posición del pedal de freno, la posición de parada del rotor depende de la intensidad del accionamiento del pedal de freno. Si el par de frenado no es suficientemente grande, el rotor saldrá de la zona de par máximo de frenado en la nueva dirección de movimiento. A partir de la salida de esta zona, el ángulo de fase de la corriente del estator vuelve a mantenerse constante en coordenadas del rotor, de modo que resulta un efecto de frenado máximo para el valor actual de la corriente.

Si el valor del vector de corriente I se aumenta de tal modo que el par de frenado que resulta supera el par que acciona, la máquina vuelve a pararse.

20 En general, resulta por lo tanto por el ejemplo de realización arriba descrito un control según la invención general de la máquina síncrona:

La amplitud del vector de corriente I es proporcional a un par de desaceleración actualmente requerido (par de frenado) M_B , aplicándose la corriente del estator, suponiéndose un sistema de coordenadas de rotor D, Q , en el que el índice espacial de la tensión de rotor inducida U_{EMK} en el eje real Q está orientado en la dirección positiva si se supone una dirección de movimiento positiva del rotor, al principio del modo de parada de tal modo que se ajusta una posición de fase del vector de corriente I de aproximadamente -90° eléctricamente respecto al índice espacial de la tensión de rotor inducida U_{EMK} .

30 Correspondientemente, el vector de corriente I se aplica, suponiéndose un sistema de coordenadas de rotor D, Q , en el que se supone una dirección de movimiento negativa del rotor, el índice espacial de la tensión de rotor inducida U_{EMK} está orientado en el eje real Q en la dirección negativa, al principio del modo de parada de tal modo que se ajusta una posición de fase del vector de corriente I de aproximadamente -90° eléctricamente respecto a la dirección de movimiento del índice espacial de la tensión de rotor inducida U_{EMK} después de la parada.

35 El vector de corriente I se aplica en el modo de parada en coordenadas de estator a lo largo de un primer intervalo del ángulo de movimiento 21 del vector de tensión U_{EMK} de 0° a 90° eléctricamente respecto a la dirección de movimiento del mismo tras la parada con una posición de fase sustancialmente constante respecto al sistema de coordenadas. En caso de detectarse nuevamente una inversión de la dirección o de una velocidad v del rotor aproximadamente igual a cero, de modo que vuelve a adoptarse la dirección de movimiento original del rotor, se mantiene el vector de corriente I ya eficazmente aplicado en coordenadas de estator a lo largo de un segundo intervalo del ángulo de movimiento 22 del vector de tensión U_{EMK} de 0° a 90° eléctricamente respecto a la dirección de movimiento actualizada tras la parada con una posición de fase sustancialmente constante respecto al sistema de coordenadas.

45 La aplicación del vector de corriente I predeterminada en el modo de parada termina cuando el ángulo de movimiento eléctrico del rotor rebasa el primero o el segundo intervalo del ángulo de movimiento $21, 22$ bajo la influencia de un par exterior M_A , que es mayor que el par interior M_B de la máquina en las zonas marginales no colindantes del primero y del segundo intervalo del ángulo de movimiento $21, 22$ en una dirección en la que no se encuentra ni el primero (21) ni el segundo intervalo del ángulo de movimiento 22 . Después de rebasar el primero y el segundo intervalo del ángulo de movimiento $21, 22$, la tensión de rotor inducida U_{EMK} y el vector de corriente I se ajustan de tal modo entre sí que al seguir moviéndose el rotor de la máquina se produce un funcionamiento de generador con par constante según un requerimiento actual, como ha tenido lugar antes del paso al modo de parada.

55 Cuando se invierte la dirección del par que ataca desde el exterior en el vehículo, de modo que el vector de tensión U_{EMK} se mueve nuevamente a una posición con 90° de desplazamiento de fase hacia el vector de corriente I (par cero), se sale de la primera zona del par máximo de parada (Fig. 2c). Al detectarse la inversión de la dirección de giro actual, se activa nuevamente la acción del par máximo de frenado, ajustándose los vectores de corriente y tensión I y U_{EMK} de la forma representada en la figura 2c. Por lo tanto, directamente después de la inversión de la dirección de giro, el par que frena es igual a cero y el vehículo se mueve siguiendo girando lentamente hasta un punto en el que el par que acelera y el par que frena están en equilibrio. Mientras que el par exterior M_A no supera el par de frenado actualmente máximo M_P , como puede verse en las figuras 2b y 2c, puede cambiarse entre los dos cuadrantes de frenado 21 y 22 sin que el vector de corriente I cambie su dirección en las coordenadas del estator. De este modo no se exigen grandes requisitos dinámicos de los reguladores de corriente 7. Respecto al vector de tensión U_{EMK} y a la dirección de giro actual, la corriente I se retarda siempre 90° inmediatamente respecto a la inversión de la dirección de giro. Cuando el rotor se mueve, la corriente puede mantenerse constante.

5 Si el par exterior se vuelve más grande que el par especificado mediante el pedal de freno, se sale de la zona de parada en la dirección en la que actúa el par exterior. Al salir de la zona de parada, el vector de corriente I y el vector de tensión U_{EMK} vuelven a estar opuestos y son guiados en esta posición uno respecto al otro a partir de la salida de la zona de parada. Para ello, a partir de rebasarse el límite de la zona se vuelve a actualizar permanentemente la posición del rotor.

10 Como muestran las representaciones anteriores, el vehículo se mantiene a lo largo de 180° del período eléctrico en el estado frenado. Si se parte de que la dirección del par que actúa en el exterior no cambia permanentemente y de que el par de frenado se especifica con un valor suficientemente elevado, después del momento de la inversión de la dirección de giro debe contarse como máximo con un movimiento de 90° eléctricamente, hasta que el vehículo llegue a pararse. Teniéndose en cuenta el número de pares de polos que tiene la máquina eléctrica y del engranaje dado el caso montado a continuación con el engranaje reductor N , debe contarse con un movimiento a lo largo de un ángulo mecánico de máximo

$$15 \quad \vartheta_{mec} = 90^\circ / (P \cdot N).$$

20 Puesto que las máquinas de accionamiento con un par fuerte son realizadas preferiblemente con números de pares de polos P superiores a 13, la distancia que se recorre hasta la parada de la máquina es despreciable.

Control de parada en coordenadas cartesianas:

25 En muchos casos, la posición de corriente no se define mediante el valor y el ángulo de la corriente sino mediante la parte activa y reactiva de ésta. Al igual que al trabajar con coordenadas polares, al detectarse la inversión de la dirección de giro se congela la posición del resolvidor. El giro necesario del ángulo de corriente respecto a la posición angular almacenada se alcanza ahora no mediante la conexión adicional de un offset anular sino mediante un intercambio de los valores teóricos para la corriente activa y reactiva con los signos correctos. Esto significa que el valor del par especificado mediante el pedal de freno se usa como valor teórico de la corriente reactiva.

30 Se supone que un vehículo se mueve en la dirección positiva, de modo que las corrientes y la tensión inducida se comportan de la forma representada en la figura 3a. El vehículo se mueve cuesta arriba. Cuando se inicia un proceso de frenado, reduce su velocidad, de modo que se alcanza la velocidad cero. A continuación, debido a la fuerza de arrastre de la pendiente se invierte la dirección de movimiento. Con el cambio de signo de la velocidad, se inicia el par máximo de frenado (figura 3b) y el vehículo se mueve en un estado de equilibrio, formado por el par de frenado activo y el par de arrastre de pendiente que actúa. Si no se encuentra este estado de equilibrio, puesto que no se acciona con suficiente intensidad el pedal de freno, el vehículo sigue moviéndose en la dirección de movimiento representada en la figura 3a. A partir de sobrepasarse el intervalo del par máximo de frenado, se cambia a la señal actual del resolvidor y en lugar de la corriente reactiva se activa la corriente activa (figura 3b). Si vuelve a cambiar la dirección de giro, el sistema pasa a un estado según la figura 3c. El comportamiento es idéntico al usarse coordenadas polares y cartesianas; sólo se usa otro planteamiento para el control.

Control de parada en coordenadas del estator:

45 Si la regulación de la máquina síncrona se realiza en coordenadas de estator, el regulador debe operar con las magnitudes alternas de la corriente del estator. Por lo tanto, en este caso se usa como valor especificado también una magnitud alterna. Si con la inversión de la dirección de giro se activa el par máximo de frenado, también se activa un patrón de corrientes, que reduce en el momento de la activación el par efectivo al valor cero. Este patrón se mantiene constante mientras el rotor se mueve en el intervalo de par máximo de frenado.

50 Las imágenes de la figura 4 muestran los recorridos de la corriente de una máquina de campo giratorio síncrona, que se frena desde una dirección de movimiento respectivamente diferente y que pasa en la misma posición mecánica al par máximo de frenado. Puesto que el paso al par máximo de frenado tiene lugar en el mismo lugar, a continuación también resulta el mismo patrón de corrientes constantes. Los patrones mostrados en las imágenes de las figuras 4a, b resultarían también en caso de la aplicación del sistema de coordenadas del rotor.

55 En resumen, en el modo de parada se aplica un patrón especial de corrientes constantes a las bobinas de la máquina, estando definido este patrón exclusivamente por la posición de rotor válida durante la velocidad cero y una especificación de fuerza de frenado máxima actualmente activa, como puede realizarse con un pedal de freno, de modo que no es necesaria ni una regulación de la posición del rotor en cascada ni una regulación de la velocidad de rotor en cascada. El modo de parada se extiende en este caso a largo de un intervalo de $\pm 90^\circ$ eléctricamente a partir del ángulo que es actual al alcanzarse la velocidad cero.

65 La regulación de las corrientes del estator puede realizarse en coordenadas polares o cartesianas de rotor o en coordenadas de estator. Si la regulación de la corriente se realiza en coordenadas polares de rotor, se define el valor teórico del vector de corriente I poniéndose el ángulo de fase en -90° eléctricamente respecto a la dirección de movimiento del vector de la tensión inducida, mientras que la posición del pedal de freno especifica el valor del

vector. Si la regulación de la corriente se realiza en coordenadas cartesianas, el valor teórico de la corriente se define durante el par máximo de frenado, poniéndose el valor de corriente activa a cero y el valor de corriente reactiva a un valor proporcional a la posición del pedal de freno.

- 5 Si la regulación de la corriente se realiza en coordenadas del rotor, al iniciarse el par máximo de frenado se desplazan los tres valores teóricos de la corriente de fase $+90^\circ$ eléctricamente (frenado desde la dirección de giro positiva) o -90° eléctricamente (frenado desde la dirección de giro negativa) de modo que resulta nuevamente un ángulo de -90° eléctricamente respecto a la dirección de movimiento actual de la tensión inducida.
- 10 Después de la inversión del par exterior puede volver a tener lugar un paso por cero de la velocidad, de modo que vuelve a establecerse la dirección de movimiento original pasándose con el paso por cero al segundo cuadrante del par máximo de frenado, sin que el vector de corriente ya activado en el primer cuadrante del par máximo de frenado cambiara su dirección, pudiendo volver a definirse la posición del vector de corriente de la forma arriba indicada.
- 15 Se sale de los cuadrantes del par máximo de frenado cuando la fuerza exterior rebasa la fuerza de frenado máxima activa en el interior del cuadrante del par máximo de frenado, estando directamente opuestos el vector de la tensión inducida U_{EMK} de la máquina y de la corriente de frenado I inmediatamente después de rebasarse los límites del intervalo y volviendo a actualizarse permanentemente el ángulo del resolvidor, de modo que a continuación tiene lugar el funcionamiento con generador característico para un proceso convencional de frenado con par constante o fuerza constante.
- 20

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para el control de una máquina síncrona eléctrica (2) con un estator y un rotor, para el accionamiento de un vehículo con las siguientes etapas:

5
 - hacer funcionar la máquina síncrona (2) con un par de desaceleración (M_p), de modo que se reduce la velocidad del rotor de la máquina,
 - vigilancia del movimiento del rotor de la máquina síncrona,
 - al detectarse una inversión de la dirección o una velocidad (v) del rotor aproximadamente igual a cero se aplica al menos un patrón de corrientes (I ; i_u , i_v , i_w) de corrientes de fase al estator de la máquina síncrona (2) pasándose a un modo de parada, **caracterizado por que**
 10 en el modo de parada se mantiene constante una posición de fase del patrón de corriente (I ; i_u , i_v , i_w) respecto al sistema de coordenadas del estator y se ajustan la posición de fase y el valor del patrón de corrientes (I ; i_u , i_v , i_w) mediante una posición del rotor de la máquina síncrona (2) válida durante la inversión de la dirección o cuando la velocidad es igual a cero y una especificación del par de desaceleración y el patrón de corrientes forma un vector de corriente (I) en representación de índice espacial de un sistema de coordenadas de rotor (D , Q), que al principio del modo de parada se aplica de tal modo que se ajusta una posición de fase del vector de corriente (I) de -90° eléctricamente respecto a la dirección del movimiento del índice espacial de la tensión de rotor inducida (U_{EMK}) después de la parada, pasando a ser aproximadamente igual a cero un par de frenado activo (M_B) de la máquina síncrona (2),
 15 porque el patrón de corrientes (I ; i_u , i_v , i_w) se mantiene mientras que se ajusta un equilibrio de pares estable entre el par exterior (M_A) y el par de frenado (M_B) de la máquina, moviéndose el rotor y bajo la influencia de un par exterior (M_A) que actúa sobre la máquina síncrona (2).

25 2. Procedimiento según la reivindicación 1, donde se alimenta un patrón de corrientes (I ; i_u , i_v , i_w) de corrientes de fase (i_u , i_v , i_w) constantes.

30 3. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 ó 2, donde el patrón de corrientes forma un vector de corriente (I) en representación de índice espacial, cuya amplitud es proporcional a un par de desaceleración (M_B) actualmente requerido y que, suponiéndose un sistema de coordenadas de rotor (D , Q), en el que se supone una dirección de movimiento positiva del rotor, el índice espacial de la tensión de rotor inducida (U_{EMK}) está orientado en la dirección positiva en el eje real (Q), se aplica al principio del modo de parada de tal modo que se ajusta una posición de fase del vector de corriente (I) de -90° eléctricamente respecto a la dirección de movimiento del índice espacial de la tensión de rotor inducida (U_{EMK}).

35 4. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 3, donde el patrón de corrientes forma un vector de corriente (I) en representación de índice espacial, cuya amplitud es proporcional a un par de desaceleración (M_B) actualmente requerido y que, suponiéndose un sistema de coordenadas de rotor (D , Q), en el que se supone una dirección de movimiento negativa del rotor, el índice espacial de la tensión de rotor inducida (U_{EMK}) está orientado en la dirección negativa en el eje real (Q), se aplica al principio del modo de parada de tal modo que se ajusta una posición de fase del vector de corriente (I) de -90° eléctricamente respecto a la dirección de movimiento del índice espacial de la tensión de rotor inducida (U_{EMK}).

40 5. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 4, donde el patrón de corrientes (I ; i_u , i_v , i_w) se aplica en el modo de parada a lo largo de un primer intervalo del ángulo de movimiento (21) del rotor de 0 a 90° eléctricamente respecto a la dirección de movimiento del mismo tras la parada con posición de fase constante respecto al sistema de coordenadas del estator.

50 6. Procedimiento según la reivindicación 5, donde al detectarse nuevamente una inversión de la dirección o una velocidad (v) del rotor de aproximadamente igual a cero, de modo que se vuelve a adoptar la dirección de movimiento original del rotor, se mantiene el patrón de corrientes (I ; i_u , i_v , i_w) ya de forma efectiva aplicada a lo largo de un segundo intervalo de ángulo de movimiento (22) del rotor de 0 a 90° respecto a la dirección de movimiento actualizada tras la parada con posición de fase constante respecto al sistema de coordenadas del estator.

55 7. Procedimiento según la reivindicación 5 ó 6, donde

- termina la aplicación predeterminada en el modo de parada del patrón de corrientes (I ; i_u , i_v , i_w), cuando el ángulo de movimiento eléctrico del rotor rebasa el primero o el segundo intervalo del ángulo de movimiento (21 , 22) bajo la influencia de un par exterior (M_A) que es mayor que el par de frenado (M_B) de la máquina síncrona (2) en las zonas marginales no colindantes del primero o del segundo intervalo del ángulo de movimiento (21 , 22) en una dirección en la que no se encuentra ni el primero (21) ni el segundo intervalo del ángulo de movimiento 22 ,
 60 - ajustándose después de rebasarse el primero y el segundo intervalo del ángulo de movimiento (21 , 22) la tensión de rotor inducida (U_{EMK}) y el patrón de corrientes (I ; i_u , i_v , i_w) de tal modo entre sí que al seguir moviéndose el rotor de la máquina síncrona (2) se produce un funcionamiento de generador con par constante según un requerimiento actual, como ha tenido lugar antes del paso al modo de parada.
 65

8. Vehículo con al menos una máquina síncrona (2) eléctrica para el accionamiento del vehículo y con un sistema de control (1) que está adaptado para hacer funcionar la máquina síncrona (2) con un procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 7.
- 5 9. Producto de programa de ordenador, que presenta segmentos de código de software que están almacenados en un sistema de control (1) para el control de una máquina síncrona (2) eléctrica, estando adaptados los segmentos de código de software de tal modo que el sistema de control realiza un procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 7.
- 10 10. Circuito programado por conexiones, que está adaptado para realizar un procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 7, estando implementado el circuito programado por conexiones en un sistema de control (1) para el control de una máquina síncrona (2) eléctrica.

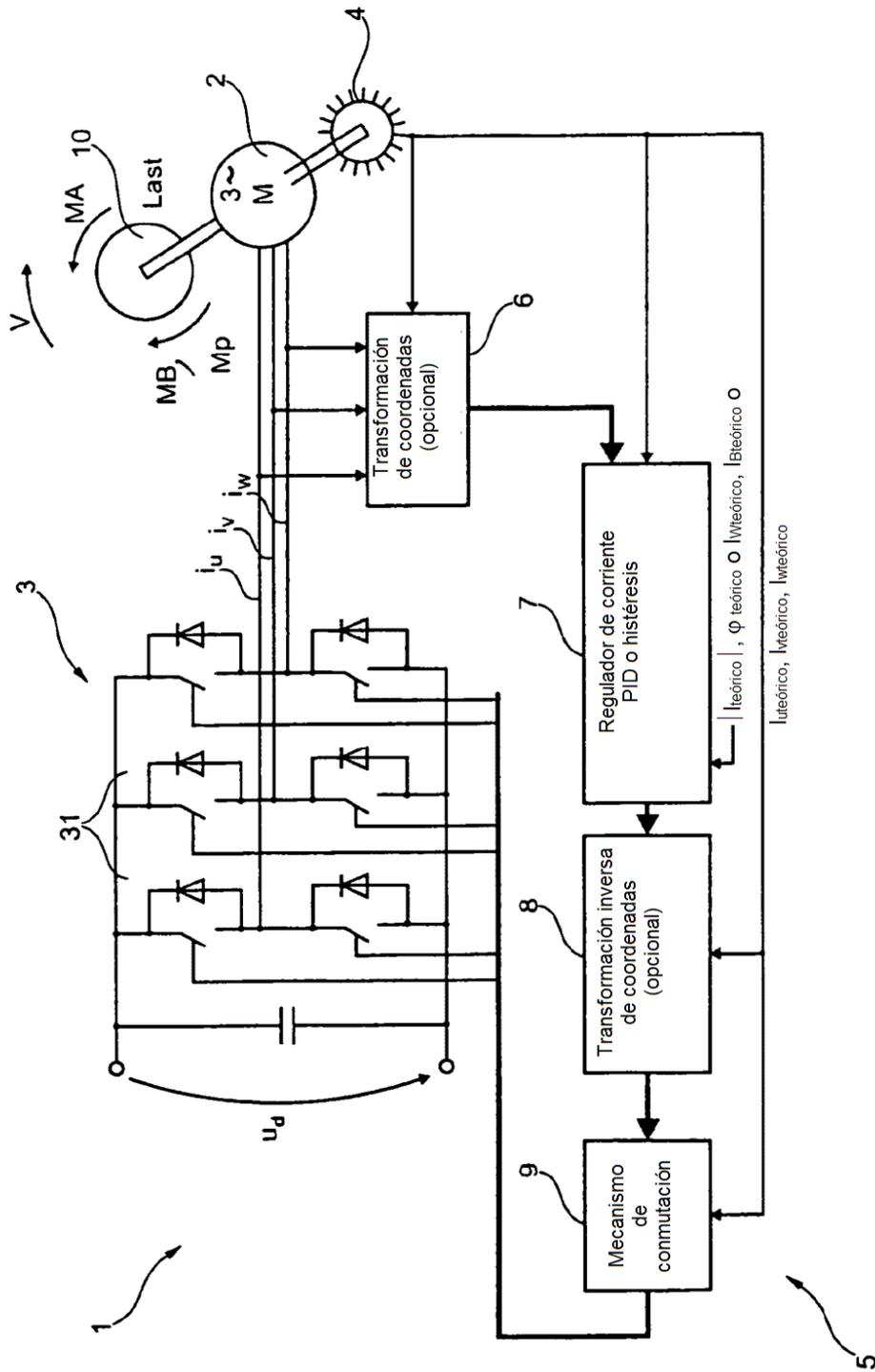


Fig. 1

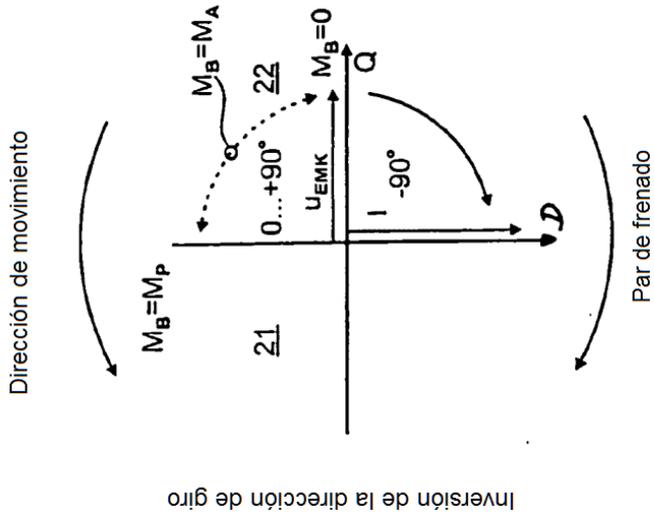
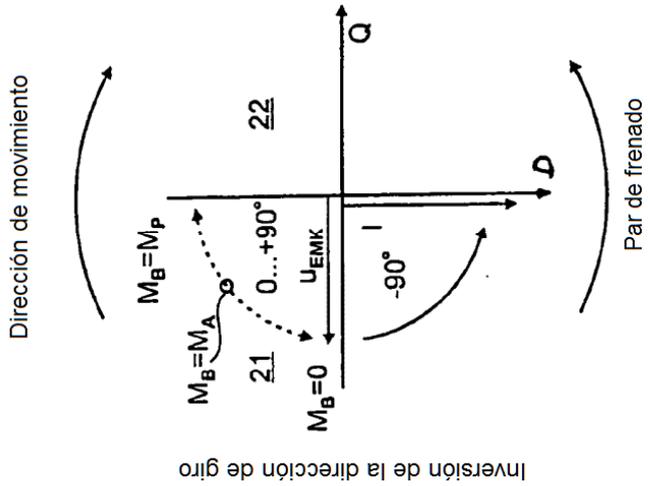
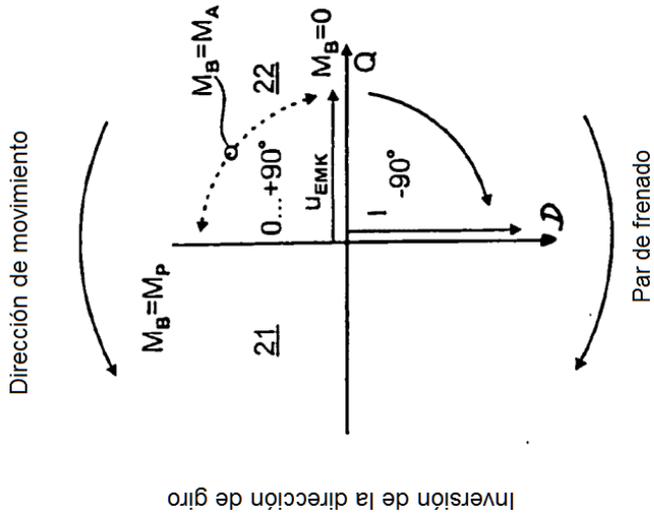


Fig. 2a



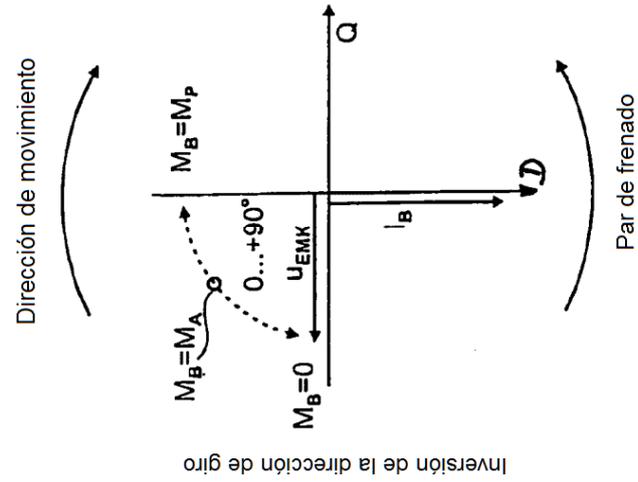
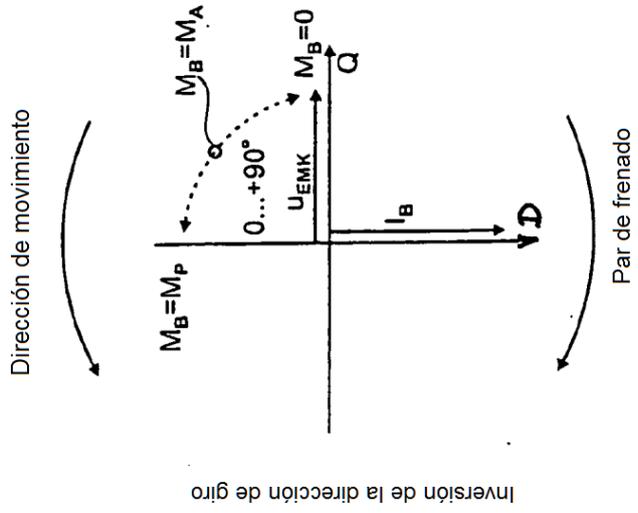
Ej.: El vehículo está parado
cuesta arriba con el freno
accionado

Fig. 2b



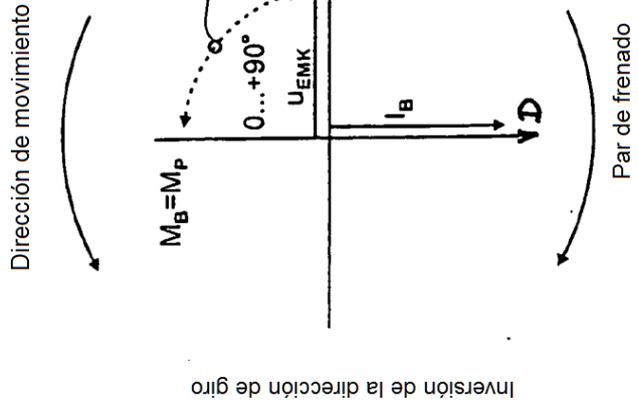
Ej.: El vehículo está parado
cuesta abajo con el freno
accionado

Fig. 2c



Ej.: El vehículo está parado
cuesta arriba con el freno
accionado

Fig. 3a



Ej.: El vehículo está parado
cuesta abajo con el freno
accionado

Fig. 3b

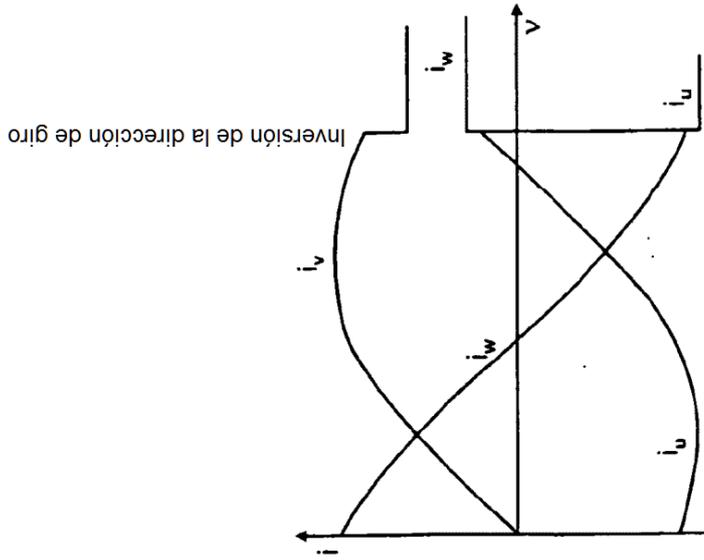


Fig. 4b

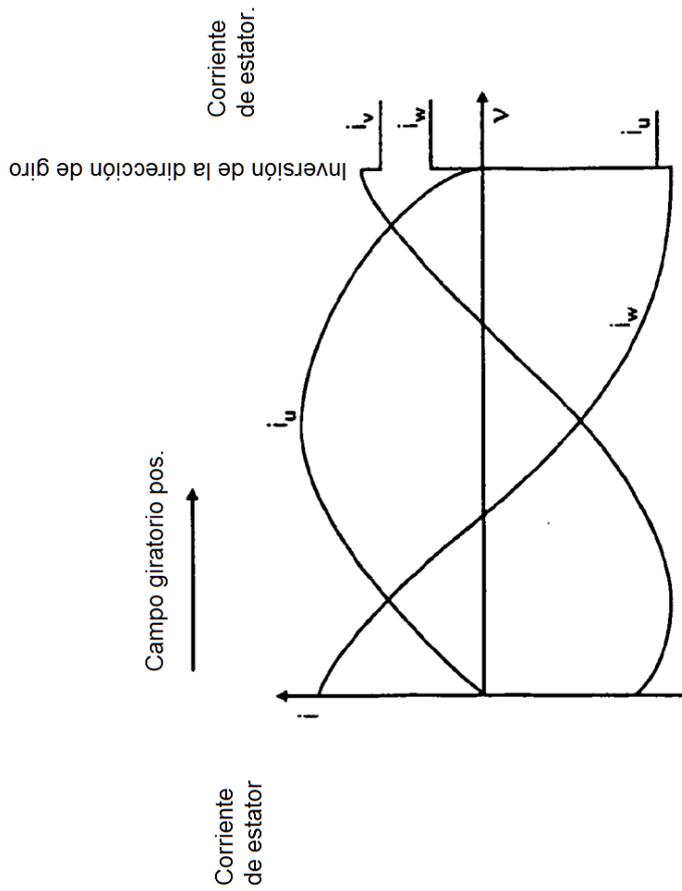


Fig. 4a