

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 939 063**

51 Int. Cl.:

H02P 9/48

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **09.08.2018 PCT/EP2018/071588**

87 Fecha y número de publicación internacional: **18.04.2019 WO19072439**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **09.08.2018 E 18752755 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.11.2022 EP 3695509**

54 Título: **Procedimiento para conmutar entre control por bloque y control por PWM de una máquina eléctrica**

30 Prioridad:

09.10.2017 DE 102017217913

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

18.04.2023

73 Titular/es:

**SEG AUTOMOTIVE GERMANY GMBH (100.0%)
Lotterbergstrasse 30
70499 Stuttgart, DE**

72 Inventor/es:

SZEPANSKI, DANIEL

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 939 063 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 para conmutar entre control por bloque y control por PWM de una máquina eléctrica

- 5 La presente invención se refiere a un procedimiento para operar una máquina eléctrica, así como a una unidad de computación y un programa informático para llevar a cabo el mismo.

Estado de la técnica

- 10 Las máquinas eléctricas, en particular los generadores, pueden utilizarse para convertir la energía mecánica en energía eléctrica en los vehículos de motor. Para ello, se suelen utilizar generadores de garras, que suelen estar dotados de excitación eléctrica. Dado que los generadores de polos de garra producen corriente trifásica, normalmente trifásica, se requiere rectificación para los sistemas eléctricos de corriente continua habituales en los vehículos de motor. Para ello pueden utilizarse rectificadores basados en diodos semiconductores o interruptores semiconductores.

- 15 Los generadores también pueden utilizarse para arrancar un motor de combustión interna. Estos generadores también se denominan generadores de arranque. Normalmente, un generador de arranque de este tipo solo se acciona por motor a velocidades muy bajas, ya que el par que se puede generar disminuye rápidamente por encima de la velocidad. Sin embargo, también son concebibles máquinas eléctricas de mayor tamaño, que también pueden utilizarse en un vehículo híbrido para conducir el vehículo, o al menos para apoyar el motor de combustión interna.

- 20 Para el control de estos generadores de arranque, se puede utilizar una operación denominada PWM, en la que se controla una corriente de fase, o un control denominado de bloque, en el que se puede modificar un ángulo de precomputación. Se puede cambiar entre los dos tipos de control en función de un umbral de velocidad.

- 25 El documento DE 10 2011 076 999 A1 muestra un procedimiento para operar una máquina eléctrica en un vehículo de motor, en donde la máquina eléctrica tiene un devanado de rotor, un devanado de estator y un convertidor conectado aguas abajo del devanado de estator con elementos de conmutación controlables, en donde la máquina eléctrica es operable en un primer modo de funcionamiento de acuerdo con el funcionamiento PWM y en un segundo modo de funcionamiento de acuerdo con el funcionamiento por bloques, siendo operada la máquina eléctrica durante una conmutación del primer al segundo modo de funcionamiento o viceversa en un tercer modo de funcionamiento en el que se modifican las duraciones de impulso de las señales de accionamiento para los elementos de conmutación controlables.

- 30 El documento DE 10 2008 020 786 A1 describe un dispositivo de control de motor que utiliza una referencia de corriente del eje d y del eje q, un valor de corriente detectado del eje d y del eje q, y un valor de frecuencia calculado para controlar una referencia de tensión de salida para un variador que acciona un motor síncrono de imanes permanentes. Cuando se ingresa una referencia del esfuerzo de torsión que especifica un esfuerzo de torsión mayor que el esfuerzo de torsión máximo que el motor puede salir, un valor del límite para un ángulo de fase que sea una desviación entre una referencia rotatoria de la fase del regulador y un valor rotatorio de la fase del motor se cambia según una magnitud de la condición especificada.

Divulgación de la invención

- 35 De acuerdo con la invención, se propone un procedimiento para operar una máquina eléctrica así como una unidad de computación y un programa informático para llevar a cabo el mismo que tiene las características de las reivindicaciones de patente independientes. Las formas de realización ventajosas son objeto de las reivindicaciones secundarias y de la descripción siguiente.

- 40 Un procedimiento según la invención sirve para operar una máquina eléctrica, por ejemplo, una máquina de polos de garra, que puede ser operada con control por PWM y con control por bloque. Con el control por PWM o el funcionamiento PWM se utiliza preferentemente el llamado control orientado al campo. Las corrientes de fase se miden y se convierten en coordenadas d-q o en la denominada representación vectorial espacial. Los parámetros de la máquina eléctrica pueden calcularse mediante un polinomio ajustado, que mapea las dependencias de saturación, y las corrientes de referencia pueden calcularse a partir de estos parámetros y de un par objetivo, que pueden convertirse en valores de referencia de tensión (en coordenadas d-q) mediante un control orientado al campo. A continuación, los valores de referencia pueden convertirse en un patrón de impulsos (por ejemplo, el denominado patrón de impulsos alineados en el centro) en una unidad de control por PWM y aplicarse a las fases de la máquina eléctrica a través de un inversor o convertidor de potencia.

En el control por bloques o en el funcionamiento por bloques, puede controlarse o especificarse el denominado ángulo de precomputación. El ángulo de precomutación indica cuándo los interruptores semiconductores conectados a una fase se conmutan a conducción en relación con el cruce por cero de la tensión de rueda de polos inducida en una fase. En lugar de controlar las corrientes, se puede calcular un par actual a partir de los parámetros de la máquina y las corrientes actuales. A continuación, puede compararse con un par objetivo y, en función de la desviación, puede controlarse el ángulo de precomutación (por ejemplo, con un controlador PI). El ángulo de precomputación resultante puede convertirse directamente en un patrón de bloques, imprimiendo siempre la tensión de fase máxima. En coordenadas d-q, el ángulo de precomutación puede entenderse como el ángulo entre el valor q y el valor d de la tensión de fase.

El cambio de control por PWM a control por bloques se produce convencionalmente cuando la velocidad de la máquina eléctrica supera un umbral de velocidad predefinido o cuando la tensión de la rueda polar supera la tensión del circuito intermedio. El cambio inverso de control por bloque a control por PWM se produce en consecuencia y puede estar sujeto a histéresis para evitar la conmutación constante de un tipo de control a otro. El umbral de velocidad (hasta el cual el control utilizado suele ser estable) puede depender del procesador utilizado o de su velocidad. La tensión de la rueda polar se produce por la rotación del rotor y debido a la inducción en los devanados o fases.

Si bien no se produce ningún salto de tensión en el ajuste de referencia de las tensiones de fase durante un cambio debido a la relación entre la tensión de la rueda de polos y la tensión del circuito intermedio, si la tensión del circuito intermedio siempre se aplica completamente en el control por bloque, puede ocurrir durante un cambio debido al umbral de velocidad, por ejemplo, para garantizar la estabilidad del control, que la tensión de la rueda de polos sea inferior a la tensión del circuito intermedio. Un salto de tensión de este tipo provoca un salto en la tensión de fase y, por tanto, en el par de la máquina eléctrica.

Para una transición entre el control por PWM y el control por bloque, se utiliza ahora un control de transición de acuerdo con el procedimiento propuesto, en donde un valor d de una tensión de fase (la tensión de fase se utiliza aquí, por tanto, en coordenadas d-q) se establece como variable manipulada y un valor q de la tensión de fase se modifica continuamente, es decir, en particular (cuasi)continuamente, como parte de un control de un par de la máquina eléctrica. Durante una transición de control por PWM a control por bloque, el valor q de la tensión de fase aumenta preferentemente, y durante una transición de control por bloque a control por PWM, el valor q de la tensión de fase se reduce preferentemente. El valor q puede modificarse con un gradiente predeterminado. Como punto de partida para el cambio del valor q de la tensión de fase, se puede considerar un valor utilizado por última vez en el control anterior (es decir, control por PWM o control por bloque).

En lugar de provocar un salto de tensión, el valor q de la tensión de fase sólo se modifica lentamente mediante un control de transición de este tipo, el valor d permanece esencialmente constante. Dado que el valor d tiene una influencia significativa en el valor q de la corriente de fase, este último permanece esencialmente inalterado. A su vez, el valor q de la corriente de fase tiene una influencia significativa en el par de la máquina eléctrica, que por lo tanto también permanece esencialmente constante.

Ventajosamente, la transición del control por PWM al control por bloque se lleva a cabo directamente y sin el control de transición si, al inicio de la transición, una fuerza electromotriz síncrona de la máquina eléctrica es mayor o igual que una tensión de circuito intermedio de la máquina eléctrica multiplicada por un factor $2/\pi$. De preferencia, la transición del control por bloque al control por PWM se realiza directamente y sin el control de transición si, al inicio de la transición, una fuerza electromotriz síncrona de la máquina eléctrica es menor o igual que una tensión de circuito intermedio de la máquina eléctrica multiplicada por un factor $2/\pi$. Preferentemente, se puede tener en cuenta un desplazamiento positivo o negativo predefinible en función de la dirección de la transición. En estos casos, no se produce ningún salto de tensión incluso con una transición directa, por lo que no es necesario el control de la transición. Sin embargo, también puede aceptarse un cierto salto de tensión de, por ejemplo, un máximo de 0,5 V. Con el factor $2/\pi$, se hace posible una conversión en una oscilación básica sinusoidal ajustable al máximo en el control por bloque.

Ventajosamente, se realiza un cambio de control por PWM a control de transición cuando una velocidad de la máquina eléctrica es mayor que un umbral de velocidad preajustable, preferiblemente más un desplazamiento positivo preajustable. En este caso, no puede suponerse que la tensión de la rueda polar sea igual o mayor que la tensión del circuito intermedio, de modo que pueda evitarse un salto de tensión con el control de transición.

Es ventajoso si se realiza un cambio del control de transición al control por bloque cuando una cantidad de la tensión de fase, aquí en particular una tensión de fase de referencia interna en coordenadas d-q, es igual o mayor que la

tensión del circuito intermedio multiplicada por un factor $2/\pi$. En este caso, la tensión ha sido aumentada por el control de transición hasta tal punto que no hay salto de tensión y, por lo tanto, no hay más salto en el par.

Es preferible que el cambio del control por bloque al control de transición se realice cuando la velocidad de la máquina eléctrica sea inferior a un umbral de velocidad preestablecido, preferiblemente menos una desviación positiva preestablecida. En este caso, no se puede suponer que la tensión de la rueda polar sigue siendo igual o superior a la tensión del circuito intermedio, de modo que se puede evitar un salto de tensión con el control de transición.

Ventajosamente, se realiza un cambio del control de transición al control por PWM cuando un valor d de una corriente de fase es igual o menor que un valor de referencia para el valor d de la corriente de fase en el control por PWM, preferentemente menos un desplazamiento positivo predeterminable. Dado que aquí no se conoce de antemano ningún valor para una tensión, se puede conseguir mediante la condición mencionada para la corriente que no se produzca ningún salto en la tensión o en el par.

El desplazamiento se puede utilizar en los casos mencionados -en el sentido de una histéresis- para evitar un cambio constante entre los modos de control en el límite.

Una unidad de computación según la invención, por ejemplo una unidad de control de un vehículo de motor, está configurada, en particular programáticamente, para llevar a cabo un procedimiento según la invención.

La implementación del procedimiento en forma de programa informático también es ventajosa, ya que esto provoca costos especialmente bajos, especialmente si una unidad de control de ejecución se sigue utilizando para otras tareas y, por lo tanto, está presente de todos modos. Los soportes de datos adecuados para proporcionar el programa informático son, en particular, las memorias magnéticas, ópticas y eléctricas, como los discos duros, las memorias flash, las EEPROM, los DVD y otros. También es posible descargar un programa a través de redes informáticas (Internet, Intranet, etc.).

Otras ventajas y formas de realización de la invención se desprenden de la descripción y del dibujo adjunto.

La invención se ilustra esquemáticamente mediante un ejemplo de realización en el dibujo y se describe a continuación con referencia al dibujo.

Breve descripción de los dibujos

La figura 1 muestra esquemáticamente una máquina eléctrica en la que puede llevarse a cabo un procedimiento según la invención.

La figura 2 muestra de forma esquemática una posibilidad de controlar una máquina eléctrica.

La figura 3 muestra de forma esquemática las características de la corriente de una máquina eléctrica.

La figura 4 muestra la tensión de fase de una fase para una transición entre el control por PWM y el control por bloque.

Las figuras 5a y 5b muestran intervalos para diferentes tipos de control.

La figura 6 muestra diferentes tamaños de la máquina eléctrica sin utilizar un método según la invención.

Las figuras 7, 8 y 9 muestran tres tipos diferentes de control que pueden utilizarse en un procedimiento según la invención en una forma de realización preferida.

La figura 10 muestra una secuencia de un procedimiento según la invención en otra forma de realización preferida.

La figura 11 muestra diferentes tamaños de la máquina eléctrica cuando se utiliza un método según la invención en una forma de realización preferida adicional.

Formas de realización de la invención

La figura 1 muestra un diagrama esquemático de una máquina eléctrica en la que puede llevarse a cabo un procedimiento según la invención. La máquina eléctrica 100 está diseñada, a modo de ejemplo, como una máquina

eléctrica de cinco fases con excitación externa. Se entiende que también puede utilizarse otro número de fases, por ejemplo tres. La máquina eléctrica 100 también puede ser diseñada, por ejemplo, como una máquina de garras.

En este caso, la máquina eléctrica 100 tiene cinco devanados de estator 120 y un devanado de excitación o rotor 110. Una corriente de excitación I_{ex} en el devanado de excitación 110 puede ajustarse mediante una unidad informática diseñada como unidad de control 140. Además, se proporciona una disposición de circuitos 130 con interruptores 131, aquí ejemplarmente MOSFETS, de los cuales solo uno está provisto de un signo de referencia, por medio del cual se puede aplicar o tomar una tensión U de los devanados del estator 120, dependiendo de si la máquina eléctrica funciona como motor o generador.

El dispositivo de conmutación 130 y la unidad de control 140 también pueden formar parte de una unidad de control común o de un inversor para la máquina eléctrica.

La figura 2 ilustra esquemáticamente una forma de controlar una máquina eléctrica, como la mostrada en la figura 1. El diagrama superior muestra una tensión U sobre el tiempo t , y el diagrama inferior muestra un ciclo de trabajo T sobre el tiempo t .

Se trata de patrones de control según un procedimiento estándar de la llamada modulación sinusoidal triangular. A la tensión diana deseada, es decir, la onda sinusoidal del diagrama superior, se superpone aquí una señal triangular (también mostrada en el diagrama superior), que tiene una frecuencia significativamente mayor que la de la onda fundamental eléctrica (normalmente más de 10 kHz). Cada punto de intersección marca una conmutación de la señal PWM.

El patrón de control del diagrama inferior se puede generar ahora con una unidad de control por PWM. Para una máquina de polos de garra, este control por PWM se suele utilizar hasta el límite de tensión mencionado. A partir del límite de tensión o por encima de él, la máquina eléctrica se controla con un patrón de bloques en modo de bloque o con el llamado control por bloques.

Este control por bloque se caracteriza por el hecho de que las tensiones de fase tienen la máxima amplitud posible y esta amplitud no puede ser modificada (teóricamente esto es posible controlando con anchos de bloque inferiores a 180° , pero esto no se suele utilizar).

Además de la corriente de excitación, la posición de fase del vector de tensión, el llamado ángulo de preconmutación, sirve ahora como variable manipulada para un par diana deseado de la máquina eléctrica.

Dado que la amplitud no puede modificarse en el funcionamiento en bloque (o al menos no se modifica), este modo de control sólo se utiliza por encima del límite de tensión (es decir, cuando la tensión de la rueda polar es mayor que la tensión de circuito intermedio aplicada), en este caso normalmente a velocidades superiores a 3.000/min.

La figura 3 muestra las curvas de corriente, en este caso las corrientes de fase, que se generan cuando la máquina eléctrica está girando y la tensión de fase es sinusoidal. Para ello, se traza una corriente I sobre el tiempo t .

Con una distribución simétrica, las corrientes de fase individuales I_A , I_B , I_C , I_D e I_E pueden combinarse en un vector espacial. Para ello se utilizan las conocidas transformaciones de Clarke y Park. En primer lugar, las corrientes I_α e I_β se obtienen con la transformación de Clarke según las fórmulas:

$$I_\alpha = \left(I_A + I_B \cos\left(\frac{2\pi}{5}\right) + I_C \cos\left(\frac{4\pi}{5}\right) + I_D \cos\left(\frac{6\pi}{5}\right) + I_E \cos\left(\frac{8\pi}{5}\right) \right)$$

e

$$I_\beta = \left(I_B \sin\left(\frac{2\pi}{5}\right) + I_C \sin\left(\frac{4\pi}{5}\right) + I_D \sin\left(\frac{6\pi}{5}\right) + I_E \sin\left(\frac{8\pi}{5}\right) \right).$$

A partir de aquí, las corrientes I_d e I_q con la transformación de Park se obtienen de acuerdo con las fórmulas:

$$I_d = I_\alpha \cos\theta + I_\beta \sin\theta \quad e \quad I_q = -I_\alpha \sin\theta + I_\beta \cos\theta,$$

donde θ denota el ángulo del rotor de la máquina eléctrica. La tensión también puede transformarse en coordinación d-q de la misma manera.

La figura 4 muestra la tensión de fase de una fase para la transición entre el control por PWM y el control en bloque o el funcionamiento en bloque. Para ello, se traza la tensión U y la corriente I en función del tiempo t . Se puede ver en el curso de la corriente que aquí ya no hay control de la corriente de fase.

En las figuras 5a y 5b, se muestran zonas para diferentes tipos de control, en base a las cuales se va a explicar una estrategia de control para este procedimiento. Para ello, se representa gráficamente un par M frente a una velocidad n de la máquina eléctrica.

El intervalo I indica un intervalo en el que la tensión de la rueda polar sigue siendo inferior a la tensión del circuito intermedio. La gama III indica una gama en la que la velocidad n es superior al umbral de velocidad n_{Gr} .

Para pares más elevados, se suele ajustar una corriente de excitación más alta para una máquina eléctrica de excitación externa, de modo que la tensión de la rueda de polos ya supera la tensión del circuito intermedio a una velocidad inferior al límite de velocidad n_{Gr} . Para una corriente de excitación constante, la tensión de la rueda de polos aumenta proporcionalmente.

La velocidad límite n_{Gr} designa el umbral de velocidad hasta el cual el control de la corriente de fase funciona de forma estable. Esta velocidad depende de la frecuencia de muestreo del regulador. Dependiendo de la situación y de la precisión deseada del regulador en el funcionamiento PWM, los umbrales de velocidad pueden ajustarse de forma que las frecuencias de muestreo correspondan como mínimo al doble hasta el vigésimo de la frecuencia correspondiente al umbral de velocidad. El umbral de velocidad hasta el cual el regulador funciona de forma estable depende también de la velocidad del procesador utilizado.

Hasta el límite en que la tensión de la rueda polar es inferior a la tensión del circuito intermedio (gama I), o hasta el umbral de velocidad n_{Gr} (izquierda de la gama III), las corrientes de fase se regulan y el patrón de impulsos se genera mediante PWM. En cuanto la tensión de la rueda polar es superior a la tensión del circuito intermedio al alcanzarse el umbral de velocidad, ya no se controlan las corrientes de fase, sino que se establece la tensión de fase máxima en el patrón de bloques y se controla el ángulo de precomputación.

En el caso mostrado en la Figura 5a, el umbral de velocidad es ahora tan grande que -independientemente del par actual- siempre se alcanza el intervalo II antes de que se supere el umbral de velocidad n_{Gr} . Esto significa que siempre puede tener lugar una transición de bloque PWM sin que se produzca un salto de tensión. En el intervalo II también se puede utilizar el funcionamiento en bloque.

Sin embargo, en el caso de la figura 5b se observa que el umbral de velocidad n_{Gr} para pares pequeños es menor que el punto de transición ideal para el funcionamiento en bloque, es decir, donde los intervalos I y III son contiguos. En este caso, debido al umbral de velocidad para la estabilidad del control de corriente de fase, es necesario saltar al funcionamiento en bloque.

Si se realiza una transición de control por PWM a control por bloques a esta velocidad, la tensión salta y se produce un salto de par.

La figura 6 muestra este comportamiento. Para ello, se trazan un par M , una velocidad n , una intensidad I y una tensión U a lo largo del tiempo t . La transición del control por PWM al control por bloques se realiza en el tiempo t . En el tiempo t_0 , se realiza la transición del control por PWM al control por bloques, en este caso a una velocidad de aproximadamente 3.800/min.

En el punto de transición, se observa un salto en las tensiones de fase U_d y U_q . El par salta aquí de aproximadamente -1,7 Nm a +4 Nm y las corrientes de fase I_d e I_q comienzan a oscilar. Hasta que se compensa el salto completo de la tensión de fase transcurren aprox. 15 ms. Este problema se soluciona con el presente procedimiento, como se explicará con más detalle a continuación.

En las figuras 7, 8 y 9, se explican tres modos de control diferentes que pueden utilizarse en un procedimiento según la invención en una forma de realización preferida. Estos modos de control individuales pueden utilizarse como controladores o como parte de un sistema de control en bucle cerrado.

En la figura 7, se muestra el control por PWM o el funcionamiento PWM con control orientado al campo. Las corrientes de fase, aquí designadas $I_{A...E}$, se miden y se convierten en I_q e I_d en representación vectorial espacial.

También se registra la corriente de excitación I_{ex} en el devanado de excitación. Los parámetros P de la máquina eléctrica, como las inductancias y los flujos encadenados, se calculan mediante un polinomio y teniendo en cuenta las propiedades de saturación con ayuda de las corrientes I_q , I_d , I_{ex} . Las corrientes de referencia $I_{q,ref}$ e $I_{d,ref}$ se calculan a partir de los parámetros P y de un par objetivo M_{soll} y se convierten en valores de referencia de tensión U_d y U_q mediante un control orientado al campo. Para el cálculo de las corrientes de referencia pueden tenerse en cuenta una temperatura T y la resistencia R_S del estator, que depende de ella.

A continuación, los valores de referencia se convierten en una unidad de control por PWM en un patrón de impulsos 180, por ejemplo un patrón de impulsos alineados en el centro, y se aplican a las fases de la máquina eléctrica 100 a través de un inversor o convertidor de potencia. Un ángulo de posición del rotor y una frecuencia angular eléctrica ω_{el} pueden determinarse a través de un sensor 170 y tenerse en cuenta a continuación.

En la figura 8, se muestra el control en bloque o funcionamiento en bloque con control del ángulo de precommutación. En lugar de controlar a las corrientes, el par actual M_{ist} se calcula a partir de los parámetros P de la máquina eléctrica y de las corrientes actuales I_q , I_d . Esto se compara con el par de consigna M_{soll} y el ángulo de precommutación se controla en función de la desviación (preferentemente un controlador PI). El ángulo de precommutación resultante, aquí denotado por α , se convierte directamente en un patrón de bloques 181, en el que siempre se imprime la tensión de fase máxima. Por lo demás, remítase a la descripción de la figura 7, pero aquí no se requiere la frecuencia angular eléctrica ω_{el} .

La figura 9 muestra un control de transición con regulación del valor q de la tensión de fase. Se trata de una mezcla de los dos tipos de control descritos con anterioridad. El par real M_{ist} se compara de nuevo con el par objetivo M_{soll} , pero solo se controla o ajusta el valor d de la tensión de fase U_d . El valor q de la tensión de fase U_q se incrementa con un gradiente U fijo, partiendo del valor inicial $U_{q,init}$. Se puede considerar un límite de tensión U_{Gr} . El valor inicial es el último valor del control por bloque o del control por PWM. Aquí se establece un patrón de impulsos 182 con un movimiento PWM.

La figura 10 muestra ahora las transiciones entre los tipos de control individuales en un procedimiento según la invención en otra forma de realización preferida.

Si la tensión de la rueda polar U_P es superior a la tensión del circuito intermedio U_{dc} multiplicada por el factor $2/\pi$, se da la condición para una transición directa entre el control por PWM A_1 y el control por bloque A_3 y no es necesario el control de transición A_2 . El factor $2/\pi$ permite la conversión a la oscilación fundamental sinusoidal máxima ajustable en modo bloque.

Si debe producirse una transición debido al umbral de velocidad n_{Gr} , se utiliza el control de transición A_2 . Para las condiciones individuales se puede utilizar una histéresis o un desplazamiento O para evitar un cambio constante de los estados.

Si se utiliza el control de transición A_2 a partir del control por PWM A_1 y se sigue cumpliendo la condición "velocidad n mayor que el umbral de velocidad n_{Gr} ($n > n_{Gr}$)", el valor q de la tensión de fase se incrementa con un gradiente fijo hasta que se cumpla la condición de que la magnitud de la tensión de fase U_{dq} sea igual o al menos aproximadamente igual a la tensión de circuito intermedio U_{dc} multiplicada por el factor $2/\pi$. El valor d de la tensión de fase se regula al par requerido respectivo. Físicamente, el aumento de U_q provoca un aumento de la corriente d, de modo que el campo se refuerza, la tensión de la rueda polar se hace mayor y se posibilita una transición suave.

Si se viola la condición " $n > n_{Gr}$ " durante la transición, mientras la condición no sea válida o se viole, el valor q de la tensión de fase ya no se incrementa sino que se decrementa, y el sistema vuelve a cambiar al funcionamiento PWM.

Si se utiliza el control de transición A_2 partiendo del modo bloque, U_q se inicializa y decrementa con el último valor del modo bloque. Dado que con el control por PWM A_1 no se conoce de antemano la tensión de transición, la condición aquí es que la corriente d ajustada sea menor que la referencia $I_{d,ref}$ en el modo PWM. Esto muestra que el campo se debilita más de lo que sería óptimo en el punto de funcionamiento respectivo y, por lo tanto, representa una condición de transición válida.

En la figura 11 se muestran de nuevo las magnitudes de la figura 6, pero aquí con el uso del control de transición. En lugar de provocar un salto de tensión en U_d y U_q , la tensión para U_q se incrementa ahora lentamente (gradiente a 400V/s, por ejemplo). U_d permanece aproximadamente constante, ya que U_d en este caso tiene la influencia sobre la corriente I_q , I_q tiene el efecto decisivo sobre el par aplicado, y el par requerido es casi constante en el intervalo mostrado (aquí con control a potencia constante). La corriente d aumenta desde aproximadamente -31 A hasta poco más de 0 A. En comparación con la figura 6, ahora se obtiene un par constante durante la transición.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para operar una máquina eléctrica (100) que puede ser operada con control por PWM (A₁) y con control por bloque (A₃),
5 caracterizado porque se utiliza un control de transición (A₂) para una transición entre el control por PWM (A₁) y el control por bloque (A₃), en el que un valor d de una tensión de fase (U_d) se establece como variable de ajuste y un valor q de la tensión de fase (U_q) se modifica continuamente en el marco de una regulación de un par (M) de la máquina eléctrica (100).
- 10 2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, en donde el valor q de la tensión de fase (U_q) se incrementa durante una transición del control por PWM (A₁) al control por bloque (A₃), y/o en donde el valor q de la tensión de fase (U_q) se reduce durante una transición del control por bloque (A₃) al control por PWM (A₁).
3. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, en donde el valor q de la tensión de fase (U_q) se modifica
15 con un gradiente predeterminado (ΔU).
4. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el valor q de la tensión de fase (U_q) se modifica a partir de un valor utilizado por última vez en el control precedente (A₁, A₃).
- 20 5. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la transición del control por PWM (A₁) al control por bloque (A₃) se efectúa directamente y sin el control de transición si, al comienzo de la transición, una fuerza electromotriz síncrona (U_P) de la máquina eléctrica es mayor o igual que una tensión de circuito intermedio (U_{dc}) de la máquina eléctrica multiplicada por un factor 2/Pi y/o en donde la transición del control por bloque (A₃) al control por PWM (A₁) se efectúa directamente y sin el control de transición, si, al inicio de la
25 transición, una fuerza electromotriz síncrona (U_P) de la máquina eléctrica es inferior o igual a una tensión de circuito intermedio (U_{dc}) de la máquina eléctrica multiplicada por un factor 2/Pi, preferentemente en cada caso más un desplazamiento predeterminable (O) que es positivo o negativo según el sentido de la transición.
6. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde se efectúa un cambio del
30 control por PWM (A₁) al control de transición (A₂) cuando una velocidad (n) de la máquina eléctrica es superior a un umbral de velocidad predeterminable (n_{Gr}), preferentemente más un desplazamiento positivo predeterminable (O).
7. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, en donde se efectúa un cambio del control de transición (A₂) al control por bloque (A₃) cuando una cantidad de la tensión de fase (U_{dq}) en coordenadas d-q es
35 igual o mayor que la tensión del circuito intermedio (U_{dc}) multiplicada por un factor 2/Pi.
8. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el cambio del control por bloque (A₃) al control de transición (A₂) se efectúa cuando una velocidad de rotación (n) de la máquina eléctrica es inferior a un umbral de velocidad de rotación predeterminable (n_{Gr}), preferentemente menos un desplazamiento
40 positivo predeterminable (O).
9. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde se efectúa un cambio del control de transición (A₂) al control por PWM (A₁) cuando un valor d de una corriente de fase (I_d) es igual o menor que un valor de referencia (I_{d,ref}) para el valor d de la corriente de fase en el control por PWM, preferentemente
45 menos un desplazamiento positivo predeterminable (O).
10. Unidad de cálculo (140) adaptada para realizar un procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores.
- 50 11. Programa informático que hace que una unidad de cálculo (140) realice un procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, cuando se ejecuta en la unidad de cálculo (140).
12. Medio de almacenamiento legible por máquina que tiene un programa informático almacenado en él de acuerdo con la reivindicación 11.

55

Fig. 1

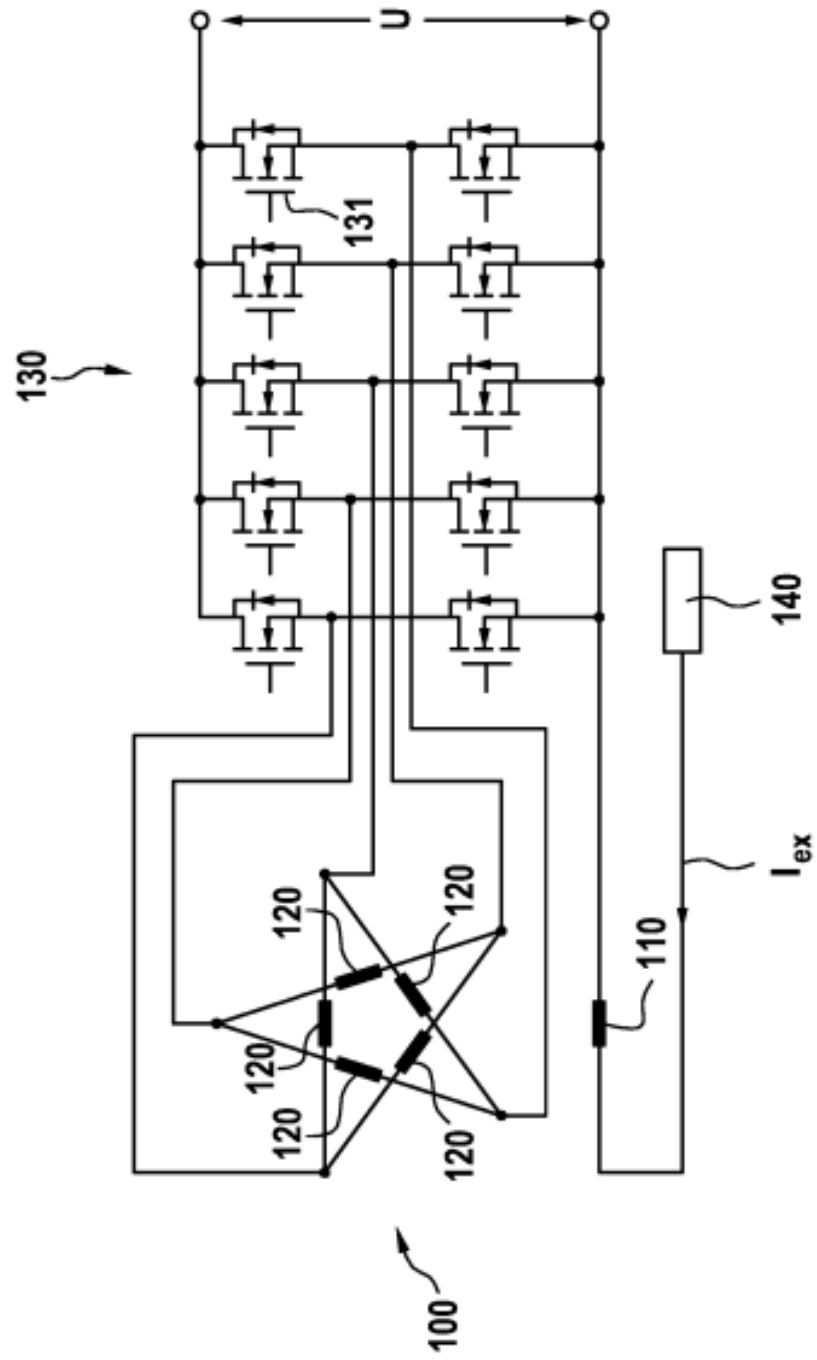


Fig. 2

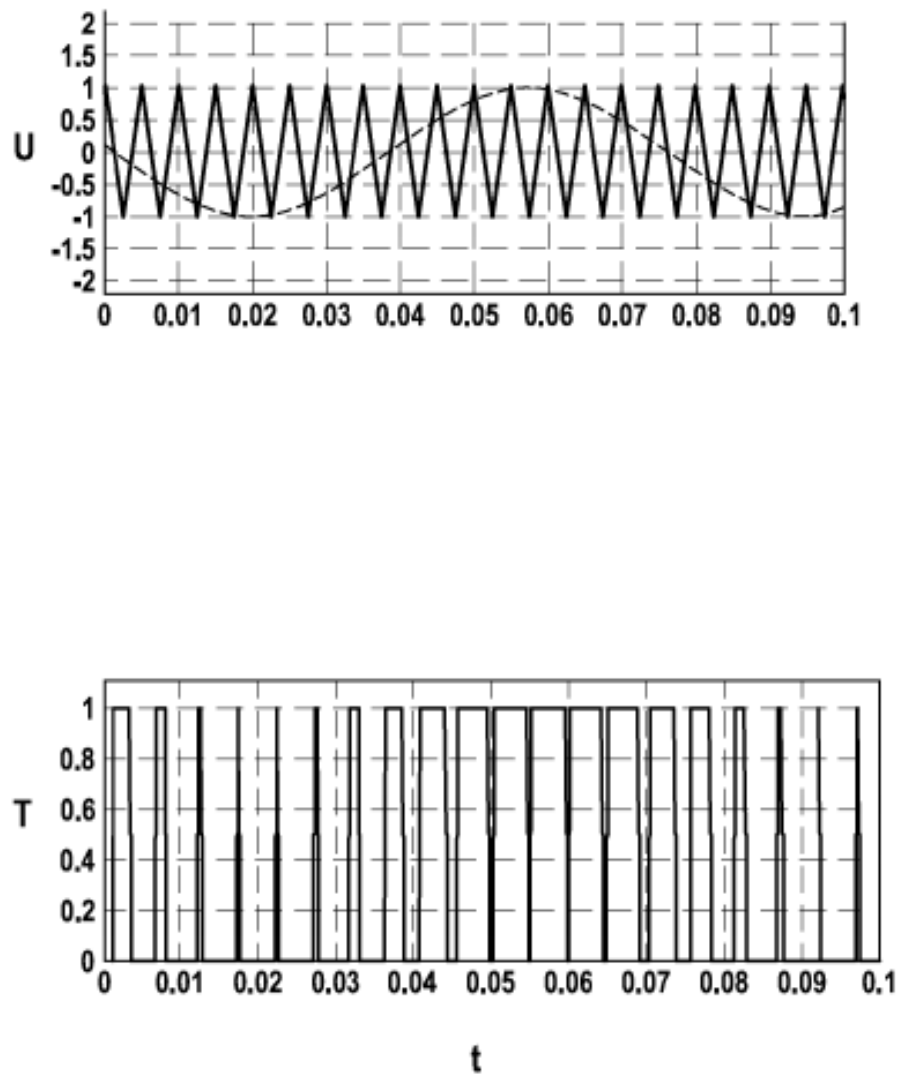


Fig. 3

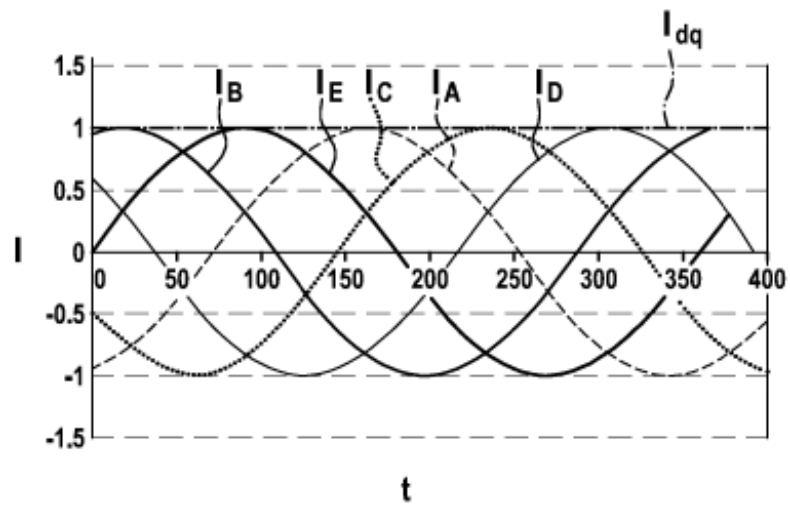


Fig. 4

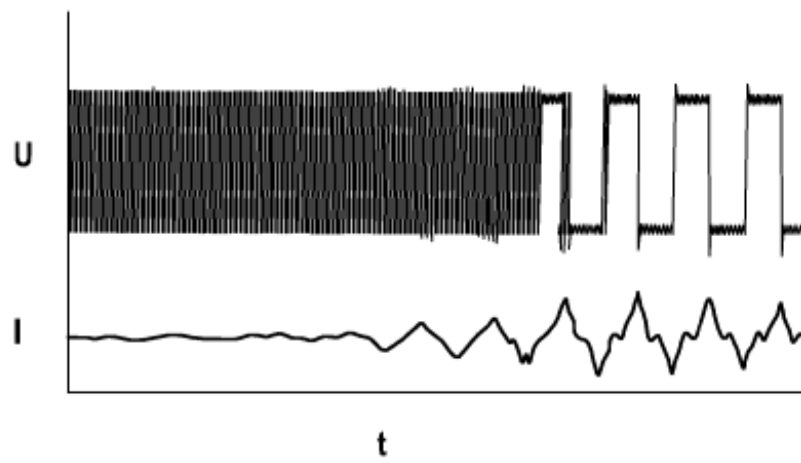


Fig. 5(a)

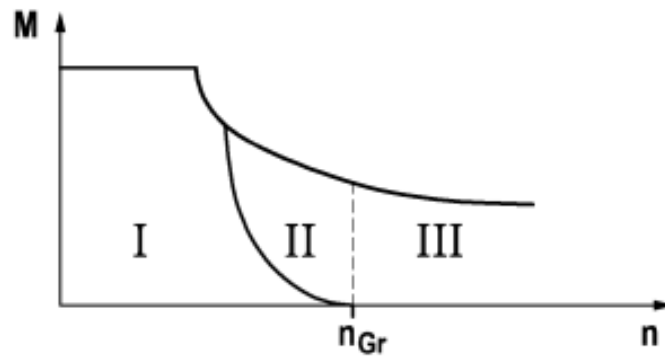


Fig. 5(b)

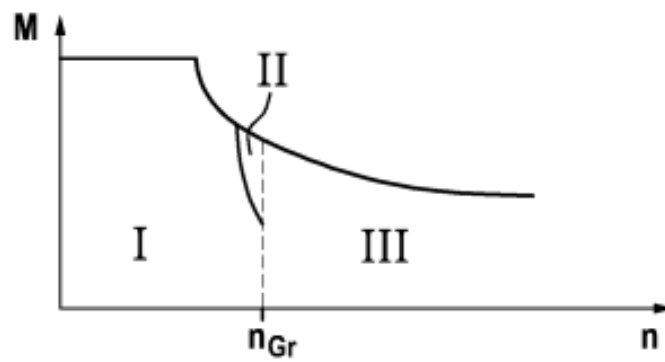


Fig. 6

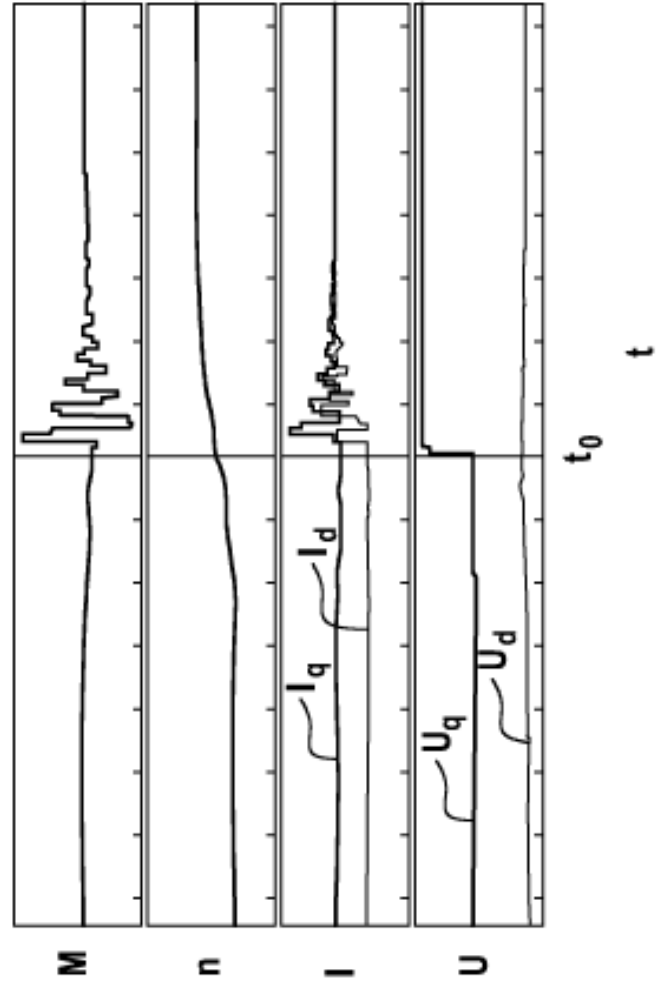


Fig. 7

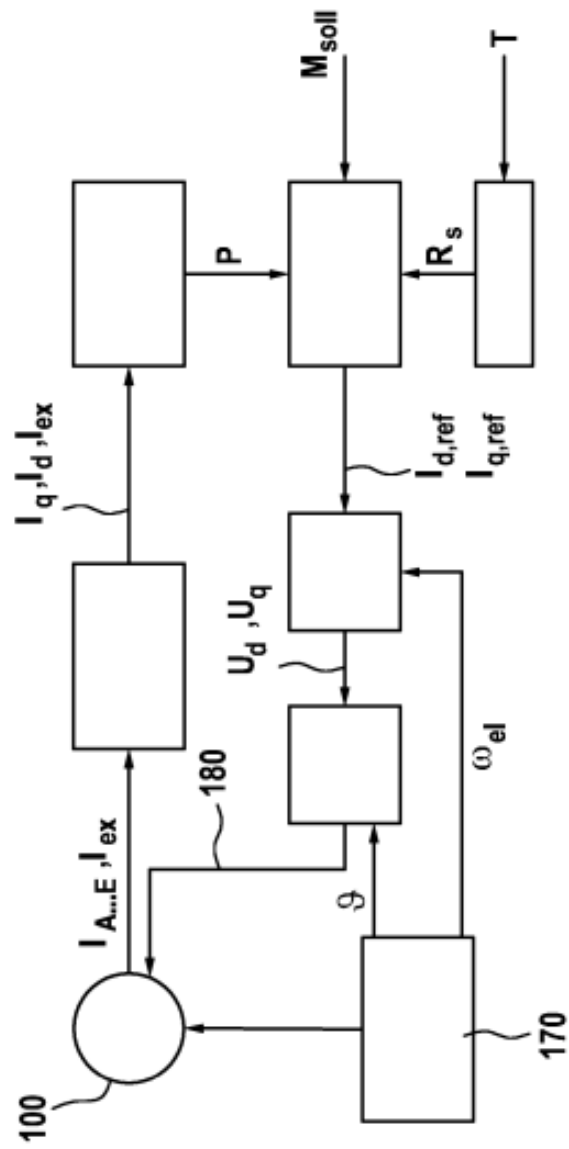


Fig. 8

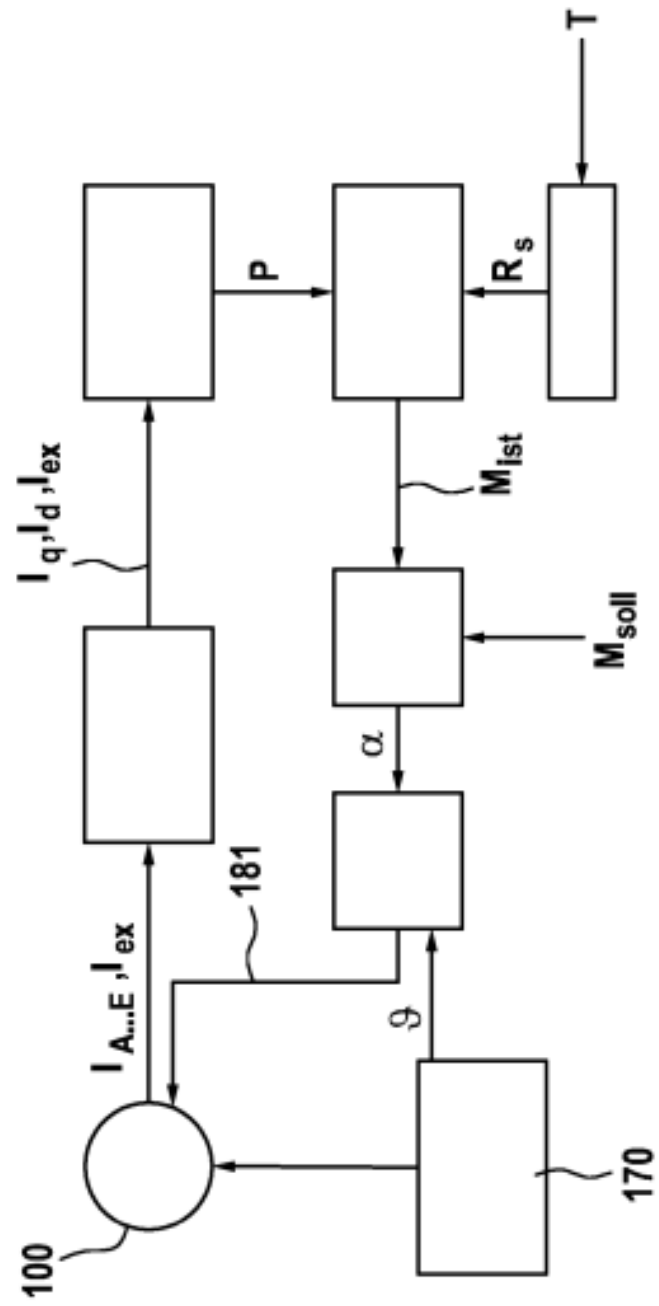


Fig. 9

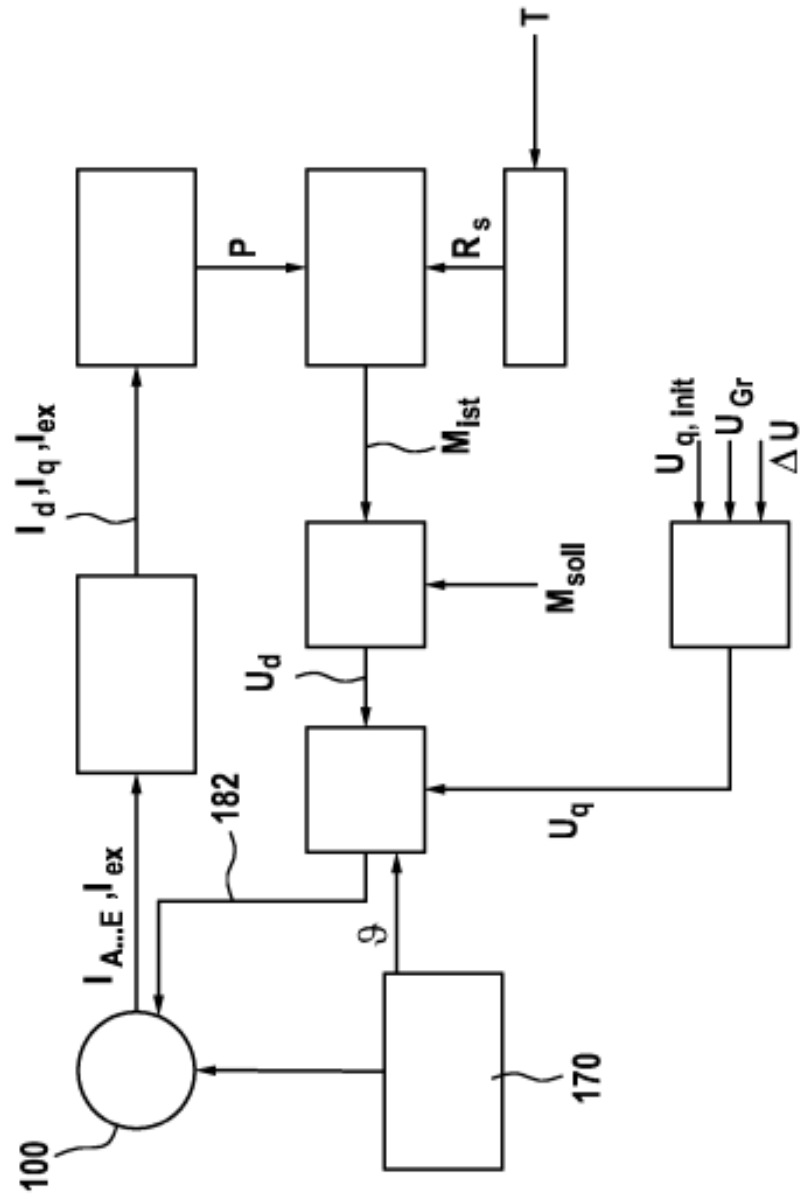


Fig. 10

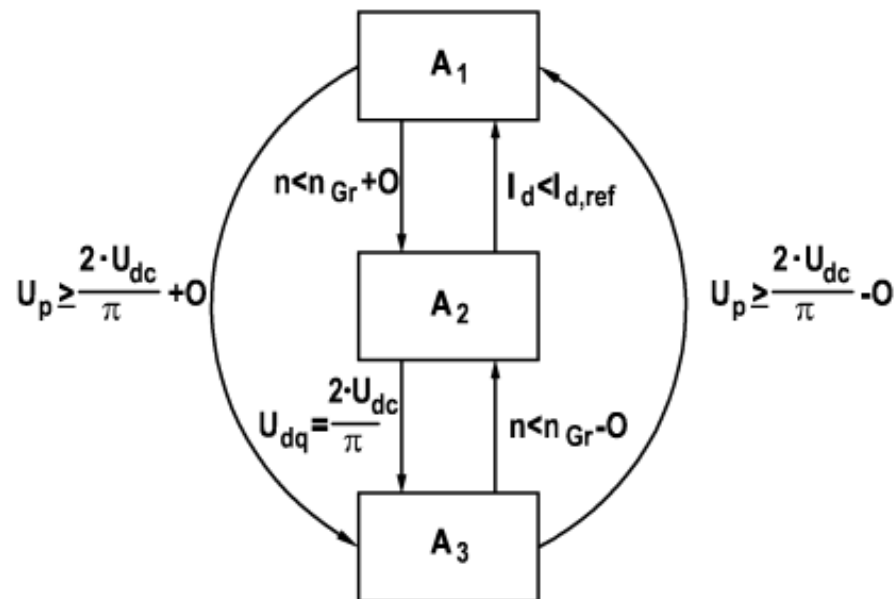


Fig. 11

