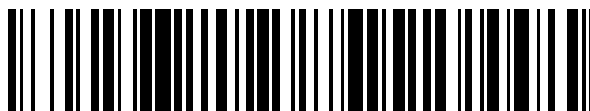


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 658 100**

51 Int. Cl.:

H02P 21/16 (2006.01)

H02P 21/14 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.07.2007** **E 07112587 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.12.2017** **EP 1881594**

54 Título: **Procedimiento de ajuste de parámetros de un motor síncrono y variador de velocidad que utiliza dicho procedimiento**

30 Prioridad:

20.07.2006 FR 0653038

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

08.03.2018

73 Titular/es:

**SCHNEIDER TOSHIBA INVERTER EUROPE SAS
(100.0%)
33, RUE ANDRÉ BLANCHET
27120 PACY SUR EURE, FR**

72 Inventor/es:

**MALRAIT, FRANÇOIS y
CAPITANEANU, STÉFAN**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 658 100 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 de ajuste de parámetros de un motor síncrono y variador de velocidad que utiliza dicho procedimiento

La presente invención se refiere a un procedimiento de ajuste de parámetros del motor en un variador de velocidad electrónico, de tipo convertidor de frecuencia, destinado al control y al mando de un motor eléctrico del tipo síncrono de imanes permanentes en el rotor, denominado igualmente motor PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor). La invención se refiere igualmente a un variador de velocidad que implementa un procedimiento de ese tipo.

Un variador de velocidad electrónico del tipo convertidor de frecuencia está encargado de mandar un motor trifásico PMSM. El variador está alimentado por una red eléctrica alterna de frecuencia fija y proporciona al motor una alimentación en corriente alterna cuya tensión y frecuencia son variables, en función de las consignas de velocidad y de las exigencias de la aplicación. Para ello, un variador de velocidad incluye una unidad de procesamiento capaz de controlar una electrónica de mando.

Para obtener buenos rendimientos del motor, el mando del variador de velocidad debe basarse sobre una representación fiable de un modelo eléctrico del motor utilizando un conjunto de parámetros físicos. Es necesario por tanto conocer un cierto número de datos representativos de las características del motor para establecer este modelo.

Ciertos de estos datos del motor se suministran por el constructor del motor eléctrico a mandar. Estos datos se inscriben habitualmente en la documentación del motor, por ejemplo.

Sin embargo, todos los datos necesarios para la elaboración del modelo de motor no son siempre fiables o pueden depender del entorno del motor, y es por tanto necesario estimar ciertos parámetros, por cálculo o por medición con la ayuda de diferentes procedimientos posibles, para tener un modelo fiel del motor. Estos procedimientos utilizan por ejemplo una fase previa de identificación o de auto-aprendizaje del motor o memorizan en el variador una serie de valores estimados que corresponden a los parámetros a estimar con la ayuda de tablas de datos o calculan ciertos parámetros por medio de ecuaciones empíricas.

En particular, los parámetros eléctricos siguientes pueden ser mal conocidos durante el funcionamiento: la resistencia estatórica del motor R_s , la constante de flujo del motor K_E (o constante de fuerza electromotriz) y las componentes de la inductancia del motor L_D y L_Q , respectivamente según el eje d y según el eje q, siendo la referencia d, q una referencia ortogonal que gira a la velocidad de rotación del motor.

Además, ciertos parámetros del motor pueden evolucionar en el tiempo durante el funcionamiento del motor, en particular la resistencia estatórica R_s que fluctúa mucho con la temperatura del motor. Si, en un instante dado, existe un error en la estimación del valor de esta resistencia estatórica R_s , entonces la corriente eléctrica suministrada al motor por el variador puede ser mayor que la necesaria en el punto de funcionamiento nominal del motor.

Igualmente, las componentes de inductancia del motor de eje d L_D y de eje q L_Q del motor pueden variar durante un funcionamiento en la zona de debilitamiento de campo (más allá de la velocidad nominal). Ahora bien, la precisión dinámica del par suministrado por el motor depende de la precisión del valor de la inductancia del motor. Cuando el motor está controlado por una corriente de eje d (o corriente de flujo) nula, el error sobre la inductancia L_D de eje d no es observable. Se prefiere sin embargo adaptarla por homogeneidad de la misma manera que la inductancia L_Q de eje q.

Igualmente, el valor de la constante de flujo K_E puede variar durante un funcionamiento en la zona de debilitamiento de campo o con la temperatura del motor. Ahora bien, la precisión del par suministrado por el motor depende de la precisión del valor de la constante de flujo.

Se puede degradar de ese modo los rendimientos del conjunto variador + motor implicando unos problemas de consumo, de sobrecalentamiento o generando oscilaciones de corriente, de velocidad y de par. Sería por tanto valioso poder ajustar, en el curso del funcionamiento, los parámetros previamente estimados de manera que se optimice el mando del motor.

El documento EP1220439 describe un procedimiento de determinación de los parámetros de un motor de imanes permanentes, principalmente la resistencia estatórica R_s , la inductancia del motor L_D , L_Q , y la constante de flujo K_E . Sin embargo, este procedimiento necesita la utilización de numerosos captadores para efectuar en particular medidas de temperatura del motor, de tensiones del motor, del par motor, de la rotación del motor, lo que convierte a su aplicación en difícil y costosa en un variador de velocidad.

Esto es por lo que la invención tiene por objeto, cuando existe una medida de la velocidad del motor en el variador (es decir con el funcionamiento en bucle cerrado), corregir en tiempo real los valores de la resistencia estatórica R_s del motor, de las componentes L_D y L_Q de la inductancia del motor y de la constante de flujo K_E del motor, utilizando el término integral del bucle de corriente, permitiendo así ajustar los valores de los parámetros del modelo de motor, sin necesitar principalmente unas medidas de temperatura o del par en el motor.

Para ello, la invención describe un procedimiento de ajuste de parámetros del motor en un variador de velocidad destinado al mando de un motor eléctrico síncrono PMSM. El procedimiento comprende una etapa de determinación de una primera desviación entre una referencia de corriente de par motor y una medida de la corriente de par motor, y de una segunda desviación entre una referencia de corriente de flujo motor y una medida de la corriente de flujo motor, una etapa de cálculo de un valor de corrección de la resistencia estática del motor, de un valor de corrección de la inductancia del motor y de un valor de corrección de la constancia de flujo del motor, a partir del término integral de dicha primera desviación y del término integral de dicha segunda desviación, una etapa de ajuste de los valores de los parámetros del modelo de motor a partir de dichos valores de corrección de la resistencia estática del motor, de la inductancia del motor y de la constante de flujo del motor y una etapa de elaboración de las tensiones de mando a aplicar al motor utilizando dichos valores ajustados de los parámetros del motor.

Según una característica, la referencia de la corriente de par se obtiene a partir de una referencia de la velocidad del motor y de una medición de la velocidad del motor.

Según otra característica, el ajuste del valor de un parámetro del modelo de motor se efectúa durante la etapa de ajuste solamente cuando el valor de una o varias magnitudes características de este parámetro sobrepasa un umbral predeterminado, dependiendo este valor o estos valores de la medida de la velocidad del motor y de la referencia de la corriente de par motor.

La invención describe igualmente un variador de velocidad dotado de una unidad de procesamiento que comprende un bloque regulador de corriente que suministra las tensiones de mando del motor. El bloque regulador de corriente incluye un bloque integrador, un bloque adaptador y un bloque de compensación para implementar el procedimiento de ajuste de los parámetros del motor.

Surgirán otras características y ventajas en la descripción detallada que sigue con referencia a un modo de realización dado a título de ejemplo y representado por los dibujos adjuntos en los que:

- la figura 1 representa un esquema simplificado del mando de un motor síncrono según la invención,
- la figura 2 detalla el bloque 15 regulador de corriente de la figura 1.

Con referencia a la figura 1, un variador de velocidad, de tipo convertidor de frecuencia, está encargado de mandar y controlar un motor eléctrico M síncrono trifásico de tipo PMSM, gracias a una unidad 10 de procesamiento capaz principalmente de controlar una electrónica de mando (no representada en la figura 1). Un captador de velocidad permite suministrar al variador una realimentación de velocidad real del motor W_m .

En lo que sigue, la referencia de corriente del eje q I_{Qref} se designará referencia de corriente de par I_{Qref} y la referencia de corriente de eje d I_{Dref} se designará referencia de corriente de flujo I_{Dref} . Esta primera designación se utiliza incluso si, en el intervalo de funcionamiento normal del motor PMSM, la corriente de flujo I_{Dref} es igual a cero porque el flujo ya está presente gracias al imán del motor. Sin embargo, en caso de debilitamiento de campo la corriente de flujo puede ser diferente a cero. Como se ha indicado anteriormente, la referencia d, q es una referencia ortogonal girando a la velocidad de rotación del motor.

La unidad 10 de procesamiento del variador de velocidad comprende un bloque 11 regulador de velocidad que recibe en la entrada una referencia de la velocidad del motor W_{ref} y la medida de la velocidad del motor W_m , de manera que proporciona en la salida una referencia de la corriente de par motor I_{Qref} . Esta referencia de corriente de par I_{Qref} se determina con precisión puesto que se basa en un valor real medido W_m de la velocidad del motor.

La unidad 10 de procesamiento del variador de velocidad comprende a continuación un bloque 15 regulador de corriente que recibe en la entrada una referencia de la corriente de flujo motor I_{Dref} y la referencia de la corriente de par motor I_{Qref} procedente del bloque 11. El bloque 15 recibe igualmente los valores medidos de las corrientes de par y de flujo motor, respectivamente I_{Qm} , I_{Dm} , así como la medida de la velocidad del motor W_m . Los valores I_{Qm} , I_{Dm} pueden provenir de un bloque 12 convertidor que transforma de manera conocida unas medidas procedentes de captadores de corriente en los conductores de alimentación del motor (es decir conversión por rotación de las corrientes de las tres fases del motor en coordenadas en la referencia d, q).

El bloque 15 regulador de corriente suministra a la salida unas tensiones de mando de flujo U_D y de mando de par U_Q a un bloque 13 convertidor que las transforma de manera conocida en consignas de tensión hacia la electrónica de mando que alimenta las diferentes fases del motor M por medio de componentes semiconductores de potencia.

Según la invención, el bloque 15 regulador de corriente comprende un bloque 16 integrador que calcula el término integral de una primera desviación ΔI_Q que existe entre la referencia de la corriente de par motor I_{Qref} y la medida de la corriente de par motor I_{Qm} , y el término integral de una segunda desviación ΔI_D existente entre la referencia de la corriente de flujo motor I_{Dref} y la medida de la corriente de flujo motor I_{Dm} .

En el punto de funcionamiento de equilibrio del motor, tenemos la relación siguiente escrita en forma vectorial:

$$\begin{pmatrix} \int (I_{Dref} - I_{Dm}) \\ \int (I_{Qref} - I_{Qm}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \int \Delta I_D \\ \int \Delta I_Q \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} \Delta R_S \\ \Delta L \\ \Delta K_E \end{pmatrix}$$

en la que ΔR_S representa el valor relativo de corrección de la resistencia estatórica R_S , ΔK_E representa el valor relativo de corrección de la constante de flujo K_E y ΔL representa el valor relativo de corrección de la inductancia del motor. En efecto, se asimila ΔL_D al valor de corrección medido ΔL_Q y se les designa simplemente ΔL . Según un modo de realización, es posible concebir un valor de corrección ΔL que no actúe más que sobre la componente de eje q L_Q de la inductancia del motor. Sin embargo, se prefiere que el valor de corrección ΔL actúe sobre las dos componentes de eje d L_D y de eje q L_Q de la inductancia del motor.

El coeficiente k puede expresarse como una matriz de transferencia dependiente de los parámetros y del punto de funcionamiento que se obtiene por la relación siguiente:

$$\begin{pmatrix} \int \Delta I_D \\ \int \Delta I_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & W_m * L_Q * I_{Qref} & 0 \\ -R_S * I_{Qref} & 0 & W_m * K_E \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta R_S \\ \Delta L \\ \Delta K_E \end{pmatrix}$$

De ese modo, en régimen estable de funcionamiento del motor, el cálculo de los términos integrales de las desviaciones de corriente ΔI_D y ΔI_Q permite determinar en tiempo real unos valores de corrección ΔR_S , ΔL y ΔK_E a aplicar a la resistencia estatórica R_S , a las componentes de eje d L_D y de eje q L_Q de la inductancia y a la constante de flujo K_E del motor de manera que pueda afinarse permanentemente el modelo del motor con unos valores reales de la resistencia estatórica R_S , de las componentes L_D , L_Q de la inductancia y de la constante de flujo K_E .

El bloque 15 regulador de corriente comprende por tanto un bloque 18 adaptador de parámetros que recibe en la entrada los términos integrales de ΔI_D y de ΔI_Q de manera que calcule ΔR_S , ΔL y ΔK_E para obtener unos valores corregidos de la resistencia estatórica R_S , de las componentes L_D , L_Q de la inductancia y de la constante de flujo K_E del motor, así como otros parámetros del motor que dependen de estos parámetros, como por ejemplo T_S , la constante de tiempo eléctrica. Gracias a la invención, en tanto que los términos integrales de ΔI_D y ΔI_Q no sean nulos, se ajustarán los parámetros R_S , L_D , L_Q y K_E permitiendo así mejorar continuamente los parámetros del modelo de motor. Una vez que se hayan conseguido los valores exactos de R_S , L_D , L_Q y K_E , entonces convergerán los términos integrales de ΔI_D y ΔI_Q hacia cero.

Los nuevos parámetros corregidos se introducen a continuación en un bloque 17 de compensación (denominado también feed-forward) que calcula las partes estáticas (desviación) de la tensión de mando de flujo U_{Destat} y de la tensión de mando de par U_{Qestat} , gracias a las relaciones siguientes:

$$U_{Destat} = R_S * I_{Dref} - L_Q * W_m * I_{Qref}$$

$$U_{Qestat} = R_S * I_{Qref} + L_D * W_m * I_{Dref} + W_m * K_E$$

Las partes estáticas de las tensiones U_{Destat} , U_{Qestat} procedentes del bloque 17 de compensación se suman a continuación con los términos proporcionales e integrales de, respectivamente, ΔI_D , ΔI_Q procedentes de la salida del bloque 16 integrador, para suministrar a la salida del bloque 15 regulador de corriente las consignas de las tensiones de mando de flujo U_D y de mando de par U_Q a aplicar al motor, según las relaciones:

$$U_D = U_{Destat} + K_P * \Delta I_D + K_I * \int \Delta I_D$$

$$U_Q = U_{Qestat} + K_P * \Delta I_Q + K_I * \int \Delta I_Q$$

en las que K_P y K_I representan respectivamente la ganancia proporcional y la ganancia integral de la regulación de corriente.

El procedimiento de ajuste comprende por tanto las etapas siguientes:

- una etapa de determinación del término integral de la primera desviación ΔI_Q , y del término integral de la segunda desviación ΔI_D , realizado en el bloque 16 integrador,
- una etapa de cálculo del valor de corrección ΔR_S , del valor de corrección ΔL y del valor de corrección ΔK_E a partir del término integral de la primera desviación ΔI_Q , y a partir del término integral de la segunda desviación ΔI_D ,
- una etapa de ajuste de los valores de los parámetros R_S , L_D , L_Q y K_E del modelo de motor a partir de los valores de corrección ΔR_S , ΔL y ΔK_E , realizándose estas dos etapas en el bloque 18 adaptador,
- una etapa de elaboración a la salida del bloque 15 regulador de la tensión de mando del flujo U_D y de la tensión de mando del par U_Q aplicadas al motor M, utilizando los valores ajustados de los parámetros del motor. Esta etapa de elaboración de U_D y U_Q comprende una etapa de cálculo de las partes estáticas U_{Destat} y U_{Qestat} en el

bloque 17 de compensación y una etapa de adición de U_{Destat} y U_{Qestat} con los términos proporcionales e integrales de ΔI_D y ΔI_Q para suministrar U_D y U_Q .

Preferentemente, la etapa de ajuste de cada uno de los diferentes parámetros R_S , L_D , L_Q y K_E se implementa con ayuda del procedimiento descrito en la presente invención bajo ciertas condiciones. El ajuste del valor de un parámetro del modelo motor se efectúa solamente cuando el valor de una o varias magnitudes características asociadas a este parámetro sobrepasa un umbral predeterminado. En efecto, cuando el valor de una o de las magnitudes características asociadas a estos parámetros se sitúa por debajo de un umbral predeterminado, los otros parámetros del motor se convierten en preponderantes con relación a este parámetro a ajustar. El ajuste de este parámetro podría por tanto inducir a un error relativo que tendría el riesgo de perturbar el buen funcionamiento del procedimiento descrito.

El ajuste de los valores de los parámetros R_S , L_D , L_Q y K_E se realiza de la siguiente manera:

- la resistencia R_S se ajusta solamente cuando los valores de sus magnitudes características $|I_{Qref} / W_m|$ y $|I_{Qref}|$ sobrepasan ambos los dos umbrales predeterminados. Por ejemplo, el umbral para la magnitud $|I_{Qref} / W_m|$ corresponde aproximadamente a la relación entre la constante de flujo nominal K_E memorizada por omisión y la resistencia estatórica R_S memorizada por omisión y el umbral para la magnitud $|I_{Qref}|$ corresponde a la relación entre una tensión mínima y la resistencia estatórica R_S memorizada por omisión, teniendo esta tensión mínima un valor definido como igual a la centésima parte de la tensión nominal del motor.
- Las componentes L_D , L_Q de la inductancia se ajustan solamente cuando la magnitud $|W_m * I_{Qref}|$ sobrepasa un umbral predeterminado, por ejemplo, este umbral corresponde aproximadamente a la relación entre una tensión mínima y la inductancia L_Q memorizada por omisión, definido el valor de la tensión mínima como igual a la centésima parte de la tensión nominal del motor.
- La constante de flujo K_E se ajusta solamente cuando las magnitudes $|W_m / I_{Qref}|$ y $|W_m|$ sobrepasan ambas los dos umbrales predeterminados. Por ejemplo, el umbral para la magnitud $|W_m / I_{Qref}|$ corresponde aproximadamente a la relación entre la resistencia estatórica memorizada por omisión y la constante de flujo K_E memorizada por omisión mientras que el umbral para la magnitud $|W_m|$ corresponde a la relación entre una tensión mínima y la constante de flujo K_E memorizada por omisión, siendo definida la tensión mínima como igual a la centésima parte de la tensión nominal del motor.

Por supuesto que se puede, sin salirse del marco de la invención, imaginar otras variantes y perfeccionamientos de detalle e igualmente concebir el empleo de medios equivalentes.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de ajuste de parámetros del motor en un variador de velocidad destinado al mando de un motor eléctrico síncrono de imanes permanentes (M), comprendiendo el procedimiento una etapa de determinación de una primera desviación (ΔI_Q) entre una referencia de corriente de par motor (I_{Qref}) y una medida de la corriente de par motor (I_{Qm}), y una segunda desviación (ΔI_D) entre una referencia de la corriente de flujo motor (I_{Dref}) y una medida de la corriente de flujo motor (I_{Dm}),
5 **caracterizado porque** el procedimiento comprende:
 - una etapa de cálculo de un valor de corrección (ΔR_s) de la resistencia estatórica del motor, de un valor de corrección (ΔL) de la inductancia del motor y un valor de corrección (ΔK_E) de la constante de flujo del motor, a partir del término integral de dicha primera desviación (ΔI_Q) y del término integral de dicha segunda desviación (ΔI_D),
10 - una etapa de ajuste de los valores de los parámetros del modelo de motor a partir de dichos valores de corrección (ΔR_s , ΔL , ΔK_E) de la resistencia estatórica del motor, de la inductancia del motor y de la constante de flujo del motor,
15 - una etapa de elaboración de las tensiones de mando (U_D , U_Q) a aplicar al motor (M) utilizando dichos valores ajustados de los parámetros del motor.
2. Procedimiento según la reivindicación 1, **caracterizado porque** la referencia de la corriente de par (I_{Qref}) se obtiene a partir de una referencia de la velocidad del motor (W_{ref}) y de una medida de la velocidad del motor (W_m).
3. Procedimiento según la reivindicación 2, **caracterizado porque** el ajuste del valor de un parámetro del modelo de motor se efectúa durante la etapa de ajuste solamente cuando el valor de una o varias magnitudes características de este parámetro sobrepasa un umbral predeterminado, dependiendo este valor o estos valores de la medida de la velocidad del motor (W_m) y de la referencia de la corriente de par del motor (I_{Qref}).
20
4. Variador de velocidad destinado al mando de un motor eléctrico síncrono de imanes permanentes (M), dotado de una unidad (10) de procesamiento que comprende un bloque (15) regulador de corriente que suministra unas tensiones de mando del motor (M), **caracterizado porque** el bloque (15) regulador de corriente incluye:
25
 - Un bloque (16) integrador para determinar una primera desviación (ΔI_Q) entre una referencia de la corriente de par motor (I_{Qref}) y una medida de la corriente de par motor (I_{Qm}), y una segunda desviación (ΔI_D) entre una referencia de la corriente de flujo motor (I_{Dref}) y una medida de la corriente de flujo motor (I_{Dm}),
30 - Un bloque (18) adaptador que calcula un valor de corrección (ΔR_s) de la resistencia estatórica del motor, un valor de corrección (ΔL) de la inductancia del motor y un valor de corrección (ΔK_E) de la constante de flujo del motor, a partir del término integral de dicha primera desviación (ΔI_Q) y del término integral de dicha segunda desviación (ΔI_D), y ajustando unos valores de los parámetros del modelo de motor a partir de dichos valores de corrección (ΔR_s , ΔL , ΔK_E) de la resistencia estatórica del motor, de la inductancia del motor y de la constante de flujo del motor,
35 - Un bloque (17) de compensación que utiliza dichos valores ajustados de los parámetros del motor para elaborar unas tensiones de mando (U_D , U_Q) a aplicar al motor (M).
5. Variador de velocidad según la reivindicación 4, **caracterizado porque** la unidad (10) de procesamiento incluye un bloque (11) regulador de velocidad que calcula la referencia de la corriente de par (I_{Qref}) a partir de una referencia de la velocidad del motor (W_{ref}) y de una medida de la velocidad del motor (W_m).
- 40 6. Variador de velocidad según la reivindicación 5, **caracterizado porque** el ajuste del valor de un parámetro del modelo de motor se efectúa en el bloque (18) adaptador solamente cuando el valor de una o varias magnitudes características de este parámetro sobrepasa un umbral predeterminado, dependiendo este valor o estos valores de la medida de la velocidad del motor (W_m) y de la referencia de la corriente de par del motor (I_{Qref}).

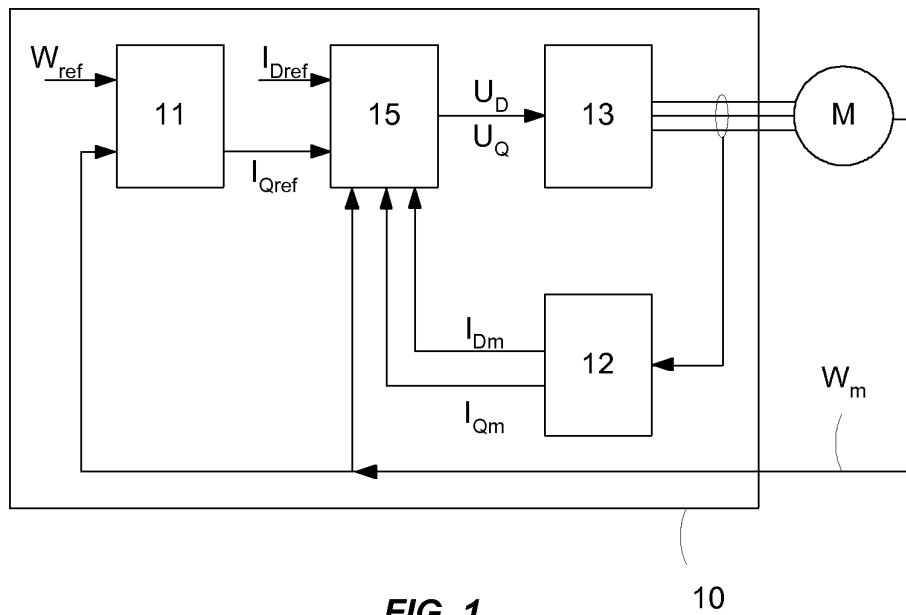


FIG. 1

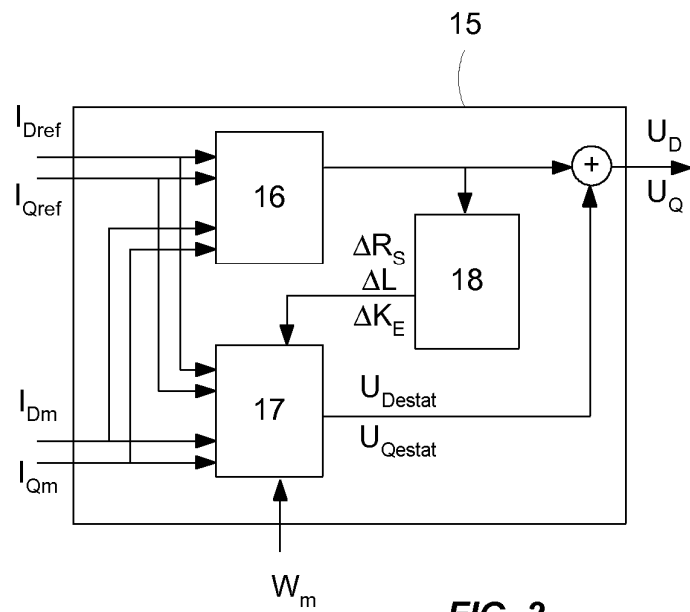


FIG. 2