



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 279 341**

51 Int. Cl.:  
**H02P 6/18** (2006.01)  
**H02P 6/14** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Número de solicitud europea: **04706415 .9**  
86 Fecha de presentación : **29.01.2004**  
87 Número de publicación de la solicitud: **1588481**  
87 Fecha de publicación de la solicitud: **26.10.2005**

54 Título: **Optimización del ángulo de avance de fase para control de motores sin escobilla.**

30 Prioridad: **29.01.2003 US 353067**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**16.08.2007**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**16.08.2007**

73 Titular/es:  
**MATRA MANUFACTURING & SERVICES S.A.S.**  
**4, rue de Presbourg**  
**75116 Paris, FR**

72 Inventor/es: **Maslov, Boris, A.;**  
**Feemster, Matthew, G. y**  
**Yuan, Guohui**

74 Agente: **Buceta Facorro, Luis**

**ES 2 279 341 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).

# ES 2 279 341 T3

## DESCRIPCIÓN

Optimización del ángulo de avance de fase para control de motores sin escobilla.

### 5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere a motores eléctricos rotatorios, y más particularmente a la optimización del ángulo de avance de fase, para el control de motores de imán permanente sin escobillas.

### 10 **Historial**

Las solicitudes de patente co-pendientes identificadas anteriormente describen los retos del desarrollo de accionamientos de motores eléctricos eficientes. La activación de impulsos electrónicos controlados de los devanados de los motores ofrece la posibilidad de una administración de las características de los motores más flexible. Por el control del ancho de los impulsos, el ciclo de trabajo, y la aplicación conectada de una fuente de energía a unos devanados de estator apropiados, se puede lograr una mayor versatilidad funcional. El uso de imanes permanentes en unión con tales devanados es ventajoso en la limitación del consumo de corriente.

En un entorno de accionamiento de vehículos, es altamente deseable alcanzar una operación suave a lo largo de una amplia gama de velocidades, mientras que se mantiene una capacidad de salida de momento de torsión elevado a un mínimo consumo de potencia. Unas disposiciones estructurales de motor descritas en las solicitudes co-pendientes contribuyen a estos objetivos. Los segmentos de núcleo de electroimanes, pueden ser configurados como estructuras permeables magnéticamente aisladas en un anillo anular, para proporcionar una concentración de flujo incrementada. El aislamiento de los segmentos de núcleo del electroimán permite una concentración individual del flujo en los núcleos magnéticos, con un mínimo de pérdida de flujo o efectos perjudiciales de interferencia de transformador, con otros miembros de electroimán.

Un rendimiento controlado con precisión dentro de las aplicaciones de motor sin escobillas, implica la fusión de una compensación de alimentación hacia adelante no lineal conectada con unos elementos de realimentación de corriente. Sin embargo, las expresiones de alimentación de compensación hacia adelante típicamente se basan fuertemente en los diferentes parámetros de circuito, tales como la resistencia de fase, la autoinductancia de fase y similares, que se han representado como ilustración en el diagrama de circuito equivalente para una fase de motor individual en la figura 1.  $V_i(t)$  indica la entrada de tensión por fase,  $R_i$  indica la resistencia de devanado por fase, y  $L_i$  representa la autoinductancia por fase.  $E_i(f)$  representa la tensión de la fuerza contraelectromotriz que se opone del motor por fase y se puede aproximar por la siguiente expresión:

$$E_i = (K_{ci} w) \text{sen} (N_r \theta_i)$$

donde  $K_{ci}$  indica el coeficiente de la fuerza contraelectromotriz por fase,  $w(t)$  representa la velocidad del rotor,  $N_r$  indica el número de pares de imanes permanentes y  $\theta_i(t)$  representa el desplazamiento relativo entre el devanado de la  $i$ -ava fase y una posición de referencia de rotor.

La tensión  $V_i(t)$  se puede definir como sigue:

$$V_i(t) = E_i(t) + R_i I_i(t) + L_i \frac{d}{dt} I_i(t) \quad i = 1, 2, \dots, N_s$$

donde

$V_i(t)$  es la tensión a través del devanado;

$I_i(t)$  es la corriente de fase;

$R_i$  es la resistencia del devanado;

$E_i(t)$  es la fuerza contraelectromotriz;

$L_i$  es la autoinductancia del devanado; y

$N_s$  es el número de devanados de fase del estator.

La tensión  $V_i(t)$  es suministrada por una fuente de potencia de corriente continua regulada con una tensión limitada. Como quiera que el término fuerza contraelectromotriz es proporcional a la velocidad del motor, hay un límite para la corriente de fase  $I_i(t)$  por encima de ciertas velocidades.

## ES 2 279 341 T3

Suponiendo que la distribución del flujo magnético en el intervalo de aire es sinusoidal, los comportamientos de estado continuo de la fuerza contraelectromotriz y la corriente de fase se puede definir como sigue:

$$E_i(t) = E_i \sin(\theta_i(t)) = K_{s,t} w \sin(N_r \omega t + \alpha_i)$$

$$I_i(t) = I_i \sin(\theta_i(t)) = I_i \sin(N_r \omega t + \alpha_i)$$

$i = 1, 2, \dots, N_s$

y el momento de torsión total medio es:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_r} K_{ei} I_i$$

donde

$N_r$  es el número de pares de polo PM;

$K_{ei}$  es el coeficiente de la fuerza contraelectromotriz;

$w$  es la velocidad del motor;

$\alpha_i$  es un ángulo de excentricidad que depende de la geometría del motor;

$T$  es la salida del momento de torsión total medio; y

$K_{ei}$  es el coeficiente de torsión.

De ahí que la salida del momento de torsión esté también limitada por las restricciones del suministro de potencia. Se ha usado una técnica de control de avance de fase para extender la operación de la gama de velocidad limitada por la tensión de suministro de potencia máxima. En lugar de formar una corriente de armadura sinusoidal (o corriente de fase) en fase con la fuerza contraelectromotriz, el ángulo de fase de la corriente de la armadura se avanza con respecto a la fuerza contraelectromotriz.

Por ejemplo, la patente Estadounidense 6.373.211 de Henry *et al.* describe un método para extender la operación de la gama de velocidad para un motor de imán permanente excitado de modo sinusoidal. El método, usa la técnica de avance de fase para lograr una gama de velocidad extendida con una corriente de fase reducida. La gama de velocidad extendida de operación, está suministrada por el control del ángulo de avance de fase  $\alpha$  entre el vector de corriente y el vector de la fuerza contraelectromotriz. Se usa un juego de unas tablas pre-computadas para almacenar los diferentes valores de momento de torsión a diferentes velocidades. El ángulo de avance de fase de corriente se calcula basado en el mando del momento de torsión y la velocidad detectada.

Sin embargo, la técnica de Henry *et al.* no produce los valores de ángulo de avance de fase optimizados para lograr la salida del momento de torsión máximo con la corriente de fase mínima. En su lugar, la patente da a conocer el ajuste del momento de torsión máximo  $T_{max}$ . Después, se lee la velocidad  $w$  y el momento de torsión  $T_{cmd}$  requerido o de control. Si el momento de torsión de control  $T_{cmd}$  es mayor que el momento de torsión máximo  $T_{max}$  disponible a esa velocidad  $w$ , entonces el momento de torsión de control  $T_{cmd}$  se reduce. El ángulo de avance de fase se calcula a ese valor reducido del momento de torsión de control  $T_{cmd}$ . De ahí que la técnica de avance de fase del tipo previo proporciona el ángulo de avance de fase para lograr una gama de velocidad de operación extendida a una corriente de fase reducida. Sin embargo, el tipo previo no enseña la optimización del ángulo de avance de fase y la amplitud de la corriente de fase para reducir al mínimo el consumo de potencia.

En un entorno de accionamiento de vehículos, en el cual la disponibilidad de potencia está limitada a un suministro a bordo, es altamente deseable alcanzar una capacidad de salida de momento de torsión elevada a un consumo de potencia mínimo. Las disposiciones estructurales de motor, descritas en las solicitudes co-pendientes, contribuyen a estos objetivos. Del modo descrito en esas aplicaciones, los segmentos de núcleo de electroimán pueden estar configurados como estructuras aisladas magnéticamente permeables en un anillo anular para proporcionar una concentración de flujo incrementada. El aislamiento de los segmentos de núcleo de electroimán permite la concentración individual del flujo en los núcleos magnéticos, con una pérdida de flujo mínima o unos efectos de interferencia perjudiciales de transformador que ocurren por la interacción con otros miembros de electroimán.

## ES 2 279 341 T3

De ahí, que exista la necesidad de una optimización de avance de fase para permitir que un motor suministre una salida del momento de torsión incrementada con un consumo de potencia mínimo.

Además, una técnica de avance de fase convencional no proporciona una optimización de avance de fase para cada fase de un motor de múltiples fases. Sin embargo, debido a los fenómenos afectados por las tolerancias mecánicas / de fabricación y otras características estructurales, cada fase de motor presentará una gama de valores para cada elemento de circuito. Los factores que pueden afectar a las magnitudes de los parámetros de circuito incluyen: el enlace de flujo neto del núcleo de electroimán; las fluctuaciones en la inductancia del núcleo con respecto al circuito eléctrico; las variaciones en la resistencia del devanado de fase debido a unos cambios en las tolerancias de fabricación tales como el área de sección transversal y la tensión de devanado; unas variaciones en la permeabilidad del núcleo (relacionada con el grado y el historial del procesamiento y del acabado del material); la técnica del devanado de fase (devanado uniforme o entremezclado) o la calidad de construcción de los devanados en cada núcleo de estator; la posición de la interacción del imán permanente y del electroimán (es decir la permeancia del circuito magnético); unas variaciones en la densidad de flujo del intervalo de aire, que depende del subconjunto del imán del rotor del imán permanente; la densidad del flujo magnético residual; un campo magnético de desviación debido a los campos magnéticos externos; la forma del alambre del devanado (rectangular, circular o helicoidal); el factor de devanado logrado en el devanado; las tolerancias de fabricación logradas en la geometría del núcleo que podrían cambiar la tolerancia de la sección transversal del núcleo; la longitud efectiva sobre la que está devanada la bobina.

Típicamente, las estrategias de control de motor suponen una uniformidad de los valores de parámetro a lo largo de todo el motor. Se toma un valor de parámetro mediano para que represente todos los elementos de circuito correspondientes del motor. Esta aproximación de parámetro de forma global, a menudo lleva a la degradación en el rendimiento de localización debido a una compensación en exceso / de menos de la estrategia de control, debido a una desadaptación de la compensación del valor del parámetro dentro de las rutinas de compensación de fase individuales. Tales parámetros supuestos, están expuestos a unos discrepancias incluso mayores con estructuras de estator configuradas como componentes autónomos de núcleo aislado ferromagnéticamente.

WO 01/20751 A2 describe una operación de gama de velocidad extendida de unas máquinas sin escobillas de imán permanente, que usan un control óptimo de ángulo de fase en la operación en el modo de tensión. El método incluye una determinación de un valor máximo de un primer juego de parámetros, donde cada parámetro tiene un valor máximo conocido al igual que una lectura de un segundo juego de parámetros. Se lleva entonces a cabo una computación de un primer ángulo derivado usando un primer juego de parámetros y el segundo juego de parámetros. Sigue una computación de una amplitud de una tensión de fase y un segundo ángulo derivado, que usa el primer ángulo derivado. Se crea una salida resultante que consta de un juego de tensiones de mando derivadas, para el control de un circuito de potencia donde el circuito de potencia puede lograr los niveles de momento de torsión requeridos, con unas corrientes más bajas para los conmutadores de potencia.

Por tanto, existe la necesidad de una técnica de optimización de avance de fase, que produzca el ángulo de avance de fase óptimo y una amplitud óptima de la corriente de fase para aumentar al máximo el momento de torsión de la salida de motor a un consumo de potencia mínimo, y que acabe con las variaciones de los parámetros en las estructuras de los componentes de fase del estator y los devanados de fase separados.

### **Invencción que se da a conocer**

La presente invención está definida por las reivindicaciones del aparato 1 y 9 y la reivindicación del método 15.

La presente invención cumple con esta necesidad, mientras que mantiene los beneficios de configuraciones del elemento de núcleo del estator individual separado y ferromagnéticamente aislado del modo dado a conocer en las solicitudes co-pendientes. La capacidad de la presente invención para implementar una estrategia de optimización del ángulo de avance de fase, que aumenta al máximo el momento de torsión de salida y reduce al mínimo la corriente de fase para los elementos de circuito de fase individuales, ofrece una estrategia de control de momento de torsión óptima para un momento de torsión en particular, solicitado para un usuario con un grado más elevado de controlabilidad de la precisión, ya que cada circuito de control de fase está compaginado de cerca con su devanado y estructura correspondientes. Esta capacidad se obtiene, al menos en parte, por el establecimiento de un controlador en un sistema de control para un motor de imán permanente de múltiples fases, para producir una señal de control para activar el devanado de fase que incluye una calculadora del valor de la corriente, para determinar un valor de corriente de fase avanzado en fase con respecto a la fuerza contraelectromotriz por un ángulo de avance de fase, y un circuito de optimización de avance de fase para la producción de un valor del ángulo de avance de fase optimizado, para aumentar al máximo el momento de torsión de salida del motor y reducir al mínimo la corriente de fase.

Basado en los parámetros dependientes de la fase que incluyen una reactancia del devanado, el coeficiente del momento de torsión y una fuerza contraelectromotriz dependiente de la fase asociada con cada fase, el proceso de optimización del avance de fase se puede llevar a cabo para cada fase del motor que acabe por las variaciones de los parámetros en las estructuras del componente de fase del estator y los devanados de fase separados. El controlador, puede operar en un esquema de ejecución integrada en la cual los parámetros de fase, en particular, se sustituyen para cada salida de tensión de control generada. Alternativamente, el controlador puede estar provisto de un circuito de control separado para cada fase del estator. Cada configuración de circuito de fase usa un valor óptimo del ángulo de avance de fase para una fase en particular, para generar la señal de control para el devanado de fase respectivo.

## ES 2 279 341 T3

El circuito de optimización del avance de fase puede constar de una primera sección de optimización, para determinar un valor de momento de torsión máximo para una velocidad dada, y una segunda sección de optimización sensible al valor del momento de torsión máximo, para producir un valor óptimo del ángulo de avance de fase y una amplitud óptima de la corriente de fase. La segunda sección de optimización, reduce al mínimo la corriente de fase para una velocidad dada y un momento de torsión solicitado por el usuario.

El ángulo de avance de fase óptimo, se puede determinar usando una tabla de localización que responde al momento de torsión y la velocidad de motor deseados.

El control de motor de la presente invención, proporciona ventajas con motores de una variedad de construcción y se puede aplicar a un motor en el cual, cada componente de fase de estator consta de un electroimán de estator ferromagnéticamente aislado, estando los elementos del núcleo del electroimán separados de un contacto directo entre sí y estando formados con devanados de fase separados.

La presente invención es particularmente ventajosa en aplicaciones en las que el motor está previsto para localizar una entrada variable iniciada por el usuario, tal como una operación de control de tracción de vehículo eléctrico. En respuesta a las señales de entrada del control del momento de torsión, las trayectorias de corriente por fase deseadas, se seleccionan por el controlador de acuerdo con una expresión que incluye en particular los parámetros para cada fase.

Las ventajas adicionales de la presente invención se harán aparentes de la siguiente descripción detallada para aquellos con conocimientos en esta técnica, en la cual solo se muestra y se describe la forma preferencial de la invención, simplemente a modo de ilustración del mejor modo contemplado para llevar a cabo la invención. Como se observa, la invención es capaz de otras realizaciones diferentes, y sus diferentes detalles son capaces de modificaciones en varios aspectos obvios, todos ellos sin apartarse de la invención. Correspondientemente, los dibujos y la descripción se han de considerar como ilustrativos en su naturaleza y no como restrictivos.

### Breve descripción de los dibujos

La presente invención se ilustra a modo de ejemplo, y no a modo de limitación, en las figuras del dibujo que la acompañan y en las cuales los números de referencia similares se refieren a elementos similares, y en la cual:

La figura 1 es un diagrama de circuito equivalente para una fase de motor individual.

La figura 2 es un diagrama de bloques de un sistema de control de motor de acuerdo con la presente invención.

La figura 3 es un diagrama de circuito parcial de un juego de conmutador y un impulsor, para un devanado de segmento de núcleo de estator individual de un motor controlado por el sistema de la figura 2.

La figura 4 es un dibujo de un recorte tridimensional de una estructura de motor adecuada para el uso en el sistema de control de la figura 2.

La figura 5 es un diagrama que ilustra las características de velocidad - momento de torsión con y sin ángulo de avance de fase.

La figura 6 es un diagrama de círculo que ilustra la técnica de avance de fase de acuerdo con la presente invención.

La figura 7 es un diagrama de bloques que ilustra la metodología del controlador del momento de torsión para el uso en el sistema de control de la figura 2.

La figura 8 es un diagrama de bloques que ilustra el bloque de optimización del ángulo de avance de fase de la figura 7.

Las figuras 9 y 10 son diagramas que ilustran la optimización del ángulo de avance de fase llevada a cabo por la primera sección de optimización de la figura 8.

Las figuras 11 y 12 son diagramas que ilustran la optimización del ángulo de avance de fase llevada a cabo por la segunda sección de optimización de la figura 8.

La figura 13 es un diagrama de bloques parcial que ilustra una variación de la metodología del controlador de la figura 7.

### Descripción detallada de la invención

La figura 2 es un diagrama de bloques de un sistema de control de un motor de acuerdo con la presente invención. El motor de múltiples fases (10) consta de un rotor (20) y un estator (30). El estator tiene una pluralidad de devanados de fase, que están activados de modo conectable por la corriente de excitación suministrada por una fuente de potencia de corriente continua (40), a través de unos juegos de conmutador electrónicos (42). Los juegos de conmutador están

## ES 2 279 341 T3

conectados al controlador (44) a través de los osciladores de mando de puerta (46). El controlador (44) tiene una o más entradas de usuario y una pluralidad de entradas para las condiciones de motor detectadas durante la operación. La corriente, en cada devanado de fase, es detectada por un respectivo sensor de una pluralidad de sensores de corriente (48) cuyas salidas se suministran al controlador (44). El controlador puede tener una pluralidad de entradas para este propósito o, como alternativa, unas señales de los sensores de corriente pueden ser transmitidas simultáneamente y conectadas a una entrada de un controlador individual. El sensor de la posición del rotor (47) está conectado a otra entrada del controlador (44) para proporcionarle a éste unas señales de posición. La salida del sensor de posición también se aplica al aproximador de velocidad (50), que convierte las señales de posición en unas señales de velocidad que se han de aplicar a otra entrada del controlador (44).

El controlador de secuencia puede constar de un microprocesador o un microcontrolador equivalente, tal como un procesador de señales digitales de Texas Instrument TMS320LF2407APG. Los juegos de conmutadores pueden constar de una pluralidad de puentes H MOSFET, tales como el rectificador internacional IRFIZ48N-ND. El oscilador de mando de puerta puede constar de un oscilador de mando de puerta Intersil MOSFET HIP40821B. El sensor de posición puede constar de cualquier medio de sensor conocido, tal como unos dispositivos de efecto de Hall (microsistemas Allegro 92B5308), sensores gigantes (GMR) sensibles a magneto, sensores rotatorios capacitivos, interruptores de lengüeta, sensores de alambres de impulso incluyendo sensores amorfos, resolvidores, sensores ópticos y similares. Los sensores de corriente de efecto Hall, tales como F.W. Bell SM-15, se pueden utilizar para sensores de corriente (48). El detector de velocidad (50) proporciona una aproximación de tiempo derivado de las señales de posición angulares detectadas.

La figura 3 es un diagrama de circuito parcial de un juego de conmutador y propulsor para un devanado de segmento de núcleo del estator individual. El devanado de fase del estator (34) está conectado en un circuito de puente de cuatro FETs (transistores de efecto de campo). Se ha de comprender que se puede usar cualquiera de los diferentes elementos de conmutación electrónicos conocidos, para dirigir la corriente de impulsión en la dirección apropiada al devanado del estator (34) tal como, por ejemplo, unos transistores bipolares. El FET (53) y el FET (55) están conectados en serie a través de la fuente de potencia, al igual que lo son el FET (54) y el FET (56). El devanado del estator (34) está conectado entre los nodos de conexión de las dos series de circuitos FET. El oscilador de mando de puerta (46) es sensible a unas señales de control recibidas del controlador de secuencia (44), para aplicar unas señales de activación a las terminales de puerta de los FETs. Los FETs (53) y (56) están activados concurrentemente para el flujo de corriente de motor en una dirección. Para el flujo de corriente en la dirección inversa, los FETs (54) y (55) están activados concurrentemente. El oscilador de mando de puerta (46) puede alternativamente estar integrado en el controlador de secuencia (44).

El motor de la presente invención es adecuado, por ejemplo, para el uso en la conducción de una rueda de un vehículo de un automóvil, motocicleta, bicicleta o similar. La figura 4 es un dibujo recortado de una estructura de motor que se puede alojar dentro de una rueda de un vehículo, el estator montado de modo rígido en un eje estacionario y rodeado por un rotor para la impulsión de la rueda. El motor (10) consta de un rotor de imán permanente anular (20) separado del estator por un intervalo de aire radial. El rotor y el estator están configurados de modo coaxial alrededor de un eje de rotación, que está centrado en un eje estacionario. El estator consta de una pluralidad de elementos aislados ferromagnéticamente, o unos grupos de estator. Los segmentos de núcleo (32), hechos de un material permeable magnéticamente, separado de un contacto directo entre sí, tienen porciones de devanado respectivos (34) formados en cada polo. En este ejemplo, se muestran siete grupos de estator, cada grupo consta de dos polos de electroimán salientes situados circunferencialmente a lo largo del intervalo de aire. El rotor consta de una pluralidad de imanes permanentes (22), distribuidos circunferencialmente alrededor del intervalo de aire y sujetos a una placa de base anular (24). Se hace referencia a la solicitud de Maslov *et al.* 09/966.102, citada anteriormente, para una discusión más detallada de un motor que lleva esta construcción. Se debería apreciar, sin embargo, que el contexto de vehículos es en particular meramente a modo de ejemplo de una multitud de aplicaciones en las cuales el motor de la presente invención se puede emplear. Los conceptos de la invención, descritos en mayor detalle a continuación, también son aplicables a otras estructuras de motor de imán permanentemente, incluyendo un núcleo de estator unitario que soporta todos los devanados de fase.

En el ejemplo de aplicación de impulsión de un vehículo, una de las entradas de usuario al controlador representa el momento de torsión requerido, indicado por el control de estrangulación del usuario. Un incremento en la estrangulación es indicativo de un comando para incrementar la velocidad, que se lleva a cabo por un incremento en el momento de torsión. Otra entrada externa al procesador del controlador, puede incluir una señal de freno que se genera cuando el conductor opera un pedal de freno o mango. El procesador puede responder por la desactivación inmediata del impulsor de motor o, en su lugar, por variar el control del impulsor para reducir el momento de torsión y la velocidad. Una señal de desactivación externa separada, se puede aplicar para responder de inmediato al control del conductor.

La funcionalidad de rastreo del momento de torsión del sistema de control, debería mantener la operación de estado continuo para un mando de entrada constante por la variación de las condiciones externas, tal como cambios en las condiciones de impulsión, gradiente de carretera, terreno, etc... El sistema de control debería ser sensible a la entrada de estrangulación del conductor, para acomodar de modo exacto y suave los cambios en los controles del momento de torsión.

## ES 2 279 341 T3

Una tensión de control ( $V_i(t)$ ) en la salida del controlador (44), representa un valor de tensión calculado requerido para obtener el momento de torsión solicitado por el usuario. Cuando se suministra la tensión de control ( $V_i(t)$ ) por una fuente de potencia de corriente continua, el valor máximo de la tensión de control está limitado por la tensión máxima del suministro de potencia de corriente continua. Si la tensión de control calculada, requerida para alcanzar el momento de torsión solicitado por el usuario, es mayor que la tensión de suministro de potencia máxima, se usa la técnica de control de avance de fase para aumentar al máximo el momento de torsión de salida del motor. En lugar de prescribir una corriente de fase sinusoidal para estar en fase con la fuerza contraelectromotriz, como se hace de modo convencional, el ángulo de fase de la corriente de fase se avanza intencionalmente con respecto a la fuerza contraelectromotriz por un ángulo de avance de fase, para aumentar al máximo el momento de torsión de salida.

El diagrama de la figura 5 ilustra las características de la velocidad del momento de torsión del motor (10) con y sin ángulo de avance de fase. La curva (1) representa los valores del momento de torsión máximo logrables a diferentes velocidades sin avanzar la fase de la corriente de fase. Esta curva define los lugares geométricos de velocidad de base del motor. Cualquier punto de operación a la derecha y por encima de esta curva no es lograble a no ser que se introduzca un ángulo de avance de fase.

La curva (2) representa los valores del momento de torsión máximo logrables a varias velocidades y usando una selección apropiada del ángulo de avance de fase. Como está claro de la figura 5, la gama de operación del motor se extiende bastante más allá de las velocidades de base.

La técnica de avance de fase se ilustra geoméricamente en un diagrama de círculo mostrado en la figura 6. El círculo con sombra (1) representa el espacio de operación de corriente disponible para la velocidad dada, limitada debido a la tensión de suministro de potencia de corriente continua limitada. El círculo menor (2) representa un espacio de operación de corriente limitado por la valoración de corriente máxima ( $I_{max}$ ) del motor. La corriente de estado continuo real ocurre dentro del área de solapado de los dos círculos.

El valor del ángulo de fase de avance, el valor  $\alpha_{max}$ , que está representado en la figura 6 por un ángulo entre el vector de corriente que tiene una longitud igual al radio del círculo (2), y el eje (q) formado a lo largo de la dirección de la fuerza contraelectromotriz, se corresponde con el ángulo de avance de fase que proporciona el momento de torsión máximo ( $T_{max}$ ) proporcional a la proyección del vector de corriente en el eje (q).

La figura 7 es un diagrama de bloques que ilustra la metodología del controlador del momento de torsión que usa unas expresiones de compensación de avance de alimentación que tiene en cuenta las condiciones de operación del motor detectadas al igual que los valores de los parámetros de circuitos individuales para obtener estos objetivos. Para la localización del momento de torsión de precisión, las trayectorias de corriente por fase deseadas se seleccionan de acuerdo con la siguiente expresión:

$$I_{di}(t) = I_{opti} \text{ sen } (N_r O_i + \alpha_{opti}),$$

donde

$I_{di}$  indica la trayectoria de corriente deseada por fase,

$I_{opti}$  es la amplitud de corriente óptima por fase,

$N_r$  es el número de pares de polos de imán permanente,

$O_i$  representa el desplazamiento posicional relativo entre el devanado de fase i-avo y un punto de referencia del rotor, y

$\alpha_{opti}$  es el ángulo de avance de fase óptimo por fase.

Para desarrollar las corrientes de fase deseadas, la siguiente expresión de control de tensión por fase se aplica al oscilador de mando para los devanados de fase:

$$V_i(t) = L_i dI_{di} / dt + R_i I_i + E_i + k_s e_i$$

La figura 7 representa la metodología, en general indicada por el número de referencia (60), por la cual el controlador deriva los componentes de esta expresión de control de tensión en tiempo real, usando la entrada del control del momento de torsión y las señales recibidas de los sensores de corriente de fase, el sensor de posición y el detector de velocidad. El control del momento de torsión solicitado (deseado) por el usuario externo ( $T_{cmd}$ ), sensible a la estrangulación, se introduce en el bloque de optimización del ángulo de avance de fase (61) que determina el ángulo de avance de fase por ciclo ( $\hat{O}_{opti}$ ) y la amplitud de la corriente de fase óptima por fase ( $I_{ampli}$ ) usada en el bloque de función del controlador (62), para determinar la corriente por fase ( $I_{di}(t)$ ) requerida para permitir que el motor desarrolle el momento de torsión solicitado por el usuario, que corresponde con el control del momento de torsión ( $T_{cmd}$ ). También, el bloque de optimización del ángulo de avance de fase (61) se alimenta con la velocidad del motor ( $w(t)$ ) suministrada

## ES 2 279 341 T3

del aproximador de velocidad (50). Del modo descrito en mayor detalle a continuación, el bloque de optimización del ángulo de avance de fase (61) se puede implementar por una tabla de localización bi-dimensional proporcionada en el controlador (44) para determinar el ángulo de avance de fase óptimo ( $\alpha_{opti}$ ) y la amplitud de corriente de fase óptima ( $I_{opti}$ ) para cada metodología de controlador (60), es decir para cada i-ava fase del motor de múltiples fases (10).

5 La posición del rotor (O) se introduce en el bloque de función del controlador (64) que produce un ángulo de excitación que representa la salida ( $O_i(t)$ ) basado en la posición del rotor, el número de pares de polos de imán permanentes ( $N_r$ ), el número de fases del estator ( $N_s$ ), y el retardo de fase de la fase en particular. La salida del bloque de función del controlador (64) se alimenta al bloque de función del controlador (62). Usando la introducción del  
10 ángulo de excitación recibido de esta forma, el bloque de función del controlador (62) determina la corriente por fase ( $I_{di}(t)$ ) requerida para permitir que el motor desarrolle el momento de torsión solicitado por el usuario, que se corresponde con el control del momento de torsión ( $T_{cmd}$ ) como sigue:

$$15 \quad I_{di}(t) = I_{opti} \text{ sen } (N_r O_i + \alpha_{opti}).$$

El bloque de función del controlador (66), calcula la diferencia entre la corriente de fase deseada ( $I_{di}(t)$ ) recibida del bloque (62) y la corriente de fase detectada ( $I_i(t)$ ) para la salida de una señal de error de localización de la corriente de fase ( $e_i(t)$ ). Esta señal de error se multiplica por el factor de ganancia ( $k_s$ ) en el bloque de función del controlador  
20 (68). El efecto de la ganancia de realimentación de corriente ha de incrementar la robustez del sistema general a través del rechazo de las perturbaciones del sistema, debidas al ruido mencionado y a cualquier inexactitud del parámetro de modelo. La salida del bloque (68) se alimenta al bloque de función del controlador (70). El bloque (70) emite las señales de tensión de variación en el tiempo ( $V_i(t)$ ) a los osciladores de mando de puerta (46), para la activación controlada de modo selectivo de los devanados de fase (34). La ( $V_i(t)$ ) tiene componentes que compensan, por los  
25 efectos de inductancia, la fuerza contraelectromotriz inducida y la resistencia.

Para compensar por la presencia de la inductancia dentro de los devanados de fase, el término ( $L_i dl_{di}/dt$ ), donde ( $dl_{di}/dt$ ) indica la derivada de tiempo standard de la corriente de fase deseada ( $I_{di}(t)$ ), se introduce al bloque de función del controlador (70) para que se añada en el cálculo de la tensión de fase. La determinación de ( $L_i dl_{di}/dt$ ), se hace en el  
30 bloque de función del controlador (72), que actúa sobre las introducciones recibidas de ( $\alpha_{opti}$ ), ( $I_{opti}$ ), ( $O_i(t)$ ) y ( $w(t)$ ). El bloque (72) determina  $L dl_{di}/dt = I_{opti} L_i N_r w \cos (N_r O_i + \alpha_{opti})$ .

Para compensar por la tensión de la fuerza contraelectromotriz inducida, se añade el término ( $E_i$ ) en el cálculo de la tensión de fase como una introducción al bloque de función (70) del bloque de la función del controlador (74).  
35 El valor de compensación de la fuerza contraelectromotriz se deriva del ángulo y la velocidad del rotor, recibido como introducciones al bloque (74), que usa el coeficiente de la fuerza contraelectromotriz ( $K_{e,i}$ ). Para compensar por la bajada de tensión atribuida a la resistencia del devanado de fase y la resistencia parasítica, se añade el término ( $R_i I_i(t)$ ) en el cálculo de la tensión de fase, como una introducción al bloque de función (70) del bloque de función del controlador (76).

40 La figura 8 es un diagrama de bloques que ilustra el bloque de optimización del ángulo de avance de fase (61) que determina el ángulo de avance de fase óptimo por fase ( $\alpha_{opti}$ ) y la amplitud de corriente de fase óptima por fase ( $I_{opti}$ ), usados para determinar la corriente por fase ( $I_{di}(t)$ ) requerida para permitir que el motor desarrolle el momento de torsión solicitado por el usuario ( $T_{cmd}$ ). El bloque de optimización del ángulo de avance de fase (61) consta de una  
45 primera sección de optimización (82) para aumentar al máximo el momento de torsión de salida y una segunda sección de optimización (84) para reducir al mínimo la corriente de fase.

La primera sección de optimización (82) determina la salida del momento de torsión máximo ( $T_{max}(w)$ ) a la velocidad actual ( $w$ ) suministrada como una señal de entrada del aproximador de velocidad (50). La sección de optimización  
50 (82) aumenta al máximo la salida del momento de torsión para una velocidad dada, sujeta a las restricciones de la valoración de corriente máxima ( $I_{max}$ ) del motor y de la tensión ( $V_c$ ) del suministro de potencia de corriente continua. En las formas matemáticas, esto se define por lo siguiente:

Aumentar al máximo:

$$55 \quad T = \frac{1}{2} \frac{N_r}{K_{r,i}} I_i \cos \theta_i \quad (1)$$

sujeto a

$$65 \quad (R_i^2 + X_{s,i}^2) I_i^2 - 2E_i X_{s,i} I_i \text{ sen } \alpha_i + 2E_i R_i I_i \text{ cos } \alpha_i + E_i^2 \leq V_e^2 \quad (2)$$

y

$$I_i \leq I_{\max} \quad (3)$$

$i = 1, 2, \dots, N_s$

donde

$\alpha_i$  es el ángulo de avance de fase

$X_{s,i} = L_i N_i \omega$  es la reactancia del devanado

$I_{\max}$  es la valoración de la corriente del motor

Durante cada ciclo de control, el controlador (44) recupera la señal de posición del rotor del sensor de posición (47). Entonces, la amplitud y la fase de la fuerza contraelectromotriz se determinan, suponiendo una distribución de flujo magnético sinusoidal en el intervalo de aire. Estos parámetros se alimentan dentro de la primera sección de optimización (82), junto con la velocidad ( $\omega$ ), para determinar el momento de torsión máximo loggable ( $T_{\max}(\omega)$ ) a la velocidad actual ( $\omega$ ), basado en las ecuaciones (1) - (3). Junto con el control del momento de torsión solicitado por el usuario ( $T_{\text{cmd}}$ ), el valor determinado del momento de torsión máximo ( $T_{\max}(\omega)$ ) se suministra a la segunda sección de optimización (84).

La figura 9 muestra las curvas que representan el ángulo de avance de fase, la corriente de fase y la salida del momento de torsión, para una velocidad dada, determinada como un resultado del proceso de optimización llevado a cabo por la primera sección de optimización (82). Como los parámetros de motor son valores dependientes de la fase, la optimización se lleva a cabo por separado para cada fase individual.

Del modo indicado en la figura 9, la totalidad de gama de velocidad se puede dividir en tres regiones, cada una de las cuales tiene una característica distinta. En la región de velocidad baja (por ejemplo inferior a 120 rpm), la restricción de la valoración de corriente es dominante en la limitación de la salida del momento de torsión. El ángulo de avance de fase óptimo es cero y la corriente de fase se iguala a la corriente máxima permitida.

En la región de velocidad media (por ejemplo entre 120 rpm y 220 rpm), tanto las restricciones de la tensión del suministro de potencia de corriente continua como la corriente máxima se hacen activas. Por tanto, es necesario un avance de fase positivo para aumentar al máximo el momento de torsión. Mientras tanto, la corriente de fase sigue igualando la corriente máxima permitida. La salida del momento de torsión se reduce a medida que incrementa la velocidad, mientras que el ángulo de avance de fase óptimo se incrementa con la velocidad.

En la región de velocidad elevada (por ejemplo por encima de 220 rpm), la tensión de suministro de potencia de corriente continua llega a ser la limitación dominante. La salida del momento de torsión máximo continua su reducción y el avance de fase sigue incrementándose con la velocidad. La corriente de fase sin embargo, está por debajo de la corriente máxima permitida.

El primer proceso de optimización se puede llevar a cabo a varias valoraciones de corriente, resultando en una familia de curvas para un ángulo de avance de fase, una corriente de fase y una salida del momento de torsión óptimos. La figura 10 ilustra las curvas que representan el ángulo del avance de fase, la corriente de fase y el momento de torsión obtenidos a unas valoraciones de corriente de 10A y 15A para una velocidad dada.

La segunda sección de optimización (84) se suministra con el valor del momento de torsión máximo ( $T_{\max}(\omega)$ ) determinado por la primera sección de optimización (82), junto con el control del momento de torsión solicitado por el usuario ( $T_{\text{cmd}}$ ) que representa el momento de torsión deseado. Basado en estos parámetros, la segunda sección de optimización (84) determina la amplitud óptima de la corriente de fase y el ángulo de avance de fase óptimo para un control de momento de torsión solicitado por el usuario ( $T_{\text{cmd}}$ ), por la reducción al mínimo de la corriente de fase ( $I_i$ ) para una velocidad en particular y un momento de torsión deseado como sigue:

Reducir al mínimo

$$I_i = \frac{2 \min(T_{\text{cmd}}, T_{\max}(\omega))}{N_s K_{r,i} \cos(\alpha_i)} \quad (4)$$

sujeto a

$$4(R_{i2} + X_{s,i}^2)T_{\text{cmd}}^2 + 4E_i N_s K_{r,i} T_{\text{cmd}} (-X_{s,i} \sin \alpha_i \cos \alpha_i + R_i \cos^2 \alpha_i) + (E_i^2 - V_s^2) N_s^2 K_{r,i}^2 \cos^2 \alpha_i \leq 0 \quad (5)$$

Esto es equivalente a reducir al mínimo el ángulo de avance de fase. Como resultado, la eficiencia a la velocidad de la corriente y el momento de torsión deseado se aumentan al máximo.

## ES 2 279 341 T3

De ahí, que la segunda sección de optimización (84) determine los valores óptimos de la amplitud de la corriente de fase y el ángulo de avance de fase de acuerdo con las expresiones (4) y (5).

Las figuras 11 y 12 ilustran los resultados del proceso de optimización para un control del momento de torsión dado ( $T_{cmd}$ ) a dos velocidades 200 y 250 RPMs, respectivamente. De modo similar a la figura 9, la gama del control del momento de torsión del usuario ( $T_{cmd}$ ) en la figura 11 se puede dividir en tres regiones. Para unos momentos de torsión inferiores (por debajo de 28 Nm), el momento de torsión solicitado se puede lograr con un ángulo de avance de fase cero. El mismo momento de torsión también se puede lograr con una eficacia inferior que usa una combinación de avance de fase positiva y una corriente más elevada. En la región intermedia (entre 28 y 56 Nm), el momento de torsión solicitado se puede lograr con un ángulo de avance de fase positivo. Se puede lograr también el mismo momento de torsión con una eficiencia menor usando una combinación de un ángulo de avance de fase mayor y una corriente más elevada. En la región del momento de torsión elevado (por encima de 56 Nm), el momento de torsión solicitado no se puede lograr. El momento de torsión máximo loggable se obtiene usando el proceso de optimización llevado a cabo por la primera sección de optimización (82).

De acuerdo con una realización de la presente invención, para soportar el control del motor en tiempo real, se implementa el bloque de optimización del ángulo de avance de fase (61) como una tabla de búsqueda bi-dimensional, sensible a las introducciones del control del momento de torsión solicitado por el usuario y la velocidad de motor para proporcionar los valores óptimos de la amplitud de la corriente de fase y el ángulo de avance de fase. Como quiera que los valores óptimos de la amplitud de corriente de fase y el ángulo de avance de fase, se determinan basados en los parámetros que dependen de la fase tales como la reactancia de los devanados de fase, el coeficiente del momento de torsión y la fuerza contraelectromotriz, los procesos de optimización llevados a cabo por las secciones de optimización primera y segunda (82 y 84) se pueden llevar a cabo para cada fase para determinar las señales de control ( $V_i(t)$ ) para los devanados de fase respectivos. Como resultado, el proceso de optimización del ángulo de avance de fase de la presente invención acaba con las variaciones de parámetro en las estructuras de los componentes de fase del estator y los devanados de fase separados.

En operación, el controlador (44) emite sucesivamente señales de control ( $V_i(t)$ ) a los osciladores de mando de puerta para la activación individual de los devanados de fase respectivos. Los osciladores de mando de puerta activan los juegos de conmutadores respectivos de modo que, la secuencia en la que se seleccionan los devanados, se conduce con una secuencia establecida en el controlador. La secuencia se transmite a los osciladores de mando de puerta a través de la conexión, solo ilustrada de modo general del diagrama de la figura 2. Cada señal de control sucesiva ( $V_i(t)$ ) está relacionada con la corriente detectada en particular en el devanado de fase correspondiente, la velocidad y la posición del rotor detectados inmediatamente, y también con los parámetros de modelo ( $K_{ei}$  y  $K_{ri}$ ) que se han determinado específicamente para las fases respectivas. Por tanto para cada señal de control derivada ( $V_i(t)$ ), además de recibir unas señales de realimentación de motor detectado a tiempo, el controlador debe acceder a los parámetros específicos para la fase en particular a la que corresponde la señal de control. El controlador, por tanto, tiene la capacidad de compensar por las diferencias características de la fase individual entre las varias fases del estator. Para evitar una compensación en exceso / de menos de la rutina de control de tensión, los parámetros del circuito por fase usados se adaptan exactamente con sus valores reales.

El coeficiente del momento de torsión por fase ( $K_{ei}$ ) captura la contribución del momento de torsión por fase de cada fase. Este parámetro es proporcional a la relación del momento de torsión efectivo, generada por corriente aplicada para esa fase. El momento de torsión desarrollado por la fase es una función de la densidad de flujo magnético desarrollada en el material de núcleo de la fase, que produce la densidad de flujo del intervalo de aire efectivo. El diseño de la geometría del núcleo electromagnético tiene en cuenta la densidad de la corriente, que es una función de los giros de amperio en cada porción del núcleo, para optimizar la inducción en el material sin llevar al núcleo a la saturación. Sin embargo, las propiedades magnéticas del material de núcleo, a menudo no son homogéneas a través de todo el núcleo del estator. Si el motor está configurado con núcleos de electroimán separados autónomos ferromagnéticamente, las inconsistencias pueden ser incluso más pronunciadas. Las variaciones en el devanado y la inductancia también contribuyen a la determinación del coeficiente del momento de torsión y los parámetros del coeficiente de la fuerza contraelectromotriz. Habrá una degradación en la formación del flujo efectivo en el núcleo, si se forman bolsitas de aire dentro de los devanados. Aunque un factor de empaque elevado se puede lograr a través de un devanado uniforme, puede haber variaciones en la fabricación del alambre. Por tanto, si se usa un coeficiente del momento de torsión nominal del motor y un coeficiente de la fuerza contraelectromotriz nominal por parte del controlador, la variación en las propiedades de las fases produce unas variaciones del momento de torsión de salida de motor generales. La metodología del controlador del momento de torsión representado en la figura 7, evita este problema por la aplicación del coeficiente del momento de torsión por fase y el coeficiente de la fuerza contraelectromotriz, predeterminados para cada fase.

Las computaciones ilustradas en la figura 7 se llevan a cabo sucesivamente en tiempo real. La expresión indicada en el bloque (62) se ha seleccionado para proporcionar las corrientes deseadas para la localización del momento de torsión en la forma preferida. Esta expresión, se puede modificar si unos factores distintos a, precisamente, los cambios en la localización en los controles de entrada del momento de torsión también tienen su significancia. Por ejemplo, en algunas aplicaciones de motor, el grado de aceleración y deceleración pueden ser de consideración para evitar unas condiciones de operación innecesariamente duras. La expresión en el bloque (62) por tanto se puede cambiar para acomodar unas consideraciones adicionales.

## ES 2 279 341 T3

La metodología del controlador ilustrado en la figura 7, se puede llevar a cabo en un esquema de ejecución integrado en el cual los parámetros de fase, en particular, se sustituyen para cada salida de tensión de control generada. Alternativamente, el controlador (44) puede proporcionar un circuito de control separado para cada fase de estator, del modo representado en el diagrama de bloques parcial de la figura 13. Para cada una de las fases ( $N_s$ ) de motor, hay provisto un circuito de control correspondiente ( $60_i$ ). Cada circuito contiene los parámetros relevantes para la fase de motor respectiva. Los circuitos de control se activan de acuerdo con la secuencia de activación de la fase de motor apropiada y solo necesitan las señales de la realimentación del motor detectadas para la generación de las tensiones de control.

En esta revelación se muestran y se describen solo unas formas preferenciales de la invención y solo unos pocos ejemplos de su versatilidad. Se ha de entender que la invención puede usarse en varias otras combinaciones y entornos y es capaz de cambios o modificaciones dentro del objetivo del concepto de la invención del modo expresado en este documento. Por ejemplo, en la metodología de control, ilustrada en la figura 7, la corriente por fase deseada ( $I_{di}(t)$ ) se puede determinar en tiempo real de las entradas recibidas de ( $T_{cmd}$ ), ( $O_i(t)$ ) por referencia a los valores almacenados en la tabla de localización. Las tablas de localización serían proporcionadas para cada fase de estator. Alternativamente, la optimización en tiempo real basada en las expresiones (1) - (5) se puede implementar, o se pueden usar unos sistemas de optimización, tales como las redes neuronales artificiales, para obtener unos parámetros de control óptimos.

Como se puede apreciar, el motor de la invención se puede utilizar en una amplia gama de aplicaciones además de en impulsiones de motor. Mientras que se prefiere, en la implementación de una impulsión de vehículo, que el rotor rodee el estator, otras aplicaciones con el estator rodeando el rotor lo pueden considerar una utilidad ventajosa. Por tanto, está dentro de la contemplación de la invención que cada miembro anular interior y exterior pueda constar de bien el estator o el rotor y pueda contener bien el grupo de electroimanes o el grupo de imanes permanentes.

Aunque la invención se da a conocer con un ejemplo de circuitos magnéticos separados para cada fase eléctrica del motor, la invención es aplicable a otras disposiciones de motor tales como motores que contienen una vía magnética común. De allí, que se ha de entender que la invención es capaz de cambios y modificaciones dentro del objetivo del concepto de la invención del modo expresado en este documento.

# ES 2 279 341 T3

## REIVINDICACIONES

5 1. Un sistema de control para un motor de múltiples fases (10) que tiene una pluralidad de componentes de fase del estator (30) y un rotor (20), cada componente de fase del estator consta de un devanado de fase (34) formado en un elemento de núcleo (32), el mencionado sistema consta de:

un controlador (44, 60) para la producción de una señal de control ( $V_i(t)$ ) para activar el devanado de fase (34), que incluye:

10 un mecanismo que determina el valor de la corriente (62) para determinar un valor de la corriente de fase ( $I_{di}(t)$ ) en fase con respecto a la fuerza contraelectromotriz por un ángulo de avance de fase ( $\alpha_{opti}$ ),

15 un mecanismo de optimización del avance de fase (61) para la producción de un valor del ángulo de avance de fase ( $\alpha_{opti}$ ) optimizado para aumentar al máximo el momento de torsión de salida del motor (10) y reducir al mínimo la corriente de fase ( $I_i$ ); y un mecanismo de diferencia (66) para determinar la diferencia ( $e_i(t)$ ) entre el valor de la corriente de fase ( $I_{di}(t)$ ) y la corriente de fase detectada ( $I_i(t)$ ).

20 2. Un sistema de control del modo indicado en la reivindicación 1, en el cual el mencionado mecanismo de optimización de avance de fase (66) está configurado para optimizar el ángulo de avance de fase para cada fase del motor (10).

25 3. Un sistema de control del modo indicado en la reivindicación 2, en el cual el mencionado controlador (44) está configurado con un circuito de control separado para cada fase de estator (34), cada configuración del circuito de fase que utiliza un valor óptimo del ángulo de avance de fase para una fase en particular, para generar la señal de control para el devanado de fase respectivo.

30 4. Un sistema de control del modo indicado en la reivindicación 1, en el cual el elemento de núcleo (32) de cada componente de fase del estator (34) consta de un electroimán (22) de estator aislado ferromagnéticamente, estando los elementos del núcleo de electroimán (22) separados evitando un contacto directo entre sí, y un devanado de fase (34) formado en cada elemento de núcleo (32).

35 5. Un sistema de control del modo indicado en la reivindicación 1, en el cual el mencionado mecanismo de optimización de avance de fase (61) consta de una primera sección de optimización para determinar un valor de momento de torsión máximo para una velocidad dada.

40 6. Un sistema de control del modo indicado en la reivindicación 5, en el cual el mecanismo de optimización del avance de fase (61) indicado consta además de una segunda sección de optimización sensible al valor del momento de torsión máximo para producir un valor óptimo del ángulo de avance de fase.

7. Un sistema de control del modo indicado en la reivindicación 6, en el cual la mencionada sección de optimización además produce una amplitud óptima de la corriente de fase.

45 8. Un sistema de control del modo indicado en la reivindicación 7, en el cual la mencionada segunda sección de optimización, está configurada para reducir al mínimo la corriente de fase para una velocidad dada y el momento de torsión solicitado por el usuario.

9. Un sistema de control para un motor de múltiples fases, que consta de:

50 un calculador de tensión de control (44) para determinar una tensión de control ( $V_i(t)$ ) requerida para activar un devanado de fase (34) del motor (10) para obtener un momento de torsión deseado, un calculador de corriente (62) para determinar la corriente por fase ( $I_i(t)$ ) que representa el momento de torsión deseado, la corriente por fase se avanza en fase con respecto a la fuerza contraelectromotriz por un ángulo de avance de fase,

55 un mecanismo de determinación de avance de fase (61) sensible a una señal de control del momento de torsión ( $T_{cmd}$ ), que corresponde con el momento de torsión deseado para determinar el valor por fase del ángulo de avance de fase ( $\alpha_{opti}$ ); y

60 un calculador de la diferencia de la corriente de fase (66) para determinar la diferencia ( $e_i(t)$ ) entre la corriente por fase determinada ( $I_{di}(t)$ ) y una corriente de fase detectada ( $I_i(t)$ ).

10. Un sistema de control del modo indicado en la reivindicación 9, en el cual el mecanismo de determinación de avance de fase (66) está configurado para aumentar al máximo el momento de torsión de salida del motor y reducir al mínimo la corriente por fase para un momento de torsión deseado dado.

65 11. Un sistema de control del modo indicado en la reivindicación 9, en el cual el ángulo de avance de fase está determinado basado en unos parámetros dependientes de fase.

## ES 2 279 341 T3

12. Un sistema de control del modo indicado en la reivindicación 11, en el cual los parámetros dependientes de fase incluyen un coeficiente de momento de torsión dependiente de fase.

5 13. Un sistema de control del modo indicado en la reivindicación 11, en el cual los parámetros dependientes de fase incluyen una fuerza contraelectromotriz dependiente de fase asociada con cada fase.

14. Un sistema de control del modo indicado en la reivindicación 11, en el cual los parámetros dependientes de fase incluyen una reactancia de devanado de fase.

10 15. Un método para el control en tiempo real de un motor de fase múltiple que tiene una pluralidad de devanados de fase del estator (34), estando cada devanado formado en un elemento de núcleo (32) y un rotor (20), el método consta de los pasos de:

15 la introducción de una señal de control del momento de torsión ( $T_{cmd}$ ) que representa el momento de torsión deseado,

la determinación (62) de una corriente de fase ( $I_{di}(t)$ ) requerida para lograr el momento de torsión deseado,

20 basado en la corriente de fase ( $I_{di}(t)$ ), que determina la tensión de control ( $V_i(t)$ ) requerida para activar cada devanado para obtener el momento de torsión deseado,

el avance de la fase de la corriente de fase ( $I_i(t)$ ) con respecto a la fuerza contraelectromotriz por un ángulo de avance de fase ( $\alpha_{opti}$ ) si la tensión de control requerida excede la tensión de suministro de potencia (40), y

25 basada en el momento de torsión deseado ( $T_{cmd}$ ), que determina el ángulo de avance de fase ( $\alpha_{opti}$ ) optimizado para aumentar al máximo el momento de torsión de salida del motor y reducir al mínimo la corriente de fase ( $I_i$ ).

16. Un método del modo indicado en la reivindicación 15, en el cual el ángulo de avance de fase se optimiza para cada fase del motor.

30 17. Un método del modo indicado en la reivindicación 15, en el cual el paso de optimización consta de un primer paso de optimización de determinación de un valor de momento de torsión máximo para una velocidad dada.

35 18. Un método del modo indicado en la reivindicación 17, en el cual el paso de optimización consta además de un segundo paso de optimización para producir un valor óptimo del ángulo de avance de fase, en respuesta al valor del momento de torsión máximo.

40 19. Un método del modo indicado en la reivindicación 18, en el cual el mencionado segundo paso de optimización además produce una amplitud óptima de la corriente de la fase.

20. Un método del modo indicado en la reivindicación 16, en el cual el ángulo de avance de fase se optimiza basado en los parámetros dependientes de la fase.

45 21. Un método del modo indicado en la reivindicación 20, en el cual los parámetros dependientes de fase incluyen un coeficiente del momento de torsión dependiente de la fase.

22. Un método del modo indicado en la reivindicación 20, en el cual los parámetros dependientes de fase incluyen una fuerza contraelectromotriz dependiente de la fase asociada con cada fase.

50 23. Un método del modo indicado en la reivindicación 20, en el cual los parámetros dependientes de la fase incluyen una reactancia del devanado de la fase.

55

60

65

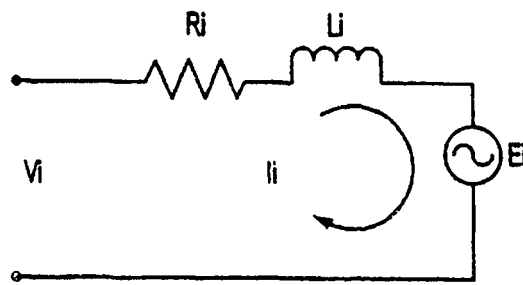


Fig. 1

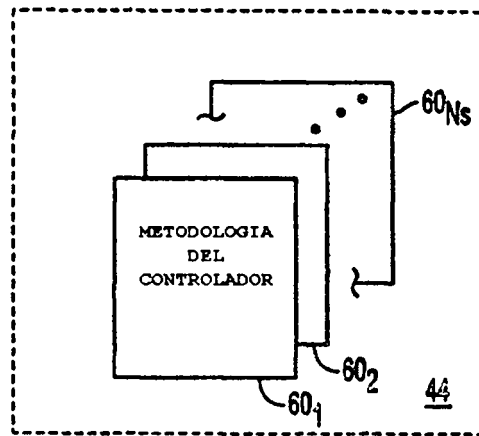


Fig. 13

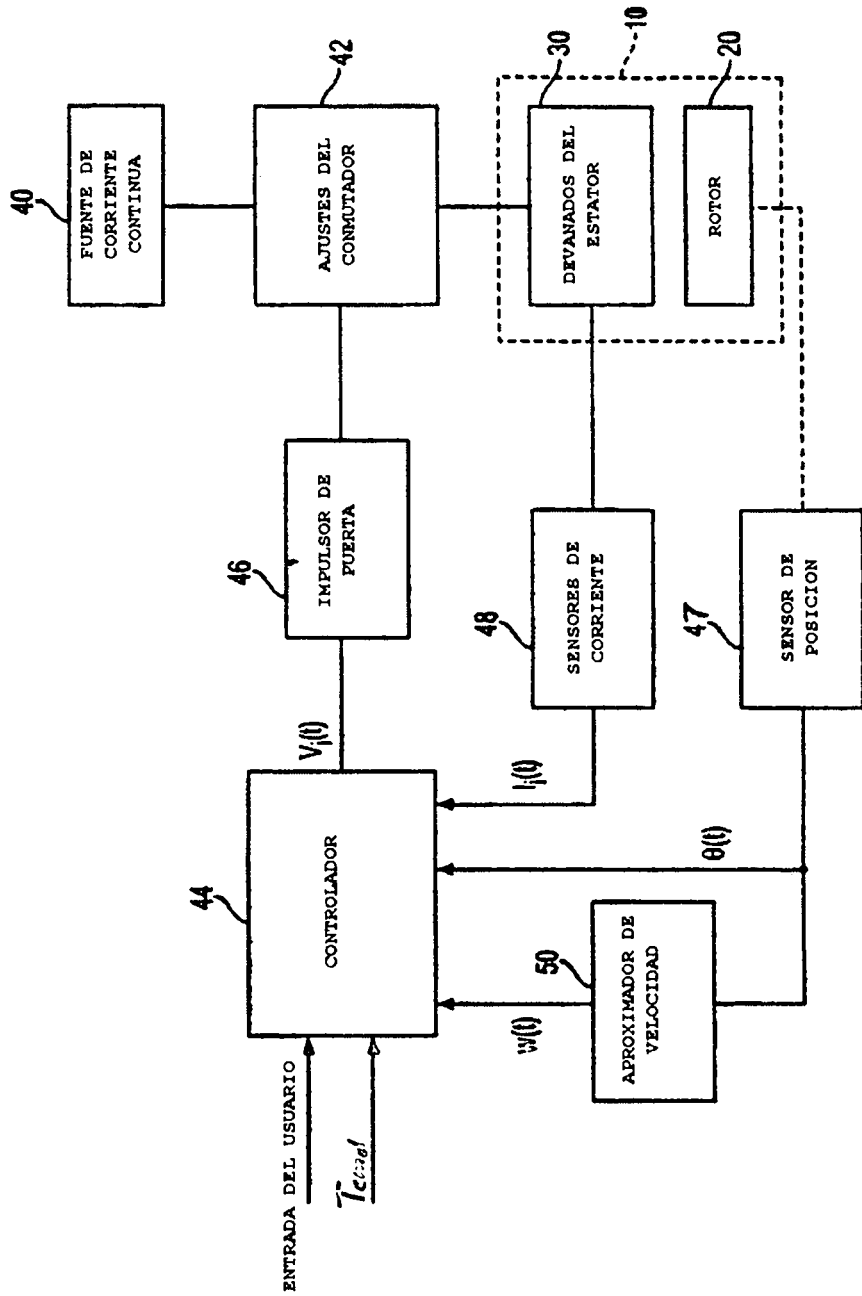


Fig. 2

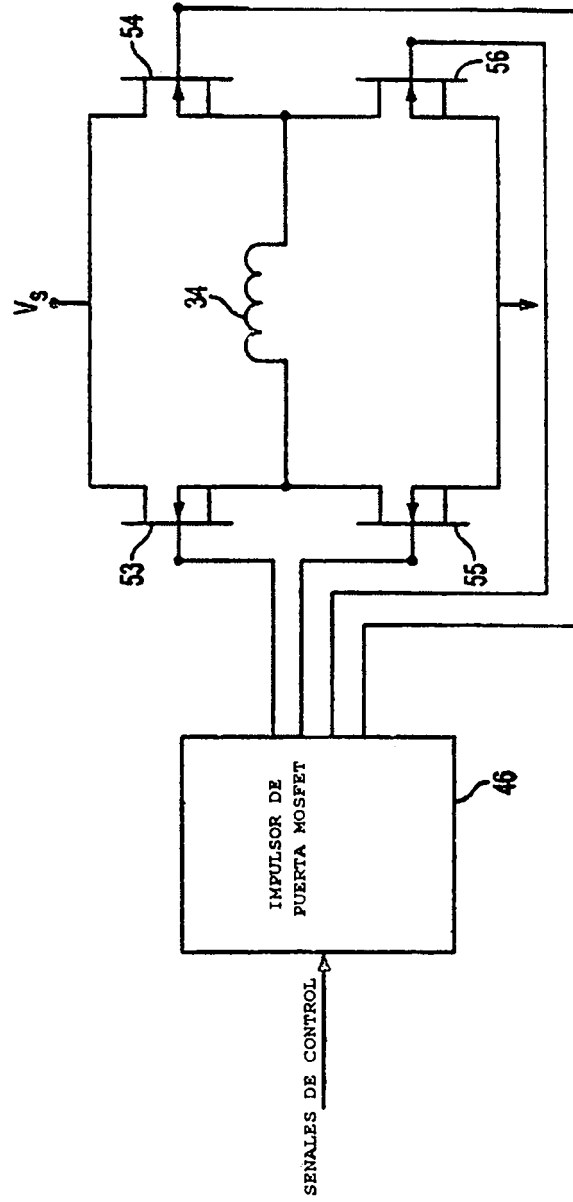


Fig. 3

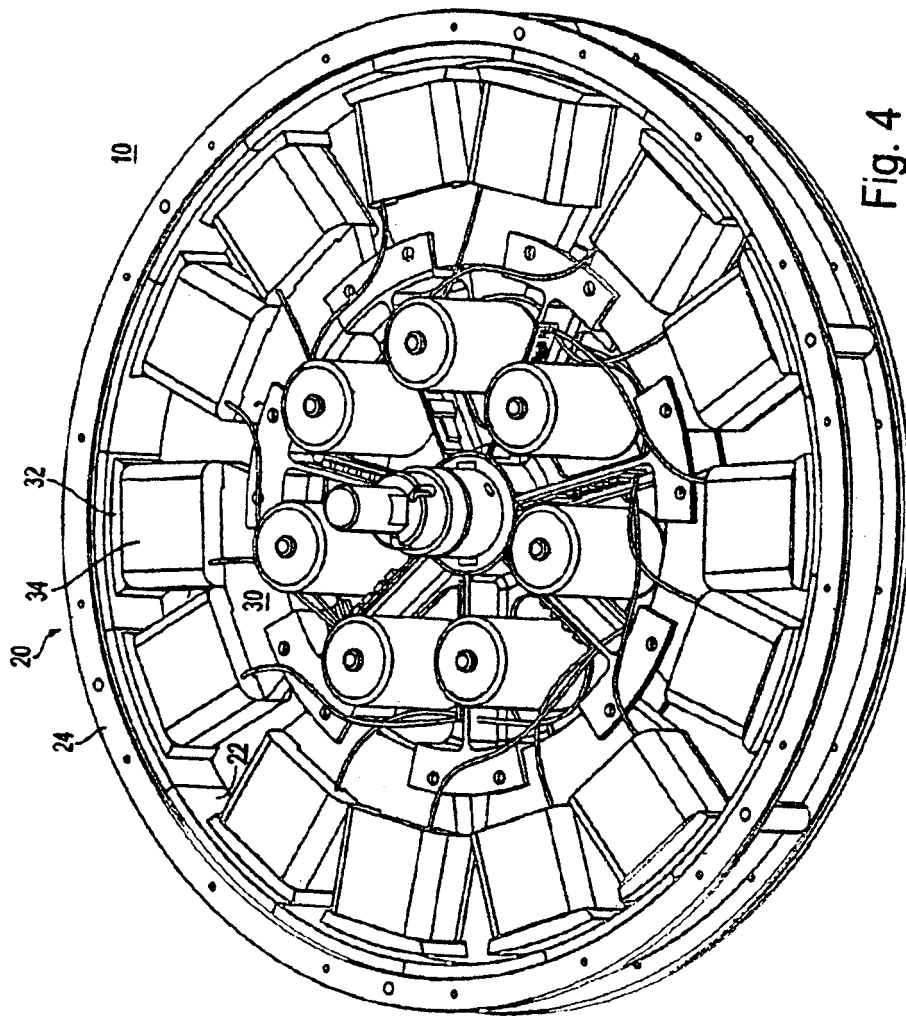


Fig. 4

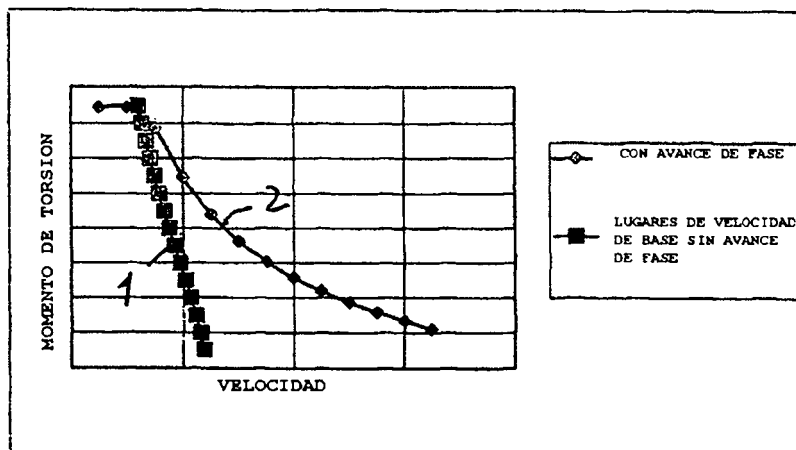


FIGURA 5

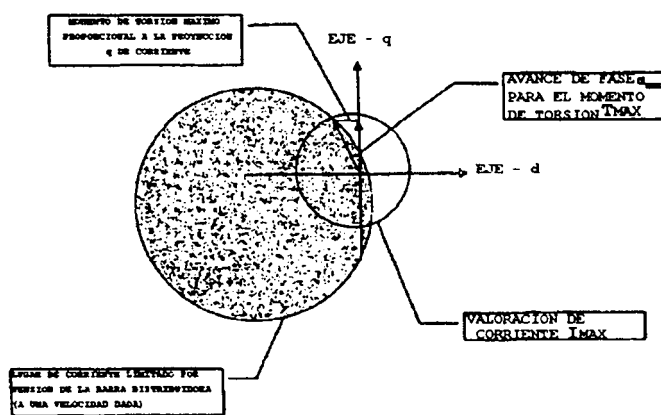


FIGURA 6

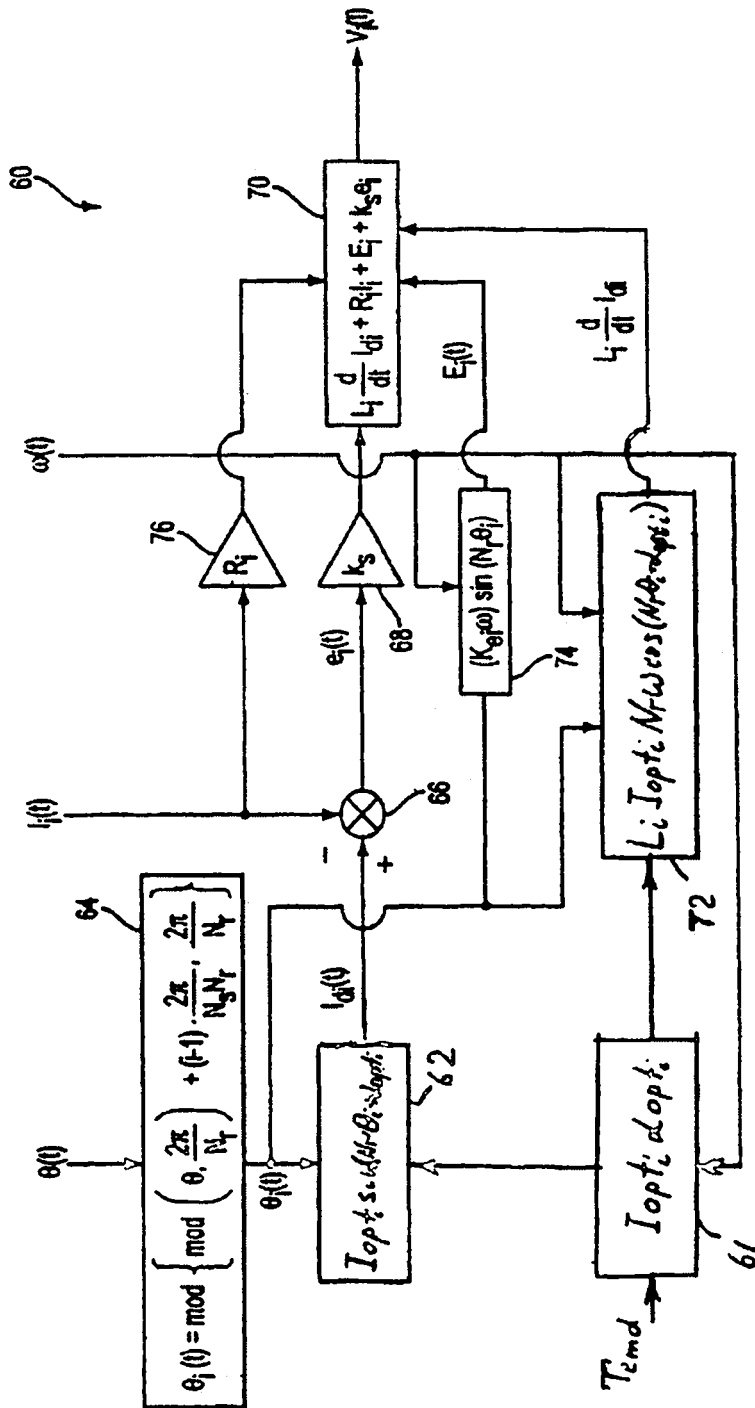


Fig. 7

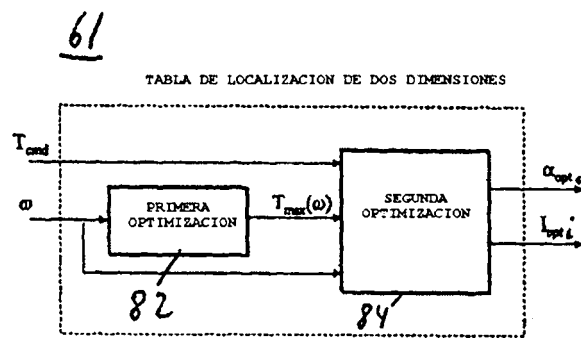


FIGURA 8

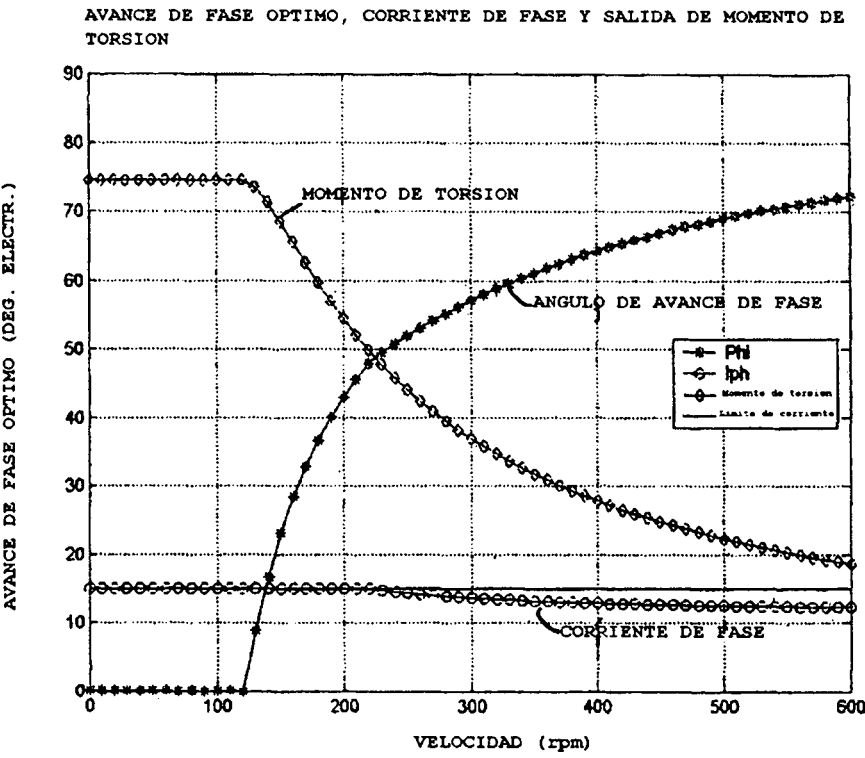


FIGURA 9

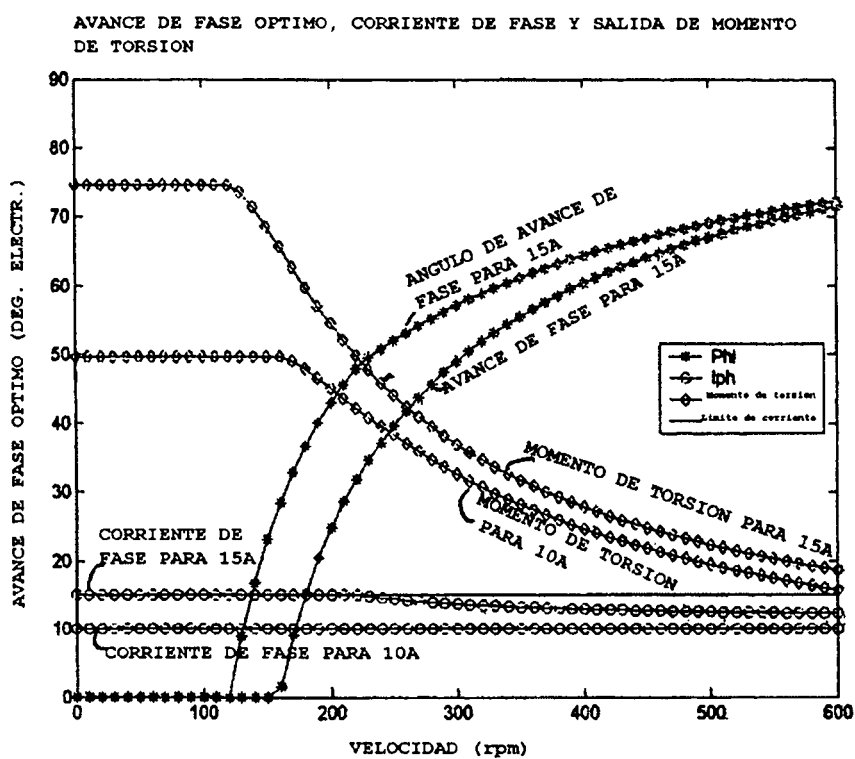


FIGURA 10

AVANCE DE FASE OPTIMO, CORRIENTE DE FASE, SALIDA DE MOMENTO DE TORSION Y EFICACIA (200 rpm)

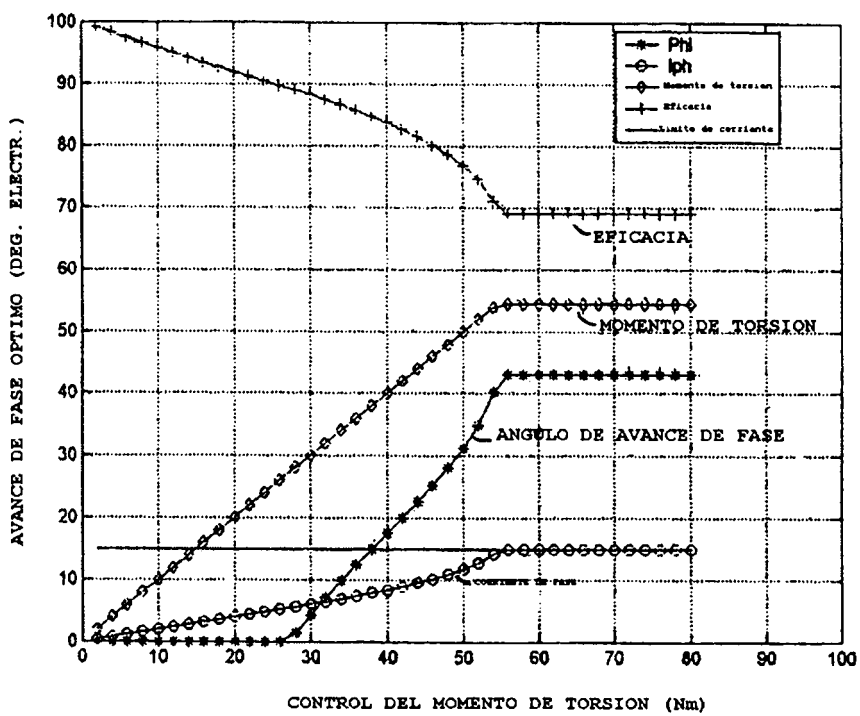


FIGURA 11

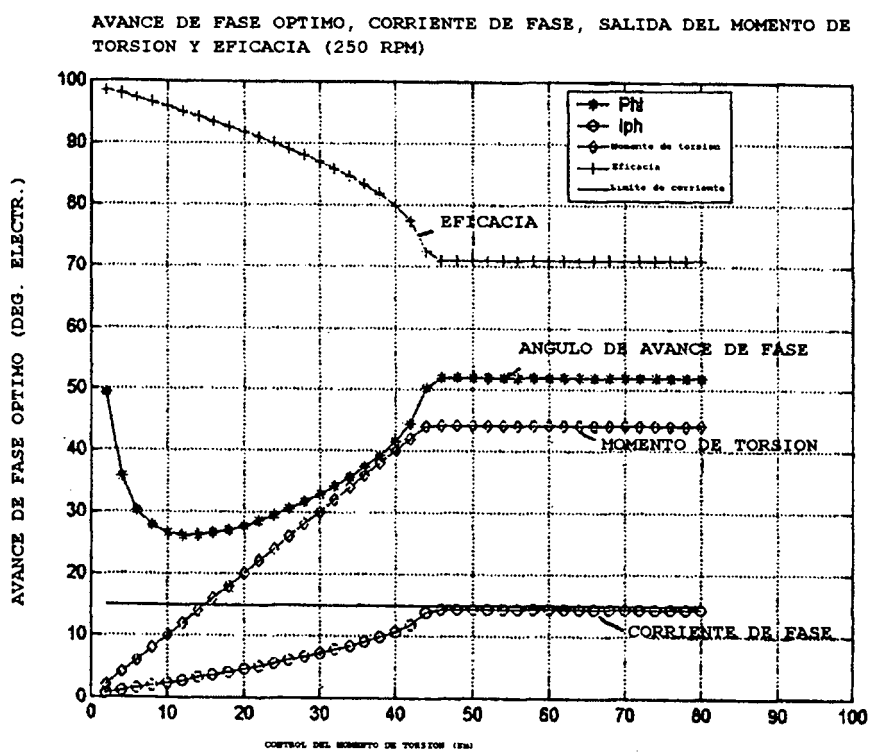


FIGURA 12