(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 790 409**

(51) Int. Cl.:
H02P 9/00 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.02.2014** **E 14156193 (6)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.02.2020** **EP 2775608**

(54) Título: **Procedimiento y sistema de control de una frecuencia de conmutación de un generador de inducción de doble alimentación (DFIG: doubly-fed induction generator)**

(30) Prioridad:

04.03.2013 US 201313783449

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
27.10.2020

(73) Titular/es:

GENERAL ELECTRIC COMPANY (100.0%)
1 River Road
Schenectady, NY 12345, US

(72) Inventor/es:

WAGONER, ROBERT GREGORY y
SMITH, DAVID

(74) Agente/Representante:

CONTRERAS PÉREZ, Yahel

ES 2 790 409 T3

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

DESCRIPCIÓN

Procedimiento y sistema de control de una frecuencia de conmutación de un generador de inducción de doble alimentación (DFIG: doubly-fed induction generator)

La presente materia se refiere en general al campo de sistemas de generación de energía, y más en particular a un sistema y procedimiento para control de generadores de velocidad variable acoplados a una red de distribución de energía.

Los sistemas de generación de energía generan energía eléctrica a partir de diversas fuentes que incluyen la energía hidráulica, la energía del viento, y energía de la combustión de combustibles tales como el carbón, el petróleo y el gas. Estas fuentes se aprovechan para hacer rotar unos motores principales, normalmente motores o turbinas, que están acoplados a generadores de energía, que a su vez están acoplados a diversas cargas a través de, por ejemplo, una red de distribución de energía ("red").

Dichos sistemas de generación de energía utilizan generadores que en general producen energía eléctrica que es proporcional en frecuencia a la velocidad de rotación de un generador, por ejemplo, una turbina. Así pues, cambios en la velocidad de la turbina pueden dar lugar a cambios en la frecuencia de la energía generada. Por consiguiente, se debe regular la velocidad de rotación de la turbina para producir una frecuencia que se ajuste a las necesidades de la red. En situaciones en las que se ha modificado la velocidad de la turbina con respecto a la frecuencia de red requerida, o no es suficiente para producir la frecuencia requerida, se deben adoptar medidas para modular la frecuencia de salida del generador para que se ajuste a la frecuencia de la red.

Se han propuesto diversas técnicas en la técnica anterior para compensar los cambios de velocidad de las turbinas. Estas técnicas incluyen el control de variables mecánicas tales como la velocidad del flujo de combustible para regular la velocidad de rotación de la turbina y el uso de configuraciones con múltiples ejes. Además, se han utilizado diversos esquemas de conversión de energía en los que los convertidores de energía están acoplados a la salida del sistema de generación.

Con actual referencia a la Figura 1, se ilustra un diagrama de bloques de un sistema de ejemplo de conversión de energía convencional 100 que utiliza un convertidor de generador de inducción de doble alimentación (DFIG: Doubly-Fed Induction Generator) 102 que incluye un convertidor en el lado de la línea 104 y un convertidor en el lado del rotor 106, funcionando ambos bajo el control de un controlador 120. Véase, por ejemplo, el documento US 2007/0052244. Los convertidores de DFIG existentes generan armónicos procedentes tanto del convertidor en el lado de la línea 104 como del convertidor en el lado del rotor 106. Los armónicos generados procedentes del convertidor en el lado del rotor 106 se transmiten a través del generador DFIG 108 y se suman conjuntamente con los armónicos del convertidor en el lado de la línea 104, con lo que estos armónicos combinados son suministrados a la red 110. Dado que los reguladores imponen limitaciones a los armónicos que se acoplan a la red, generalmente se requiere la formación de un filtro LRC 112 en el convertidor en el lado de la línea 104 para atenuar estos armónicos para satisfacer los códigos de la red. El tamaño físico y el coste de producción de dichos filtros son significativos.

Con referencia a la Figura 2, se ilustra un diagrama de bloques de un sistema de ejemplo de conversión de energía convencional 200 que utiliza un convertidor de DFIG 202 en asociación con un transformador principal de tres bobinas 216. La inclusión del transformador principal de tres bobinas 216 permite la operación del estator del DFIG 208 a un voltaje diferente del voltaje del convertidor 202. Tal como se ha indicado anteriormente con respecto a la Figura 1, los convertidores de DFIG existentes generan armónicos procedentes de los convertidores tanto en el lado del rotor como en el lado de la línea. En el caso ilustrado en la Figura 2, el transformador de tres bobinas 216 separa el filtro en el lado de la línea del convertidor 212 con respecto al estator en tanta impedancia que también se debe añadir un filtro 214 muy grande en el lado del estator. El tamaño y el coste de este filtro también son significativos.

A la vista de estas cuestiones conocidas, sería ventajoso, por lo tanto, desarrollar sistemas y procedimientos que permitieran reducir el tamaño de los componentes y los costes relacionados con dichos filtros.

La presente materia, tal como se define en las reivindicaciones adjuntas, se refiere a metodologías para operar un generador de inducción de doble alimentación (DFIG: doubly-fed induction generator) que tiene convertidores controlables en el lado de la línea y en el lado del rotor y al menos un filtro de atenuación de armónicos. Según un procedimiento según se define en la reivindicación 1, la conmutación del convertidor en el lado de la línea es coordinada con la conmutación del convertidor en el lado del rotor para producir un patrón de conmutación entrelazado entre ambas. De esta manera, la frecuencia de conmutación vista por el filtro de atenuación de armónicos es aumentada de forma efectiva, en comparación con, por ejemplo, un patrón de conmutación no entrelazado, y los resultados son atenuados más fácilmente por el filtro. De esta

manera, los filtros se pueden construir en función de la operación a la mayor frecuencia, lo que requiere unos componentes físicamente más pequeños y, por consiguiente, menos costosos.

La presente materia también se refiere a un sistema generador de inducción de doble alimentación (DFIG), tal como se define en la reivindicación 5. Dicho sistema incluye un DFIG que tiene un bus de estator y un bus de rotor, un convertidor en el lado de la línea acoplado con el bus de estator a través de un bus de línea, un convertidor en el lado del rotor acoplado con el convertidor en el lado de la línea y con el bus de rotor, un controlador acoplado con el convertidor en el lado de la línea y con el convertidor en el lado del rotor, y al menos un filtro de atenuación de armónicos. En dicho sistema, el bus de línea y el bus de estator están configurados para su acoplamiento a una red de distribución de energía, el al menos un filtro de atenuación de armónicos está configurado para atenuar los armónicos aplicados a la red de distribución de energía, y el controlador está configurado para coordinar la conmutación del convertidor en el lado de la línea con la conmutación del convertidor en el lado del rotor para producir un patrón de conmutación entrelazado entre ambas.

Diversas características, aspectos y ventajas de la presente materia se comprenderán mejor con referencia a la siguiente descripción y a las reivindicaciones adjuntas.

Los dibujos adjuntos, que se incorporan a esta especificación y forman parte de la misma, ilustran formas de realización de la materia y, junto con la descripción, sirven para explicar los principios de la materia. En los dibujos:

La Figura 1 muestra un sistema de turbina eólica con DFIG que tiene un solo voltaje secundario e ilustra un convertidor de CA-CC (corriente alterna a corriente continua) de línea y un convertidor de CC-CA (de corriente continua a corriente alterna) de rotor;
La Figura 2 muestra un sistema de turbina eólica con DFIG que tiene un transformador principal de tres bobinas e ilustra un convertidor de CA-CC de línea y el convertidor de CC-CA de rotor;
La Figura 3 es un diagrama de flujo que ilustra una metodología para controlar un DFIG de acuerdo con la presente materia;
La Figura 4 es un diagrama de bloques que ilustra una visión general de un sistema de control de un DFIG convencional;
La Figura 5 es un diagrama de bloques que ilustra una visión general de un sistema de control de un DFIG de acuerdo con una primera forma de realización de la presente materia divulgada;
La Figura 6 es un diagrama de bloques que ilustra una visión general de un sistema de control de un DFIG de acuerdo con una segunda forma de realización de la presente materia divulgada; y
La Figura 7 es un gráfico que ilustra formas de onda de ejemplo asociadas con la visión general que se ilustra en la Figura 6.

El uso repetido de caracteres de referencia a lo largo de la presente especificación y en los dibujos adjuntos tiene por objeto representar características o elementos iguales o análogos de la invención.

Como ya se ha comentado anteriormente, la presente materia se refiere en particular a procedimientos y sistemas de control de generadores de velocidad variable acoplados a una red de distribución de energía.

Ahora se hará referencia en detalle a formas de realización de la invención, uno o más ejemplos de las cuales se ilustran en los dibujos. Cada ejemplo se proporciona a modo de explicación de la invención, no de limitación de la misma. De hecho, será evidente para los expertos en la materia que se pueden hacer diversas modificaciones y variaciones en la presente invención sin apartarse del alcance o el espíritu de la misma. Por ejemplo, características ilustradas o descritas como parte de una forma de realización pueden ser utilizadas con otra forma de realización para producir una forma de realización adicional. De este modo, se pretende que la presente invención cubra dichas modificaciones y variaciones cuando caigan dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas y sus equivalentes.

De acuerdo con la presente materia, se ha comprobado que la frecuencia de conmutación del convertidor en el lado de la línea 104, 204 se puede coordinar con (sincronizar con) la frecuencia de conmutación del convertidor en el lado del rotor 106, 206 de manera que las frecuencias se suman conjuntamente en el nodo de red 110, 210 en fase opuesta. Esta técnica se puede describir como entrelazado. Dicho entrelazado aumenta la frecuencia de conmutación efectiva que ven los filtros 112, 212, 214 y, por consiguiente, permite reducir el tamaño físico de los filtros y, al mismo tiempo, reducir considerablemente el coste asociado con la producción de dichos filtros.

Este tipo de operación no se ha utilizado anteriormente en convertidores de DFIG. En un aspecto, esta coordinación entre convertidores en el lado de la línea y en el lado del rotor es más compleja que la de los convertidores ordinarios debido a la frecuencia de rotación y al desplazamiento de fase causados por el generador. De acuerdo con la presente materia, los controladores 120, 220 están configurados para proporcionar un desplazamiento continuamente variable en la fase de corte de la línea con respecto a la fase de corte del rotor para mantener la frecuencia de deslizamiento. Más en concreto, la presente materia

proporciona la creación de un desplazamiento arbitrario en el ángulo de fase de corte del convertidor en el lado de la línea 104, 204 con el fin de desplazar la fase dinámicamente a través de la trama de modulación por ancho de pulso (PWM: Pulse width modulation). Este desplazamiento permite sincronizar la frecuencia de conmutación del convertidor en el lado de la línea con una posición de fase que se entrelaza para tener una polaridad opuesta con el convertidor en el lado del rotor 106, 206 en el nodo de red 110, 210.

En otras palabras, mientras la corriente de rizado del convertidor en el lado de la línea 104, 204 aumenta, la corriente de rizado del convertidor en el lado del rotor 106, 206 disminuye. De esta manera las frecuencias de cada convertidor tienden a cancelarse en el nodo de red 110, 210. Con el fin de que esta operación funcione correctamente, las frecuencias de conmutación del rotor y de la línea son sincronizadas estrechamente entre sí, difiriendo únicamente en el desplazamiento de frecuencia proporcionado por el controlador 120, 220, ya que la frecuencia de rotación del rotor es ajustada a medida que pasa por el generador.

Con actual referencia a la Figura 3, se ilustra un diagrama de flujo 300 que ilustra la operación de un DFIG de acuerdo con la presente materia. Tal como se ilustra en la Figura 3, una primera etapa (etapa 302) de acuerdo con la presente materia es coordinar la conmutación de los convertidores en el lado de la línea y en el lado del rotor asociados con un DFIG. Tal como se ha indicado anteriormente, dicha coordinación puede implicar la sincronización de la conmutación de los convertidores de manera que se produzca un entrelazado de las frecuencias de conmutación. Dicho entrelazado da lugar a una frecuencia más alta que es vista por, es decir, es aplicada a los filtros de armónicos asociados al DFIG. Debido a la generación de las mayores frecuencias por la combinación de las frecuencias de conmutación (en comparación con la conmutación no entrelazada de convertidores), se pueden utilizar componentes de menor capacidad para formar los filtros de armónicos, con lo que se obtiene un importante ahorro de costes.

Además, con referencia a la Figura 3, en la etapa 304 se filtran los armónicos con respecto a las señales de conmutación combinadas utilizando los filtros de tamaño reducido que son posibles gracias a la mayor frecuencia de conmutación aplicada a los filtros.

Con actual referencia a la Figura 4, se ilustra un diagrama de bloques 400 que muestra una visión general de un sistema de control de un DFIG convencional. Tal como se ilustra, las señales de entrada de corrientes y voltajes tanto de inversor como de rotor se monitorizan por medio de respectivos circuitos de adquisición de retroalimentación 402, 404, mientras que el codificador 406 procesa una señal de velocidad para producir una señal indicativa del ángulo del rotor. La señal de ángulo del rotor se combina con una señal de ángulo de red procedente del bucle bloqueado de fase 408 en un sumador 410 y se aplica a unos demoduladores 412 asociados con el convertidor del rotor, mientras que a unos demoduladores 414 asociados con el inversor sólo se les aplica la señal de ángulo de red.

Entonces, las señales combinadas se aplican procedentes de los demoduladores 412, 414, respectivamente a través de unos reguladores 416, 418 y rotadores 420, 422 a unos moduladores de ancho de pulso (PWM) 424, 426 como una entrada a cada modulador. Una segunda entrada a los PWM 424, 426 se basa en una señal de ángulo de portadora derivada a partir de una señal de frecuencia de portadora a través de un integrador 430. Las salidas de los moduladores 424, 426 se aplican entonces, respectivamente, al convertidor del rotor y al inversor. Todas estas operaciones con respecto al diagrama de bloques 400 están de acuerdo con las prácticas conocidas.

Con actual referencia a la Figura 5, se ilustra un diagrama de bloques 500 de un sistema de control de un DFIG de acuerdo con una primera forma de realización de la presente materia divulgada. Tal como se ilustra en la Figura 5, los elementos que se describen con respecto a la Figura 4 también están presentes en la Figura 5 y funcionan exactamente de la misma manera que los que se describen con respecto a la Figura 4 y, por lo tanto, no se describirán más en este caso. Con referencia, sin embargo, a la presente materia divulgada, se apreciará que la salida del codificador 506 que es el ángulo del rotor, por la presente divulgación, no sólo se aplica a un sumador 510 de la misma manera que se describe con respecto a la Figura 4, sino que también se suministra como una de las entradas a un sumador 532 en el que se suma dicha señal de ángulo del rotor a una señal de ángulo de portadora procedente de un integrador 530 y son aplicadas a un modulador 526 asociado con el inversor.

Con actual referencia a la Figura 6, se ilustra un diagrama de bloques 600 de un sistema de control de un DFIG de acuerdo con una segunda forma de realización de la presente materia divulgada. Como se verá a partir de una comparación con la Figura 5, esta segunda forma de realización es idéntica en todos los sentidos a la primera forma de realización, salvo que la señal de ángulo del rotor procedente del codificador 606 es sustraída de la señal del ángulo de portadora procedente de un integrador 630 en un sumador 632 y luego es aplicada a un modulador 624 asociado con un convertidor del rotor. El resultado de esta operación se puede observar en la Figura 7.

Con actual referencia a la Figura 7, se muestra un gráfico 700 que ilustra formas de onda de ejemplo asociadas con la visión general que se ilustra en la Figura 6. Como se puede ver en la Figura 7, durante

cada trama de ejecución del procesador, representada por la estructura 702, se puede desplazar un voltaje de PWM nominal 704 según se ilustra en la señal de voltaje 706 desplazando la onda portadora triangular normal 708 mediante operación de la combinación de la señal de ángulo del rotor y la señal de ángulo de la portadora en el sumador 632 según se describe con referencia a la Figura 6. Dicha combinación produce como resultado el voltaje de PWM desplazado 706 que entonces es aplicado al convertidor del rotor. Operando de este modo se produce el entrelazado de las frecuencias de conmutación según se ha descrito anteriormente con referencia a la Figura 3 y produce los mayores armónicos de frecuencia que entonces se pueden filtrar utilizando los filtros de tamaño físico reducido y de menor coste que se han descrito anteriormente con respecto a la Figura 1.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento (300) de operar un generador de inducción de doble alimentación (DFIG) (100) con convertidores controlables en un lado de línea (104, 204) y en un lado de rotor (106, 206) y al menos un filtro de atenuación de armónicos (112, 212, 214), que comprende:

coordinar una conmutación del convertidor en el lado de la línea (104, 204) con una conmutación del convertidor en el lado del rotor (106, 206) que incluye una conmutación del convertidor en el lado de la línea (104, 204) para producir un desplazamiento de frecuencia continuamente variable procedente del convertidor en el lado del rotor (106, 206) en coordinación con una frecuencia de deslizamiento del DFIG para producir un patrón de conmutación entrelazado entre los mismos; y

producir por medio del patrón de conmutación entrelazado una mayor frecuencia de conmutación efectiva aplicada al filtro de atenuación de armónicos asociado (112, 212, 214).

2. Un procedimiento (300) como en la reivindicación 1, en el que la conmutación es coordinada de manera que la conmutación del convertidor en el lado de la línea (104, 204) y del convertidor en el lado del rotor (106, 206) están en fase opuesta.

3. Un procedimiento (300) como en una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el desplazamiento es establecido arbitrariamente para desplazar dinámicamente el ángulo de fase del convertidor en el lado de la línea.

4. Un procedimiento (300) como en una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el convertidor en el lado de la línea (104, 204) y convertidores en el lado del rotor (106, 206) difieren en sincronismo en el desplazamiento de frecuencia.

5. Un sistema generador de inducción de doble alimentación (DFIG) (100), que comprende:

un generador de inducción de doble alimentación que tiene un bus de estator y un bus de rotor;

un convertidor en un lado de línea (104, 204) acoplado con dicho bus de estator a través de un bus de línea;

un convertidor en un lado de rotor (106, 206) acoplado con dicho convertidor en el lado de la línea y dicho bus de rotor;

un controlador (120) acoplado con dicho convertidor en el lado de la línea (104, 204) y dicho convertidor en el lado del rotor; y

al menos un filtro de atenuación de armónicos (112, 212, 214),

en el que dicho bus de línea y bus de estator están configurados para ser acoplados con una red de distribución de energía (110), dicho al menos un filtro de atenuación de armónicos (112, 212, 214) está configurado para atenuar armónicos aplicados a la red de distribución de energía (110), y

en el que dicho controlador (120) está configurado para coordinar una conmutación del convertidor en el lado de la línea (104, 204) con una conmutación del convertidor en el lado del rotor (106, 206) para producir un patrón de conmutación entrelazado entre los mismos, en el que

dicho controlador (120) está configurado para coordinar la conmutación del convertidor en el lado de la línea (104, 204) para producir un desplazamiento de frecuencia continuamente variable procedente del convertidor en el lado del rotor (106, 206) en coordinación con una frecuencia de deslizamiento del generador de inducción de doble alimentación.

6. Un sistema (100) como en la reivindicación 5, en el que dicho controlador (120) está configurado para coordinar la conmutación de manera que la conmutación del convertidor en el lado de la línea (104, 204) y del convertidor en el lado del rotor (106, 206) están en fase opuesta.

7. Un sistema (100) como en la reivindicación 5 o 6, en el que el controlador (120) está configurado para establecer arbitrariamente el desplazamiento para desplazar dinámicamente el ángulo de fase del convertidor en el lado de la línea (104, 204).

8. Un sistema (100) como en una cualquiera de las reivindicaciones 5 a 7, en el que el controlador (120) está configurado para mantener la sincronización del convertidor en el lado de la línea (104, 204) y convertidores en el lado del rotor (106, 206) que difieren en el desplazamiento de frecuencia.

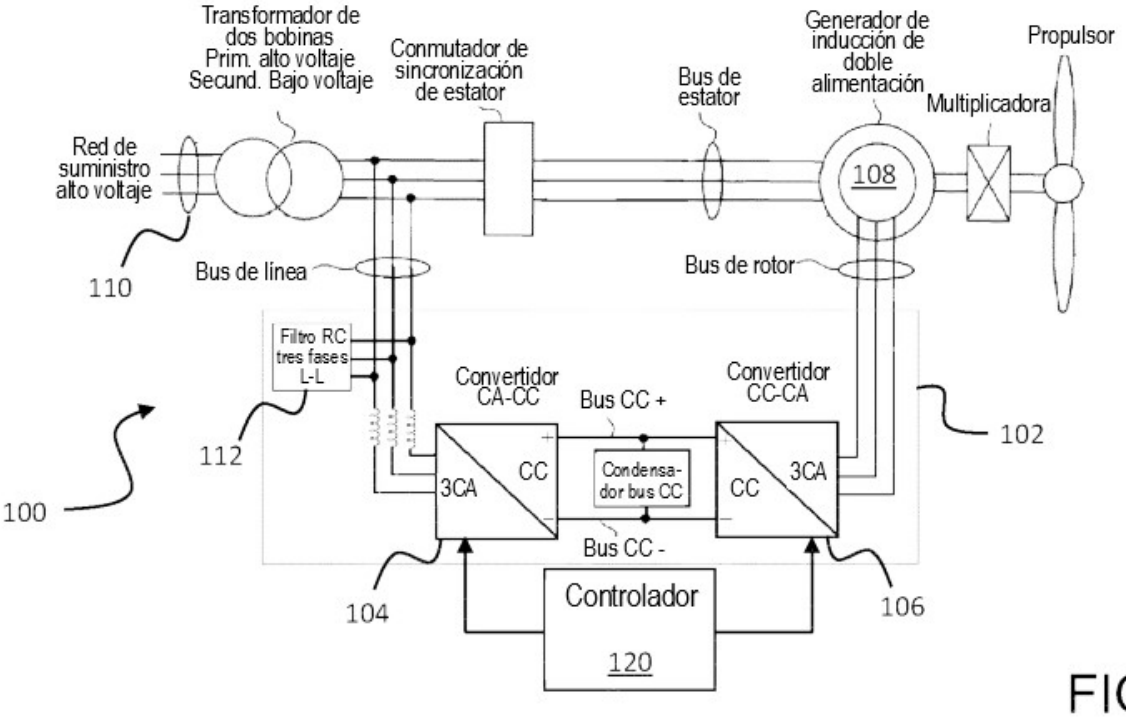
Transformador de dos bobinas Prim. alto voltaje Secund. Bajo voltaje
Conmutador de sincronización de estator
Bus de estator
Generador de inducción de doble alimentación
Propulsor
Multiplicadora
Red de suministro alto voltaje
108
110
Bus de línea
Bus de rotor
Filtro RC tres fases L-L
112
Convertidor CA-CC
Bus CC +
Convertidor CC-CA
102
100
3CA
CC
Condensador bus CC
CC
3CA
Bus CC -
104
106
Controlador
120

FIG. 1

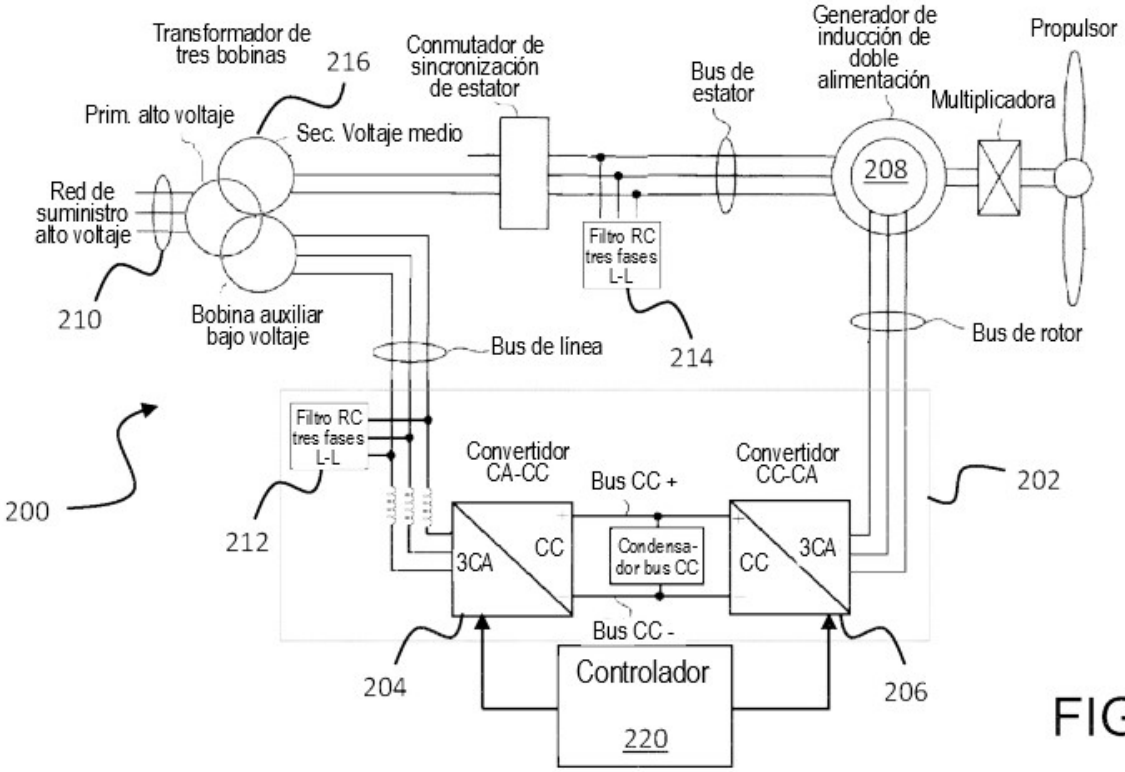
Transformador de tres bobinas
216
Conmutador de sincronización de estator
Bus de estator
Generador de inducción de doble alimentación
Propulsor
Multiplicadora
Prim. alto voltaje
Sec. Voltaje medio
Red de suministro alto voltaje
208
Filtro RC tres fases L-L
210
Bobina auxiliar bajo voltaje
Bus de línea
214
Bus de rotor
Filtro RC tres fases L-L
Convertidor CA-CC
Bus CC +
Convertidor CC-CA
202
200
212
3CA
CC
Condensador bus CC
CC
3CA
Bus CC -
204
206
Controlador
220

FIG. 2

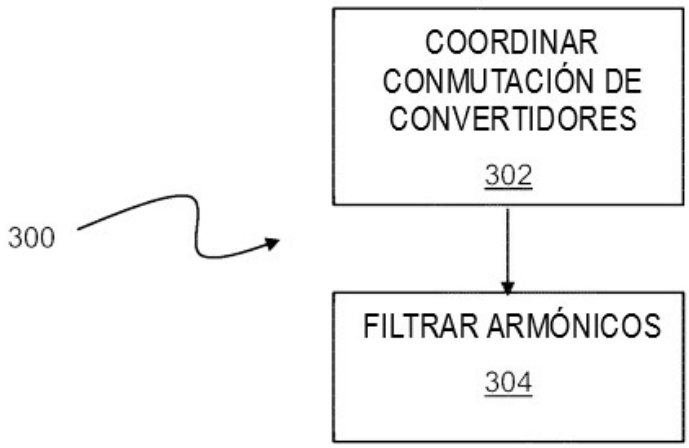
COORDINAR CONMUTACIÓN DE CONVERTIDORES
302
300
FILTRAR ARMÓNICOS
304

FIG. 3

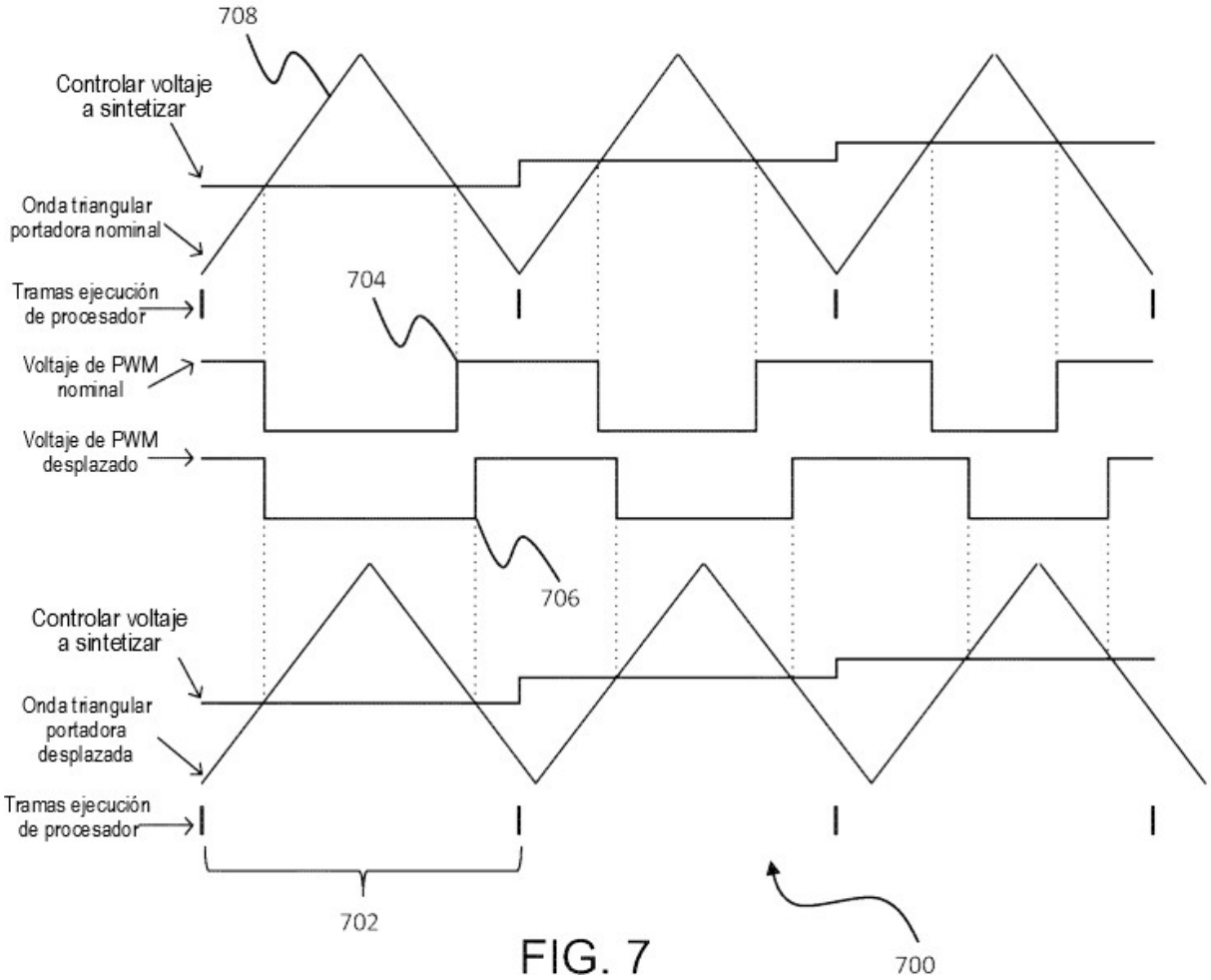
708
Controlar voltaje a sintetizar
Onda triangular portadora nominal
Tramas ejecución de procesador
704
Voltaje de PWM nominal
Voltaje de PWM desplazado
706
Controlar voltaje a sintetizar
Onda triangular portadora desplazada
Tramas ejecución de procesador
702
700

FIG. 7

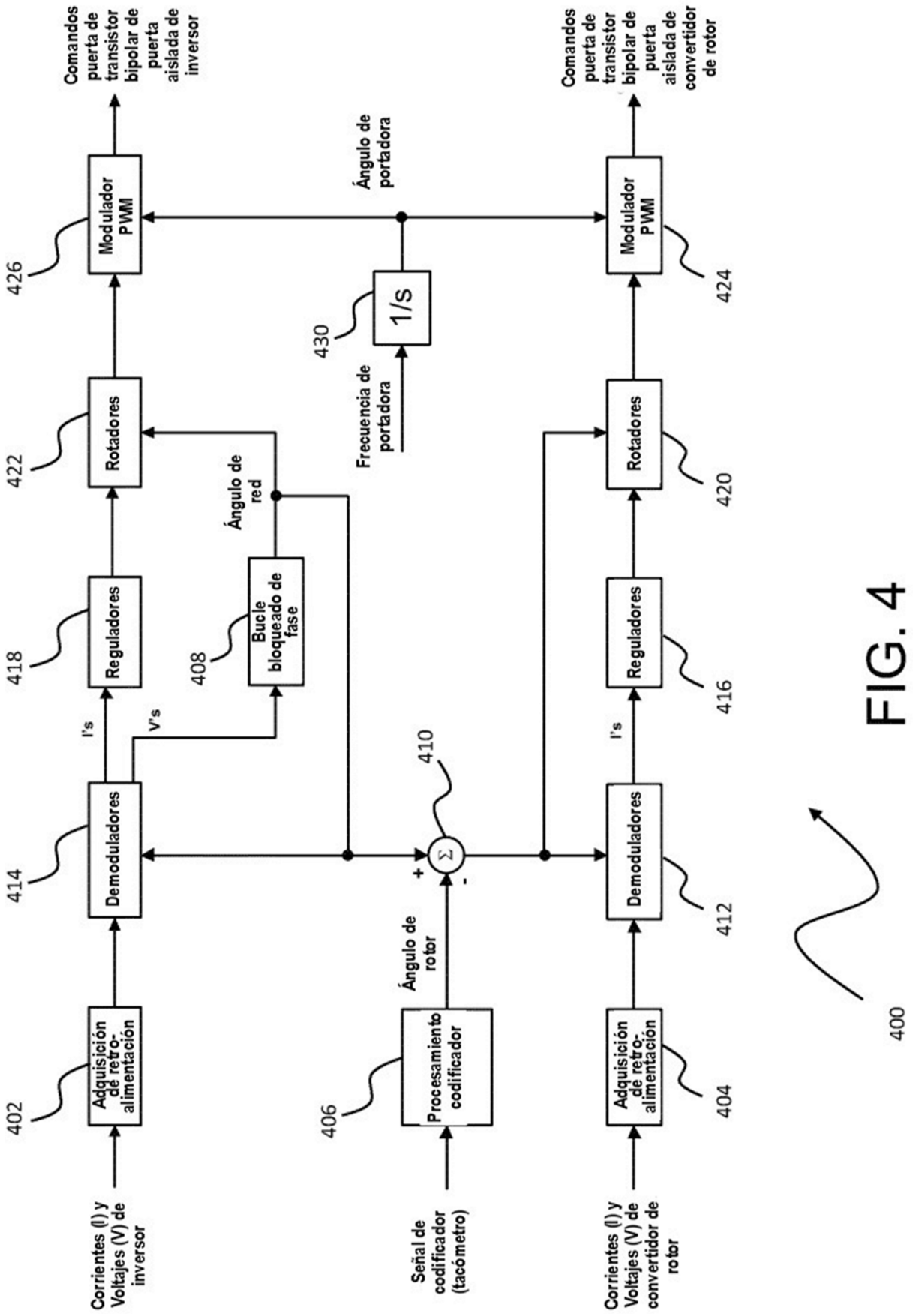
Comandos puerta de transistor bipolar de puerta aislada de inversor
Comandos puerta de transistor bipolar de puerta aislada de convertidor de rotor
Ángulo de portadora
Modulador PWM
426
Modulador PWM
424
1/s
430
Frecuencia de portadora
Rotadores
422
Rotadores
420
Ángulo de red
Bucle bloqueado de fase
408
Reguladores
418
Reguladores
416
I's
V's
I's
410
Demoduladores
414
Demoduladores
412
Ángulo de rotor
Adquisición de retro-alimentación
402
Procesamiento codificador
406
Adquisición de retro-alimentación
404
Corrientes (I) y Voltajes (V) de inversor
Señal de codificador (tacómetro)
Corrientes (I) y Voltajes (V) de convertidor de rotor
400

FIG. 4

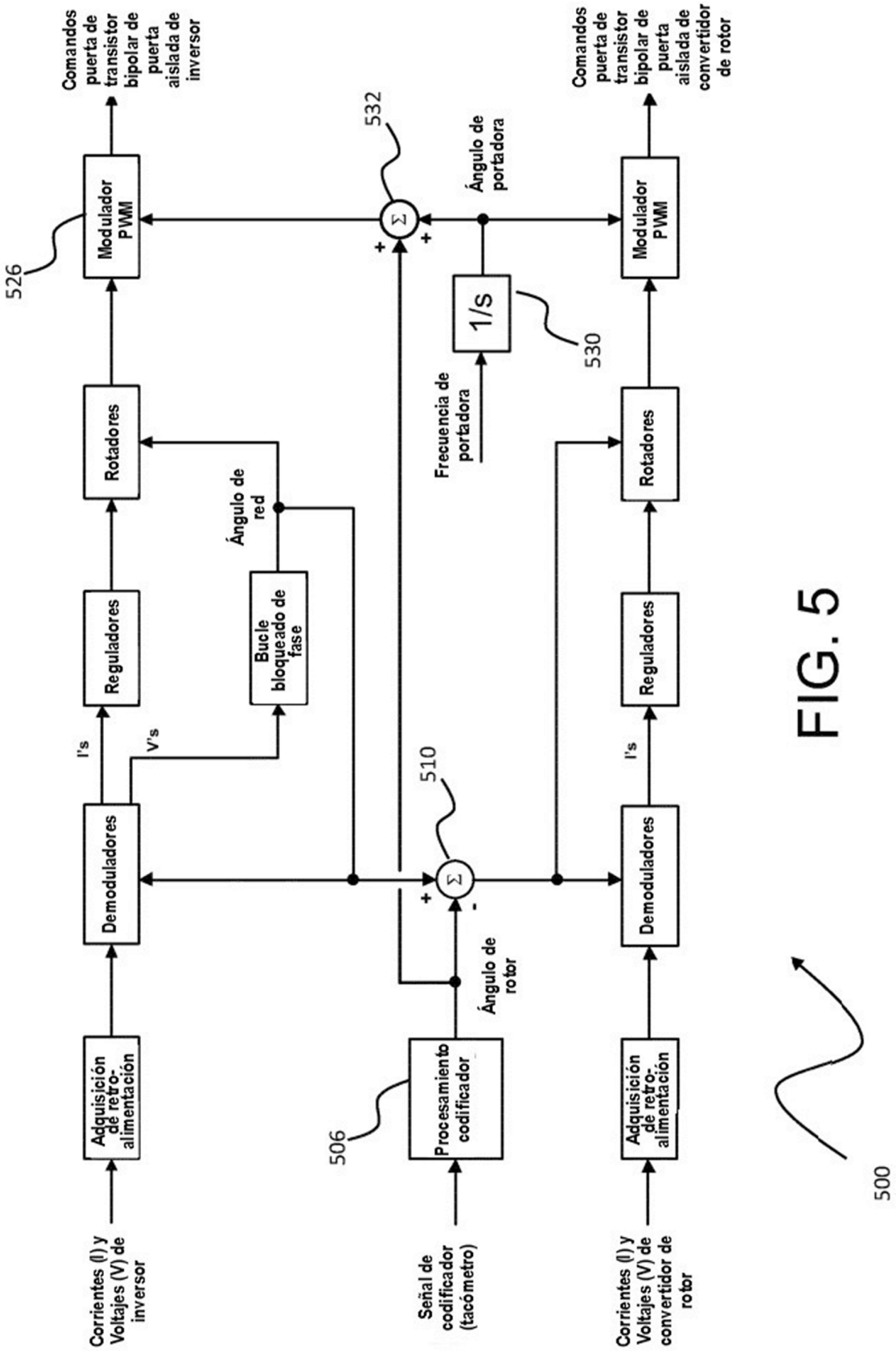
Comandos puerta de transistor bipolar de puerta aislada de inversor
Modulador PWM
526
Rotadores
Reguladores
I's
V's
Demoduladores
Adquisición de retro-alimentación
Corrientes (I) y Voltajes (V) de inversor
Ángulo de red
Bucle bloqueado de fase
532
Σ
+
+
Ángulo de portadora
1/s
530
Frecuencia de portadora
510
Σ
+
-
Ángulo de rotor
506
Procesamiento codificador
Señal de codificador (tacómetro)
Comandos puerta de transistor bipolar de puerta aislada de convertidor de rotor
Modulador PWM
Rotadores
Reguladores
I's
Demoduladores
Adquisición de retro-alimentación
Corrientes (I) y Voltajes (V) de convertidor de rotor
500

FIG. 5

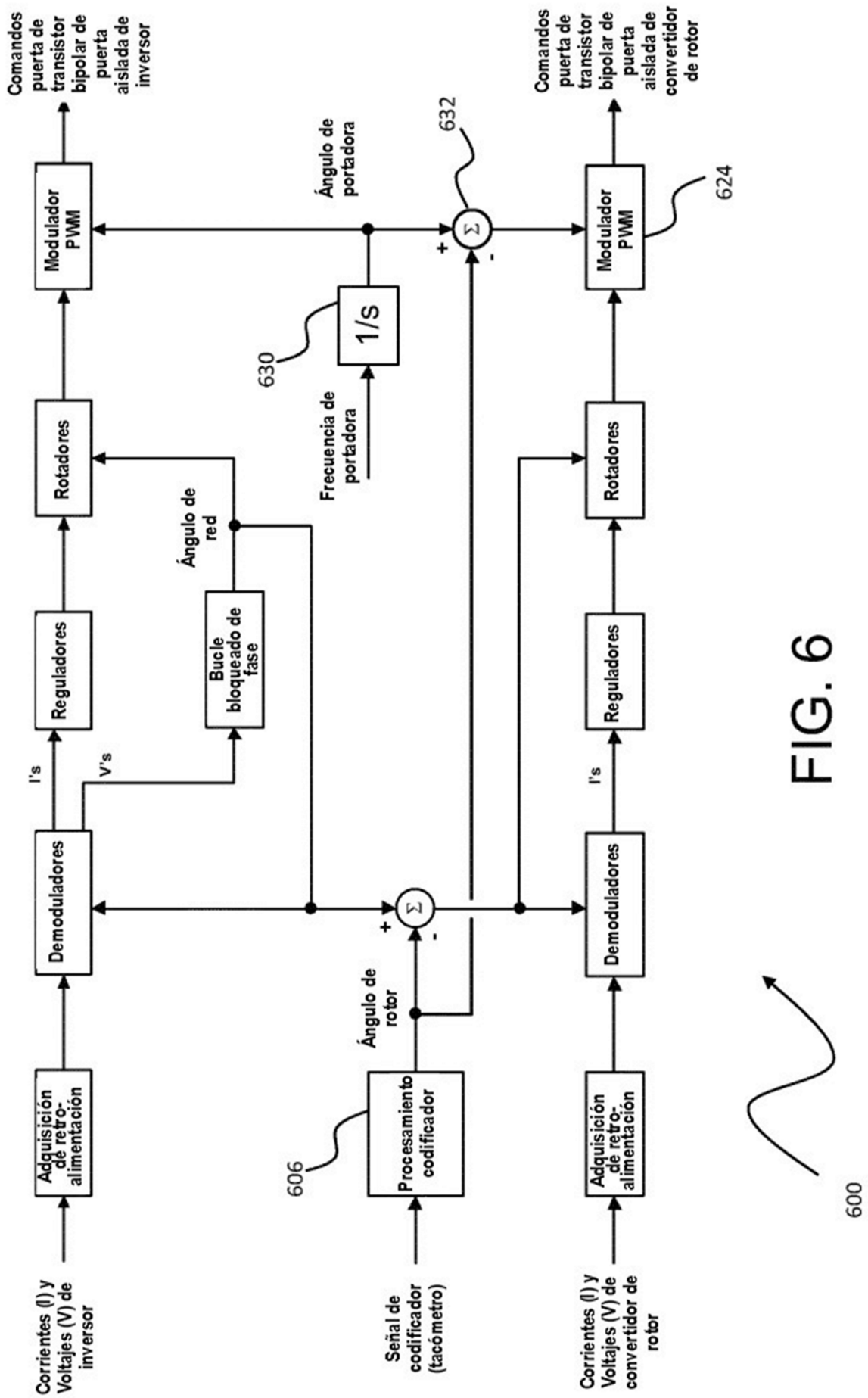
Comandos puerta de transistor bipolar de puerta aislada de inversor
Modulador PWM
Rotadores
Reguladores
Demoduladores
Adquisición de retro-alimentación
Corrientes (I) y Voltajes (V) de inversor
I's
V's
Ángulo de red
Bucle bloqueado de fase
Ángulo de portadora
632
630
1/s
Frecuencia de portadora
Ángulo de rotor
606
Procesamiento codificador
Señal de codificador (tacómetro)
Comandos puerta de transistor bipolar de puerta aislada de convertidor de rotor
624
Modulador PWM
Rotadores
Reguladores
Demoduladores
Adquisición de retro-alimentación
Corrientes (I) y Voltajes (V) de convertidor de rotor
600

FIG. 6