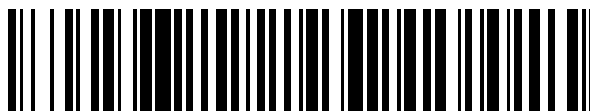


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 700 453**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02 (2006.01)

F03D 9/25 (2006.01)

H02P 25/024 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **06.07.2011** **E 11005490 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.10.2018** **EP 2405135**

54 Título: **Métodos para evitar defectos indeseados del par de rotación irregular en un aerogenerador**

30 Prioridad:

09.07.2010 ES 201000882

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
15.02.2019

73 Titular/es:

GAMESA INNOVATION & TECHNOLOGY, S.L.
(100.0%)
Avenida Ciudad de la Innovación 9-11
31621 Sarriguren, Navarra, ES

72 Inventor/es:

BIRK, JENS

ES 2 700 453 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

Métodos para evitar efectos indeseados del par de rotación irregular en un aerogenerador.

5 Campo de la invención

La invención se refiere a métodos para evitar efectos indeseados del par de rotación irregular en un aerogenerador con un generador de imanes permanentes (PM) y a un aerogenerador con sistemas de control para implementar dichos métodos.

10

Antecedentes

15

Como se muestra en la Figura 2, en un generador o motor de imanes permanentes (PM) el rotor 45 contiene imanes permanentes 51 y el estator 43 contiene laminados apilados que son placas de acero.

20

Los laminados del estator tienen ranuras 55, en las que se sitúan los devanados 57, y dientes 53 que son los laminados entre las ranuras 55. Los imanes 51 del rotor serán atraídos naturalmente por el material magnético del estator 43 o más específica mente por los dientes 53.

25

Así pues al girar el rotor 45 de la máquina PM tratara de encontrar una posición de equilibrio en la 2 o que los imanes 51 están atraídos por los dientes 53 del estator. Por ello mover el rotor 45 más allá de los dientes 53 requiere cierta fuerza. Si se continúa girando el rotor 45, aparecerá el siguiente diente 53 en la dirección de rotación y entonces los imanes 51 en el rotor serán atraídos por el material magnético en el diente 53 y conduciendo con ello el giro hacia la siguiente posición de equilibrio.

30

Consiguientemente, hacer girar el rotor 45 de una máquina PM lentamente en velocidad continua requiere una fuerza para, en primer lugar, mover el rotor más allá de una posición de equilibrio y a continuación con la fuerza necesaria para retener el rolar y evitar que se mueva demasiado deprisa hacia la nueva posición de equilibrio.

35

Será pues necesaria normalmente una fuerza sinusoidal dependiente de la geometría del rotor 45 y del estator 43. El par necesario se llama el par de rotación irregular.

40

Típicamente el par de rotación irregular se reduce tanto como sea posible al diseñar la máquina eléctrica bien desviando los imanes 51 en el rotor 45 o desviando las ranuras 55 en el estator 43 como se describe, por ejemplo, en US 200810036215.

Sin embargo, debido a las tolerancias de fabricación, el par de rotación irregular no puede reducirse a 0.

45

EP 2 043 255 Y EP 2164165 conciernen sistemas y métodos para controlar el rizado de par y el ruido acústico en máquinas síncronas.

50

Cuando se usa una máquina PM como un motor, la rotación está afectada siempre por este fenómeno y por ello las rpm siempre contendrán una pequeña fluctuación con la frecuencia de paso por ranura. Para ciertos motores esto resulta inaceptable ya que deben funcionar con un 100% de suavidad y por tanto las fluctuaciones son compensadas controlando la potencia del motor y acelerando o decelerando el rotor para compensar pequeñas variaciones. Esto se hace controlando la corriente en el motor en un convertidor de frecuencia.

Se sabe análogamente que cuando se usa una máquina PM como generador hay un par de rotación irregular debido a la frecuencia de paso por ranura. Su magnitud típica es 1-2% del par nominal y también puede ser compensado controlando la corriente vía un convertidor de frecuencia.

5 En el caso de aerogeneradores con generadores PM en una situación de marcha en vacío, es decir en ausencia de carga o de red, este par de rotación irregular introduce una variación de par de aproximadamente un 1% del par nominal. Particularmente en el caso de una máquina con un generador PM accionada directamente ese par de rotación irregular será visible
10 directamente en el rotor y por ello causa algunos problemas.

El par de rotación irregular puede causar una parada del rotor en una posición de equilibrio. Esta parada del rotor puede impedir la lubricación de los cojinetes principales lo que puede provocar marcas de fricción en los cojinetes dañando con ello esta parte del aerogenerador.

15 La presente invención está orientada a la solución de estos inconvenientes.

Sumario de la invención

20 Un objeto de la presente invención es proporcionar un método para evitar la parada del rotor en una situación de marcha en vacío en aerogeneradores con un generador de imanes permanentes.

Otro objeto de la presente invención es proporcionar un método para controlar la velocidad del rotor en una situación de marcha en vacío en aerogeneradores con un generador de imanes permanentes.

Estos objetos se consiguen proporcionando un método de operación de un aerogenerador, preferiblemente un aerogenerador accionado directamente, que comprende un generador de imanes permanentes accionado por un rotor eólico que proporciona potencia a una red eléctrica a través de una unidad de electrónica de potencia, que, en una situación de marcha en vacío que crea un par de rotación irregular que puede parar el rotor eólico, configura el convertidor de frecuencia de la unidad de electrónica de potencia para controlar la corriente de manera que se cree un par opuesto a dicho par de rotación irregular permitiendo una situación de marcha en vacío libre y dicha situación de marcha en vacío es detectada cuando alguno de los siguientes casos ocurre:

a) una situación en la que la velocidad instantánea del rotor W_i o la filtrada con un paso bajo W_f , bien en un instante individual o a lo largo de un intervalo temporal $T1$, está por debajo de un valor predeterminado en cada caso; b) una situación en la que hay variaciones de la velocidad instantánea del rotor W_i o la filtrada con un paso bajo W_f en un intervalo temporal $T2$ debidas al par de rotación irregular por encima de unos primeros valores predeterminados; c) una situación en la que hay variaciones de la velocidad instantánea del rotor W_i o la filtrada con un paso bajo W_f en un intervalo temporal $T2$ debidas al par de rotación irregular por encima de unos segundos valores predeterminados y la velocidad instantánea del rotor W_i o la filtrada con un paso bajo W_f , mínima o media, en dicho intervalo temporal $T2$ está por debajo de un valor predeterminado en cada caso. Uno o más de dichos métodos puede ser implementado en el aerogenerador dependiendo de sus circunstancias particulares.

50 En una realización preferente, el convertidor de frecuencia se configura para hacer que el generador funcione a la velocidad rpm_{ref} de una situación de marcha en vacío libre. Se consigue con ello un método que puede reutilizar esquemas de control y métodos de control que normalmente ya están implementados en el aerogenerador.

En otra realización preferente, el convertidor de frecuencia se configura para proporcionar una corriente fija a la frecuencia fija correspondiente a la velocidad del generador rpm_{ref} de una situación de marcha en vacío libre. Se consigue con ello un método estable a una velocidad muy baja.

5 En otra realización preferente, dicho convertidor de frecuencia se configura para aplicar una corriente conformadora a la corriente de salida para producir dicho par opuesto. Se consigue con ello un método que reacciona muy rápidamente a las variaciones del par de rotación irregular permitiendo con ello una velocidad de marcha en vacío muy baja.

10 En otro aspecto, los objetos mencionados anteriormente se consiguen proporcionando un sistema de control para un aerogenerador que comprende un generador de imanes permanentes accionado por un rotor eólico que proporciona potencia a una red eléctrica a través de una unidad de electrónica de potencia que incluye un convertidor de frecuencia, dispositivos de medida o de estimación de al menos la velocidad del rotor W , la velocidad del generador rpm , la intensidad I y el par T , que también comprende una unidad de control conectada a dichos dispositivos y a dicho convertidor de frecuencia adaptada para ejecutar los métodos mencionados anteriormente.

20 En otro aspecto, los objetos mencionados anteriormente se consiguen proporcionando un aerogenerador que comprende dicho sistema de control.

Otras características y ventajas de la presente invención se entenderán de la siguiente descripción detallada de una realización ilustrativa y no limitativa de su objeto en relación con las figuras que se acompañan.

Breve descripción de las figuras

30 La Figura 1 es una vista esquemática en sección lateral de un aerogenerador accionado directamente con el generador situado aguas arriba del rotor eólico.

La Figura 2 es una vista esquemática en sección lateral parcial de un generador PM.

35 La Figura 3 es un diagrama de bloques de un aerogenerador con un convertidor para implementar el método de la presente invención.

La Figura 4 es un diagrama de bloques de una primera realización de un método para contrarrestar el par de rotación irregular según la presente invención.

40 La Figura 5 es un diagrama de bloques de una segunda realización de un método para contrarrestar el par de rotación irregular según la presente invención.

45 Las Figuras 6a y 6b son curvas Velocidad vs. Tiempo de, respectivamente, una señal de velocidad instantánea y de una señal de velocidad filtrada con un filtro de paso bajo, para ilustrar diferentes métodos para detectar cuando está próxima a 0 la velocidad del generador o del rotor.

Descripción detallada de las realizaciones preferentes

50 La Figura 1 muestra un aerogenerador accionado directamente con el generador situado aguas arriba del rotor que comprende una torre 11 soportando medios alojados dentro de la góndola 9 para convertir la energía rotacional del rotor eólico 15 en energía eléctrica por medios de un generador 41 de imanes permanentes. El rotor eólico 15 comprende un buje de rotor 17 y, típicamente, tres palas (no mostradas en la Figura 1). El buje del rotor 17 está situado sobre

dos cojinetes principales 21, 23, estando situado el primer cojinete 21 cerca de la parte frontal del buje del rotor y el segundo cojinete 23 cerca de la parte trasera del buje del rotor. Ambos cojinetes 21, 23 están posicionados sobre un eje principal no- rotatorio 29 conectado con la estructura de soporte 13 del aerogenerador. El generador 41 está situado delante el buje del rotor 17. El estator del generador 43 está conectado al eje principal no-rotatorio 29 y el rotor del generador 45 está conectado al buje del rotor 17.

Como se muestra en la Figura 3 el generador de imanes permanentes 41 con el rotor 45 y el estator 43 está conectado a la red 7 a través de una unidad de electrónica de potencia 47.

La unidad de electrónica de potencia 47 comprende un convertidor de frecuencia 49 para llevar a cabo la conversión de la energía producida por el generador 41 a energía que está sincronizada con la energía de la red eléctrica 7 y elementos adicionales tales como elementos de almacenamiento que pueden ser utilizados para proporcionar energía al aerogenerador y elementos disipativos que pueden ser usados para consumir energía.

La energía producida por el aerogenerador se controla típicamente mediante un sistema de control para regular el ángulo de paso de las palas y el par motor del generador. La velocidad rotacional del rotor y la energía producida por el aerogenerador pueden ser por tanto controladas inicialmente. En particular, dichos medios de control incluyen un controlador que recibe señales indicativas de la velocidad del generador 41 y de la energía producida por el generador 41 y que proporciona una señal de referencia del par motor al convertidor 49 para obtener la energía requerida.

La idea básica de la presente invención para contrarrestar el par motor de rotación irregular en un aerogenerador como el acaba de describirse en una situación de marcha en vacío, consiste en usar dichos medios de control para crear un par opuesto a dicho par de rotación irregular, permitiendo una situación de marcha en vacío libre en la que el rotor 15 gira lentamente evitando los daños causados a los cojinetes 21, 23 por cualquier parada del rotor 15 debida al par de rotación irregular.

A título de ejemplo, una máquina de 3 MW funcionando a 14.3 rpm tendrá un par motor de 2000 kNm. Ello implica una variación del par en una situación de marcha en vacío de +/-10 kNm. Esta variación del par puede ser suficiente en el caso de ciertas velocidades de viento para detener el rotor 15 desde una situación de rotación/marcha en vacío y actuando como un freno de disco que retiene al rotor 15 en una posición fija. La retención del rotor introduce unas cargas más altas en el aerogenerador que las causadas por un rotor marchando en vacío que encuentra naturalmente una posición de equilibrio de cargas y por tanto de cargas mínimas sobre el aerogenerador.

Para un mejor entendimiento de esta invención debe advertirse que los siguientes términos deben entenderse con el siguiente significado:

- Situación de marcha en vacío: El rotor gira lentamente y no hay producción de energía. El ángulo de paso de las palas está fijado típicamente a un valor entre 45 y 90 grados dependiendo del tipo de aerogenerador.

- Velocidad normal del rotor durante una marcha en vacío libre: La velocidad que tendría el rotor si no hubiera un par de rotación irregular en el generador. Este valor está típicamente en torno a 1 rpm.

El método según la presente invención se activa cuando la velocidad del rotor está próxima a 0. Los posibles métodos de detección de esa condición de "próxima a 0" incluyen, aunque no están limitados a los siguientes casos que serán explicados en referencia a la señal de

velocidad instantánea 71 mostrada en la Figura 6a ó a la señal de velocidad filtrada con un paso bajo 73 mostrada en la Figura 6b.

5 - Detectar cuando la velocidad instantánea W , está por debajo de un cierto valor. Si este valor es, por ejemplo, 0.7 rpm eso sucederá en el tiempo 5.6 s (ver Figura 6a).

10 - Detectar cuando el valor de la velocidad filtrada con un paso bajo W_f está por debajo de un cierto valor. Si este valor es, por ejemplo, 1.20 rpm eso sucederá en el tiempo 5.6 s (ver Figura 6b).

- Detectar cuando el valor de la velocidad filtrada con un paso bajo W_f está por debajo de un cierto valor durante un cierto tiempo. Si estos valores son por ejemplo 1.8 rpm y 0.4 s eso sucederá en el tiempo 5.77 s (ver Figura 6b).

15 - Detectar cuando hay variaciones del valor de la velocidad (instantánea W , o filtrada W_f) debidas al par de rotación irregular en un cierto tiempo y por encima de un cierto valor. Si estos valores son por ejemplo 1.3 rpm (velocidad instantánea) y 0.4 s eso sucederá en el tiempo 5.4 s (ver Figura 6a).

20 - Detectar cuando el valor de la velocidad (instantánea W_i o filtrada W_f) está por debajo de un cierto valor durante un cierto tiempo y al mismo las variaciones de la velocidad debidas al par de rotación irregular están por encima de un cierto valor. Si estos valores son, por ejemplo, 1.3 rpm (velocidad filtrada), 0.4 s y 0,55 rpm esto sucederá en el tiempo 5,99 s (ver Figura 6b).

25 La velocidad del rotor puede ser detectada directamente por un sensor de velocidad tal como un codificador, un resolovedor o un elemento Hall y la velocidad puede ser medida por el convertidor de frecuencia o por el PLC o PC del sistema de control del aerogenerador. Alternativamente la velocidad puede ser estimada a partir de señales de voltaje y/o intensidad en el convertidor de frecuencia.

30 En una realización dichos medios de control se usan en situaciones de marcha en vacío que crean un par de rotación irregular que puede detener el rotor para configurar dicho convertidor de frecuencia 49 para hacer girar al generador 41 a la velocidad de una situación de marcha en vacío libre. En particular, se configura el convertidor de frecuencia 49 en modo de control de
35 velocidad, siendo la consigna de la velocidad del generador rpm_{ref} igual a la velocidad normal del rotor en marcha en vacío. El método de control usado en el convertidor de frecuencia 49 se muestra en la Figura 4. Las entradas al esquema de control son la velocidad deseada del generador rpm_{ref} , que en este caso es la velocidad normal del rotor en marcha en vacío, la velocidad del generador medida o estimada rpm_{meas} y la intensidad medida I_{meas} . La diferencia
40 entre rpm_{meas} y rpm_{ref} se envía al controlador de par o intensidad 61 que envía la referencia de intensidad I_{ref} al bloque 63 responsable del cálculo de la referencia del voltaje de salida V_{ref} para el generador 41. Esa referencia de voltaje V_{ref} se envía al bloque 65 que envía señales moduladas por ancho de pulso a los semiconductores, p.ej, IGBT's, del lado del generador del convertidor de frecuencia 49.

45 En otra realización dichos medios de control se usan en situaciones de marcha en vacío que crean un par de rotación irregular que puede detener el rotor para configurar dicho convertidor de frecuencia 49 para proporcionar una corriente fija a la frecuencia fija correspondiente a la velocidad del rotor/generador en una situación de marcha en vacío libre. En este caso no es
50 necesaria una señal de realimentación de la velocidad en el convertidor de frecuencia 49. El método de control usado en el convertidor de frecuencia se muestra en la Figura 5. El esquema de control es similar al de la Figura 4 excepto que se omite el controlador de par o intensidad 61 y las entradas al esquema de control son por tanto solamente la deseada intensidad del generador I_{ref} y la intensidad medida I_{meas} . En otra realización dichos medios de control se usan

en situaciones de marcha en vacío que crean un par de rotación irregular que puede detener el rotor para configurar dicho convertidor de frecuencia 49 para aplicar una corriente conformadora a la corriente de salida de manera que la forma de onda de la corriente produzca dicho par opuesto haciendo nulo el par resultante.

5 La amplitud del par de rotación irregular depende de las tolerancias de fabricación y difiere de un generador a otro. Son necesarias pues diferentes amplitudes para contrarrestar el par de rotación irregular. Por tanto debe medirse el par de rotación irregular y calibrarse la corriente conformadora antes de usar el método en el aerogenerador.

10 Otro requisito de esta realización es que el ángulo de fase de la corriente conformadora tiene que ser igual al ángulo de fase del par de rotación irregular. Con ello se evita que el par proporcionado por la corriente del generador amplifique el par de rotación irregular en lugar de reducirlo. El ángulo de fase de la corriente conformadora debe estar en una relación fija con la posición del rotor, medida o estimada, y con el número de ranuras del estator.

15 La invención es aplicable preferentemente a aerogeneradores accionados directamente porque en los aerogeneradores con multiplicadora el par de rotación irregular absoluto se reduce con la relación de multiplicación y siendo ésta típicamente de 1:8 para una multiplicadora de una etapa, 1:40 para una multiplicadora de dos etapas y 1:100 para una multiplicadora de tres etapas, un par de rotación irregular de un 1% del par nominal queda reducido a un valor insignificante en el eje de baja velocidad del aerogenerador.

20 Un sistema de control de un aerogenerador según la presente invención combina medios de control disponibles de aerogeneradores conocidos con una unidad de control específica para implementar los métodos según la presente invención.

25 El sistema de control recibe datos de entrada tales como la velocidad del rotor W , la velocidad del generador rpm, la intensidad I y el par motor T y envía el dato de salida V_{ref} al convertidor de frecuencia 49 para crear un par opuesto al par de rotación irregular que permite una situación de marcha en vacío libre.

30 Aunque la presente invención se ha descrito enteramente en conexión con realizaciones preferidas, es evidente que se pueden introducir aquellas modificaciones dentro de su alcance, no considerando éste como limitado por las anteriores realizaciones, sino por el contenido de las reivindicaciones siguientes.

REIVINDICACIONES

1. Método de operación de un aerogenerador que comprende un generador (41) de imanes permanentes accionado por un rotor eólico (15) que proporciona potencia a una red eléctrica (7) a través de una unidad de electrónica de potencia (47), caracterizado porque, en una situación de marcha en vacío que crea un par de rotación irregular que puede parar el rotor eólico (15), caracterizado porque se configura el convertidor de frecuencia (49) de la unidad de electrónica de potencia (47) para controlar la corriente de manera que se cree un par opuesto a dicho par de rotación irregular permitiendo una situación de marcha en vacío libre; Y dicha situación de marcha en vacío se detecta cuando ocurre uno de los casos siguientes:
 - a) una situación en que la velocidad instantánea (W_i) ó la filtrada con un paso bajo (W_f), está por debajo de un valor predeterminado;
 - b) una situación en la que hay variaciones de la velocidad instantánea (W_i) ó la filtrada con un paso bajo (W_f), por encima de unos primeros valores predeterminados debidas al par de rotación irregular en un intervalo temporal T2;
 - c) una situación en la que hay variaciones de la velocidad instantánea (W_i) ó la filtrada con un paso bajo (W_f) por encima de unos segundos valores predeterminados debidas al par de rotación irregular en un intervalo temporal T2 y la velocidad instantánea (W_i) ó la filtrada con un paso bajo (W_f), mínima o media, en dicho intervalo temporal T2 está por debajo de un valor predeterminado en cada caso.
 - d) una situación en la que la velocidad filtrada con un paso bajo (W_f), está por debajo de un valor predeterminado durante un intervalo temporal T1 predefinido.
2. Método de operación de un aerogenerador según cualquiera de las reivindicaciones 1 caracterizado porque el convertidor de frecuencia (49) se configura para hacer que el generador (41) funcione a la velocidad de una situación de marcha en vacío libre que es igual a la velocidad normal del rotor (rpm_{ref}) durante una situación de marcha en vacío.
3. Método de operación de un aerogenerador según la reivindicación 1, caracterizado porque el convertidor de frecuencia (49) se configura para proporcionar una corriente fija a la frecuencia fija correspondiente a la velocidad del generador de una situación de marcha en vacío libre que es igual a la velocidad normal del rotor (rpm_{ref}) durante una situación de marcha en vacío.
4. Método de operación de un aerogenerador según la reivindicación 1, caracterizado porque dicho convertidor de frecuencia (49) se configura para aplicar una corriente conformadora a la corriente de salida para producir dicho par opuesto.
5. Método de operación de un aerogenerador según cualquiera de las reivindicaciones 1-4, caracterizado porque dicho aerogenerador es un aerogenerador accionado directamente.
6. Un sistema de control para un aerogenerador que comprende un generador (41) de imanes permanentes accionado por un rotor eólico (15) que proporciona potencia a una red eléctrica (7) a través de una unidad de electrónica de potencia (47) que incluye un convertidor de frecuencia (49), dispositivos de medida o de estimación de al menos la velocidad del rotor W , la velocidad del generador rpm , la intensidad I y el par T , caracterizado porque también comprende una unidad de control conectada a dichos dispositivos y a dicho convertidor de frecuencia (49) adaptada para ejecutar un método según cualquiera de las reivindicaciones 1-5.
7. Un aerogenerador comprendiendo el sistema de control objeto de la reivindicación 6.

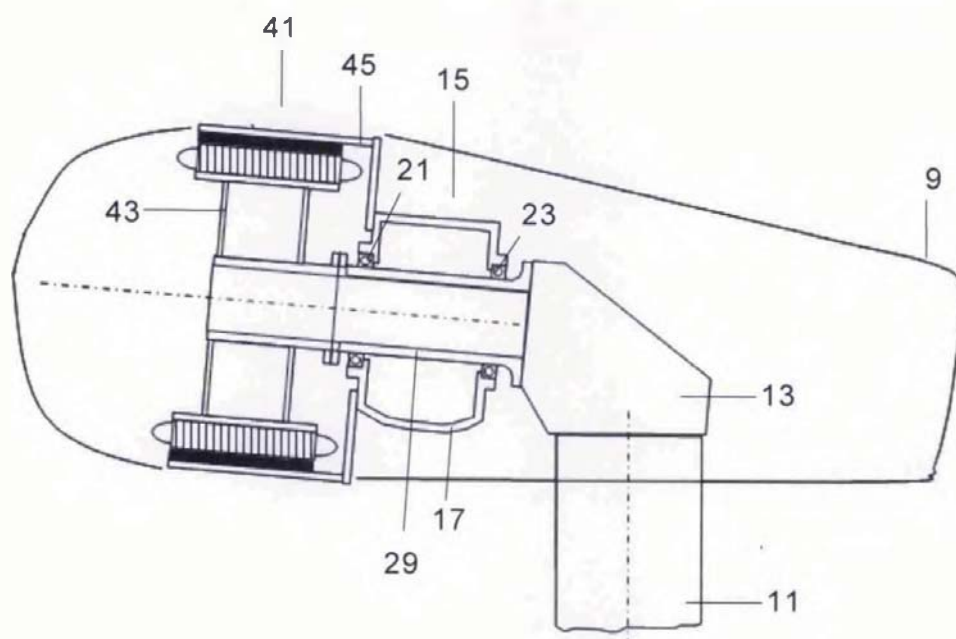


FIG. 1

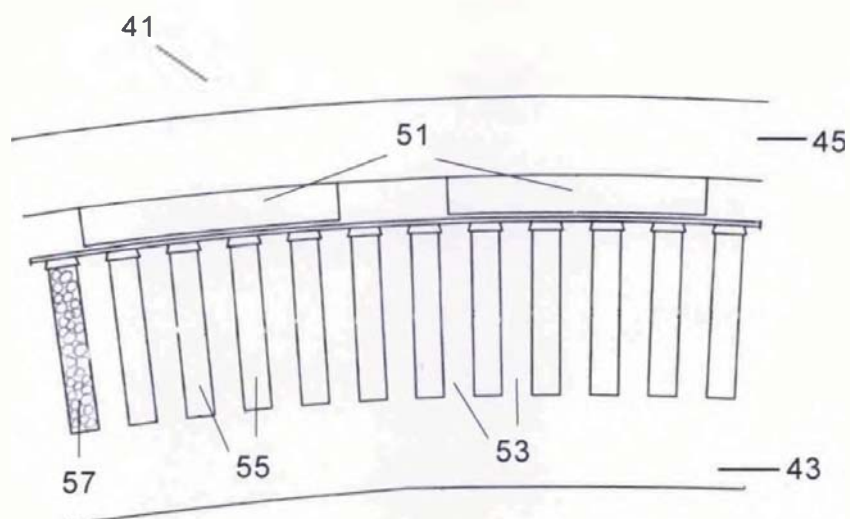


FIG. 2

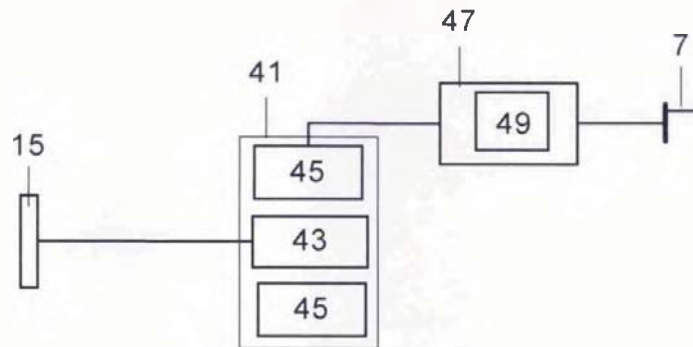


FIG. 3

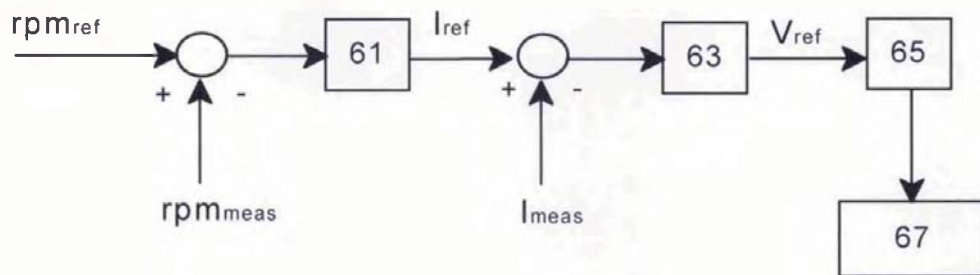


FIG. 4

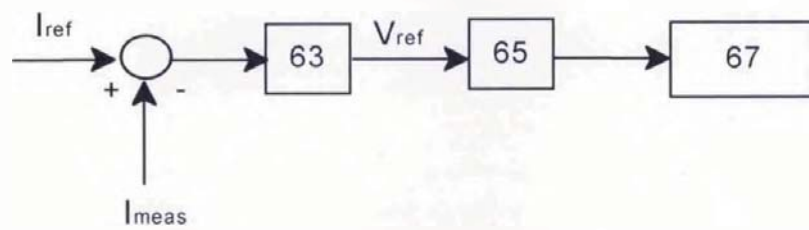


FIG. 5

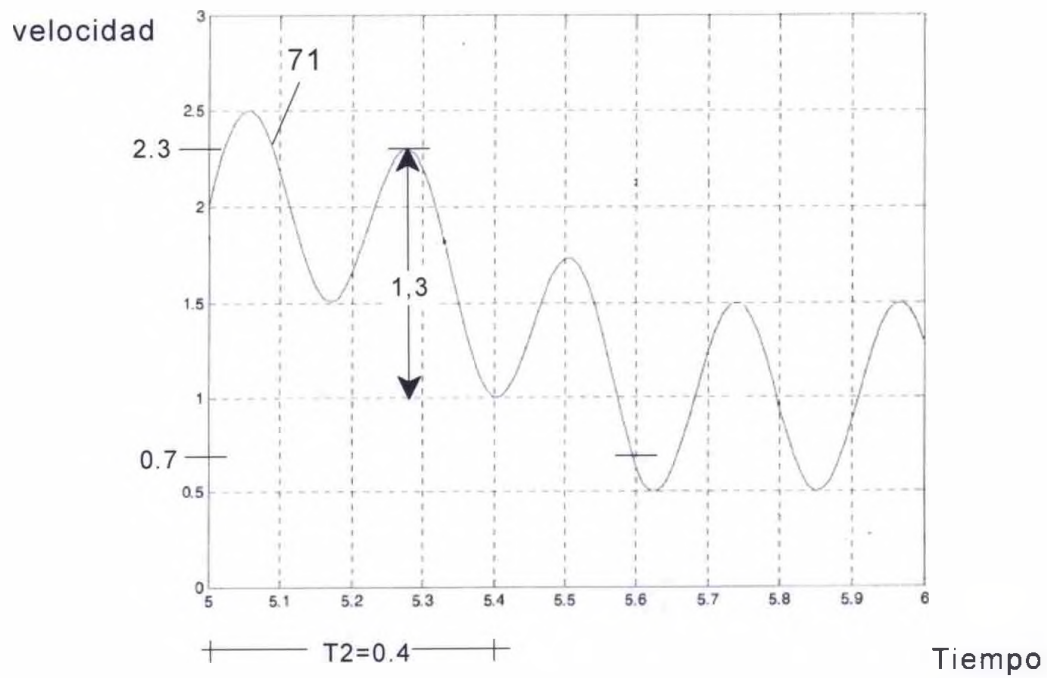


FIG. 6a

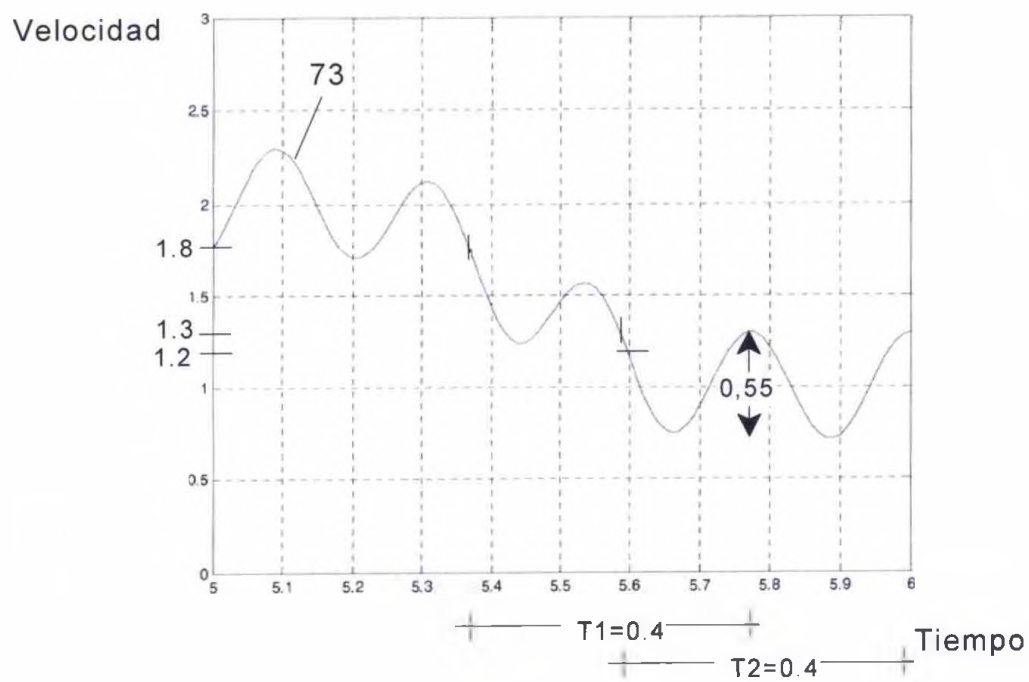


FIG. 6b