

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 505 441**

51 Int. Cl.:

F03D 9/00 (2006.01)

F03D 7/02 (2006.01)

F03D 11/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.07.2011 E 11382246 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **18.06.2014 EP 2549100**

54 Título: **Generador de turbina eólica**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
09.10.2014

73 Titular/es:

ALSTOM RENOVABLES ESPAÑA, S.L. (100.0%)
C/ Roc Boronat, 78
08005 Barcelona, ES

72 Inventor/es:

FABREGAT BALBOA, GUILLERMO;
GARCÍA I ERILL, DANIEL y
CLARAMUNT ESTECHA, SANTIAGO

74 Agente/Representante:

ZEA CHECA, Bernabé

ES 2 505 441 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

Generador de turbina eólica

5 La presente invención se refiere a un generador de turbina eólica que comprende un rotor, un estator y un entrehierro (air gap) entre una región delimitante del estator y una región delimitante del rotor, siendo dichos rotor y/o estator deformables bajo cargas operacionales.

10 La presente invención también se refiere a un procedimiento para optimizar un entrehierro (air gap) entre una región delimitante de un estator y una región delimitante de un rotor de un generador de turbina eólica, siendo dichos rotor y/o estator deformables bajo cargas operacionales.

Antecedentes de la técnica

15 Los generadores de turbina eólica (p.ej. generadores auto-excitados o con imanes permanentes) pueden estar expuestos a deformaciones de su rotor y/o estator debido al efecto de cargas operacionales (como p.ej. el peso del rotor/estator, fuerzas electromagnéticas entre el rotor y el estator, etc.). Estas deformaciones pueden causar la degradación del entrehierro entre el rotor y el estator, produciendo dicha degradación un mal rendimiento y una reducción de la vida del generador.

20 Es conocido, por ejemplo, que deformaciones del rotor/estator y la consecuente degradación del entrehierro causa cargas de atracción desequilibradas que generan una fuerza de tracción (pull force). Esta fuerza de tracción, la cual se incrementa a medida que aumenta la degradación del entrehierro, puede afectar el rendimiento del generador, la vida de los componentes del generador tal como el rotor, el estator, rodamientos, acoplamientos elásticos y otros componentes de la turbina eólica (p.ej. bastidores).

25 Actualmente, algunos diseños ponen en práctica generadores con partes pesadas para incrementar la rigidez de los componentes del generador y, así, reducir la deformación del rotor/estator con el objetivo de asegurar un entrehierro constante entre el estator y el rotor. No obstante, la aplicación de este enfoque genera estructuras muy pesadas cuya fabricación y transporte, por ejemplo, son muy costosos.

30 EP2106013A2 muestra otro enfoque mediante la divulgación de un generador de turbina eólica resistente a la desviación en el que el estator y el rotor tienen superficies acoplables selectivamente que mantienen el entrehierro sustancialmente estable y permiten la rotación del rotor durante el acoplamiento, acoplándose dichas superficies acoplables cuando el rotor alcanza una desviación predeterminada. Además, EP2106013A2 también describe que dichas superficies acoplables selectivamente pueden incluir un conjunto de rodamientos internos.

35 EP2063114A1 muestra otro enfoque mediante la divulgación de una turbina eólica que comprende una estructura de retención (p.ej. un bastidor principal en forma de brazo de retención) que soporta un elemento de soporte del rotor y está conectada a un elemento de soporte del estator, de modo que se incrementa la estabilidad de la estructura rotor-estator.

40 No obstante, los enfoques comentados en los dos párrafos anteriores generalmente implican geometrías complejas, introducen componentes adicionales, etc. Así pues, los generadores de turbina eólica resultantes pueden ser caros y difíciles de mantener.

Resumen de la invención

45 Por lo tanto, aún existe una necesidad de nuevos generadores de turbina eólica y procedimientos de optimización de un entrehierro (air gap) que resuelvan al menos algunos de los inconvenientes antes mencionados. Es un objeto de la presente invención satisfacer dicha necesidad.

50 Dicho objeto se consigue con un generador de turbina eólica según la reivindicación 1, y con un procedimiento de optimización de un entrehierro según la reivindicación 8.

55 En un primer aspecto, la presente invención proporciona un generador de turbina eólica que comprende un rotor, un estator y un entrehierro entre una región delimitante del estator y una región delimitante del rotor; en el que el rotor y/o el estator son deformables bajo cargas operacionales y están configurados de manera que el entrehierro resultante de la presencia de cargas operacionales es más uniforme que el entrehierro en la ausencia de cargas operacionales.

60

La estructura del generador de este primer aspecto se basa en aprovecharse de las deformaciones sufridas por el rotor/estator bajo cargas operacionales dándole una pre-forma al rotor/estator de modo que dichas deformaciones producen un entrehierro más uniforme. Se consideran dos situaciones diferentes: una situación por defecto, la cual se refiere a la ausencia de cargas operacionales, y una situación de carga, la cual se refiere a la presencia de cargas operacionales. El punto clave de este primer aspecto de la invención es que el rotor/estator en la situación por defecto tiene una configuración (p.ej. introduciendo distorsiones aparentes) de manera que el rotor/estator en la situación de carga constituye un entrehierro más uniforme que el entrehierro en la situación por defecto.

Este innovador primer aspecto puede ser visto como una paradoja, puesto que un diseño aparentemente deformado del rotor/estator en la situación por defecto resulta en una mejor forma del rotor/estator en la situación de carga. Así, el generador de este primer aspecto tiene ventajas tales como la extensión de la vida del generador, la mejora de su rendimiento, etc. sin p.ej. incrementar la masa/peso del generador.

En un segundo aspecto, la presente invención proporciona un procedimiento para optimizar un entrehierro entre una región delimitante de un estator y una región delimitante de un rotor de un generador de turbina eólica, siendo dicho rotor y/o dicho estator deformables bajo un conjunto de cargas operacionales y consistiendo dicha optimización en que el entrehierro resultante de la presencia del conjunto de cargas operacionales es más uniforme que el entrehierro en la ausencia del conjunto de cargas operacionales.

El procedimiento de este segundo aspecto comprende simular la operación del rotor y el estator bajo el conjunto de cargas operacionales, basándose dicha simulación en un rotor de prueba que representa el rotor, un estator de prueba que representa el estator y un entrehierro (air gap) de prueba entre dicho rotor de prueba y estator de prueba. Una vez que la simulación ha sido completada, se verifica si el entrehierro de prueba satisface un modelo de entrehierro. En caso de que el entrehierro de prueba no satisfaga el modelo de entrehierro, se calcula una corrección de prueba del rotor de prueba y/o del estator de prueba para adaptar el entrehierro de prueba con el fin de que satisfaga el modelo de entrehierro, y dicha corrección de prueba es aplicada al rotor de prueba y/o al estator de prueba para su consideración en una siguiente simulación.

El tratamiento descrito en el párrafo anterior es repetido hasta que el entrehierro de prueba satisface el modelo de entrehierro. Entonces, en caso de que dicho tratamiento haya producido una o más correcciones de prueba, estas correcciones de prueba son aplicadas al rotor y/o estator del generador de la turbina eólica.

Este procedimiento permite producir un generador en el que el entrehierro constituido por el rotor/estator en la situación de carga es más uniforme que el entrehierro en la situación por defecto. Así, los principios y ventajas comentados en relación con el primer aspecto de la invención pueden ser también aplicados a este segundo aspecto de la invención.

Objetos, ventajas y características adicionales de realizaciones de la invención serán claros para aquellos expertos en el campo de la técnica al examinar la descripción, o pueden ser aprendidos al poner en práctica la invención.

Breve descripción de los dibujos

A continuación se describirán realizaciones concretas de la presente invención mediante los siguientes ejemplos no limitativos, con referencia a los dibujos adjuntos, en los cuales:

Figura 1 es una representación esquemática de una configuración rotor-estator de la técnica anterior que ilustra la degradación del entrehierro entre el rotor y el estator;

Figura 2 es una representación esquemática de un rotor/estator con imanes permanentes que ilustra algunos ejemplos de regiones delimitantes de un entrehierro para una mejor comprensión de realizaciones de la invención;

Figura 3 es una representación esquemática de una configuración rotor-estator de la técnica anterior y una configuración rotor-estator según una primera realización de la invención;

Figura 4 es una representación esquemática de la configuración rotor-estator de la técnica anterior mostrada en la Figura 3 y de una configuración rotor-estator según una segunda realización de la invención;

Figura 5 es una representación esquemática de la configuración rotor-estator de la técnica anterior mostrada en la Figura 3 y de una configuración rotor-estator según una tercera realización de la invención;

Figura 6 es una representación esquemática de la configuración rotor-estator de la técnica anterior mostrada en la Figura 3 y de una configuración rotor-estator según una cuarta realización de la invención;

Figura 7 es una representación esquemática de otra configuración rotor-estator de la técnica anterior y de una configuración rotor-estator según una quinta realización de la invención;

Figura 8 es una representación esquemática de algunos aspectos estructurales de una primera realización del procedimiento de optimización de un entrehierro;

Figura 9 es una representación esquemática de algunos aspectos cuantitativos de dicha primera realización del procedimiento de optimización del entrehierro; y

Figura 10 es una representación esquemática de algunos aspectos de discretización de una segunda realización del procedimiento de optimización del entrehierro.

5

Descripción de realizaciones de la invención

En las siguientes descripciones, se exponen numerosos detalles específicos para proporcionar un profundo conocimiento de la presente invención. Se entenderá, no obstante, por parte de los expertos en la materia, que la presente invención podrá ser llevada a la práctica sin algunos o todos estos detalles específicos. En otros casos, no se han descrito en detalle elementos bien conocidos para no complicar innecesariamente la descripción de la presente invención.

10

La Figura 1 describe esquemáticamente una configuración rotor-estator de la técnica anterior en la situación por defecto (ausencia de cargas operacionales) y en la situación de carga (presencia de cargas operacionales), produciendo dicha situación de carga algunas deformaciones en el rotor/estator. El objetivo principal de esta Figura 1 es proporcionar una buena comprensión del problema que se resuelve usando varias realizaciones de la presente invención.

15

Las Figuras, 1a, 1b, 1c y 1d muestran una estructura interior 101,102,103/101',102',103 y una estructura exterior 100. Las configuraciones rotor-estator más comunes son aquellas en las que la estructura interior 101,102,103/101',102',103 es el rotor (es decir, configurada para rotar con respecto a un eje de rotación 110) y la estructura exterior 100 es el estator (es decir, configurada para permanecer estacionaria). Sin embargo, debe tenerse en cuenta que también son posibles configuraciones rotor-estator en las que la estructura interior 101,102,103/101',102',103 es el estator y la estructura exterior 100 es el rotor.

20

25

Por razones de simplicidad, en las siguientes descripciones de realizaciones, la estructura interior 101,102,103/101',102',103 es siempre el rotor y la estructura exterior 100 es siempre el estator. No obstante, debe tenerse en cuenta que en todas las realizaciones la estructura interior 101,102,103/101',102',103 puede ser el estator y la estructura exterior 100 puede ser el rotor.

30

La Figura 1a se refiere a una vista frontal, en la dirección del eje de rotación 110, de la configuración rotor-estator en la situación por defecto. La Figura 1b se refiere a una sección transversal de acuerdo con el plano indicado en la Figura 1a mediante A y A'. La Figura 1c se refiere a la vista de la Figura 1a pero reflejando deformaciones sufridas por el rotor/estator en la situación de carga. Y la Figura 1d se refiere a la vista de la Figura 1b pero incluyendo deformaciones del rotor/estator debidas a cargas operacionales.

35

La vista frontal de la Figura 1a muestra un entrehierro (air gap) 104 entre una región delimitante 100 del estator y una región delimitante 101,102 del rotor (el concepto de región delimitante en el sentido de la presente invención será explicado en descripciones posteriores con referencia a la Figura 2). En la Figura 1a, el rotor comprende varios radios 103 cada uno de los cuales está unido a una zona 102 de la región delimitante 101,102 del rotor. La región delimitante 101,102 del rotor también comprende zonas 101 que no están unidas a un radio 103. Las zonas 102 (unidas a un radio 103) y zonas 101 (no unidas a un radio 103) pueden sufrir diferentes niveles de deformación debido a cargas operacionales, dado que los radios 103 retienen sustancialmente las zonas 102 cuando se tira de ellas bajo la influencia de cargas operacionales, mientras que las zonas 101 no son retenidas por radio 103 alguno. La Figura 1a también muestra que el entrehierro 104 es sustancialmente uniforme a lo largo de toda la circunferencia (360°). En este sentido, la Figura 1a refleja que la anchura 106 del entrehierro 104 en las zonas 102 (unidas a un radio 103) es sustancialmente la misma que la anchura 105 del entrehierro 104 en las zonas 101 (no unidas a un radio 103).

40

45

50

La Figura 1b ilustra otra vista del entrehierro 104 entre la región delimitante 100 del estator y la región delimitante 101', 102' del rotor.

La Figura 1b muestra un elemento de soporte 107 que sostiene la región delimitante 100 del estator de manera que la región delimitante 100 del estator comprende zonas 109 más cercanas al elemento de soporte 107 y zonas 108 más alejadas del elemento de soporte 107. Las zonas 109 son retenidas más fuertemente que las zonas 108, de modo que la deformación en las zonas más cercanas 109 es menor que la deformación en las zonas más alejadas 108. La Figura 1b también refleja que el entrehierro 104 es sustancialmente uniforme a lo largo de todo el entrehierro 104 (en esta vista particular).

55

60

La Figura 1c muestra la configuración de la Figura 1a deformada bajo el efecto de cargas operacionales. Por razones de simplicidad, no se muestra deformación alguna de la región delimitante 100 del rotor, es decir, se asume

que la forma circular de la región delimitante 100 de 1a permanece inalterada. La Figura 1c muestra que la anchura 105 del entrehierro 104 en las zonas 101 (no retenidas por un radio 103) es sustancialmente reducida con respecto a la anchura 105 mostrada en 1a, mientras que la anchura 106 del entrehierro 104 en las zonas 102 (retenidas por un radio 103) también es reducida con respecto a la anchura 106 mostrada en 1a pero no tanto como la anchura 105 en las zonas 101 (no retenidas por un radio 103). En conclusión, el entrehierro 104 uniforme de 1a se convierte en el entrehierro 104 no uniforme (es decir, degradado) de 1c como consecuencia del efecto de las cargas operacionales.

La Figura 1d muestra la configuración de la vista 1b deformada bajo el efecto de cargas operacionales. La Figura 1d también muestra que la anchura 105' del entrehierro 104 en las zonas 101' (no retenidas por un radio 103) es reducida significativamente con respecto a la anchura 105' mostrada en 1b, mientras que la anchura 106' del entrehierro 104 en las zonas 102' (retenidas por un radio 103) es también reducida con respecto a la anchura 106' mostrada en 1b pero no tanto como la anchura 105' en las zonas 101' (no retenidas por un radio 103). La Figura 1d también muestra como la región delimitante 100 se deforma de modo que las zonas más alejadas 108 se acercan más a la región delimitante 101',102' que las zonas menos alejadas 109, contribuyendo también dicha deformación de la región delimitante 100 a la degradación del entrehierro 104. Así, el entrehierro 104 uniforme de 1b se convierte en el entrehierro 104 no uniforme (o degradado) de 1d como consecuencia del efecto de las cargas operacionales. Dicha degradación del entrehierro 104 se puede producir tanto en la dirección axial (tal como se muestra en la Figura 1d) como en la dirección radial (según se muestra en la Figura 1c).

Las deformaciones reflejadas en las Figuras 1c y 1d pueden ser debidas a fuerzas de atracción causadas por fuerzas electromagnéticas entre el rotor y el estator, y al peso de las estructuras del rotor/estator en las que están comprendidas la región delimitante 100 y la región delimitante 101',102'. Además, el par del generador en funcionamiento puede contribuir también a deformar la configuración rotor-estator.

Por ejemplo, la Figura 1e muestra un ejemplo de fuerzas que podrían causar las deformaciones reflejadas en las Figuras 1c y 1d, en la cual 115 se refiere a una fuerza de atracción que actúa en la estructura superior (en esta vista particular) del estator, 116 se refiere al peso de dicha estructura superior del estator, y 117 se refiere a la fuerza resultante de sumar dicha fuerza de atracción 115 y dicho peso 116. La Figura 1e muestra además una fuerza de atracción 118 que está actuando en la estructura inferior (en esta vista particular) del estator, el peso 119 de dicha estructura inferior del estator, y la fuerza resultante 120 de sumar la fuerza de atracción 118 y el peso 119. No se muestran fuerzas que deforman el rotor por razones de simplicidad, pero éstas pueden ser concebidas fácilmente.

La Figura 1e también muestra que tanto la estructura superior como la inferior del estator se acercan al rotor, siendo consecuencia este hecho de que la fuerza más influyente en este caso es la fuerza de atracción 115, 118 y no el peso 116, 119. La Figura 1e también muestra que la anchura más pequeña 121 del entrehierro en la estructura rotor-estator superior es menor que la anchura más pequeña 122 del entrehierro en la estructura rotor-estator inferior. Esta diferencia es consecuencia de que la fuerza resultante 117 que acerca el estator al rotor en la estructura superior tiene un valor mayor que el de la fuerza resultante 120 que acerca el estator al rotor en la estructura inferior.

La Figura 2 es una representación esquemática de un rotor/estator con imanes permanentes que ilustra algunos ejemplos de regiones delimitantes de un entrehierro con el fin de facilitar la comprensión de las descripciones posteriores de realizaciones de la invención. En particular, la Figura 2a se refiere a una vista de una región delimitante circular 21 típica de la técnica anterior en la ausencia de cargas operacionales, mientras que las Figuras 2b y 2c se refieren a vistas respectivas de regiones delimitantes no circulares 24 y 26 también en la ausencia de cargas operacionales.

Las Figuras 2a y 2b y 2c se refieren a vistas respectivas de un rotor similar al rotor mostrado en la Figura 1a, pero comprendiendo además imanes permanentes 20, más 22 en 2b y más 23 en 2c. Estas tres vistas 2a/2b/2c se muestran aquí para indicar la definición de entrehierro y de región delimitante del entrehierro en el sentido de la presente invención. En 2a/2b/2c, el rotor comprende algunos elementos (imanes 20/20, 22/20, 23) que causan una región delimitante ligeramente irregular (es decir, un entrehierro no constante debido a p.ej. espacios entre los imanes), pero dichas irregularidades pueden ser suavizadas conceptualmente de modo que se puede derivar fácilmente una región delimitante curvilínea 21/24/26.

En particular, todos los imanes permanentes 20 de 2a tienen sustancialmente el mismo tamaño y están uniformemente distribuidos a lo largo de los 360°, por lo que puede considerarse que constituyen una región delimitante curvilínea 21 con forma circular. La vista 2b es muy similar a la vista 2a con la única diferencia de que tiene un único imán más grande 22 que causa una región delimitante curvilínea 24 con una protuberancia local 25 (causada por dicho imán más grande 22). La vista 2c es muy similar a la vista 2a con la única diferencia de que tiene un único imán más pequeño 23 que causa una región delimitante curvilínea 26 con una depresión local 27 (causada por dicho imán más pequeño 23).

Aún en referencia a la Figura 2, los elementos distorsionantes que causan regiones delimitantes ligeramente irregulares pueden comprender también devanados (p.ej. en generadores auto-excitados) o cualquier otro elemento saliente comprendido en el borde del rotor/estator. Por consiguiente, todos los principios explicados anteriormente, en relación con la Figura 2, para inferir fácilmente regiones delimitantes curvilíneas son de idéntica consideración con independencia del tipo de elementos que causen ligeras irregularidades en el borde del rotor/estator.

En relación con la Figura 3, las Figuras 3a y 3b muestran una configuración rotor-estator de la técnica anterior, y las Figuras 3c y 3d muestran una configuración rotor-estator según una primera realización de la invención. La Figura 3a se refiere a una sección de una configuración rotor-estator muy similar a la sección 111 de la Figura 1b, con la única diferencia de que la región delimitante 101', 102' del rotor está constituida por imanes permanentes 20. El aspecto más relevante de 3a es que representa la sustancial uniformidad del entrehierro 104 en la situación por defecto a lo largo de todo el entrehierro 104 (en esta vista particular). A este respecto, 3a refleja que la anchura 106' del entrehierro 104 en las zonas 109 más cercanas al elemento de soporte 107 y la anchura 105' del entrehierro 104 en las zonas 108 más alejadas del elemento de soporte 107 son sustancialmente la misma.

La Figura 3b muestra la configuración de la Figura 3a deformada bajo el efecto de cargas operacionales. Por razones de simplicidad, se asume que el rotor no se deforma porque p.ej. el rotor está muy reforzado mecánicamente y por lo tanto es muy rígido. La Figura 3b muestra como la región delimitante 100 del estator se puede deformar de tal manera que la anchura 105' del entrehierro 104 en las zonas más alejadas 108 es significativamente reducida en relación con la anchura 105' de 3a, mientras que la anchura 106' del entrehierro en las zonas más cercanas 109 también es reducida en relación a la anchura 106' de 3a pero no tanto como la anchura 105'. Así, la combinación de las Figuras 3a y 3b reflejan como las cargas operacionales pueden transformar el entrehierro uniforme 104 de 3a en el entrehierro degradado 104 de 3b.

La Figura 3c muestra una corrección de la configuración 3a según una primera realización de la invención, comprendiendo dicha realización la presencia de una o más láminas metálicas 30 entre alguno de los imanes 20 y la superficie del rotor sobre la cual dichos imanes 20 están fijados. El número y/o anchura de las láminas metálicas 30 insertadas puede depender de las deformaciones anticipadas (mostradas en la Figura 3b) del rotor y/o estator de manera que las cargas operacionales transformarán el entrehierro 104 no uniforme de 3c en el entrehierro 104 uniforme de 3d. En este ejemplo particular, el número y/o anchura de las láminas metálicas insertadas aumenta a medida que disminuye la proximidad del correspondiente imán 20 con respecto al elemento de soporte 107. Concretamente, 3c muestra que la anchura 105' del entrehierro 104 en las zonas 108 más alejadas no es reducida en la misma medida que en las zonas 109 más próximas (incluso nada reducida), en comparación con el entrehierro mostrado en la Figura 3a.

La Figura 3d muestra como unas distorsiones intencionadas (protuberancias debidas a la presencia de láminas metálicas 30) en el rotor/estator en la situación por defecto conducen a la uniformidad del entrehierro 104 de 3d en la presencia de cargas operacionales. Como se muestra en la Figura 3d, la anchura del entrehierro 104 final es sustancialmente la misma a lo largo de todo el entrehierro 104 (en esta vista particular) en presencia de cargas operacionales. La Figura 3d muestra que la anchura 105' del entrehierro 104 en las zonas más alejadas 108 y la anchura 106' en las zonas más cercanas 109 son sustancialmente la misma cuando las cargas operacionales están presentes.

La presencia de láminas metálicas 30 (tal como se muestra p.ej. en las Figuras 3c y 3d) puede causar una protuberancia local en la región delimitante 101',102' del rotor, que puede causar al mismo tiempo una sección transversal no circular y/o no constante de toda la región delimitante 101',102' del rotor (en sus 360°) con respecto al eje de rotación. En realizaciones en las que los imanes están fijados al rotor a través de bases de soporte, se pueden generar protuberancias locales mediante la inserción de láminas metálicas entre dichos imanes y sus bases de soporte relacionadas y/o entre las bases de soporte y la superficie del rotor sobre la cual las bases de soporte están originalmente fijadas.

Las deformaciones del estator debidas a cargas operacionales reflejadas en las Figuras 3b y 3d pueden ser de la misma naturaleza que las deformaciones del estator mostradas en las Figuras 1d y 1e. A este respecto, la Figura 3e muestra una fuerza de atracción 315 que actúa en la estructura superior (en esta vista particular) del estator, el peso 316 de dicha estructura superior del estator, y la fuerza resultante 317 de sumar la fuerza de atracción 315 y el peso 316. La Figura 3e muestra además una fuerza de atracción 318 que actúa en la estructura inferior (en esta vista particular) del estator, el peso 319 de dicha estructura inferior del estator, y la fuerza resultante 320 de sumar la fuerza de atracción 318 y el peso 319. Tanto la fuerza resultante 317 en la estructura superior como la fuerza resultante 320 en la estructura inferior hacen que la región delimitante 100 del estator se acerque a la región delimitante 101', 102' del rotor, según se ilustra en la Figura 3e.

La Figura 4 es una representación esquemática de la configuración rotor-estator de la técnica anterior mostrada en la Figura 3 (las Figuras 4a y 4b son idénticas a las Figuras 3a y 3b respectivamente) y una configuración rotor-estator particular de acuerdo con una segunda realización de la invención. La Figura 4c muestra dicha configuración rotor-estator particular de acuerdo con las deformaciones anticipadas (mostradas en Figura 4b) de la configuración rotor-estator 4a de la técnica anterior debidas a cargas operacionales. En particular, 4c muestra como el estator está pre-deformado de forma intencionada con el objetivo de obtener el entrehierro 104 uniforme de 4d cuando las cargas operacionales están presentes.

Dicha pre-deformación del estator tiene el objetivo de alejar la región delimitante 100 del estator con respecto a la región delimitante 101', 102' del rotor, de tal modo que la anchura del entrehierro 104 aumenta a medida que aumenta la distancia con respecto al elemento de soporte 107 del estator. A este respecto, 4c muestra explícitamente que la anchura 105' del entrehierro 104 en zonas más alejadas aumenta en mayor medida con respecto a la anchura 105' de 4a, mientras que la anchura 106' del entrehierro 104 en zonas más cercanas 109 aumenta en menor medida con respecto a la anchura 106' de 4a.

Así, se puede derivar a partir de 4d que la configuración rotor-estator 4c representa una opción para aprovecharse de las deformaciones causadas por las cargas operacionales, con el objetivo de obtener finalmente el entrehierro 104 uniforme de 4d. Es decir, la pre-deformación intencionada del estator en la situación por defecto conduce a la uniformidad del entrehierro 104 de 4d en la situación de carga. Tal como se muestra en la Figura 4d, la anchura del entrehierro 104 final es sustancialmente la misma a lo largo de todo el entrehierro 104 (en esta vista particular) cuando las cargas operacionales están presentes.

Las deformaciones debidas a las cargas operacionales reflejadas en las Figuras 4b y 4d pueden ser las mismas que las deformaciones representadas en las Figuras 3b y 3d. El origen de dichas deformaciones está ilustrado en la Figura 4e (idéntica a la Figura 3e) y ha sido explicado en referencia a la Figura 3e. La pre-deformación del estator (según se muestra en las Figuras 4c y 4f) puede causar una sección transversal no constante y/o no circular de la región delimitante 100 del estator con respecto al eje de rotación, el cual, en esta vista particular, coincide con el eje de simetría del estator porque la configuración rotor-estator de la Figura 4 es una configuración coaxial.

Una alternativa a la pre-deformación del estator (tal como se muestra en 4c y 4f) podría ser la pre-deformación del rotor de acuerdo con las deformaciones anticipadas debidas a las cargas operacionales (mostradas en Figura 4b). Otra alternativa podría ser una combinación de pre-deformar el estator y pre-deformar el rotor. Cualquiera de dichas alternativas también permite potencialmente la obtención de un entrehierro uniforme similar al entrehierro 104 de la Figura 4d.

La Figura 5 es una representación esquemática de la configuración rotor-estator de la técnica anterior mostrada en la Figura 3 (las Figuras 5a y 5b son idénticas a las Figuras 3a y 3b respectivamente) y de una configuración rotor-estator particular según una tercera realización de la invención. La Figura 5c muestra dicha configuración rotor-estator particular de acuerdo con las deformaciones anticipadas (mostradas en 5b) de la configuración rotor-estator 5a de la técnica anterior debidas a cargas operacionales. Particularmente, 5c muestra como la superficie del rotor en la cual están fijados los imanes 20 está selectivamente mecanizada 50, 51 con el objetivo de obtener el entrehierro 104 uniforme de 5d cuando las cargas operacionales están presentes.

Dicho mecanizado selectivo 50, 51 de 5c tiene el objetivo de alejar la región delimitante 101',102' del rotor con respecto a la región delimitante 100 del estator, de tal manera que la anchura del entrehierro 104 aumenta a medida que aumenta la distancia con respecto al elemento de soporte 107 del estator. Por ejemplo, 5c muestra que la anchura 105' del entrehierro 104 en las zonas más alejadas 108 aumenta en gran medida con respecto a la anchura 105' de 5a, mientras que la anchura 106' del entrehierro 104 en zonas más cercanas 109 aumenta ligeramente (incluso no aumenta) con respecto a la anchura 106' de 5a.

Según se deriva de la Figura 5d, la configuración rotor-estator 5c representa una opción para aprovecharse de las deformaciones causadas por cargas operacionales para obtener finalmente el entrehierro 104 uniforme de 5d en la situación de carga. Es decir, unas distorsiones intencionadas (consecuencia de un mecanizado selectivo 50, 51) en el rotor/estator en la situación por defecto conducen a la uniformidad del entrehierro 104 de 5d en la presencia de cargas operacionales. Según se muestra en 5d, la anchura del entrehierro 104 final es sustancialmente la misma a lo largo de todo el entrehierro 104 (en esta vista particular) en presencia de cargas operacionales.

Las deformaciones debidas a cargas operacionales reflejadas en las Figuras 5b y 5d pueden ser las mismas que las deformaciones representadas en las Figuras 3b y 3d. El origen de dichas deformaciones está ilustrado en la Figura 5e (idéntica a la Figura 3e) y ha sido explicado en referencia a la Figura 3e.

El mecanizado selectivo 50, 51 de la superficie del rotor en la cual están fijados los imanes 20 (tal como se muestra p.ej. en las Figuras 5c y 5d) puede causar una depresión local en la región delimitante 101', 102' del rotor, que puede causar al mismo tiempo una sección transversal no circular y/o no constante de toda la región delimitante 101', 102' del rotor (en sus 360°) con respecto al eje de rotación.

Una alternativa al mecanizado selectivo 50, 51 de la superficie del rotor en la cual están fijados los imanes 20 (tal como se muestra en 5c y 5d), para causar depresiones locales, puede ser un mecanizado selectivo de los imanes 20 de acuerdo con las deformaciones anticipadas debidas a cargas operacionales (mostradas en Figura 5b). En el caso de que los imanes 20 estén fijados originalmente en el rotor a través de bases de soporte, otra alternativa podría ser un mecanizado selectivo de las bases de soporte. Otra alternativa podría ser cualquier posible combinación de las opciones antes mencionadas: mecanizado selectivo 50, 51 de la superficie del rotor en la que están fijados los imanes 20, mecanizado selectivo de los imanes, y mecanizado selectivo de las bases de soporte.

La Figura 6 es una representación esquemática de la configuración rotor-estator de la técnica anterior mostrada en la Figura 3 (las Figuras 6a y 6b son idénticas a las Figuras 3a y 3b respectivamente) y de una configuración rotor-estator particular según una cuarta realización de la invención. En este caso, 6a y 6b muestran además el eje de rotación 60 del rotor y el eje de simetría 61 del estator, siendo dichos ejes 60, 61 el mismo eje porque la configuración rotor-estator de 6a y 6b es una configuración coaxial. La Figura 6c muestra la configuración rotor-estator particular de acuerdo con las deformaciones anticipadas (mostradas en 6b) de la configuración rotor-estator 6a de la técnica anterior debidas a cargas operacionales. Particularmente, 6c muestra como el eje de rotación 60 está inclinado con respecto al eje de simetría 61 del estator con el objetivo de obtener el entrehierro 104 uniforme de 6d cuando las cargas operacionales están presentes.

La inclinación del eje de rotación 60 con respecto al eje de simetría 61 del estator tiene el objetivo de alejar la región delimitante 101', 102' del rotor con respecto a la región delimitante 100 del estator, de tal forma que la anchura del entrehierro 104 aumenta a medida que aumenta la distancia con respecto al elemento de soporte 107 del estator. Por ejemplo, 6c muestra que la anchura 105' del entrehierro 104 en zonas más alejadas 108 aumenta en gran medida con respecto a la anchura 105' de 6a, mientras que la anchura 106' del entrehierro 104 en zonas más cercanas 109 aumenta en menor medida o incluso es reducida con respecto a la anchura 106' de 6a.

Puede inferirse a partir de 6d que la configuración rotor-estator de 6c representa una opción para aprovecharse de las deformaciones causadas por cargas operacionales para obtener finalmente el entrehierro 104 uniforme de 6d en la situación de carga. Es decir, distorsiones intencionadas (causadas por la inclinación del eje de rotación 60 con respecto al eje de simetría 61 del estator) en la situación por defecto conducen a la uniformidad del entrehierro 104 de 6d en la presencia de cargas operacionales. Tal como se muestra en 6d, la anchura del entrehierro 104 final es sustancialmente la misma a lo largo de todo el entrehierro 104 (en esta vista particular) en la presencia de cargas operacionales.

Las deformaciones del estator debidas a las cargas operacionales reflejadas en las Figuras 6b y 6d pueden ser debidas principalmente al peso de las partes del estator que comprenden la región delimitante 100 del estator. La Figura 6e muestra una fuerza de atracción 615 que actúa en la estructura superior (en esta vista particular) del estator, el peso 616 de dicha estructura superior del estator, y la fuerza 617 resultante de sumar la fuerza de atracción 615 y el peso 616. La Figura 6e muestra además una fuerza de atracción 618 que actúa en la estructura inferior (en esta vista particular) del estator, el peso 619 de dicha estructura inferior del estator, y la fuerza 620 resultante de sumar la fuerza de atracción 618 y el peso 619.

La Figura 6e también muestra que la estructura superior del estator se acerca al rotor pero la estructura inferior del estator se aleja del rotor, siendo este hecho consecuencia de que las fuerzas más influyentes en este caso son los pesos 616, 619 y no las fuerzas de atracción 615, 618. La Figura 6f muestra que la inclinación del eje de rotación 60 con respecto al eje de simetría 61 del estator causa un entrehierro más uniforme tanto en la estructura rotor-estator superior como en la estructura rotor-estator inferior.

La inclinación del eje de rotación 60 con respecto al eje de simetría 61 del estator es una manera de generar una desalineación entre dichos ejes 60, 61. Otra opción para obtener una desalineación entre los ejes 60 y 61 podría ser el desplazamiento del eje de rotación 60 del rotor con respecto al eje de simetría 61 del estator. Y otra opción podría ser una combinación de la inclinación y el desplazamiento de uno de los ejes 60, 61 con respecto al otro eje 60, 61.

La desalineación del eje de rotación 60 del rotor con respecto al eje de simetría 61 del estator puede producir una sección transversal no constante de la región delimitante 101', 102' del rotor y/o una configuración rotor-estator no coaxial, lo que puede causar un entrehierro 104 sustancialmente uniforme (tal como se muestra en la Figura 6d) dependiendo de las deformaciones anticipadas (según se muestra en la Figura 6b) de la correspondiente configuración rotor-estator de la técnica anterior (según se muestra en 6a) debido a las cargas operacionales.

La Figura 7 es una representación esquemática de otra configuración rotor-estator de la técnica anterior y de una configuración rotor-estator particular según una quinta realización de la invención. Las Figuras 7a y 7b se refieren a una configuración rotor-estator muy similar a la configuración de las Figuras 3a y 3b, con la única diferencia de que cada imán permanente 20 está fijado al rotor a través de una base de soporte 70. La Figura 7c muestra la nueva configuración rotor-estator de acuerdo con las deformaciones anticipadas (mostradas en 7b) de la configuración rotor-estator 7a de la técnica anterior debidas a cargas operacionales. En particular, 7c muestra como las bases de soporte 70 están mecanizadas selectivamente, con el objetivo de obtener el entrehierro 104 uniforme de 7d cuando las cargas operacionales están presentes.

Este mecanizado selectivo de las bases de soporte puede producir un efecto muy similar al efecto mostrado en la Figura 5, la cual ilustra como unas distorsiones intencionadas basadas en mecanizar selectivamente la superficie del rotor en la cual están fijados los imanes permiten obtener un entrehierro uniforme en la situación de carga. Así, todos los principios y ventajas descritos previamente en referencia a la Figura 5 pueden ser aplicados también a este caso.

En resumen, pueden obtenerse diferentes realizaciones del generador de turbina eólica de la invención provocando que la región delimitante del estator y/o la región delimitante del rotor tengan, en la ausencia de cargas operacionales, una o más secciones transversales no circulares y/o una sección transversal no constante con respecto al eje de rotación del rotor; y/o provocando que el rotor y el estator constituyan, en la ausencia de cargas operacionales, una configuración no coaxial. Causando dichas secciones transversales no circulares y/o sección transversal no constante y/o estructura no coaxial que el entrehierro resultante de la presencia de cargas operacionales sea más uniforme que el entrehierro en la ausencia de cargas operacionales.

En lo que respecta al procedimiento de optimización de un entrehierro de la invención, la Figura 8 es una representación esquemática de algunos aspectos estructurales de una primera realización de dicho procedimiento de optimización del entrehierro. Esta realización del procedimiento se basa en el uso del procedimiento de elementos finitos o MEF (en inglés: Finite Element Method o FEM), cuya aplicación práctica es conocida a menudo como análisis de elementos finitos (en inglés, Finite Element Analysis o FEA).

Este ejemplo particular del procedimiento de optimización de un entrehierro, basado en un software MEF, comprende simular virtualmente la operación del rotor y del estator bajo algunas cargas operacionales, en el que el rotor y el estator son representados en la herramienta MEF a través de un rotor virtual y un estator virtual que constituyen un entrehierro virtual entre ellos. La Figura 8a muestra una vista 3D (tridimensional) del rotor virtual, mientras que se asume que el estator virtual (no mostrado por razones de simplicidad) completa una estructura concéntrica sustancialmente perfecta con el rotor virtual. La Figura 8b muestra una sección transversal, según el eje de rotación, de la representación MEF del rotor virtual en la situación por defecto, es decir, en la ausencia de cargas operacionales.

En este ejemplo del procedimiento de optimización, por razones de simplicidad, sólo se emula en la herramienta MEF una carga uniformemente distribuida de 23.500 kg/m² (aunque se podrían considerar diferentes magnitudes de carga). En algunas realizaciones, se pueden considerar diferentes tipos de cargas operacionales, como por ejemplo: el peso del rotor y/o del estator; y/o al menos una fuerza electromagnética entre el estator y el rotor; y/o el par causado por la rotación del rotor, etc. En realizaciones del procedimiento, estos diferentes tipos de cargas pueden ser simulados simultáneamente, o, en realizaciones alternativas, cada carga operacional puede ser simulada independientemente y los resultados de dichas simulaciones independientes pueden ser agrupados finalmente.

Una vez la simulación ha sido ejecutada, el entrehierro virtual resultante es comparado con un modelo de entrehierro predeterminado. Entonces, en el caso de que el entrehierro virtual resultante satisfaga el modelo de entrehierro en términos de tener una anchura entre una anchura mínima y una anchura máxima a lo largo de todo el entrehierro, se fuerza la satisfacción de una condición de finalización con el fin de evitar nuevas simulaciones. De lo contrario, en el caso de que el entrehierro virtual resultante no satisfaga el modelo de entrehierro, se calculan algunos ajustes y se aplican al rotor/estator virtual con el fin de que el rotor/estator virtual ajustado satisfaga el modelo de entrehierro. Dicho cálculo y aplicación de ajustes comprende calcular una corrección virtual del rotor virtual y/o del estator virtual para provocar que el entrehierro virtual satisfaga el modelo de entrehierro, y aplicar dicha corrección virtual al rotor virtual y/o al estator virtual para su consideración en simulaciones virtuales subsiguientes.

La Figura 8c muestra una sección transversal, según el eje de rotación, de la representación MEF del rotor virtual como resultado de la ejecución de una o más simulaciones (hasta la satisfacción de la condición de finalización). La sección transversal de 8c refleja que las zonas 101 (no unidas a un radio 103) pueden ser deformadas más fuertemente que las zonas 102 (unidas a un radio 103), de una manera muy similar a la manera reflejada en p.ej. la Figura 1c.

Una vez que el bucle que comprende la simulación de la operación, y el cálculo y la aplicación de ajustes ha finalizado (forzando la satisfacción de la condición de finalización), la corrección (o ajuste) virtual calculado es finalmente aplicado al rotor y/o al estator.

5 La Figura 8d ilustra una representación 3D del rotor virtual corregido, en la ausencia de cargas operacionales, como resultado de la aplicación de las correcciones virtuales calculadas al rotor virtual una vez que se ha satisfecho la condición de finalización. Dicha Figura 8d muestra distorsiones intencionadas 80 introducidas en zonas 102 (unidas a un radio 103) para compensar la mayor deformación sufrida por las zonas 101 (no unidas a un radio 103).
10 Comprendiendo cada una de dichas distorsiones intencionadas 80 la agregación de algunas láminas metálicas (dos en este caso particular) en cada zona 102 (unida a un radio 103).

La Figura 8e muestra una sección transversal, según el eje de rotación, de la representación MEF del rotor virtual, en la ausencia de cargas operacionales, resultante de la aplicación de las correcciones virtuales calculadas al rotor virtual una vez que se ha satisfecho la condición de finalización. En concreto, la Figura 8e muestra la agregación de láminas metálicas 80 en las zonas 102 (unidas a un radio 103) pero no en las zonas 101 (no unidas a un radio 103).
15

La Figura 8f muestra una sección transversal, según el eje de rotación, de la representación MEF del rotor virtual, en la presencia de cargas operacionales, como resultado de la aplicación de las correcciones virtuales calculadas al rotor virtual una vez que se ha satisfecho la condición de finalización. En concreto, la Figura 8f muestra la agregación de láminas metálicas 80 en las zonas 102 (unidas a un radio 103) pero no en las zonas 101 (no unidas a un radio 103).
20

Teniendo en cuenta tanto la Figura 8e como la Figura 8f, permiten concluir que las distorsiones/protuberancias 80 intencionadas aplicadas producen una sección transversal 8f en la situación de carga más cercana a un contorno circular que la sección transversal 8e en la situación por defecto. Es decir, las distorsiones/protuberancias 80 intencionadas producen un entrehierro en la situación de carga que es más uniforme que el entrehierro en la situación por defecto.
25

Además, la consideración de las Figuras 8c y 8f permite concluir además que las distorsiones/protuberancias 80 intencionadas aplicadas producen una sección transversal 8f (en la situación de carga) que se acerca más a un contorno circular que la sección transversal 8c (también en la situación de carga) sin tales distorsiones/protuberancias 80 intencionadas. En otras palabras, teniendo en cuenta que el estator completa una estructura concéntrica con el rotor, puede concluirse que las distorsiones/protuberancias 80 intencionadas causan un entrehierro (en la situación de carga) que es más uniforme que el entrehierro (también en la situación de carga) sin las distorsiones/protuberancias 80 intencionadas en el rotor.
30
35

Todos los principios estructurales sobre deformidades intencionadas comentados con respecto a las figuras que se refieren a realizaciones del generador de turbina eólica de la invención, se pueden aplicar también a las realizaciones del procedimiento de la invención. Por ejemplo: secciones transversales no circulares pueden ser debidas a protuberancias/depresiones locales, etc.
40

La Figura 9 es una representación esquemática de algunos aspectos cuantitativos de la realización para la cual se muestran algunos aspectos estructurales en la Figura 8. La Figura 9a se refiere a un gráfico que refleja la distancia en la dirección radial a lo largo de los 360° 900 entre el rotor distorsionado intencionadamente (según se muestra en Figura 8f) y el estator en la situación de carga, y la distancia en la dirección radial a lo largo de los 360° 901 entre el rotor original (no distorsionado intencionadamente, según se muestra en Figura 8c) y el estator en la situación de carga. Dicho gráfico 9a refleja claramente que la variación de la anchura del entrehierro a lo largo de los 360° es significativamente menor en la configuración del rotor distorsionado intencionadamente 900 con respecto a la configuración del rotor original (no distorsionado intencionadamente) 901 cuando las cargas operacionales están presentes.
45
50

La Figura 9b ofrece otra vista de la anchura del entrehierro a lo largo de los 360°, en la que 902 se refiere a la anchura relacionada con la configuración del rotor distorsionado intencionadamente 900, y 903 se refiere a la anchura relacionada con la configuración del rotor no distorsionado intencionadamente 901. La Figura 9b ofrece también una vista gráfica 904 de las distorsiones/protuberancias intencionadas 80 de la Figura 8 a lo largo de los 360°, correspondiendo cada una de dichas protuberancias intencionadas 80 a un pico (o valor máximo) en el gráfico 904 y a un valle (o valor mínimo) en el gráfico 903.
55

La Figura 10 es una representación esquemática de algunos aspectos de discretización de una segunda realización del procedimiento de optimización del entrehierro. En concreto, esta figura ilustra cómo se puede seccionar una vista de una configuración rotor-estator virtual (y su entrehierro virtual 104 relacionado) para calcular y aplicar con precisión las correcciones virtuales adecuadas al rotor/estator virtual. La Figura 10a muestra una vista de la
60

configuración rotor-estator virtual deformada bajo el efecto de cargas operacionales, siendo dicha vista muy similar a la vista 112 de la Figura 1d. La Figura 10b muestra un entrehierro virtual objetivo 1001 de acuerdo con un modelo de entrehierro predeterminado, y una región delimitante objetivo 1002 del rotor que permite obtener dicho entrehierro virtual objetivo 1001. Por razones de simplicidad, se asume en esta realización que no se aplica al estator corrección alguna de la región delimitante 100.

La Figura 10c muestra un ejemplo de cómo el entrehierro virtual 104 de la vista 10a puede ser dividido en una pluralidad de secciones 1003-1006 del entrehierro virtual de modo que cada sección 1003-1006 del entrehierro virtual está parcialmente delimitada por una sub-región de la región delimitante 1000 del rotor virtual y una sub-región de la región delimitante 100 del estator virtual. La Figura 10c también muestra el perfil 1019 de la región delimitante del estator virtual en la situación por defecto (es decir, sin deformaciones debidas a cargas operacionales), y una pluralidad de líneas de referencia 1031-1033 que definen las secciones 1003-1006. En este ejemplo particular, las líneas de referencia 1031-1033 son perpendiculares al perfil 1019 de la región delimitante no deformada del estator virtual de manera que todas las secciones 1003-1006 tienen la misma anchura.

La Figura 10d está centrada en una única sección virtual 1003 por razones de simplicidad, estando comprendido el entrehierro virtual de dicha sección virtual 1003 entre una sub-región virtual 1034 del estator y una sub-región virtual 1035 del rotor. La Figura 10d ilustra un posible modo de calcular una sub-corrección virtual 1012 para su aplicación a la sub-región virtual 1035 del rotor virtual con el fin de obtener una sub-región virtual objetivo 1036, con el objetivo de que la sección 1003 del entrehierro virtual satisfaga su sub-modelo de entrehierro relacionado de acuerdo con el modelo de entrehierro virtual 1001.

El modelo de entrehierro virtual puede comprender una anchura mínima y una anchura máxima, de modo que el entrehierro virtual satisface el modelo de entrehierro cuando la anchura del entrehierro virtual a lo largo de todo el entrehierro virtual se encuentra entre una anchura mínima y una anchura máxima según lo definido en el modelo de entrehierro. Cada sub-modelo de entrehierro virtual puede comprender una anchura mínima (la cual p.ej. puede ser igual a la anchura mínima de su modelo de entrehierro virtual relacionado más/menos una cierta tolerancia), y una anchura máxima (la cual p.ej. puede ser igual a la anchura máxima de su modelo de entrehierro virtual relacionado más/menos una cierta tolerancia), de modo que la sección de entrehierro virtual relacionada satisface el sub-modelo de entrehierro virtual cuando la anchura de la sección del entrehierro virtual a lo largo de toda la sección del entrehierro virtual se encuentra entre la anchura mínima y la anchura máxima del sub-modelo del entrehierro virtual.

En esta implementación concreta, se definen dos puntos de referencia 1021, 1022 para calcular la sub-corrección virtual. El punto de referencia 1021 es el punto de intersección de la línea de referencia 1031 con la sub-región virtual objetivo 1036, mientras que el punto de referencia 1022 es el punto de intersección de la línea de referencia 1032 con la sub-región virtual objetivo 1036.

La distancia 1008 entre el punto de referencia 1021 y el punto de intersección de la línea de referencia 1031 con la sub-región virtual 1034 del estator puede ser expresada mediante el siguiente cálculo:

$$1008 = (1017 - 1016) - (1018 + 1015);$$

en el que:

1017 corresponde a la distancia 113 de la Figura 1, es decir, el radio de la región (circular) delimitante del estator en la situación por defecto;

1018 corresponde a la distancia 114 de la Figura 1, es decir, el radio de la región (circular) delimitante del rotor en la situación por defecto;

1016 es la deformación del estator en la línea de referencia 1031 (distancia entre el punto de intersección de la línea de referencia 1031 con la sub-región virtual 1034 del estator y el punto de intersección de la línea de referencia 1031 con el perfil 1019 de la región delimitante del estator virtual en la situación por defecto); y

1015 es la deformación del rotor en la línea de referencia 1031 (distancia entre el punto de referencia 1021 y el punto de intersección de la línea de referencia 1031 con el perfil 1020 de la región delimitante del rotor virtual en la situación por defecto).

La distancia 1009 entre el punto de intersección de la línea de referencia 1032 con la sub-región virtual 1034 del estator y el punto de intersección de la línea de referencia 1032 con la sub-región virtual 1035 del rotor puede ser expresada mediante el siguiente cálculo:

$$1009 = (1017 - 1014) - (1018 + 1013);$$

en el que:

1014 es la deformación del estator en la línea de referencia 1032 (distancia entre el punto de intersección de la línea de referencia 1032 con la sub-región virtual 1034 del estator y el punto de intersección de la línea de referencia 1032 con el perfil 1019 de la región delimitante del estator virtual en la situación por defecto); y

1013 es la deformación del rotor en la línea de referencia 1032 (distancia entre el punto de intersección de la línea de referencia 1032 con la sub-región virtual 1035 del rotor y el punto de intersección de la línea de referencia 1032 con el perfil 1020 de la región delimitante del rotor virtual en la situación por defecto).

5 La distancia 1010 entre el punto de intersección de la línea de referencia 1032 con la sub-región virtual 1034 del estator y el punto de referencia 1022 puede ser expresada mediante el siguiente cálculo:

$$1010 = 1009 - 1012;$$

en el que:

1009 = (1017 - 1014) - (1018 + 1013) según se ha explicado anteriormente; y

10 1012 es la sub-corrección virtual que se ha de calcular en relación al punto de referencia 1022.

Dado que la distancia 1010 es conocida del modelo de entrehierro predeterminado y la distancia 1009 se puede obtener a partir del cálculo (1017 - 1014) - (1018 + 1013), la sub-corrección virtual 1012 relacionada con el punto de referencia 1022 puede ser obtenida a partir del siguiente cálculo:

15
$$1022_sub_corrección = (1017 - 1014) - (1018 + 1013) - 1010.$$

De forma equivalente, la sub-corrección virtual relacionada con el punto de referencia 1021 puede ser obtenida mediante el siguiente cálculo:

20
$$1021_sub_corrección = (1017 - 1016) - (1018 + 1015) - 1010.$$

El resultado de promediar la sub-corrección virtual relacionada con el punto de referencia 1021 y la sub-corrección virtual 1012 relacionada con el punto de referencia 1022 se puede asumir como la sub-corrección virtual relacionada con la sección virtual 1003. Es decir, la sub-corrección virtual relacionada con la sección virtual 1003 se puede obtener mediante el siguiente cálculo:

25
$$1003_sub_corrección = (1021_sub_corrección + 1022_sub_corrección) / 2.$$

Todos los cálculos descritos previamente enfocados a obtener una sub-corrección virtual relacionada con una sección de entrehierro virtual, pueden ser aplicados a cada una de las secciones definidas 1003-1006, de modo que se puede obtener una sub-corrección virtual concreta para cada una de las secciones 1003-1006. Por ejemplo, la Figura 10e muestra la sub-corrección virtual 1023 relacionada con la sección 1003, y la sub-corrección virtual 1024 relacionada con la sección 1004. Esta figura también muestra que se puede obtener un punto medio entre cada par de sub-correcciones relacionadas con secciones contiguas; por ejemplo, 1026 es el punto medio entre la sub-corrección 1023 (de la sección 1003) y la sub-corrección 1024 (de la sección 1004). Una vez se han obtenido todos los puntos medios 1025-1027 para todos los pares de secciones contiguas, puede asumirse una línea recta entre cada par de puntos medios contiguos. Por ejemplo, la Figura 10e muestra una línea recta 1029 entre los puntos medios 1025 y 1026, y una línea recta 1030 entre los puntos medios 1026 y 1027.

En el caso particular de la línea recta 1029, se puede obtener la inclinación 1037 de dicha línea 1029 por medio del siguiente cálculo:

40
$$1037 = 1028 / anchura_1003;$$

en el que:

1028 es la mitad de la sub-corrección virtual 1012 relacionada con el punto de referencia 1022 (1028 = 1012 / 2);

y

anchura_1003 es la anchura de la sección virtual 1003.

45 La inclinación de cada línea recta 1029-1030 se puede calcular mediante la aplicación de los mismos principios y cálculos descritos en el párrafo anterior en referencia a la sección virtual 1003. Todas las líneas rectas constituyen en conjunto una línea global (probablemente no recta) que debería tener un perfil similar al perfil de la región delimitante objetivo 1002 (de la Figura 10b). La proximidad de esta línea global con respecto a la región delimitante 1002 será mayor cuanto mayor sea el número de secciones definidas y menor sea su anchura. Es decir, la fiabilidad de obtener la región delimitante objetivo 1002 será más y más exacta cuanto mayor sea el número de secciones y menor sea la anchura de dichas secciones.

55 Todos los cálculos descritos en referencia a la Figura 10 se pueden implementar usando p.ej. una herramienta MEF, según se ha explicado en relación a las Figuras 8 y 9, puesto que este tipo de herramientas son muy apropiadas para realizar este tipo de procesamiento de datos.

60 Alternativamente a las simulaciones virtuales basadas en un rotor/estator virtual y un entrehierro virtual entre ellos, se pueden aplicar simulaciones basadas en prototipos fundamentadas en un prototipo de rotor/estator y un prototipo de entrehierro entre ellos para obtener los mismos resultados o similares.

5 Aunque esta invención ha sido divulgada en el contexto de ciertas realizaciones preferidas y ejemplos, se entenderá por parte de los expertos en la materia que la presente invención se extiende más allá de las realizaciones específicamente divulgadas a otras realizaciones alternativas y/o usos de la invención y modificaciones y equivalentes obvios de las mismas. Así, se pretende que el alcance de la presente invención divulgada en este documento no se debería limitar a las realizaciones concretas divulgadas y descritas previamente, sino que se debería determinar sólo por una lectura imparcial de las reivindicaciones que siguen.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Generador de turbina eólica que comprende un rotor, un estator y un entrehierro (104) entre una región delimitante (100) del estator y una región delimitante (101, 102) del rotor; en el que el rotor y/o el estator son deformables bajo cargas operacionales;
caracterizado porque el rotor y/o el estator están configurados de modo que el entrehierro (104) resultante de la presencia de cargas operacionales es más uniforme que el entrehierro (104) en la ausencia de cargas operacionales.
- 10 2. Generador de turbina eólica según la reivindicación 1, en el que la región delimitante (100) del estator y/o la región delimitante (101, 102) del rotor tienen, en la ausencia de cargas operacionales, una o más secciones transversales no circulares (24; 26) con respecto al eje de rotación (110) del rotor.
- 15 3. Generador de turbina eólica según la reivindicación 2, en el que una sección transversal no circular (24; 26) es debida a al menos uno de los siguientes tipos de distorsión:
 protuberancia local (25);
 depresión local (27); y
 pre-deformación del rotor/estator.
- 20 4. Generador de turbina eólica según la reivindicación 2, en el que una sección transversal no circular (24) es debida a al menos una protuberancia local (25); y en el que una protuberancia local (25) es debida a al menos uno de los siguientes tipos de disposiciones:
 presencia de una o más láminas metálicas (30) entre un imán (20) fijado en el rotor/estator y la superficie del rotor/estator sobre la que el imán (20) está fijado;
 25 presencia de una o más láminas metálicas (30) entre un imán (20) fijado en el rotor/estator a través de una base de soporte (70) y dicha base de soporte (70); y
 presencia de una o más láminas metálicas (30) entre una base de soporte (70) a través de la cual un imán (20) está fijado en el rotor/estator y la superficie del rotor/estator sobre la que está fijado el imán (20) a través de dicha base de soporte (70).
- 30 5. Generador de turbina eólica según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que la región delimitante (100) del estator y/o la región delimitante (101, 102) del rotor tienen, en la ausencia de cargas operacionales, una sección transversal no constante (24; 26) con respecto al eje de rotación (110) del rotor.
- 35 6. Generador de turbina eólica según la reivindicación 5, en el que la sección transversal no constante (24; 26) es debida a al menos uno de los siguientes tipos de distorsiones:
 protuberancia local (25);
 depresión local (27);
 pre-deformación del rotor/estator; e
 40 inclinación del eje de rotación (60) del rotor con respecto al eje de simetría (61) del estator.
7. Generador de turbina eólica según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que el rotor y el estator constituyen, en la ausencia de cargas operacionales, una configuración no coaxial debida a al menos uno de los siguientes tipos de distorsiones:
 45 inclinación del eje de rotación (60) del rotor con respecto al eje de simetría (61) del estator; y
 desplazamiento del eje de rotación (60) del rotor con respecto al eje de simetría (61) del estator.
- 50 8. Procedimiento para optimizar un entrehierro (104) entre una región delimitante (100) de un estator y una región delimitante (101, 102) de un rotor de un generador de turbina eólica, siendo dicho rotor y/o estator deformables bajo un conjunto de cargas operacionales y consistiendo dicha optimización en que el entrehierro (1001) resultante de la presencia del conjunto de cargas operacionales es más uniforme que el entrehierro (104) en la ausencia del conjunto de cargas operacionales; comprendiendo el procedimiento:
 repetir hasta que se satisface una condición de finalización:
 simular la operación del rotor y del estator bajo el conjunto de cargas operacionales, basándose dicha simulación
 55 en un rotor de prueba que representa el rotor, un estator de prueba que representa el estator y un entrehierro de prueba (104) entre dicho rotor de prueba y dicho estator de prueba;
 verificar si el entrehierro de prueba (104) satisface un modelo de entrehierro (1001);
 en caso de resultado positivo:
 causar la satisfacción de la condición de finalización;
 60 en caso de resultado negativo:
 calcular una corrección de prueba del rotor de prueba y/o del estator de prueba para adaptar el entrehierro de prueba (104) con el fin de que satisfaga el modelo de entrehierro (1001);

aplicar dicha corrección de prueba al rotor de prueba y/o al estator de prueba para su consideración en la siguiente simulación;

verificar si se ha producido una o más correcciones de prueba;

en caso de resultado positivo:

5 aplicar las correcciones de prueba al rotor y/o al estator.

9. Procedimiento según la reivindicación 8, en el que el modelo de entrehierro (1001) comprende una anchura mínima y una anchura máxima; y en el que el entrehierro de prueba (104) satisface el modelo de entrehierro (1001) cuando la anchura del entrehierro de prueba (104) a lo largo de todo el entrehierro de prueba (104) se encuentra entre la anchura mínima y la anchura máxima.

10. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 8 ó 9, en el que el conjunto de cargas operacionales comprende uno de los siguientes tipos de cargas:

peso del rotor y/o del estator;

15 al menos una fuerza electromagnética entre el estator y el rotor; y

par causado por la rotación del rotor.

11. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 8 ó 9, en el que el conjunto de cargas operacionales comprende al menos dos de los siguientes tipos de cargas operacionales:

20 peso del rotor y/o del estator;

al menos una fuerza electromagnética entre el estator y el rotor; y

par causado por la rotación del rotor;

y en el que simular la operación del rotor y del estator bajo el conjunto de cargas operacionales comprende simular simultáneamente todas las cargas operacionales del conjunto de cargas operacionales.

12. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 8 ó 9, en el que el conjunto de cargas operacionales comprende al menos dos de los siguientes tipos de cargas:

peso del rotor y/o del estator;

al menos una fuerza electromagnética entre el estator y el rotor; y

30 par causado por la rotación del rotor;

y en el que simular la operación del rotor y del estator bajo el conjunto de cargas operacionales comprende simular de forma independiente cada una de las cargas operacionales del conjunto de cargas operacionales y agrupar los resultados de dichas simulaciones independientes.

13. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 12, en el que la simulación es una simulación virtual, el rotor de prueba es un rotor virtual, el estator de prueba es un estator virtual, el entrehierro de prueba (104) es un entrehierro virtual, y la corrección de prueba es una corrección virtual.

14. Procedimiento según la reivindicación 13, en el que verificar si el entrehierro virtual (104) satisface un modelo de entrehierro (1001) comprende:

dividir el entrehierro virtual (104) en una pluralidad de secciones de entrehierro virtuales (1003-1006) de manera que cada sección de entrehierro virtual (1003-1006) está parcialmente delimitada por una sub-región (1035) del rotor virtual y una sub-región (1034) del estator virtual;

45 verificar, para cada sección de entrehierro virtual (1003-1006), si dicha sección de entrehierro virtual (1003-1006) satisface un sub-modelo de entrehierro de acuerdo con el modelo de entrehierro (1001);

en el que calcular una corrección virtual del rotor virtual y/o del estator virtual para adaptar el entrehierro virtual (104) para que satisfaga el modelo de entrehierro (1001) comprende:

para cada sección de entrehierro virtual (1003-1006) que no satisface su sub-modelo de entrehierro relacionado, calcular una sub-corrección virtual de la sub-región del rotor virtual (1035) y/o de la sub-región del estator virtual (1034) de la sección de entrehierro virtual (1003-1006) para adaptar la sección de entrehierro virtual (1003-1006) para que satisfaga su sub-modelo de entrehierro relacionado;

y en el que verificar si se han producido una o más correcciones virtuales comprende:

verificar si se han producido una o más sub-correcciones virtuales;

y en el que aplicar las correcciones virtuales al rotor y/o al estator comprende:

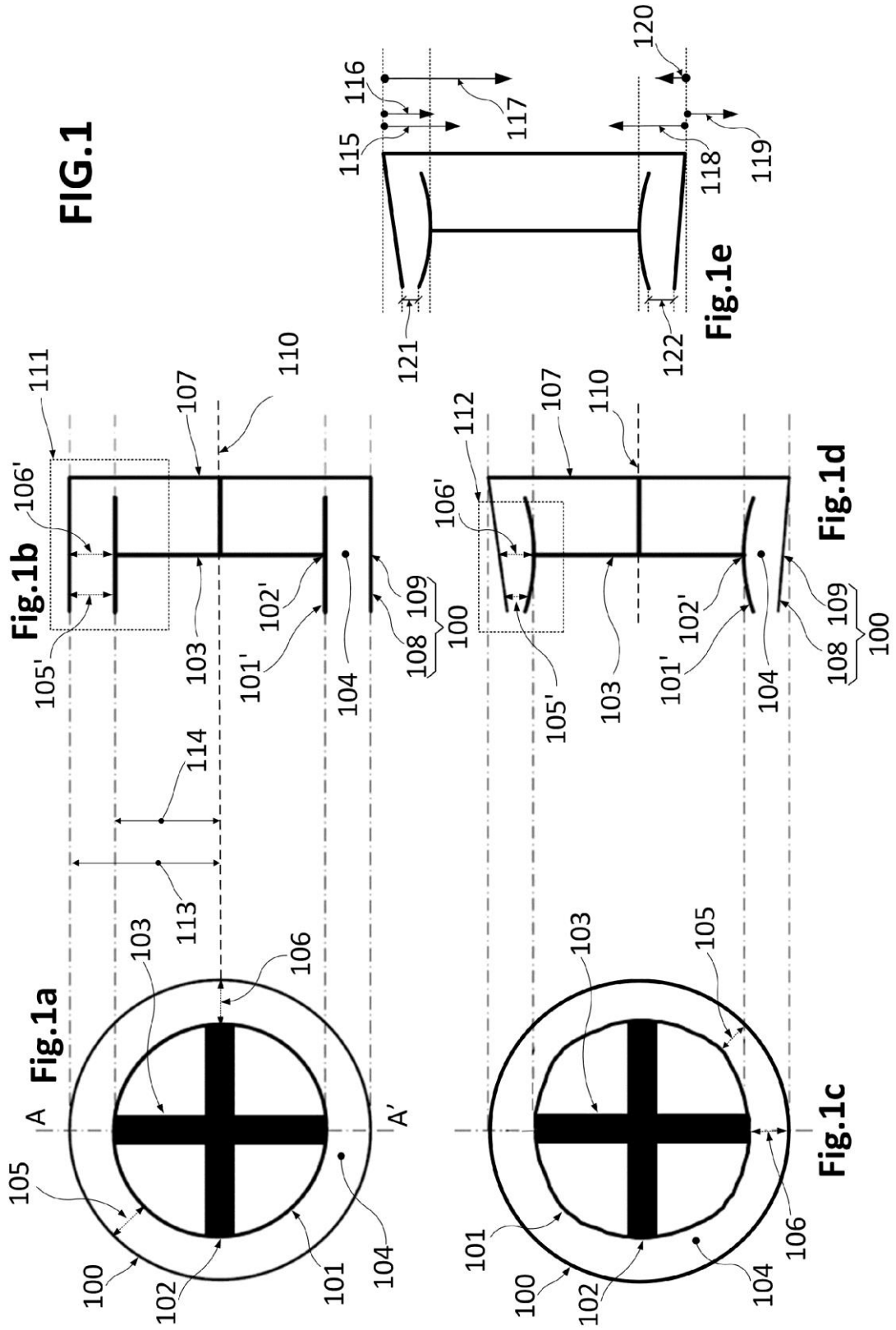
55 aplicar las sub-correcciones virtuales al rotor y/o al estator.

15. Procedimiento según la reivindicación 14, en el que cada sub-modelo de entrehierro comprende una anchura mínima y una anchura máxima; y en el que la sección de entrehierro virtual (1003-1006) satisface el sub-modelo de entrehierro cuando la anchura de la sección de entrehierro virtual (1003-1006) a lo largo de toda la sección de entrehierro virtual (1003-1006) se encuentra entre la anchura mínima y la anchura máxima.

60

16. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 12, en el que la simulación es una simulación basada en un prototipo, el rotor de prueba es un prototipo de rotor, el estator de prueba es un prototipo de estator, el entrehierro de prueba es un prototipo de entrehierro, y la corrección de prueba es una corrección basada en el prototipo.

5



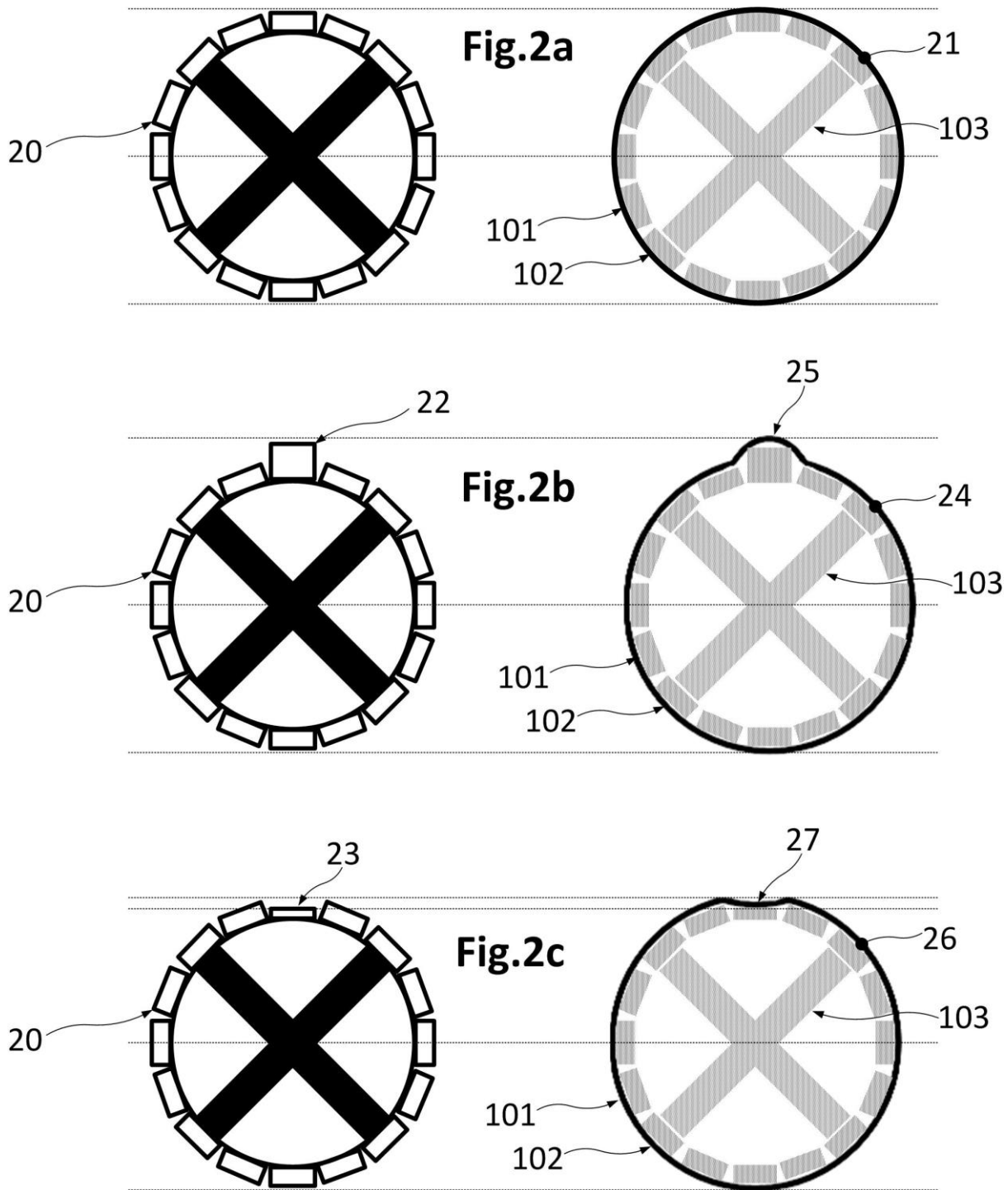
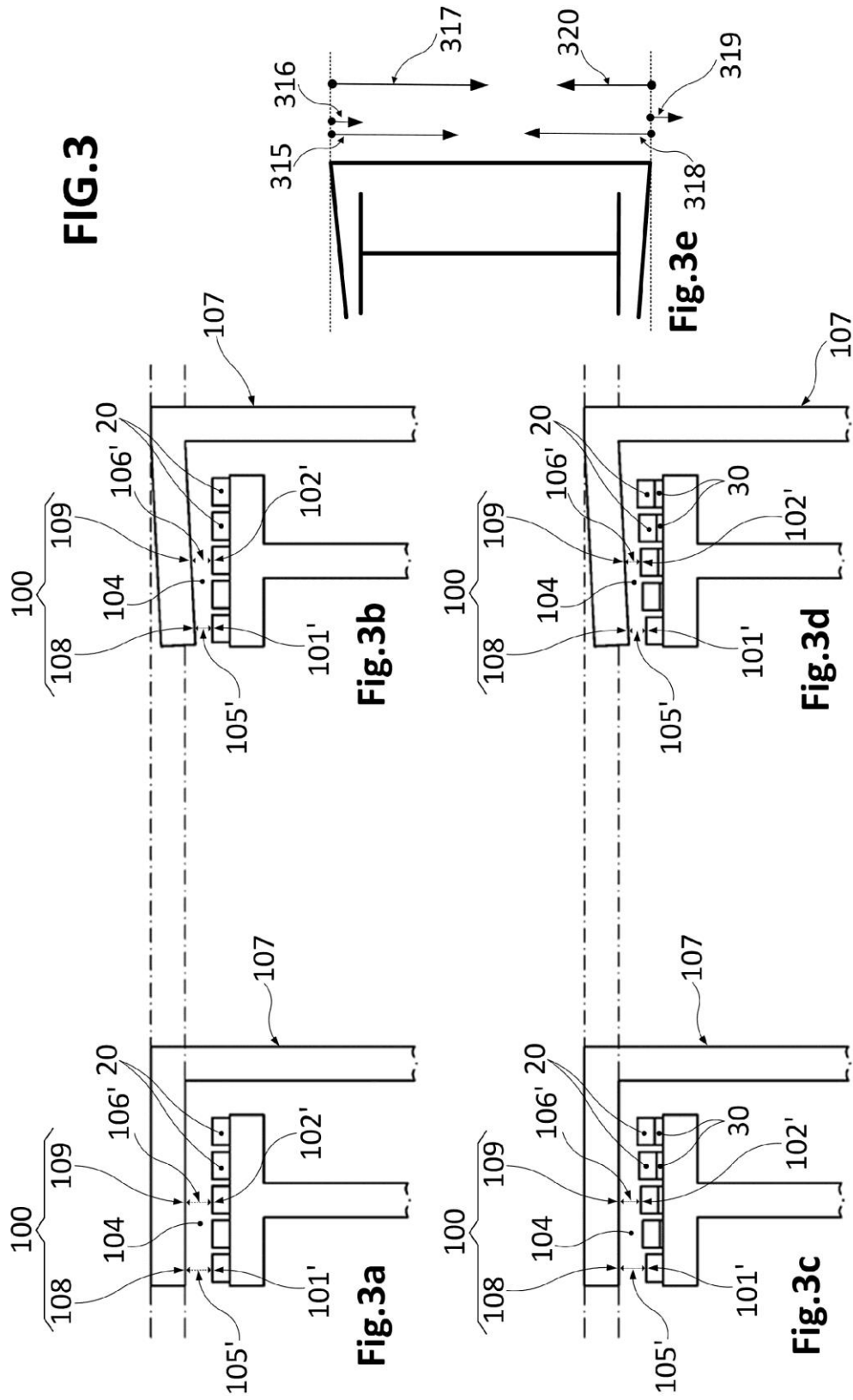
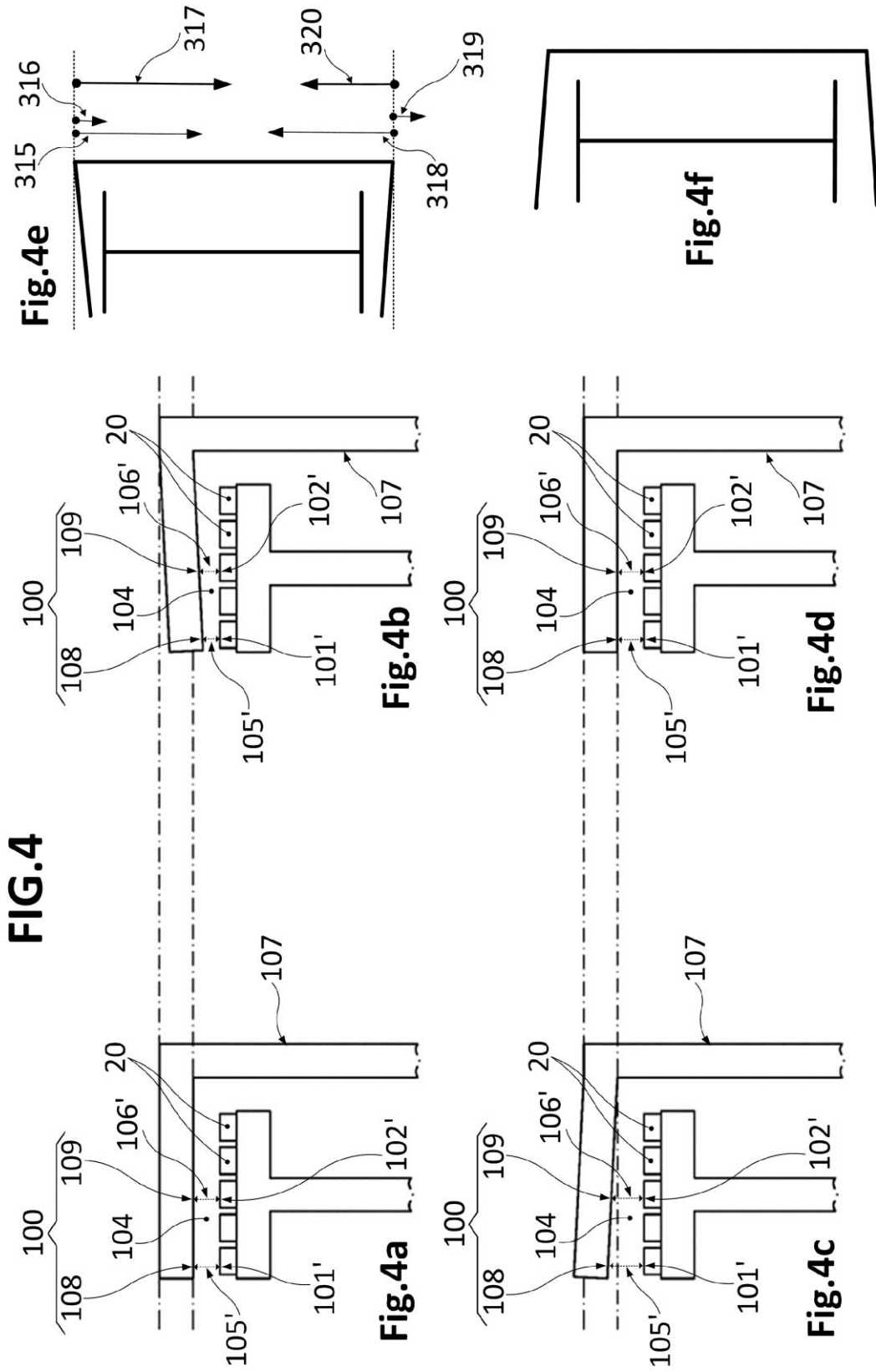
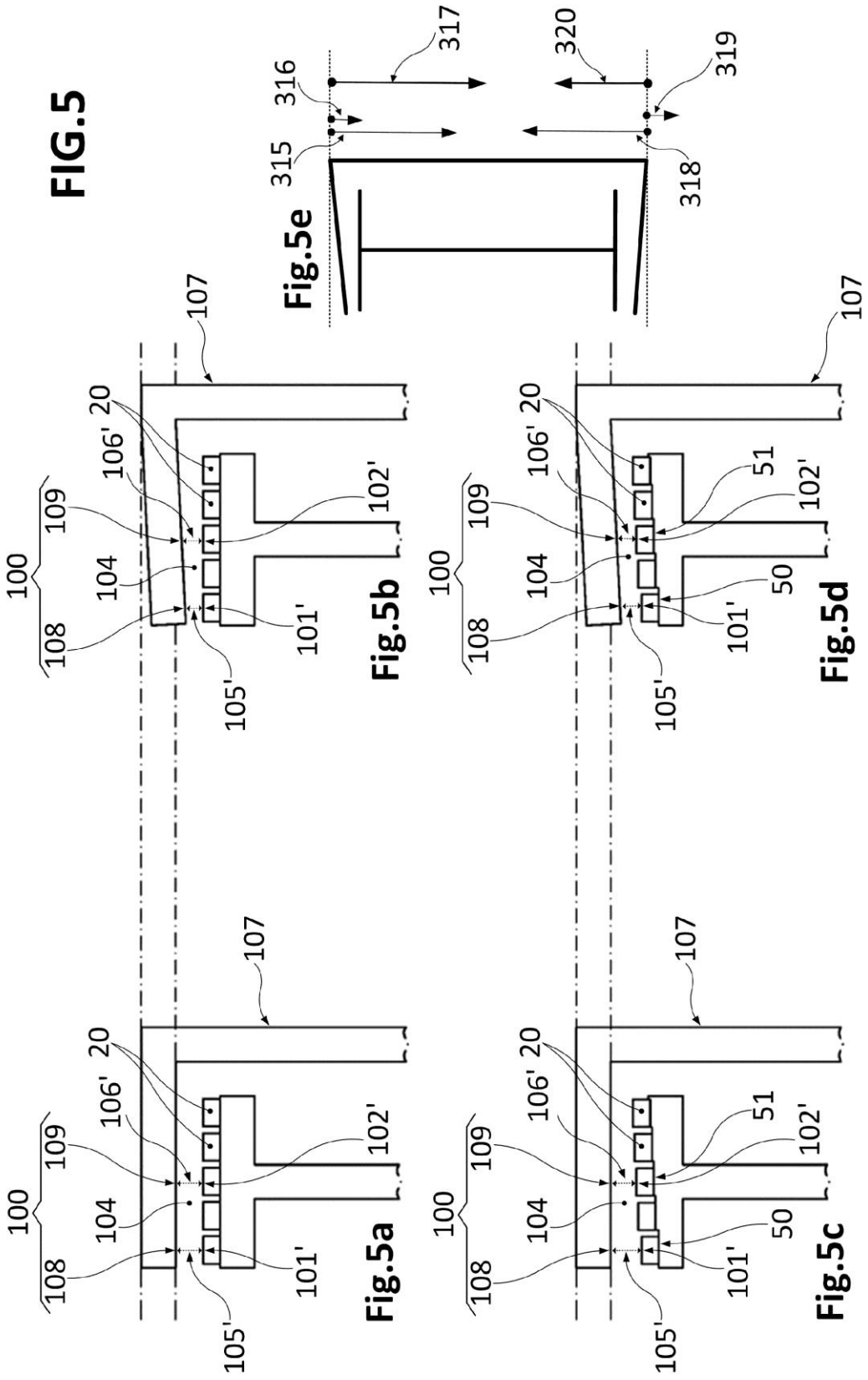
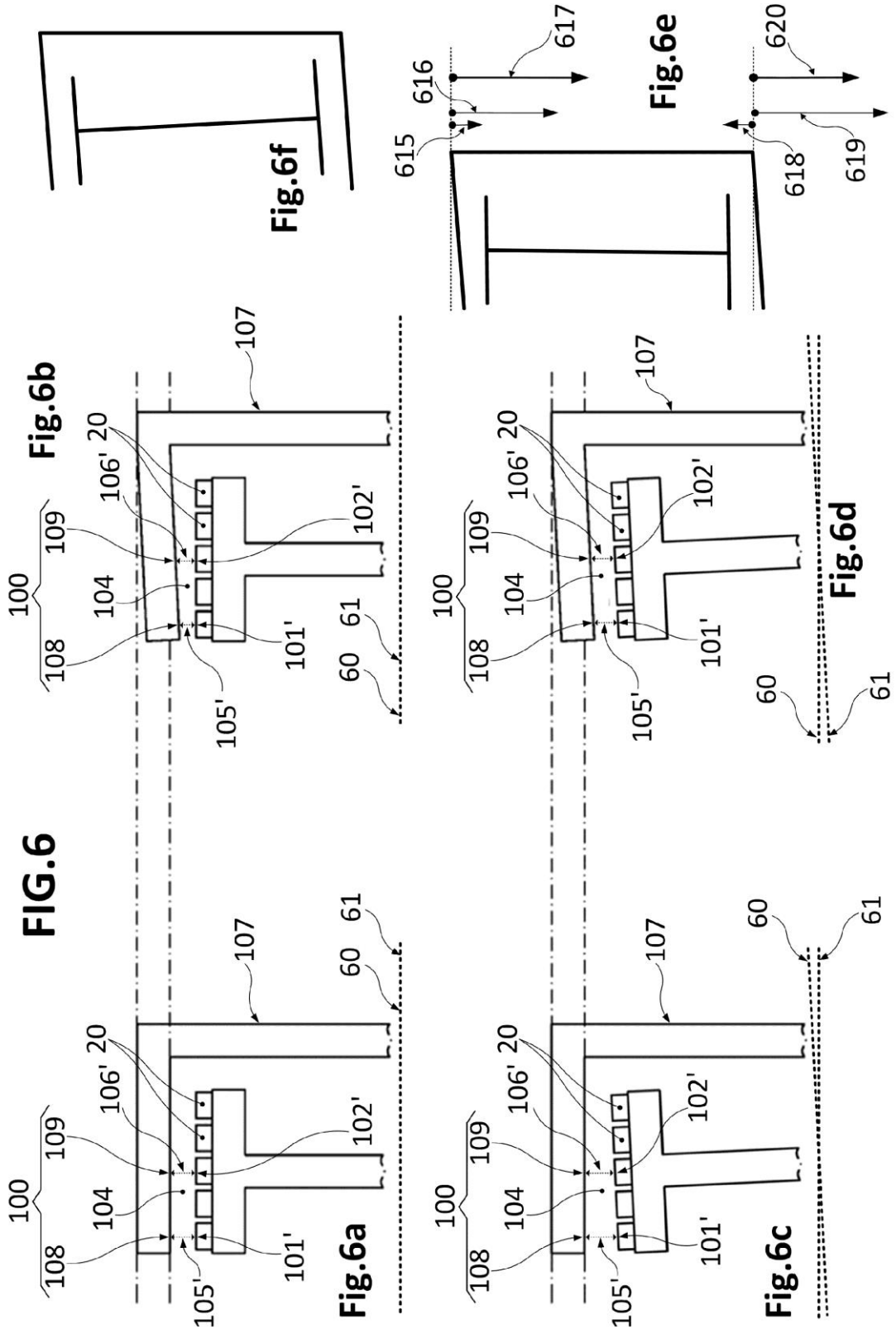


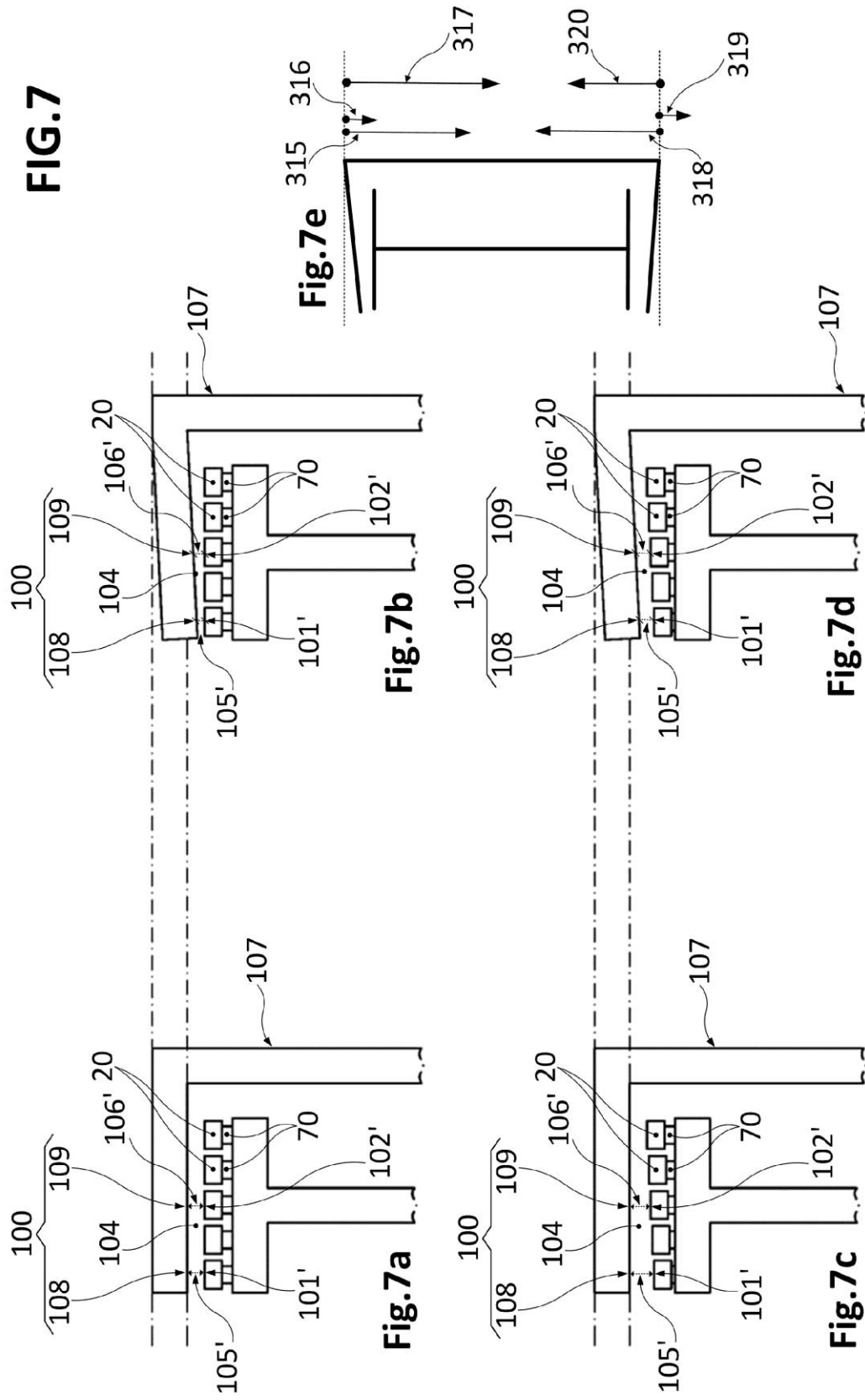
FIG.2

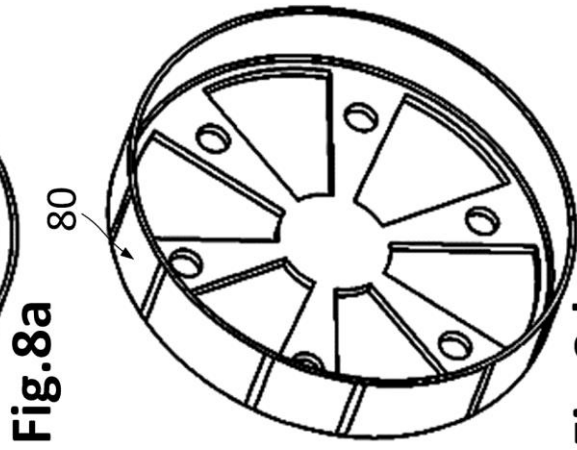
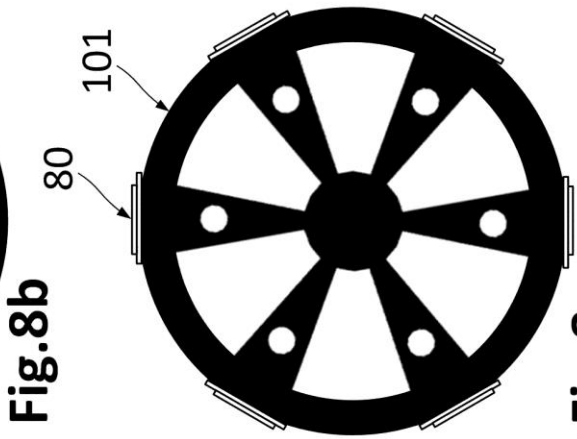
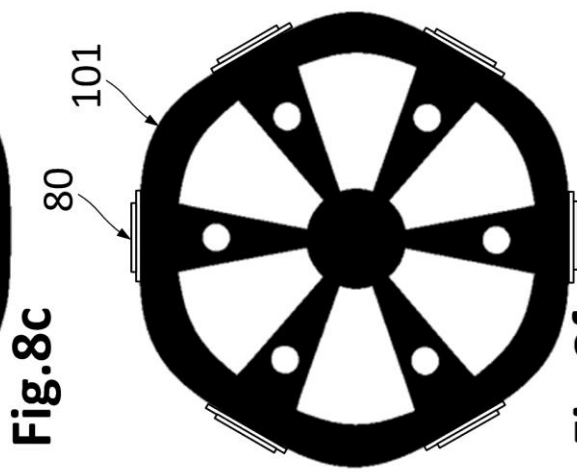
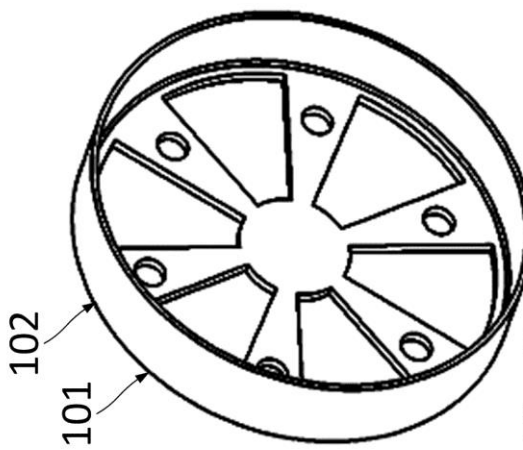
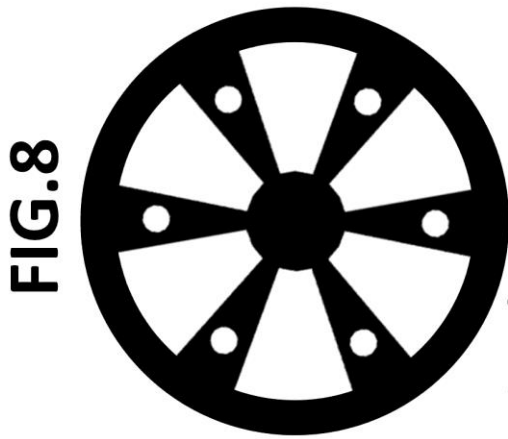
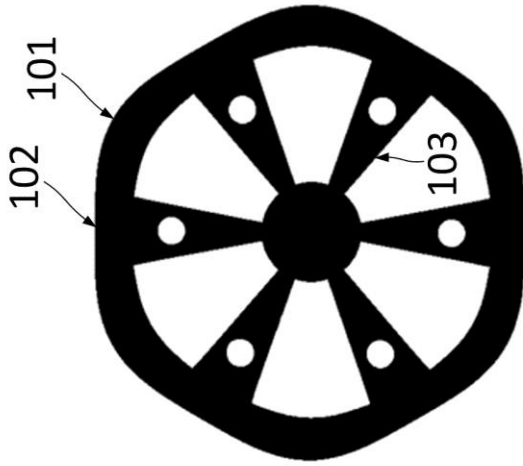












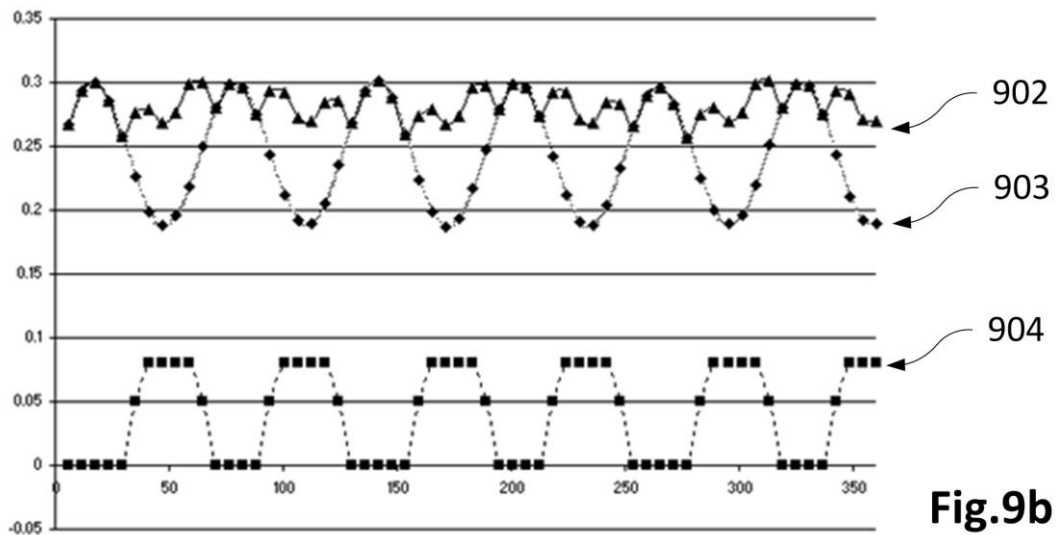
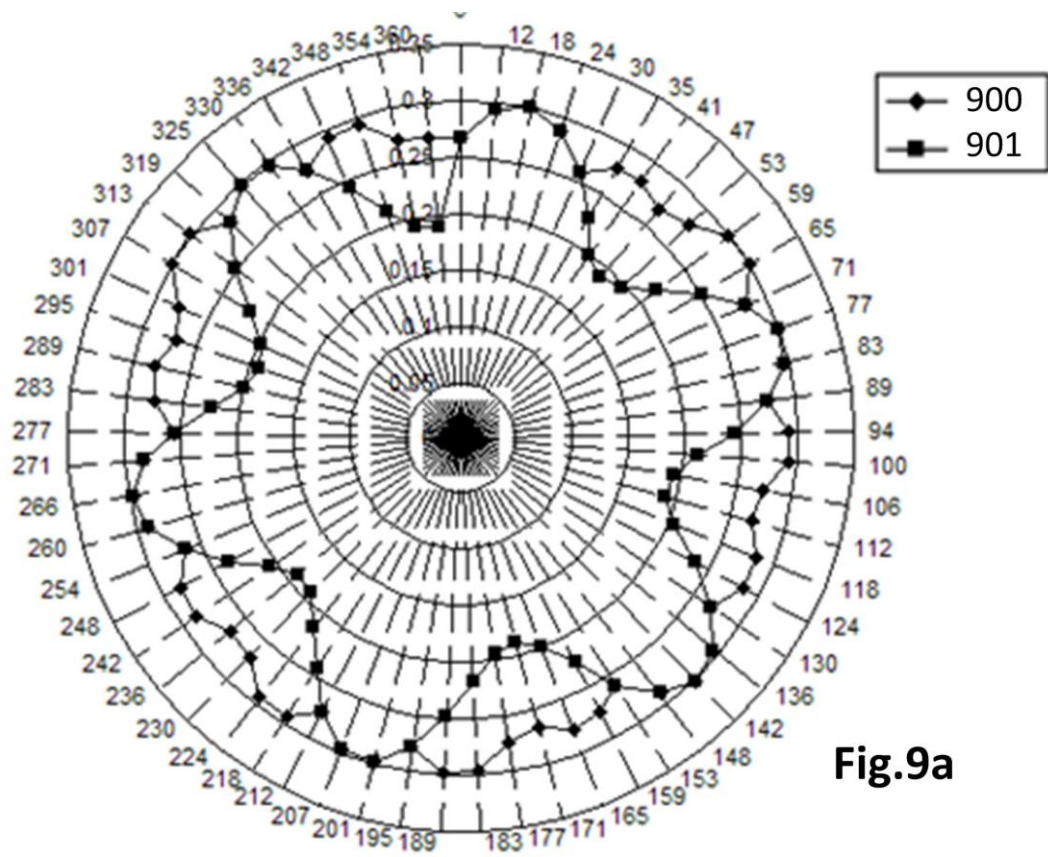


FIG.9

