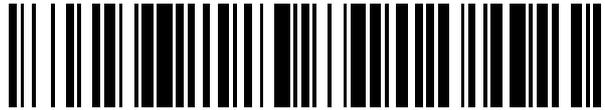


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 479 391**

51 Int. Cl.:

**H02K 37/14** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.08.2008 E 08795695 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.04.2014 EP 2324563**

54 Título: **Motores paso a paso de imán permanente**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**24.07.2014**

73 Titular/es:

**MOOG INC. (100.0%)  
A New York Corporation Jamison Road  
East Aurora, NY 14052, US**

72 Inventor/es:

**ZHAO, STEVE ZONG-PING**

74 Agente/Representante:

**VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro**

**ES 2 479 391 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**

Motores paso a paso de imán permanente

**5 Campo técnico**

La presente invención se refiere en general a los motores de indexación y paso a paso y, más particularmente, a motores paso a paso del tipo de imán permanente mejorados que aportan la posibilidad de un rendimiento mejorado (por ejemplo, el par) en un encapsulado más pequeño. La mejora del rendimiento se desprende de una ventaja doble obtenida a través del diseño inventivo que (a) incrementa las características de densidad del par motor y (b) mejora la sincronización y estabilidad del paso.

**Técnica antecedente**

Hay en general tres tipos de motores paso a paso: el tipo de reluctancia variable, el tipo híbrido y el tipo de imán permanente. Con el accionador apropiado (es decir, el controlador), los tres tipos ofrecen la capacidad de un amplio intervalo de movimientos y características del paso o indexación angular. Una referencia general sobre el control de motores paso a paso se puede hallar en línea en <http://www.cs.uiowa.edu/~jones/step/> por Douglas W. Jones. La presente invención se refiere a los motores paso a paso del tipo de imán permanente.

Tanto los motores paso a paso de tipo híbrido como los de tipo de imán permanente usan imán(es) permanente(s) en las estructuras móviles (por ejemplo, el rotor) y fijas (por ejemplo el estátor). Pueden ser indistinguibles desde el punto de vista del accionador del motor. Tradicionalmente, los motores paso a paso de tipo híbrido se construyen con un imán con forma de donut en el centro de dos polos del rotor, dando como resultado predominantemente un flujo magnético axial desde el imán a los dos polos del rotor. Varios diseños de motores paso a paso que implican imanes permanentes se derivan de la manipulación de los circuitos magnéticos de polos e imanes. Los motores paso a paso del tipo de imán permanente con los que esta invención está fundamentalmente implicada se muestran y describen representativamente por Schaeffer en las Patentes de Estados Unidos N° 4.190.779 y 4.315.171.

Los motores paso a paso del tipo de imán permanente descritos por Schaeffer tienen un gran número de dientes de estátor y un gran número de imanes radialmente magnetizados sobre el rotor para proporcionar pequeños ángulos de paso. Estos motores tienen la ventaja de pares de detención elevados tanto sin energización como energizados, longitudes axiales del motor relativamente cortas (es decir estilo torta), inercias de rotor pequeñas y soluciones de grandes orificios pasantes sobre el rotor. Estos motores han tenido un gran éxito en los últimos treinta años en las aplicaciones espaciales, tales como en los accionamientos de conjuntos de matrices de energía solar y mecanismos de guiado de antenas. Aplicaciones que han requerido masas ligeras, altos pares de detención con y sin energización, inercias de rotor pequeñas, ejes grandes y/o gran número de guarniciones de paso sobre el rotor.

Las aplicaciones avanzadas requieren diseños de motores paso a paso del estado de la técnica con más par, tamaño y masa reducidos, elevada densidad del par, pequeña inercia del rotor, coste reducido, pares de pico de detención con y sin energización constantes y pares de pico de funcionamiento constantes. Inherente al diseño del motor paso a paso es la preocupación por mantener la sincronización, esto es, la capacidad del motor y la carga de salida para mantener juntos la rotación en respuesta a cada señal de orden de entrada al motor. Dado que normalmente no hay realimentación que asegure que tiene lugar ésta operación síncrona del motor paso a paso y de la carga, la salida del motor paso a paso depende no solamente de la capacidad de producción del par, sino también de la estabilidad de la acción del motor en respuesta a las órdenes de paso mientras acciona la carga. Los motores paso a paso funcionan en bucle abierto, y de ese modo el sistema se preocupa sobre el modo en que las resonancias pueden mitigarse por medio de una estabilidad de motor mejorada. Por ello, existe la necesidad de mejorar tanto la densidad del par como la estabilidad del paso para mejorar la tecnología de motores paso a paso del estado de la técnica.

Otros motores paso a paso conocidos se describen en los documentos US 2007/013237, US 2002/153792 y US 6320347.

**55 Descripción de la invención**

De acuerdo con la invención, se proporciona un motor paso a paso del tipo de imán permanente de acuerdo con la reivindicación 1. Con una referencia entre paréntesis a las piezas, partes o superficies correspondientes de la realización descrita, con propósitos meramente de ilustración y no a modo de limitación, la presente invención proporciona globalmente un motor paso a paso del tipo de imán permanente mejorado (por ejemplo, 20) que tiene un elemento móvil y un elemento fijo. El motor mejorado incluye globalmente: un cierto número de polos magnéticos (por ejemplo, 21) sobre una superficie (por ejemplo, 24) de uno de los elementos. Los polos del rotor adyacentes son de polaridad opuesta. El número de polos es función de una constante, el número de fases y un intervalo de paso deseado. La invención incluye también un número de dientes equidistantes (por ejemplo, 22) sobre el otro de los elementos que se disponen para situarse enfrente de la superficie del otro elemento, teniendo cada uno de los dientes una pluralidad de dedos (por ejemplo, 23) dispuestos para situarse enfrente de la superficie de un elemento.

El número de dientes es un número entero que es función de una constante, el número de polos, el número de dedos sobre cada diente de estátor y el número de fases. Los dedos están separados entre sí de modo que los dedos sobre cualquier diente dado puedan alinearse con polos de la misma polaridad.

5 El elemento móvil puede ser un rotor que tenga una superficie exterior. El elemento fijo puede ser un estátor. El intervalo de paso deseado puede ser un ángulo de paso deseado. Los dientes pueden estar espaciados circularmente alrededor del estátor para situarse enfrente de la superficie exterior del rotor.

10 El número de polos del rotor para un accionador de motor unipolar debe ser un número entero par determinado a partir de la ecuación:

$$[1] \quad \text{ángulo de paso} = \frac{2 \times 360^\circ}{(\text{n}^\circ \text{ de fases}) \times (\text{n}^\circ \text{ polos del rotor})}$$

15 El número de polos del rotor para un accionador de motor bipolar debe ser un número entero par determinado a partir de la ecuación:

$$[2] \quad \text{ángulo de paso} = \frac{360^\circ}{(\text{n}^\circ \text{ de fases}) \times (\text{n}^\circ \text{ polos del rotor})}$$

20 Los polos de rotor pueden estar equidistantemente espaciados alrededor del soporte del rotor (24) que puede formarse a partir de acero(s) blando(s) magnético(s), material(es) de laminación eléctrica o una combinación de estos materiales.

El número máximo de dientes de estátor ( $m$ ) por fase puede determinarse mediante la ecuación:

$$25 \quad [3] \quad m \leq \text{int} \left( \frac{\text{n}^\circ \text{ polos del rotor}}{[2 \times (\text{n}^\circ \text{ de dedos por diente del estátor}) - 1] \times (\text{n}^\circ \text{ de fases})} \right)$$

en donde la expresión,  $\text{int}(x)$ , es la función entero que devuelve la parte entera de su argumento ( $x$ ). La distancia entre dos dedos contiguos de un diente de estátor dado puede ser tal que cuando los dedos se alinean con los polos del rotor, se alinearán con polos del rotor de la misma polaridad.

30 Los dientes está equidistantemente espaciado preferiblemente alrededor del estátor.

El estátor puede formarse con acero(s) magnético(s) blando(s) sólido(s), material(es) de laminación de acero eléctrico o una combinación de estos materiales.

35 El rotor y el estátor se pueden configurar y disponer de modo que para un motor de dos fases que tenga las fases A y B, cuando los dedos de la fase A sobre los dientes de estátor se alinean con los polos de rotor, cada dedo de la fase B estará alineado con el centro de dos polos de rotor contiguos.

40 El rotor y el estátor se pueden configurar y disponer de modo que para un motor de tres fases que tenga las fases A, B y C, cuando los dedos de estátor de la fase A se alinean con los polos del rotor de una polaridad, cada dedo de estátor de la fase B y de la fase C se alineará con polos del rotor de la polaridad opuesta. Si cada dedo del estátor de la fase B se alinea con el borde de ataque de un polo de rotor asociado, cada dedo de la fase C se alineará con el borde de salida del polo del rotor asociado. A la inversa, si cada dedo de estátor de la fase B se alinea con el borde de salida de un polo de rotor asociado, cada dedo de la fase C se alineará con el borde de ataque de un polo de rotor asociado.

45 El rotor y el estátor se pueden configurar y disponer de modo que para un motor de cuatro fases que tenga las fases A, B, C y D, cuando los dedos de la fase A sobre el diente de estátor se alinean con los polos del rotor, cada dedo de la fase B se alineará con el centro de dos polos contiguos, cada dedo de la fase C se alineará con los polos opuestos a aquellos alineados con la fase A y cada dedo de la fase D se alineará con los polos opuestos a aquellos alineados con la fase B.

En consecuencia, el objetivo general de la invención es proporcionar motores paso a paso mejorados.

55 Otro objetivo es proporcionar motores paso a paso mejorados del tipo de imán permanente.

Estos y otros objetivos y ventajas serán evidentes a partir de la especificación escrita antecedente y siguiente, los dibujos y las reivindicaciones adjuntas.

60

**Breve descripción de los dibujos**

La Fig. 1 es una vista en sección transversal esquemática de una primera forma de un motor paso a paso de tres cables, conectado en estrella, de tres fases, de 1,5° por paso, bipolar mejorado que tiene ochenta polos de rotor alternativamente magnetizados y veinticuatro dientes de estátor equidistantemente espaciados, con dos dedos en cada diente de estátor.

La Fig. 2 es una vista esquemática que muestra el diagrama de cableado físico sobre los dientes de estátor del motor paso a paso mostrado en la Fig. 1.

La Fig. 2A es una vista ampliada de la parte dentro del círculo señalado en la Fig. 2.

La Fig. 2B es un diagrama de cableado eléctrico esquemático para la forma mostrada en la Fig. 2.

La Fig. 2C muestra un rotor alternativo al mostrado en la Fig. 2A para una técnica de reducción de las variaciones de la intensidad magnética entre imanes para construir un rotor con un par de pico de detención sin energización, de pico de detención con energización y de pico de funcionamiento más constante.

La Fig. 3 es una vista en sección transversal esquemática de una segunda forma de un motor paso a paso con tres cables, conectado en estrella, trifásico, de 1,5° por paso, bipolar mejorado que tiene los mismos ochenta polos del rotor alternativamente magnetizados de la Fig. 1, pero con quince dientes de estátor equidistantemente espaciados, con tres dedos sobre cada diente de estátor.

La Fig. 3A es una vista ampliada de la parte dentro del círculo señalado en la Fig. 3.

La Fig. 4 es una vista en sección transversal esquemática de un motor paso a paso de dos o cuatro fases con ciento veinte polos del rotor alternadamente magnetizados y dieciséis dientes de estátor equidistantemente espaciados, y con tres dedos sobre cada diente de estátor.

La Fig. 4A es una vista ampliada de la parte dentro del círculo señalado en la Fig. 4.

La Fig. 5 es una vista esquemática que muestra el diagrama de cableado físico sobre el motor paso a paso de la Fig. 4 de un motor paso a paso de cinco cables, cuatro fases, 1,5° por paso, unipolar.

La Fig. 5A es una vista ampliada de la parte dentro del círculo señalado en la Fig. 5.

La Fig. 5B es un diagrama de cableado eléctrico esquemático para la forma mostrada en la Fig. 5.

La Fig. 6 es una vista esquemática que muestra el diagrama de cableado físico del mismo motor paso a paso de la Fig. 4 de un motor paso a paso de cuatro cables, dos fases, 1,5° por paso, bipolar.

La Fig. 6A es una vista ampliada de la parte dentro del círculo señalado en la Fig. 6.

La Fig. 6B es un diagrama de cableado eléctrico esquemático para la forma mostrada en la Fig. 6.

La Fig. 7 es una vista en sección transversal esquemática de otra forma de motor paso a paso de dos o cuatro fases, similar en general al de la Fig. 4, con ciento veinte polos del rotor alternativamente magnetizados y dieciséis dientes de estátor equidistantemente espaciados, pero con cuatro dedos sobre cada diente de estátor.

La Fig. 8 es una vista en sección transversal esquemática de un motor paso a paso de tres fases que tiene un rotor que es el mismo que el de las Figs. 4 y 7 con ciento veinte polos del rotor alternativamente magnetizados, pero con dieciocho dientes de estátor equidistantemente espaciados y con tres dedos sobre cada diente de estátor.

La Fig. 9 es un diagrama de cableado físico esquemático sobre los dientes de estátor como en la Fig. 8 de un motor paso a paso de tres cables, tres fases, 1,0° por paso, bipolar.

**Descripción de realizaciones preferidas**

En primer lugar, se debería entender claramente que los números de referencia iguales se pretende que identifiquen los mismos elementos estructurales, partes o superficies consistentemente a todo lo largo de las diversas figuras de los dibujos, dado que dichos elementos, partes o superficies se pueden describir y explicar adicionalmente por la especificación escrita completa, de cuya descripción detallada son parte integral. A menos que se indique lo contrario, los dibujos se pretende que sean leídos (por ejemplo, sombreados, disposición de piezas, proporción, grado, etc.) junto con la especificación, y han de considerarse una parte de la descripción escrita completa de la presente invención. Tal como se usan en la descripción a continuación, los términos “horizontal”, “vertical”, “izquierdo”, “derecho”, “arriba” y “abajo”, así como los adjetivos y adverbios derivados de los mismos (por ejemplo, “horizontalmente”, “a la derecha”, “hacia arriba”, etc.), se refieren simplemente a la orientación de la estructura ilustrada cuando la figura del dibujo particular mira hacia el lector. De modo similar, los términos “interiormente” y “exteriormente” se refieran en general a la orientación de una superficie relativa a su eje de extensión, o eje de rotación, lo que sea apropiado.

Para conseguir un par de funcionamiento elevado, mientras se mantienen pares de detención con y sin energización altos, se desarrolló un motor paso a paso del tipo de imán permanente tal como se describe en el presente documento.

Se describen un cierto número de formas diferentes del motor paso a paso mejorado. Una primera forma se describe en las Figs. 1, 2, 2A, 2B y 2C; una segunda en las Figs. 3 y 3A; una tercera en las Figs. 4 y 4A; una cuarta en las Figs. 5, 5A y 5B; una quinta en las Figs. 6, 6A y 6B; una sexta en las referencias a la primera y cuarta; una séptima en la Fig. 7; y una octava en las Figs. 8 y 9.

Estas diversas formas muestran cómo se puede conseguir un movimiento de indexación por paso de 1,5° para accionadores de motor bipolar o unipolar de dos, tres y cuatro fases. Estas formas muestran también cómo el mismo

rotor con ciento veinte polos alternativamente magnetizados se puede usar para motores de dos, tres y cuatro fases. Las formas individuales ilustran que un diente de estátor puede diseñarse para tener dos, tres, cuatro o más dedos. Las formas mostrarán también las secuencias de excitación del motor y devanados con cuatro, cinco, seis y ocho configuraciones de cables que se usan comúnmente en motores paso a paso del tipo de reluctancia variable, del tipo híbrido y del tipo de imán permanente.

Aunque sólo se ilustran en el presente documento rotores de ochenta y ciento veinte polos para motores paso a paso de dos, tres y cuatro fases, otras formas, tales como las listadas en la tabla 1, se entenderán fácilmente por los expertos en la técnica del diseño de motores paso a paso.

El número requerido de polos de imán sobre la superficie periférica exterior del rotor se determina por el ángulo de paso deseado, el número de fases y la configuración del accionador del motor. Los números de polos magnéticos norte y sur deben ser iguales. Los polos magnéticos norte y sur adyacentes se muestran esquemáticamente en las figuras de los dibujos adjuntos, con flechas radiales de los polos adyacentes apuntando hacia el interior y exterior, respectivamente, para indicar polaridades opuestas. Por lo tanto, debido a que los números de polos magnéticos norte y sur son iguales, el número total de polos del rotor debe ser un número entero par.

Para un accionador de motor bipolar, el número de polos del rotor debe ser un número entero par determinado a partir de la ecuación:

$$[4] \quad \text{ángulo de paso} = \frac{360^\circ}{(\text{n}^\circ \text{ de fases}) \times (\text{n}^\circ \text{ polos del rotor})}$$

Por ejemplo, para un motor paso a paso de tres fases, 1,5° por paso, que es accionado mediante un accionador bipolar, el número de polos del rotor requerido es:  $360^\circ / (3 \times 1,5^\circ) = 80$ . Este ejemplo se muestra en los diseños de las Figs. 1 y 3.

Para un motor paso a paso de dos fases, 1,5° por paso, que es accionado mediante un accionador bipolar, el número requerido de polos del rotor es:  $360^\circ / (2 \times 1,5^\circ) = 120$ . Este ejemplo se muestra en los diseños de la Fig. 4 y la 7.

Para un accionador del motor unipolar, el número de polos del rotor debe ser un número entero par determinado a partir de la ecuación:

$$[5] \quad \text{ángulo de paso} = \frac{2 \times 360^\circ}{(\text{n}^\circ \text{ de fases}) \times (\text{n}^\circ \text{ polos del rotor})}$$

Por ejemplo, para un motor paso a paso de cuatro fases, 1,5° por paso, que es accionado mediante un accionador unipolar, el número de polos del rotor requerido es:  $2 \times 360^\circ / (4 \times 1,5^\circ) = 120$ . Este ejemplo se muestra en los diseños de la Fig. 4 y la 7, que son los mismos diseños sin devanados que aquellos para el ejemplo de dos fases anterior.

Los tres ejemplos anteriores han demostrado el número requerido de polos del rotor para motores de 1,5° por paso accionados mediante un accionador de motor bipolar de dos y tres fases y un accionador de motor unipolar de cuatro fases.

Todos los polos magnéticos pueden estar equidistantemente espaciados alrededor del rotor con los polos adyacentes apuntando en direcciones opuestas o alternativamente magnetizadas y pueden realizarse con elementos premagnetizados que se unen a la superficie de soporte del rotor, que puede hacerse de acero(s) magnético(s), laminación(es) de aceros eléctricos o diversas combinaciones de estos materiales. Alternativamente, los polos magnéticos pueden hacerse con materiales magnéticos sin magnetizar aplicados a la superficie exterior del rotor y magnetizados localmente para obtener polaridades alternas. Sin embargo, sólo un número limitado de polos se puede magnetizar sobre las superficies exteriores del rotor con esta técnica, y un gran número de polos haría a esta técnica o bien imposible o bien no práctica.

La separación adecuada entre polos magnéticos adyacentes, que se obtiene con ranuras magnéticas sobre el soporte del rotor, pueden asignarse de modo que se puedan conseguir polos equidistantemente espaciados. Ninguna separación entre polos magnéticos adyacentes, tal como las mostradas en las Patentes de Estados Unidos previas 6.329.729 y 6.657.353, harán difíciles de conseguir los polos equidistantemente espaciados debido a que la separación de los polos depende de los anchos de los imanes. Incluso si se hace un rotor sin separación de polos, como los mostrados en las patentes anteriormente referenciadas, será difícil obtener pares de pico de detención con y sin energización constantes y pares de pico de funcionamiento constantes debido a las variaciones magnéticas.

Un pequeño número de polos magnéticos sobre un rotor de gran diámetro dejará espacios vacíos entre polos magnéticos adyacentes, haciendo así el motor paso a paso menos compacto. Por otro lado, un gran número de polos magnéticos sobre un rotor de pequeño diámetro requerirá imanes delgados, haciéndolo no práctico de

fabricar.

5 La Tabla 1 lista algunos polos de rotor, ángulos de paso y relaciones de fase seleccionadas para accionadores de motor bipolares y unipolares calculados de acuerdo con las ecuaciones [1] y [2], anteriores. Los ángulos de paso fraccionales son inevitables en los cálculos, pero se pueden evitar por razones prácticas, tales como la precisión de mecanizado o técnica de las fracciones de ángulo.

Tabla 1

Número de polos del rotor	Ángulo de paso para accionador bipolar				Ángulo de paso para accionador unipolar			
	Número de fases				Número de fases			
	2	3	4	5	2	3	4	5
12	15	19	7,5	6	30	20	15	12
16	11,25	7,5	5,625	4,5	22,5	15	11,25	9
18	10	6,6667	5	4	20	13,3333	10	8
20	9	6	4,5	3,6	18	12	9	7,2
24	7,5	5	3,75	3	15	10	7,5	6
30	6	4	3	2,4	12	8	6	4,8
32	5,625	3,75	2,8125	2,25	11,25	7,5	5,625	4,5
36	5	3,3333	2,5	2	10	6,6667	5	4
40	4,5	3	2,25	1,8	9	6	4,5	3,6
48	3,75	2,5	1,875	1,5	7,5	5	3,75	3
50	3,6	2,4	1,8	1,44	7,2	4,8	3,6	2,88
60	3	2	1,5	1,2	6	4	3	2,4
72	2,5	1,6667	1,25	1	5	3,3333	2,5	2
80	2,25	1,5	1,125	0,9	4,5	3	2,25	1,8
90	2	1,3333	1	0,8	4	2,6667	2	1,6
96	1,875	1,25	0,9375	0,75	3,75	2,5	1,875	1,5
100	1,8	1,2	0,9	0,72	3,6	2,4	1,8	1,44
120	1,5	1	0,75	0,6	3	2	1,5	1,2

- 10 Para el mismo número de polos y fases del rotor, un motor paso a paso con accionador de motor bipolar avanza la mitad del ángulo que un motor paso a paso con un accionador unipolar. A la inversa, para conseguir el mismo ángulo de paso, un motor paso a paso con un accionador unipolar requiere doble número de polos del rotor que los que requiere un motor paso a paso con un accionador bipolar.
- 15 El número máximo de dientes de estátor por fase,  $m$ , tanto para accionadores de motor bipolares como unipolares debe satisfacer la ecuación:

$$[6] \quad \text{int} \left( \frac{360^\circ}{(\text{n}^\circ \text{ de polos del rotor}) \times [2 \times (\text{n}^\circ \text{ de dedos por diente del estátor}) - 1] \times (\text{n}^\circ \text{ de fases})} \right) \times m \leq 360^\circ$$

- 20 Donde la expresión,  $\text{int}(x)$ , es la función entero que devuelve la parte entera de su argumento ( $x$ ). Esta ecuación se puede simplificar en:

$$[7] \quad m \leq \text{int} \left( \frac{\text{n}^\circ \text{ polos del rotor}}{[2 \times (\text{n}^\circ \text{ de dedos por diente del estátor}) - 1] \times (\text{n}^\circ \text{ de fases})} \right)$$

- 25 La distancia entre dos dedos contiguos sobre un diente de estátor dado debe ser tal que cuando los dedos se alinean con los polos del rotor, deben alinearse con polos del rotor de la misma polaridad. Por lo tanto, la expresión,

$$[2 \times (\text{n}^\circ \text{ de dedos por diente de estátor}) - 1],$$

en las ecuaciones [6] y [7] anteriores es el número total de polos del rotor cubiertos por cada diente de estátor.

Para el motor paso a paso de tres fases, 1,5° por fase, ochenta polos, bipolar con dos dedos por diente de estátor, el número máximo de dientes de estátor por fase (Ecuación 7, anterior) es:

5

$$[8] \quad m \leq \text{int}\left(\frac{80}{(2 \times 2 - 1) \times 3}\right) = \text{int}(8,9) \rightarrow 8 \text{ dientes de estátor/fase}$$

Por lo tanto, el número máximo de dientes de estátor es:

10

$$[9] \quad \text{máx. n}^\circ \text{ de dientes de estátor} = (3 \text{ fases}) \times (8 \text{ dientes/fase}) = 24 \text{ dientes.}$$

Este ejemplo se muestra el diseño de la Fig.1.

15

Para el mismo motor paso a paso de tres fases, 1,5° por paso, ochenta polos, bipolar pero con tres dedos por diente de estátor, el número máximo de dientes de estátor por fase es:

$$[10] \quad m \leq \text{int}\left(\frac{80}{(2 \times 3 - 1) \times 3}\right) = \text{int}(5,3) \rightarrow 5 \text{ dientes de estátor/fase}$$

Por lo tanto, el número máximo de dientes de estátor es:

20

$$[11] \quad \text{máx. n}^\circ \text{ de dientes de estátor} = (3 \text{ fases}) \times (5 \text{ dientes/fase}) = 15 \text{ dientes.}$$

Este ejemplo se muestra en el diseño de la Fig. 3.

25

Para el diseño de motor paso a paso de cuatro fases, 1,5° por paso, ciento veinte polos, unipolar con cuatro dedos por diente de estátor, el número máximo de dientes de estátor por fase es:

$$[12] \quad m \leq \text{int}\left(\frac{120}{(2 \times 4 - 1) \times 4}\right) = \text{int}(4,3) \rightarrow 4 \text{ dientes de estátor/fase}$$

30

Por lo tanto, el número máximo de dientes de estátor es:

$$[13] \quad \text{máx. n}^\circ \text{ de dientes de estátor} = (4 \text{ fases}) \times (4 \text{ dientes/fase}) = 16 \text{ dientes.}$$

Este ejemplo se muestra en el diseño de la Fig. 7.

35

Es opcional usar el número máximo de dientes de estátor y el número de dedos siempre que se satisfaga la Ecuación [7]. Las Figs. 1 y 3 muestran ambos motores paso a paso de tres fases con los mismos ochenta polos del rotor magnetizados alternativamente. El diseño de la Fig. 1 usa un estátor con veinticuatro dientes equidistantemente espaciados y dos dedos en cada diente. Sin embargo, el diseño de la Fig. 3 usa un estátor que tiene quince dientes equidistantemente espaciados con tres dedos en cada diente de estátor. Es obvio que el diseño de la Fig. 3 puede usar también dos dedos en cada uno de los quince dientes de estátor equidistantemente espaciados. De modo similar, las Figs. 4 y 7 muestran ambas motores paso a paso de dos o cuatro fases con los mismos ciento veinte polos del rotor alternativamente magnetizados y dieciséis dientes de estátor equidistantemente espaciados. El diseño mostrado en la Fig. 7 tiene cuatro dedos en cada diente de estátor, mientras que el diseño en la Fig. 4 tiene tres dedos en cada diente de estátor.

40

45

La selección de los números de dientes de estátor y del número de dedos en cada diente afectará al par de detención del motor, al par de funcionamiento del motor y a la resistencia del devanado si los devanados se bobinan primero sobre un mandril y a continuación se transfieren sobre el diente de estátor. Para los mismos motores paso a paso de dos o cuatro fases, 1,5° por paso, el diseño mostrado en la Fig. 7 con cuatro dedos tendrá mayor par de detención sin energización que el diseño mostrado en la Fig. 4 con tres dedos. Sin embargo, si los devanados se bobinan sobre un mandril y a continuación se transfieren sobre el diente de estátor, la longitud de la espira final del devanado requerida para el diseño mostrado en la Fig. 7 será mayor que para el diseño mostrado en la Fig. 4. Esto da como resultado mayor resistencia por fase para los devanados de la Fig. 7 que para los devanados de la Fig. 4.

50

55

Estas diversas formas se explicarán en secuencia en el presente documento a continuación.

Primera forma (Figs. 1, 2, 2A, 2B y 2C)

El diseño de motor paso a paso de tres cables, conexión en estrella, tres fases, 1,5° por fase, bipolar, indicado en general en 20 en la Fig. 1, genera varias veces más par que los motores paso a paso del tipo de Schaeffer (véanse por ejemplo, las Patentes de Estados Unidos N° 4.190.779 y 4.315.171, anteriores) de resistencia por fase, dimensiones mecánicas y par de detención sin energización idénticos que se han producido en Schaeffer Magnetics/Moog Inc. durante los últimos treinta años.

La Fig. 1 muestra una vista en sección transversal de un motor paso a paso 20 de tres fases con ochenta polos de rotor magnetizados alternativamente, varios indicados en 21, y con veinticuatro dientes de estátor equidistantemente espaciados, indicados varios en 22. Cada diente de estátor tiene dos dedos, indicados varios en 23. La brida de montaje genérica junto con los orificios de montaje genéricos sobre el estátor y el eje sobre el rotor son comunes a todos los motores ilustrados en el presente documento. El estátor y la brida de montaje, que también son comunes a todos los otros motores descritos en el presente documento, puede hacerse con aceros magnéticos blandos sólidos en una pieza para aplicaciones de baja relación de paso. También pueden ser laminados con materiales de laminación de acero eléctrico y/o montados en el interior de una carcasa estructural para aplicaciones de elevada relación de paso.

La Fig. 2 muestra el diagrama de cableado físico en el diente de estátor de una conexión en estrella, tres cables, tres fases, 1,5° por paso, bipolar con ochenta polos de rotor y veinticuatro dientes de estátor, como se muestra en la Fig. 1. Dado que hay veinticuatro dientes de estátor y tres fases, cada fase tiene ochenta bobinas conectadas en serie. Hay seis estados de excitación. El paso a paso continuo requiere repeticiones de estos seis estados de excitación. En cada estado de excitación, los dos terminales que tienen la misma polaridad se conectan juntos, dando como resultado un trayecto de corriente en paralelo en los dos devanados desde el centro unido (es decir, A2, B2 y C2) a los dos terminales. La secuencia de excitación se muestra en la Tabla 2:

Tabla 2

Estado	Terminal		
	A1	B1	C1
1	+	+	-
2	+	-	-
3	+	-	+
4	-	-	+
5	-	+	+
6	-	+	-

Esta secuencia de excitación en el orden desde el estado 1 al 6 dará como resultado la rotación del rotor en la dirección de las agujas del reloj ("CW") en la Fig. 2. La inversión de la secuencia de excitación anterior dará como resultado la rotación del rotor en la dirección contraria a las agujas del reloj ("CCW") en la Fig. 2. De modo similar, la inversión de la dirección del devanado en cada diente de estátor a la dirección opuesta, como se muestra en las Figs. 2 y 2A, dará como resultado la inversión de la dirección de la rotación del rotor.

La Fig. 2A muestra una vista detallada de la relación física entre los polos del rotor, dientes de estátor y devanados físicos mostrada en las Figs. 1 y 2. Cuando los dientes de estátor de la fase A se alinean con los polos del rotor de una polaridad, cada uno de los dedos del estátor de la fase B o de la fase C se alinearán con o bien los bordes de ataque (o los bordes de salida) o bien los bordes de salida (o los bordes de ataque) de los polos del rotor de la polaridad opuesta a aquellos alineados con la fase A. De ese modo, se crean tres dientes de estátor diferentemente posicionados, uno para cada fase, en relación con los polos del rotor. Los veinticuatro dientes de estátor equidistantemente espaciados son, por lo tanto, ocho repeticiones de los tres dientes de estátor diferentemente posicionados. Dichas alineaciones de los dedos del estátor y polos del rotor se requieren para todos los motores paso a paso de tres fases descritos en el presente documento para formas rotativas, lineales, seccionales o fraccionales, invertidas y espacios de aire axiales.

Las variaciones entre intensidades del imán provocarán variaciones en el par de pico de detención con y sin energización y variaciones del par de pico de funcionamiento del motor. La Fig. 2C muestra una técnica de reducción de la variación de la intensidad magnética entre imanes para construir un rotor con pares de pico de detención con y sin energización y de pico de funcionamiento más constantes. En comparación con las vistas detalladas de los rotores mostrados en las Figs. 2A, 3A, 4A, 5A y 6A, las ranuras magnéticas sobre el soporte del rotor de acero magnético blando o laminación eléctrica laminada en la Fig. 2C son más profundas y más anchas.

La Fig. 2B es un diagrama del cableado eléctrico de la Fig. 2 de las bobinas conectadas en estrella con un centro común unido.

Segunda forma (Figs. 3 y 3A)

La Fig. 3 muestra la vista en sección transversal de otro motor paso a paso de tres fases, indicado en general en 30, y un diseño similar al mostrado en las Figs. 1, 2 y 2A, con los mismos ochenta polos de rotor alternativamente magnetizados (indicados de modo diverso con 31), pero con quince dientes de estátor equidistantemente espaciados (indicados de modo diverso con 32), y tres dedos (indicados de modo diverso con 33) sobre cada diente de estátor. Como se muestra en la Fig. 3A, hay tres dientes de estátor posicionados de modo diferente, uno por cada fase, en relación a los polos del rotor. Los quince dientes de estátor equidistantemente espaciados de la Fig. 3 son, por lo tanto, cinco repeticiones de esos tres dientes de estátor posicionados de modo diferente. Los diagramas de cableado físicos y eléctricos se basan por ello en el mismo principio que el explicado para las Figs. 2, 2A y 2B, y se omiten.

Tercera forma (Figs. 4 y 4A)

La Fig. 4 muestra la vista en sección transversal de un motor paso a paso de dos o cuatro fases, indicado en general en 40, con ciento veinte polos del rotor magnetizados alternativamente (indicados de modo diverso con 41), y dieciséis dientes de estátor equidistantemente espaciados (indicados de modo diverso con 42). Cada diente de estátor tiene tres dedos (indicados de modo diverso con 43). La Fig. 4A muestra una vista detallada de la relación de alineación física entre los polos del rotor y dientes de estátor. La relación de alineación detallada se explica a continuación con los diagramas de cableado físico.

Cuarta forma (Figs. 5, 5A y 5B)

La Fig. 5 muestra el diagrama de cableado físico sobre el diente de estátor de la Fig. 4 de un motor paso a paso de cinco cables, cuatro fases, 1,5° por paso, unipolar, indicado en general en 50, con ciento veinte polos del rotor (indicados de modo diverso con 51), y dieciséis dientes de estátor (indicados de modo diverso con 52), y tres dedos (indicados de modo diverso con 53) por diente de estátor. Cada fase tiene cuatro bobinas conectadas en serie. Hay cuatro estados de excitación, uno para cada fase. La toma de voltaje central (CT) puede ser o bien positiva o bien negativa, donde en la tabla de excitación se muestra sólo la polaridad del voltaje positiva sobre la toma central.

La secuencia de excitación se muestra en la Tabla 3:

Tabla 3

Estado	Terminal				
	A1	B1	C1	D1	CT
1	-				+
2		-			+
3			-		+
4				-	+

Esta secuencia de excitación en el orden desde los Estados 1 a 4 dará como resultado la rotación del rotor en la dirección de las agujas del reloj ("CW") en la Fig. 5. La inversión de la secuencia de excitación anterior dará como resultado la rotación del rotor en la dirección contraria a las agujas del reloj ("CCW") en la Fig. 5. De modo similar, la inversión de la dirección de devanado en cada diente de estátor a la dirección opuesta, como se muestra en las Figs. 5 y 5A, dará como resultado la inversión de la dirección de rotación del rotor.

La Fig. 5A muestra una vista detallada de la relación entre los polos del rotor, dientes de estátor y devanados físicos en la Fig. 5 para un motor paso a paso de cuatro fases, 1,5° por paso, unipolar, indicado en general en 50. Esta disposición tiene ciento veinte polos del rotor (indicados de modo diverso con 51), dieciséis dientes de estátor (indicados de modo diverso con 52), y tres dedos (indicados de modo diverso con 53) por diente. Cuando los dedos de la fase A sobre los dientes de estátor se alinean con los polos del rotor, cada dedo de la fase B se alineará en el centro de dos polos contiguos, cada dedo de la fase C se alineará con polos opuestos a aquellos alineados con la fase A, y cada dedo de la fase D se alineará con los polos opuestos a aquellos alineados con la fase B. De ese modo, se crean cuatro dientes de estátor posicionados de modo diferente, uno para cada fase, en relación a los polos del rotor. Los dieciséis dientes de estátor equidistantemente espaciados de la Fig. 5 son, por lo tanto, cuatro repeticiones de los cuatro dientes de estátor posicionados de modo diferente. Dichas alineaciones de dedos del estátor y polos del rotor de la Fig. 5A son requeridos para todos los motores paso a paso de cuatro fases descritos en el presente documento para formas rotativas, lineales, seccionales o fraccionales, invertidas y espacios de aire axiales.

La Fig. 5B es un diagrama de cableado eléctrico de la Fig. 5 con una toma central común. Otro accionador del motor unipolar de cuatro fases comúnmente usado requiere seis cables para dos tomas centrales. Esto se puede llevar a cabo, por ejemplo en las Figs. 5 y 5B, conectando A2 y B2 a una toma central, y conectando C2 y D2 a la otra toma central. Las dos tomas centrales sirven para la misma función que la toma central mostrada en la Fig. 5B. Las secuencias de polaridad de excitación en cuatro estados continúan siendo las mismas que la Tabla 3 pero con una toma central extra.

Quinta forma (Figs. 6, 6A y 6B)

La Fig. 6 muestra el diagrama de cableado físico sobre el diente de estátor de las Figs. 4 y 4A de una configuración de cuatro cables, dos fases, 1,5° por paso, bipolar, indicada en general en 60, con ciento veinte polos del rotor (indicados de modo diverso con 61), y dieciséis dientes de estátor (indicados de modo diverso con 62), y tres dedos (indicados de modo diverso con 63) por diente. Las secuencias de excitación se muestran en la Tabla 4:

Tabla 4

Estado	Terminal			
	A1	B1	A2	B2
1	+		-	
2		+		-
3	-		+	
4		-		+

Esta secuencia de excitación en el orden desde los Estados 1 a 4 dará como resultado la rotación del rotor en la dirección de las agujas del reloj ("CW") de la Fig. 6. La inversión de la secuencia de excitación anterior dará como resultado la rotación del rotor en la dirección contraria a las agujas del reloj ("CCW") en la Fig. 6. De modo similar, la inversión de la dirección de devanado en cada diente de estátor a la dirección opuesta, como se muestra en las Figs. 6 y 6A, dará como resultado la inversión de la dirección de rotación del rotor.

La Fig. 6A muestra una vista detallada de la relación entre los polos del rotor, dientes de estátor y devanados en la Fig. 6 para un motor paso a paso de dos fases, 1,5° por paso, bipolar, indicado en general en 60. Esta disposición tiene ciento veinte polos del rotor (indicados de modo diverso con 61), dieciséis dientes de estátor (indicados de modo diverso con 62), y tres dedos (indicados de modo diverso con 63) por diente. Cuando los dedos de la fase A sobre el diente de estátor se alinean con los polos del rotor, cada dedo de la fase B se alineará en el centro de dos polos contiguos. Los dedos de la siguiente fase A se alinearán con los polos opuestos a los alineados con la fase A previa, y los dedos de la siguiente fase B se alinearán con los polos opuestos a los alineados con la fase previa B. Cuando se cablean como se muestra en la Fig. 6 en los patrones de +A, -A, +A, -A y así sucesivamente para la fase A, y +B, -B, +B, -B, y así sucesivamente para la fase B, se crean dos dientes de estátor posicionados de modo diferente, uno para cada fase, en relación a los polos del rotor. Los dieciséis dientes de estátor equidistantemente espaciados de la Fig. 6 son, por lo tanto, ocho repeticiones de los dos dientes de estátor posicionados de modo diferente en la Fig. 6A. Dichas alineaciones de estátor y polos del rotor se requieren para todos los motores paso a paso de dos fases descritos en el presente documento para formas rotativas, lineales, seccionales o fraccionales, invertidas y espacios de aire axiales.

En las ilustraciones anteriores de los tres tipos de diagramas de cableado físico, las Figs. 2 y 2A para tres fases, las Figs. 5 y 5A para cuatro fases y las Figs. 6 y 6A para dos fases, la dirección de cableado sobre cada diente para cada fase es determinada por las polaridades de los polos del rotor que se alinean con los dedos de los dientes de estátor para cada fase. Por ejemplo, los dedos del estátor sobre todos los ocho dientes de estátor de la Fig. 2 para la fase A se alinean con la misma polaridad de polos de rotor, por lo tanto, las direcciones de cableado para todos los ocho dientes de estátor son la misma. Lo mismo es verdad para las fases B o C. Las mismas direcciones de cableado son verdad también para la Fig. 5. Sin embargo, el diagrama de cableado de la fase A mostrado en la Fig. 6 requiere la inversión de la dirección cada dos dientes debido a cambios en la polaridad del polo de rotor cada dos dientes de estátor para la fase A. Lo mismo es verdad para la fase B.

Sexta forma

Se puede realizar una configuración de ocho cables, dos por cada fase, sin toma central (en oposición a las tomas centrales mostradas en las Figs. 5, 5A y 5B), dando como resultado mayor flexibilidad para el accionamiento o bien como motor unipolar o bien bipolar de un motor de cuatro fases. De modo similar para el motor de tres fases, se puede realizar una configuración de seis cables, dos por cada fase, sin una unión central (en oposición al centro unido de A2, B2 y C2 mostrado en las Figs. 2 y 2B), dando como resultado una mayor flexibilidad en el accionamiento del motor para un accionamiento como motor de tres fases o bien unipolar o bien bipolar.

De acuerdo con la Tabla 1 para el motor de cuatro fases anterior, el esquema de accionamiento bipolar de ocho cables creará un ángulo de paso de 0,75 grados/paso —la mitad del ángulo de paso en comparación con el creado por un accionador unipolar—. De modo similar para el motor de tres fases anterior, el esquema de accionamiento unipolar con seis cables duplicará el ángulo de paso del esquema de accionamiento bipolar.

#### 5 Séptima forma (Fig. 7)

La Fig. 7 es una vista en sección transversal de otra forma de un motor paso a paso de dos o cuatro fases, en general similar a la Fig. 4, con los mismos ciento veinte polos del rotor magnetizados alternativamente y dieciséis dientes de estátor equidistantemente espaciados, pero con cuatro dedos en cada diente de estátor. Los diagramas de cableado físicos y eléctricos así como las secuencias de la polaridad de excitación son idénticos a los mostrados en las Figs. 5, 5A, 5B para motores de cuatro fases y 6, 6A y 6B para dos fases.

#### 15 Octava forma (Figs. 8, 9)

La Fig. 8 muestra la vista en sección transversal de un motor paso a paso de tres fases, 1,0° por paso, bipolar, indicado en general en 80, con el mismo rotor que en las Figs. 4 y 7 con ciento veinte polos del rotor magnetizados alternativamente (indicados de modo diverso con 81), pero con dieciocho dientes de estátor equidistantemente espaciados (indicados de modo diverso con 82). Cada diente de estátor tiene tres dedos (indicados de modo diverso con 83).

La Fig. 9 muestra el diagrama de cableado físico de un motor paso a paso, conexión en Y, tres cables, tres fases, 1,0° por paso, bipolar con ciento veinte polos del rotor y dieciocho dientes de estátor como se muestra en la Fig. 8. Cada fase tiene seis bobinas conectadas en serie. El diagrama de cableado eléctrico es el mismo que el mostrado en la Fig. 2B y las secuencias de la polaridad excitación son las mismas que las mostradas en la Tabla 2.

Todos los ejemplos anteriores muestran que los dientes de estátor están equidistantemente espaciados, y los números de dientes de estátor son múltiplos enteros del número de fases (por ejemplo, Ecuación 6). Sin embargo, los motores paso a paso se pueden diseñar (pero no se recomienda) con dientes de estátor que no estén equidistantemente espaciados, con números de dientes de estátor que no sean múltiplos enteros del número de fases. Por ejemplo, se puede diseñar un motor paso a paso de cuatro fases, 3,0° por paso, sesenta polos de rotor, unipolar con dieciséis dientes de estátor y dos dedos por diente de estátor para satisfacer el requisito de alineación de los dedos de dientes de estátor y polos del rotor, como se ha descrito anteriormente en el párrafo [0075] y siguientes. En este diseño, hay quince espacios entre los dientes de estátor a 21,0° y uno a 45,0°. Hay dos grandes inconvenientes con este diseño. Uno es los irregulares pares de pico de detención con y sin energización debido a la desigual separación de dientes de estátor. El otro es el desperdicio de espacio de devanado del estátor en la localización de separación de dientes a 45,0°. Añadiendo un diente de estátor extra en la localización con 45,0° de separación de dientes, lo que hace al estátor con diecisiete dientes y dieciséis espacios entre dientes de estátor a 21,0° y uno a 24,0°, mejorará los pares de pico irregulares de detención con y sin energización, pero dejarán el diente de estátor extra sin usar para devanados. Por lo tanto, los diseños con los números de dientes de estátor que no estén equidistantemente espaciados o no sean múltiplos enteros del número de fases, no se recomiendan. Por ejemplo, el motor paso a paso anterior de cuatro fases, 3,0° por paso, sesenta polos de rotor, unipolar se puede diseñar con ocho dientes de estátor equidistantemente espaciados con tres dedos por diente de estátor.

Todos los ejemplos anteriores y las ecuaciones 3, 6 y 7 muestran que la distancia entre dos dedos contiguos sobre un diente de estátor dado es tal que cuando los dedos se alinean con los polos del rotor, se alinearán con polos de la misma polaridad. Esto significa que el polo del rotor de la polaridad opuesta se saltará entre medias de dos dedos contiguos. Sin embargo, los dedos de los dientes se pueden diseñar (pero no se recomienda) sin tal salto de polos para los motores paso a paso descritos en el presente documento. Por ejemplo, el diseño de dos dedos por diente de estátor de la Fig. 1 puede ser un diseño de tres dedos por diente de estátor con un dedo adicional entre medias de dos dedos existentes. Este dedo adicional se alineará con el polo de rotor compuesto a aquellos alineados con los dos dedos en la Fig. 1. De modo similar, el diseño de tres dedos por diente de estátor de la Fig. 4 puede ser un diseño de cinco dedos por diente de estátor con dos dedos adicionales. En comparación con las realizaciones preferidas descritas en el presente documento, hay tres inconvenientes con dichos diseños con dedos adicionales. En primer lugar, se crea un par de detención sin energización muy alto debido a los cortocircuitos magnéticos entre polos del rotor y dedos de dientes de estátor. Segundo, se crean pares de detención con energización y de funcionamiento muy bajos debido a la cancelación del flujo magnético entre polos del rotor y dedos del estátor. Tercero, y quizás más importante, el motor paso a paso puede avanzar irregularmente en términos de tamaño del paso debido a la combinación de un par de detención sin energización muy alto y pares con energización y funcionamiento muy bajos. Por lo tanto, los dedos de los dientes de estátor no deberían espaciarse entre sí de modo que se alineen con polos del rotor de polaridad opuesta. Por el contrario, se deberían espaciar de modo que se alineen con polos del rotor de la misma polaridad.

Los motores paso a paso con cinco o más fases, aunque posibles según se lista en la Tabla 1 para polos del rotor de cinco fases, no se ilustran en el presente documento debido que se usan raramente debido al elevado coste de los accionadores del motor cuando se comparan con los accionadores de motor comúnmente usados de dos, tres o

cuatro fases.

Un motor paso a paso lineal que utilice los conceptos del diseño de la presente invención es un caso especial. Al abrir un motor paso a paso y enderezar el estátor y rotor, un motor paso a paso rotativo se convierte en un motor paso a paso lineal. Sin embargo, los motores paso a paso lineales no se ilustran en el presente documento debido al hecho de que la alineación entre dedos de dientes de estátor y polos del rotor, diagramas de cableado eléctrico y secuencias de la polaridad de excitación siguen siendo las mismas que las descritas en el presente documento para motores paso a paso rotativos. La alineación entre dedos de dientes de estátor y polos del rotor, diagramas de cableado eléctrico y secuencias de polaridad excitación se han mostrado anteriormente, respectivamente, en: (a) párrafo [0067] y siguientes, Fig. 2B y Tabla 2 para motores paso a paso bipolares de tres fases; (b) párrafo [0075] y siguientes, Fig. 5B y Tabla 3 para motores paso a paso de cuatro fases unipolares; y (c) párrafo [0079] y siguientes, Fig. 6B y Tabla 4 para motores paso a paso de dos fases bipolares.

No se muestran en el presente documento diversas otras variaciones de diseños de motores paso a paso basadas en los principios de esta invención. Éstas incluyen: (a) motores paso a paso seccionales o fraccionales, en los que sólo se usan partes de los 360° de estátor y rotor; (b) motores paso a paso con elementos rotativos y fijos invertidos, en los que el elemento fijo interior es un estátor y el otro elemento rotativo es un rotor; (c) motores paso a paso con espacios de aire axiales, en donde el rotor y el estátor, ambos de formas planas, se alinean lado a lado sobre un eje común. En comparación con los espacios de aire circulares y radiales en las formas Primera a Octava, los diseños de espacio de aire axial requieren direcciones de magnetización axiales para los polos del rotor en lugar de dirección radiales en las formas Primera a Octava y los dientes y dedos del estátor dispuestos para situarse enfrente de los polos del rotor en direcciones axiales. En estas variaciones de diseños, los esquemas de devanado y la alineación de los dedos de dientes de estátor y polos del rotor seguirán siendo las mismas que las explicadas anteriormente para motores de dos, tres y cuatro fases.

Los devanados bifilares y los devanados redundantes son otras características más que se pueden implementar fácilmente para todos los esquemas de devanado anteriores. No se ilustran en el presente documento debido a que son técnicas de devanado comunes y variaciones menores de los esquemas de devanado descritos anteriormente.

El uso de aceros magnéticos blandos, para fabricar estatores sólidos de una pieza apilados con dientes, incluso para fabricar carcasas y dientes de estátor sólidos en una pieza, es otra característica más que se puede implementar para aplicaciones de relación de paso baja para las invenciones descritas en el presente documento. Los aceros magnéticos blandos sólidos pueden incluir, pero sin limitarse a, materiales compuestos de polvo de hierro moldeado, aceros de bajo carbono (tal como los aceros designados 1010, 1015 o 1018 por el American Iron and Steel Institute (AISI)), aceros resistentes a la corrosión martensíticos sólidos (tal como el acero inoxidable 416, etc.), o aleaciones níquel-hierro o hierro-cobalto de alta permeabilidad, etc. Esos aceros magnéticos blandos sólidos se distinguen de los materiales de laminación de acero eléctrico usados comúnmente (por ejemplo, AISI M-15, M-19, etc.), o aleaciones níquel-hierro o hierro-cobalto de alta permeabilidad, etc., para aplicaciones de circuitos magnéticos de alta frecuencia. Esos aceros magnéticos blandos sólidos son conocidos por los diseñadores magnéticos para aplicaciones de baja frecuencia donde las corrientes parásitas y las pérdidas por histéresis son insignificantes. Esta característica se ha probado que es extremadamente útil para motores y actuadores de baja relación de paso, debido a que elimina los problemas de deslaminación, recorta costes (especialmente cuando se usa el acero de bajo carbono 1018 común o acero inoxidable 416), y simplifica los procesos de fabricación.

Basándose en la descripción anterior, la diferencia principal entre esta invención y la técnica anterior (véanse, por ejemplo, las patentes de Estados Unidos Nº 4.190.779 y 4.315.171, anteriores) está en los diseños del estátor y se puede resumir como sigue: (a) los dientes de estátor en esta invención están equidistantemente espaciados, mientras que los dientes de estátor en la técnica anterior estaban agrupados en segmentos y los segmentos estaban espaciados por la separación de dientes de estátor normal y un ángulo adicional, normalmente, un ángulo de paso; (b) con igual separación de los dientes de estátor, el motor paso a paso produce pares de pico de detención sin energización y pares de detención con energización más constantes, que aquellos de la técnica anterior; (c) esta invención usa dedos sobre los dientes de estátor, mientras que la técnica anterior no; (d) esta invención usa menos dientes de estátor que los requeridos en la técnica anterior para pequeños ángulos de paso; (e) con menos dientes de estátor, el diseño de la presente invención tiene más espacio para el incremento del número de espiras por fase, o reducir la resistencia de la fase con hilos de galga más gruesa para los devanados, mientras se mantiene el número de espiras por fase y, por tanto, se incrementa el par motor o la densidad de par; (f) con más espacio en el estátor, los dientes de estátor en esta invención pueden ser más gruesos, por lo tanto más fuertes, que los de la técnica anterior, mejorando la estabilidad del paso, la precisión y la facilidad de fabricación; (g) con menos dientes de estátor, la masa del estátor del diseño para esta invención será menor que la de la técnica anterior y (h) con menos dientes de estátor e igual separación de dientes, el proceso de devanado será más fácil que el que supone para la técnica anterior.

Otra diferencia entre esta invención y la técnica anterior es el diseño del soporte del rotor con ranuras profundas y más anchas para reducir las variaciones de la intensidad magnética entre imanes del rotor para construir pares de pico de detención con y sin energización y de pico de funcionamiento más constantes.

5 Adicionalmente, este trabajo ha establecido las relaciones, Ecuaciones 1, 2 y 3 anteriores, entre los polos del rotor, dientes y dedos del estátor, ángulo de paso, fase, y configuraciones de accionador bipolar o unipolar. Ha demostrado los esquemas de devanado para dos, tres y cuatro fases, con motores paso a paso de tres, cuatro, cinco, seis u ocho cables y secuencias de polaridad de accionamiento que son comunes a otros motores paso a paso de tipo comercial y accionadores de motores bipolares o bipolares para el tipo de reluctancia variable, el tipo híbrido y el tipo de imán permanente.

10 Por lo tanto, aunque se han mostrado y descrito un cierto número de realizaciones de los motores paso a paso mejorados, y se han explicado en el mismo ciertos cambios y modificaciones, los expertos en esta técnica apreciarán fácilmente que se pueden realizar varios cambios y modificaciones adicionales dentro del alcance de la invención, tal como se define por las reivindicaciones a continuación.

REIVINDICACIONES

1. Un motor paso a paso del tipo de imán permanente (20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90) que tiene un elemento móvil y un elemento fijo, que comprende:

5 un cierto número de polos magnéticos (21, 31, 41, 51, 61, 71, 81, 91) sobre una superficie de uno de dichos elementos, siendo los polos adyacentes de polaridad opuesta, siendo el número de polos función de una constante, del número de fases y de un intervalo de paso deseado; y  
 10 un número de dientes equidistantemente espaciados (22, 32, 42, 52, 62, 72, 82, 92) sobre el otro de dichos elementos, disponiéndose dichos dientes para situarse enfrente de dicha superficie del otro elemento, teniendo cada uno de dichos dientes una pluralidad de dedos (23, 33, 43, 53, 63, 73, 83, 93) dispuestos para situarse enfrente de dicha superficie de un elemento en donde dichos dedos están separados entre sí de modo que los dedos en cualquier diente dado se alinearán con polos de la misma polaridad  
 15 **caracterizado por que** el número de dichos dientes es un número entero que es función de una constante, del número de dichos polos, del número de dedos en cada diente de estátor y del número de fases.

2. Un motor paso a paso del tipo de imán permanente tal como se expone en la reivindicación 1 en el que dicho un elemento es un rotor que tiene una superficie exterior, dicho otro elemento es un estátor, en donde dicho intervalo de paso deseado es un ángulo de paso deseado, y en el que dichos dientes están espaciados circularmente alrededor de dicho estátor para situarse enfrente de dicha superficie exterior del rotor.

3. Un motor paso a paso del tipo de imán permanente tal como se expone en la reivindicación 2 en el que el número de polos del rotor para un accionador de motor unipolar es un número entero par determinado a partir de la ecuación:

25 
$$\text{ángulo de paso} = \frac{2 \times 360^\circ}{(\text{n}^\circ \text{ de fases}) \times (\text{n}^\circ \text{ polos del rotor})}$$

4. Un motor paso a paso del tipo de imán permanente tal como se expone en la reivindicación 2 en el que el número de polos del rotor para un accionador de motor bipolar es un número entero par determinado a partir de la ecuación:

30 
$$\text{ángulo de paso} = \frac{360^\circ}{(\text{n}^\circ \text{ de fases}) \times (\text{n}^\circ \text{ polos del rotor})}$$

5. Un motor paso a paso del tipo de imán permanente tal como se expone en cualquiera de las reivindicaciones 2 a 4 en el que dichos polos del rotor están equidistantemente espaciados alrededor de dicha superficie exterior del rotor.

35 6. Un motor paso a paso del tipo de imán permanente tal como se expone en cualquiera de las reivindicaciones 2 a 5 en el que dichos polos del rotor están equidistantemente espaciados alrededor de un soporte del rotor formado con aceros magnéticos blandos sólidos, o laminados con terminaciones de acero eléctrico, o una combinación de estos materiales.

7. Un motor paso a paso del tipo de imán permanente tal como se expone en cualquiera de las reivindicaciones 2 a 6 en el que el número máximo de dientes (*m*) del estátor por fase se determina mediante la ecuación:

45 
$$m \leq \text{int} \left( \frac{\text{n}^\circ \text{ polos del rotor}}{[2 \times (\text{n}^\circ \text{ de dedos por diente de estátor}) - 1] \times (\text{n}^\circ \text{ de fases})} \right).$$

en la que la expresión, int(*x*), es la función entero que devuelve la parte entera de su argumento (*x*).

8. Un motor paso a paso del tipo de imán permanente tal como se expone en cualquiera de las reivindicaciones 2 a 7 en el que dichos dientes están equidistantemente espaciados alrededor de dicho estátor.

9. Un motor paso a paso del tipo de imán permanente tal como se expone en cualquiera de las reivindicaciones 2 a 8 en el que dicho estátor está formado con aceros magnéticos blandos sólidos, materiales de laminación de acero eléctrico o una combinación de estos materiales.

55 10. Un motor paso a paso del tipo de imán permanente tal como se expone en cualquiera de las reivindicaciones 2 a 9 en el que dichos rotor y estátor se configuran y disponen de modo que para un motor de dos fases que tenga las fases A y B, cuando los dedos de la fase A sobre los dientes de estátor se alinean con los polos de rotor, cada dedo de la fase B estará alineado con el centro de dos polos de rotor contiguos.

60 11. Un motor paso a paso del tipo de imán permanente tal como se expone en cualquiera de las reivindicaciones 2 a

9 en el que dichos rotor y estátor se configuran y disponen de modo que para un motor de tres fases que tenga las fases A, B y C, cuando los dedos de estátor de la fase A se alinean con los polos del rotor de una polaridad, cada dedo de estátor de la fase B y de la fase C se alineará con polos del rotor de la polaridad opuesta.

5 12. Un motor paso a paso del tipo de imán permanente tal como se expone en la reivindicación 11 en el que si cada dedo del estátor de la fase B se alinea con el borde de ataque de un polo de rotor asociado, cada dedo de la fase C se alinea con el borde de salida de un polo del rotor asociado.

10 13. Un motor paso a paso del tipo de imán permanente tal como se expone en la reivindicación 11 en el que si cada dedo de estátor de la fase B se alinea con el borde de salida de un polo de rotor asociado, cada dedo de la fase C se alineará con el borde de ataque de un polo de rotor asociado.

15 14. Un motor paso a paso del tipo de imán permanente tal como se expone en cualquiera de las reivindicaciones 2 a 9 en el que dichos rotor y estátor se configuran y disponen de modo que para un motor de cuatro fases que tenga fases A, B, C y D, cuando los dedos de la fase A sobre los dientes de estátor se alinean con los polos del rotor, cada dedo de la fase B se alineará con el centro de dos polos contiguos, cada dedo de la fase C se alineará con un polo opuesto a aquellos alineados con la fase A y cada dedo de la fase D se alineará con un polo opuesto a aquellos alineados con la fase B.

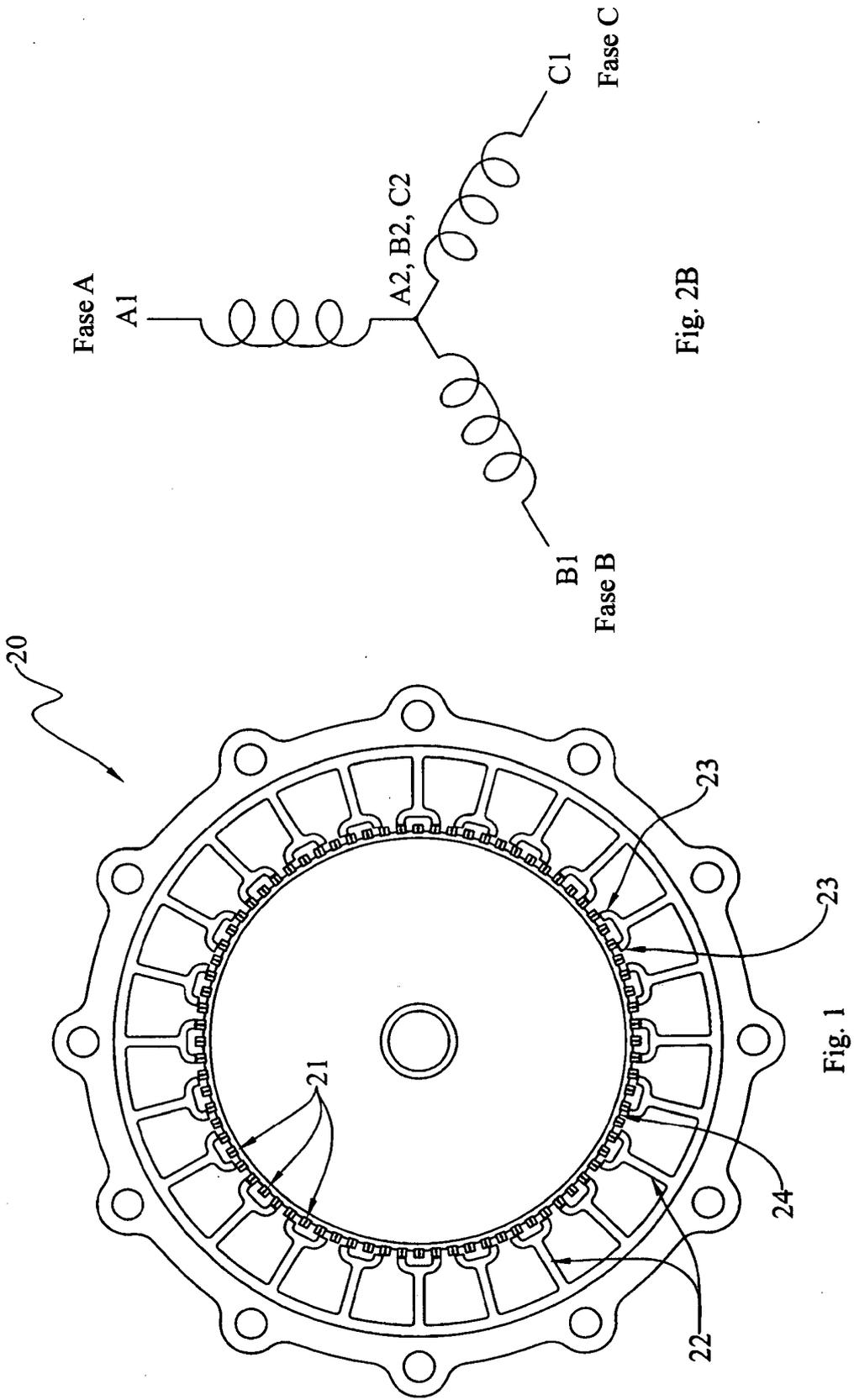
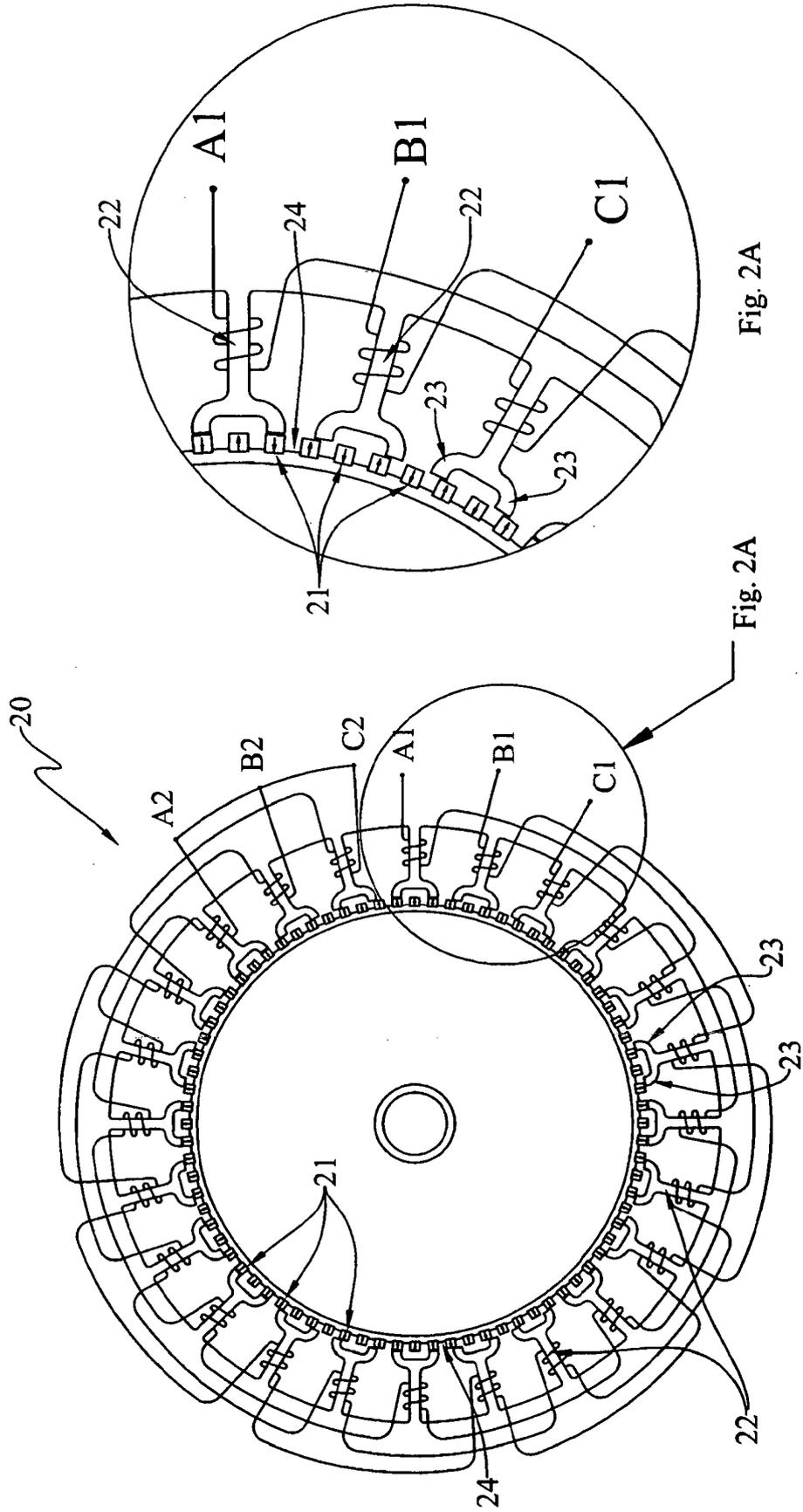


Fig. 2B

Fig. 1



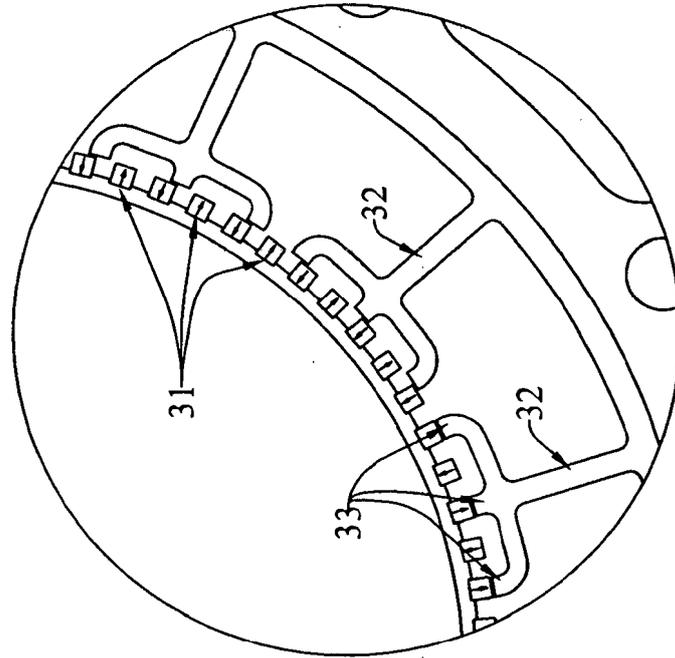


Fig. 3A

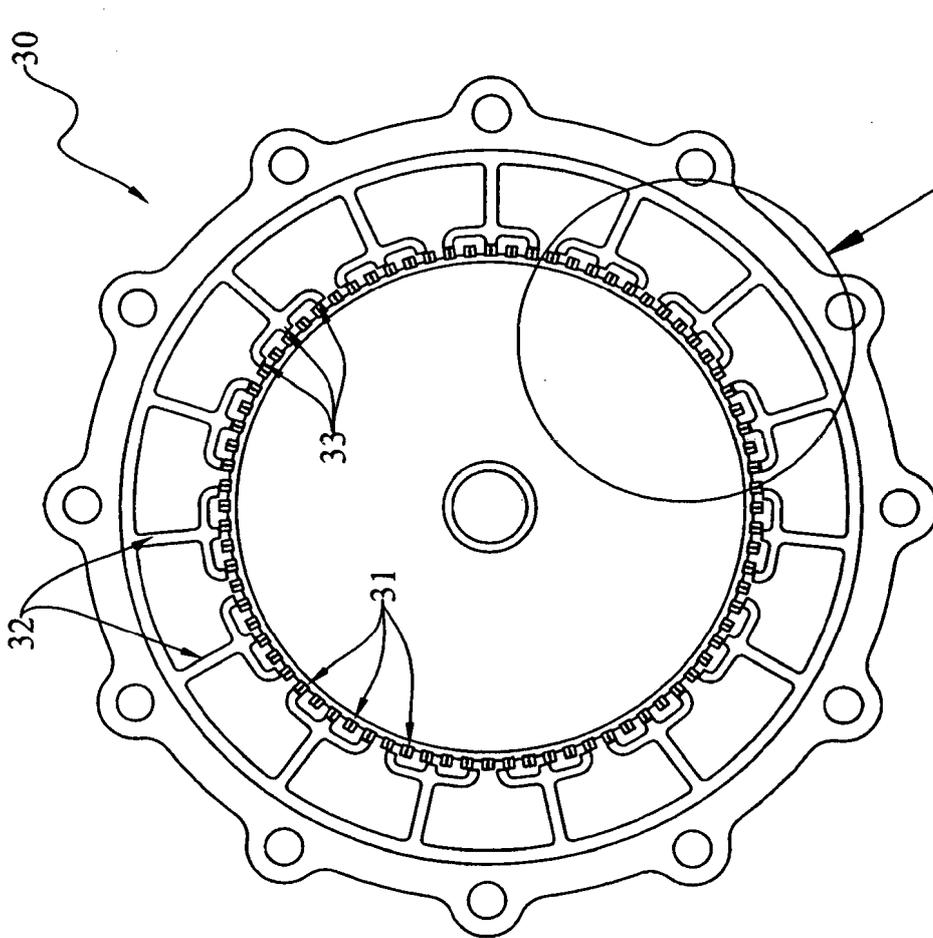


Fig. 3A

Fig. 3

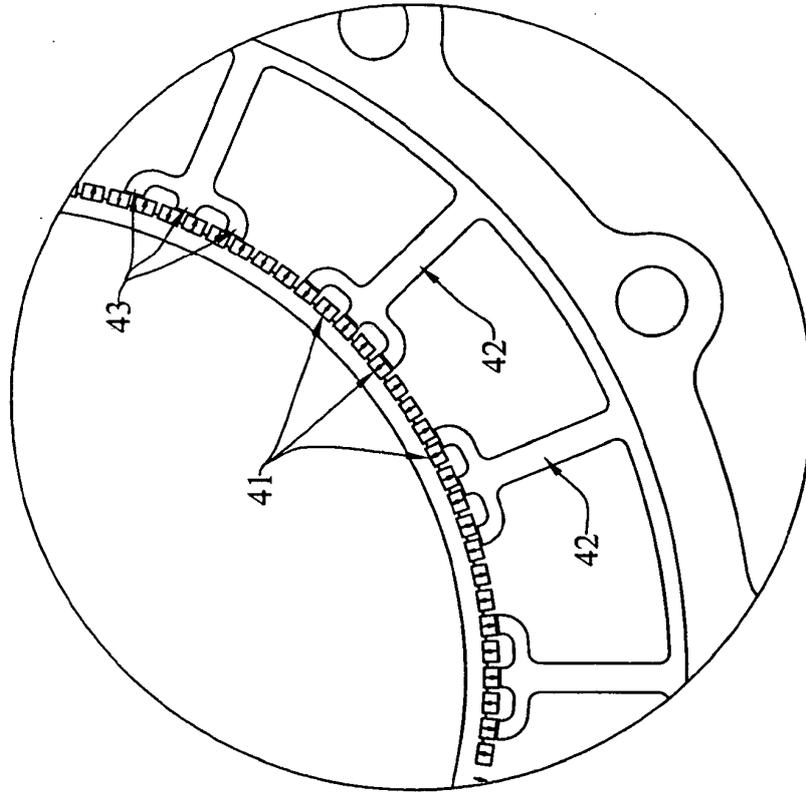


Fig. 4A

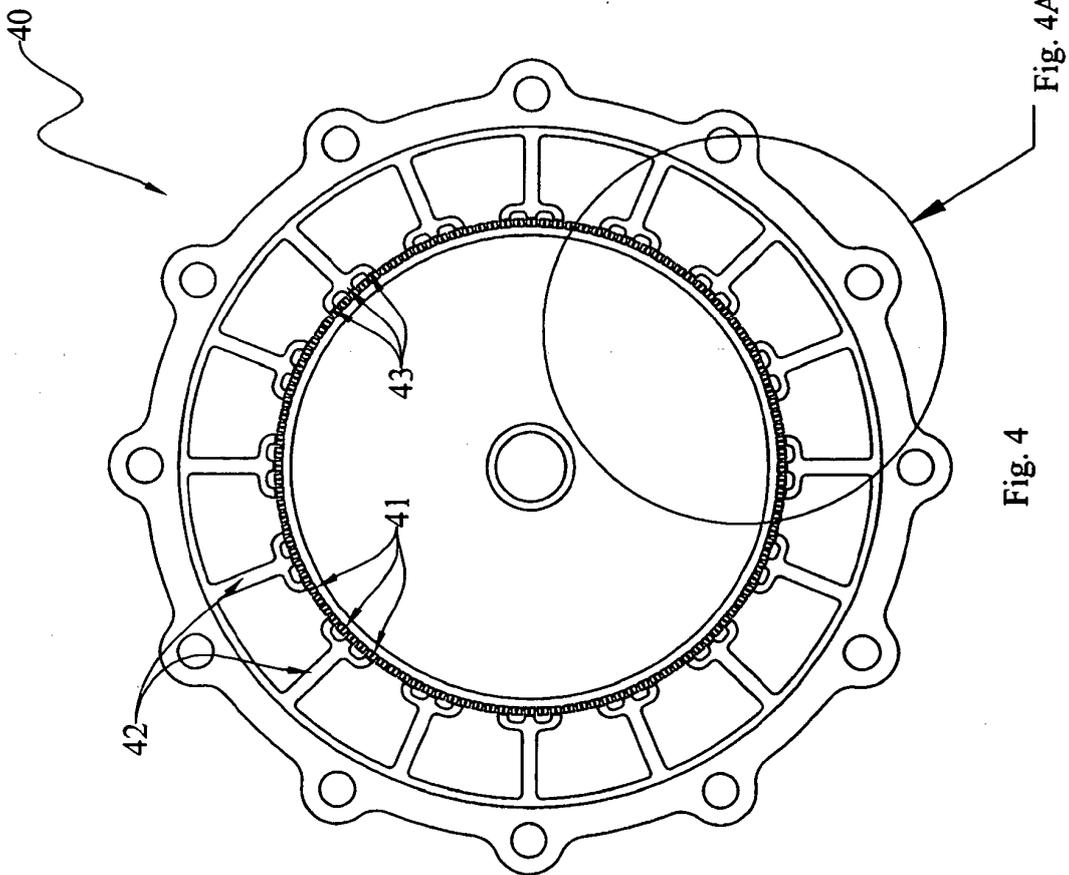


Fig. 4

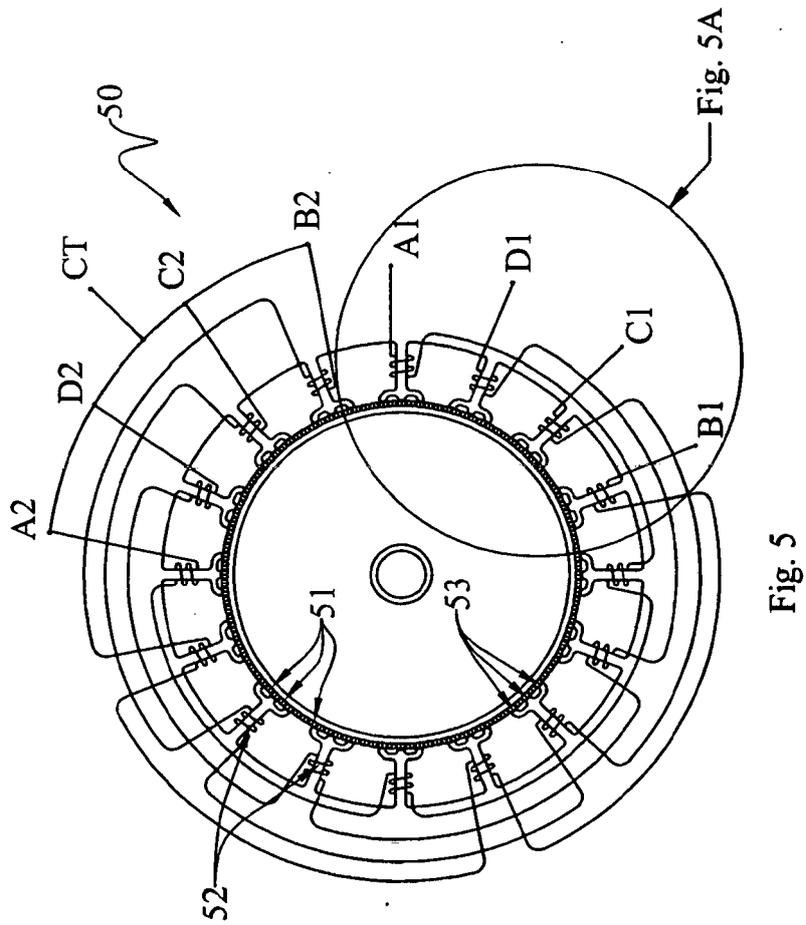


Fig. 5

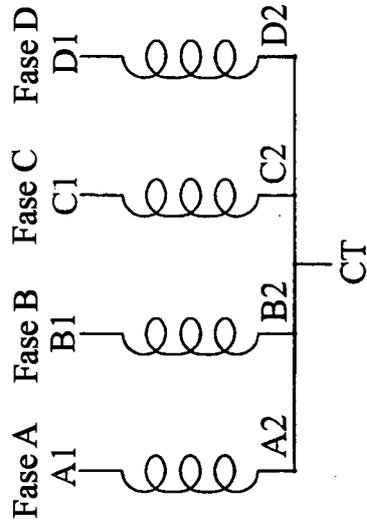


Fig. 5B

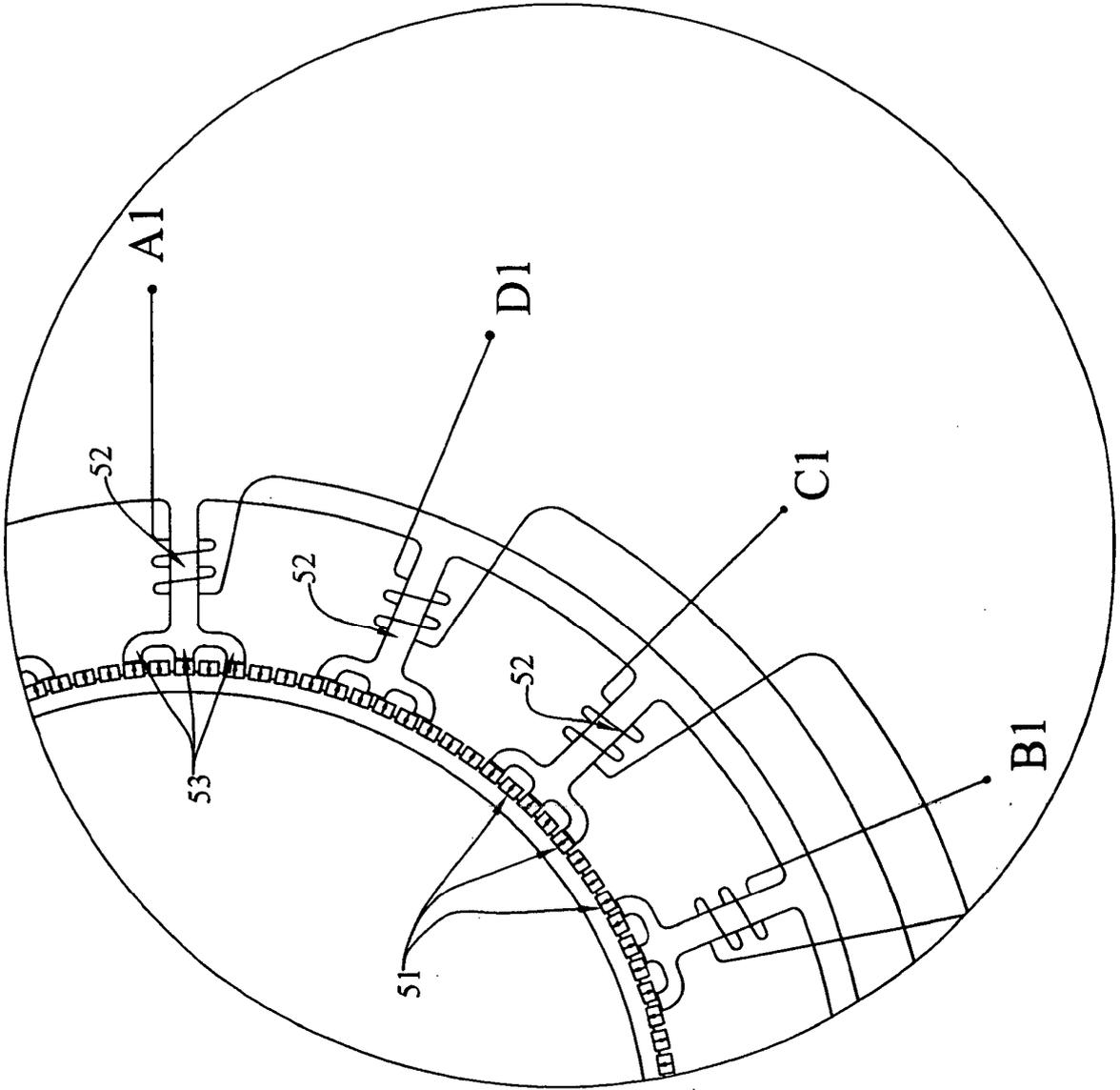


Fig. 5A

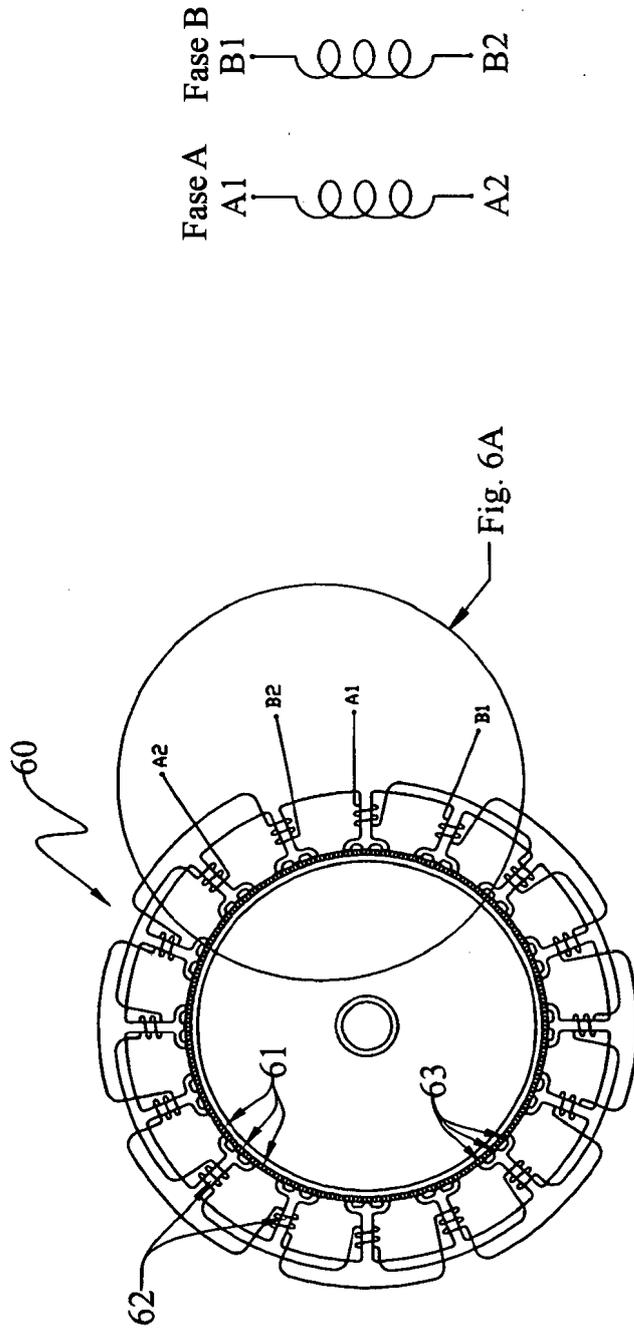


Fig 6B

Fig. 6

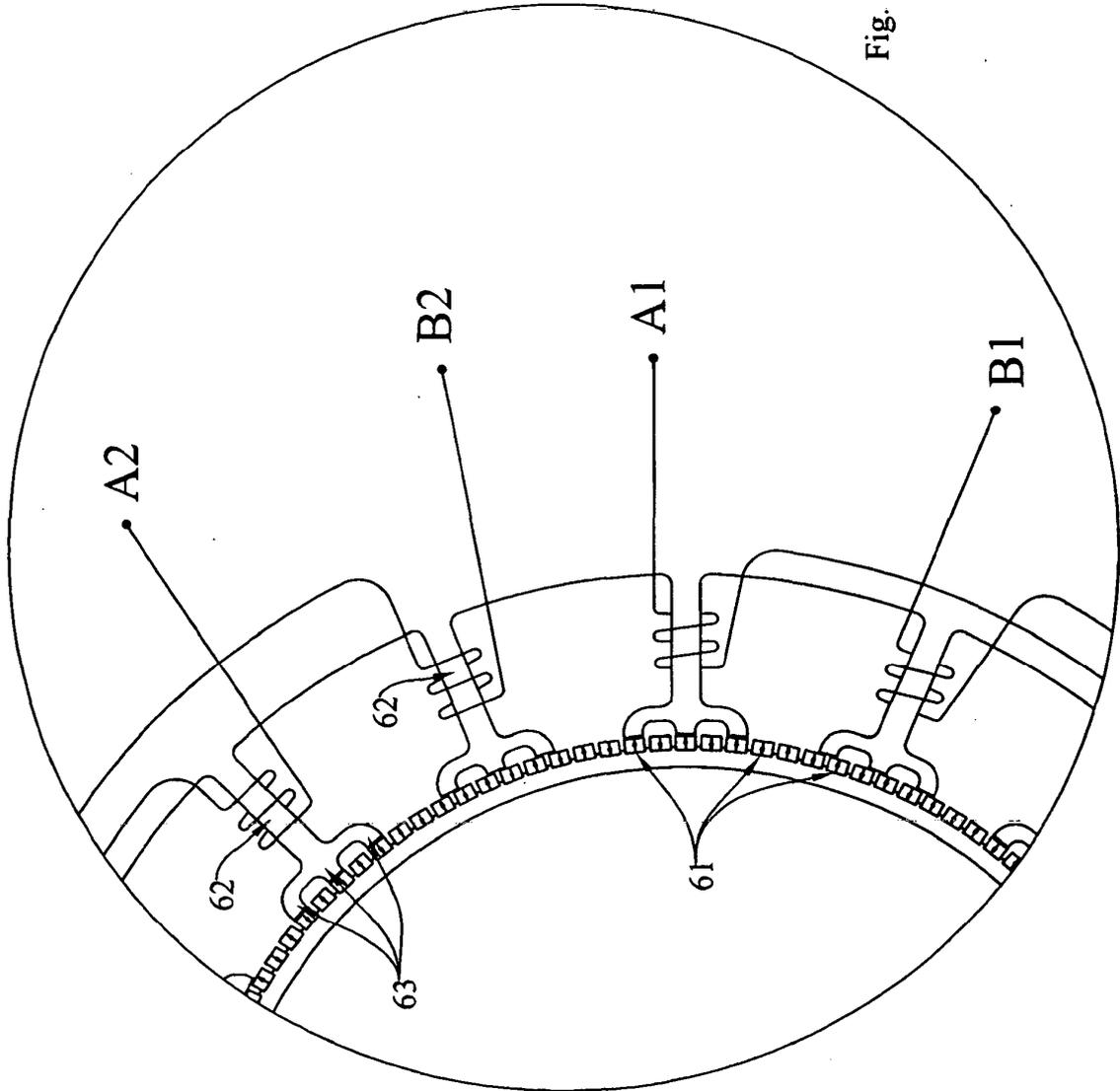


Fig. 6A

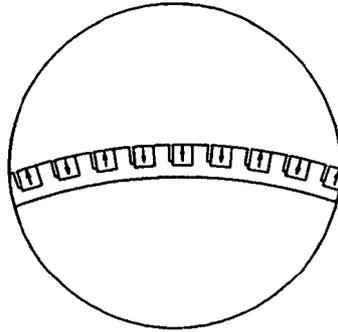


Fig. 2C

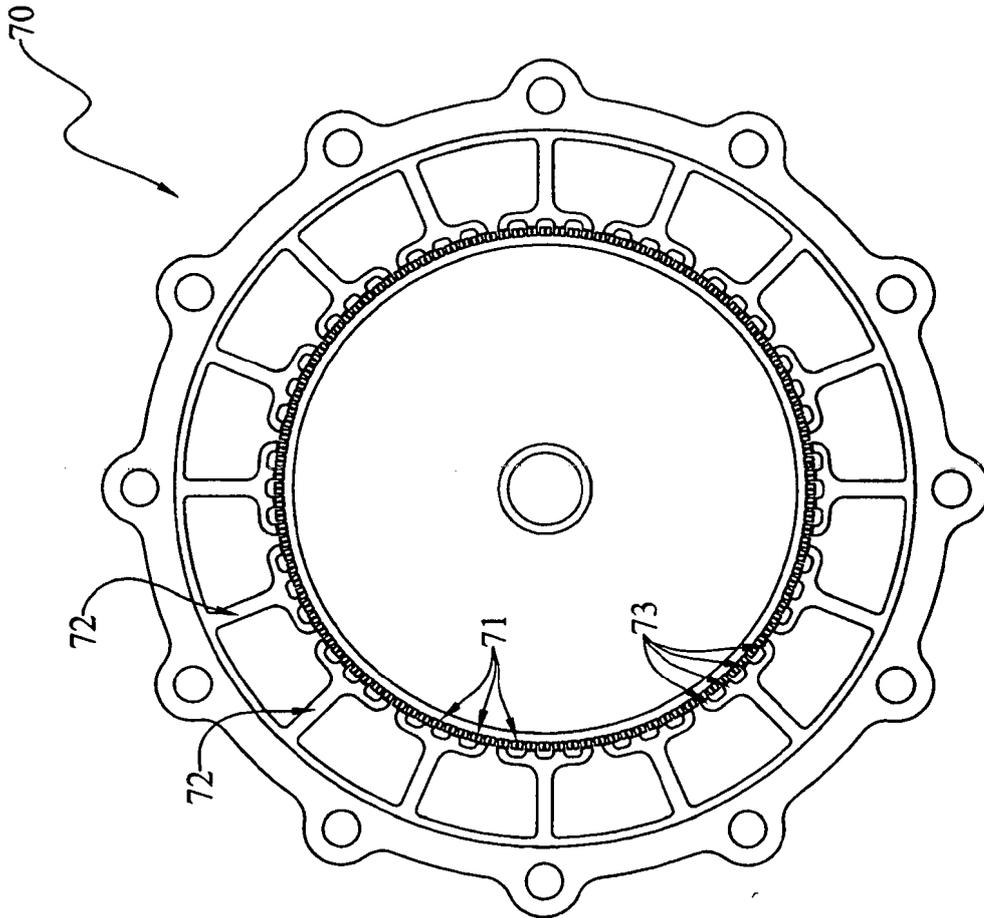


Fig. 7

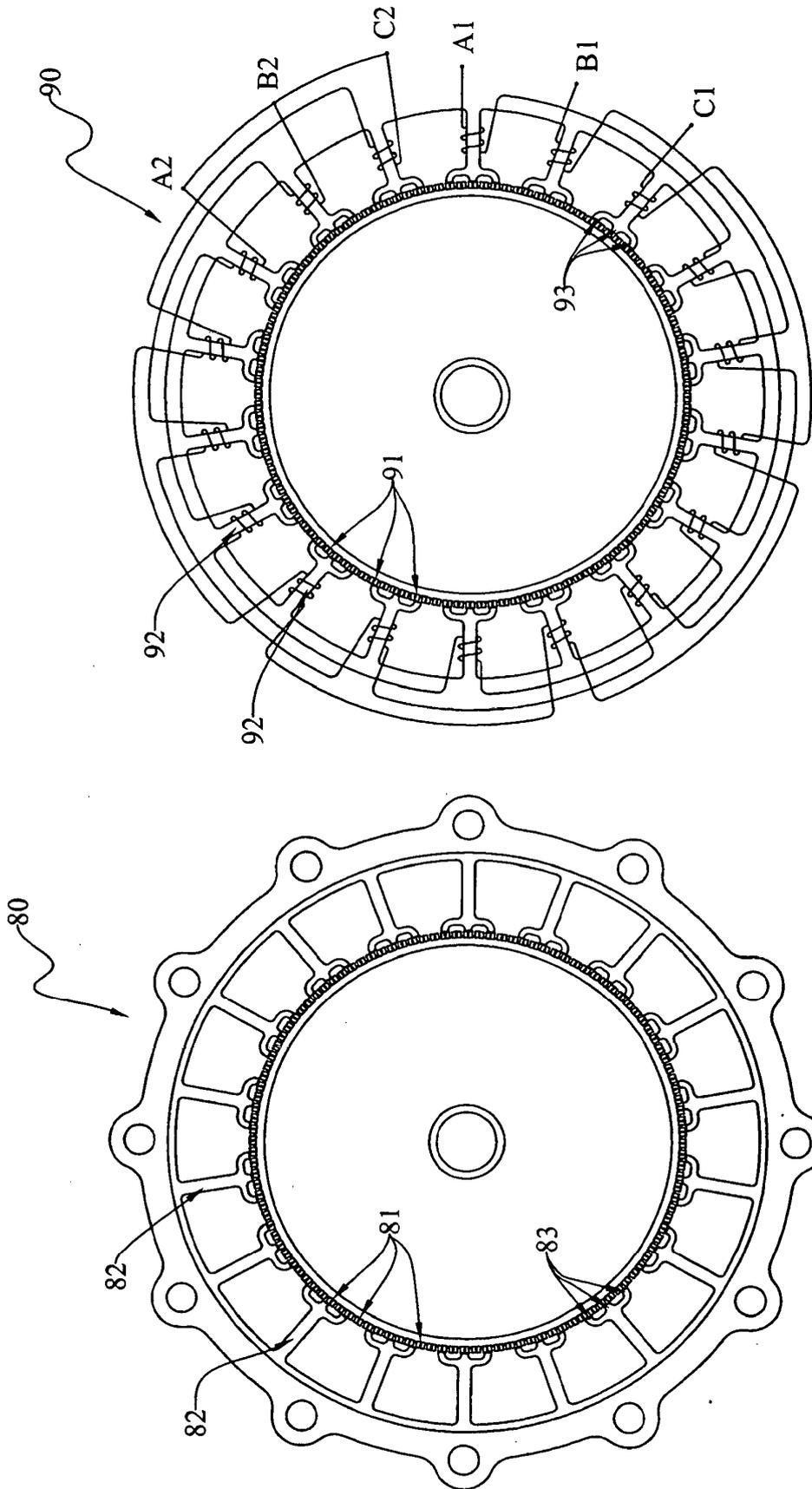


Fig. 9

Fig. 8