

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号
特許第5228582号
(P5228582)

(45) 発行日 平成25年7月3日 (2013.7.3)

(24) 登録日 平成25年3月29日 (2013.3.29)

(51) Int.Cl.	F I
H O 2 K 1/27 (2006.01)	H O 2 K 1/27 5 O 1 A
H O 2 K 1/22 (2006.01)	H O 2 K 1/27 5 O 1 M
H O 2 K 21/16 (2006.01)	H O 2 K 1/22 A
B 6 2 D 5/04 (2006.01)	H O 2 K 21/16 M
	B 6 2 D 5/04

請求項の数 11 (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2008-98143 (P2008-98143)	(73) 特許権者	000006013
(22) 出願日	平成20年4月4日 (2008.4.4)		三菱電機株式会社
(65) 公開番号	特開2009-254103 (P2009-254103A)		東京都千代田区丸の内二丁目7番3号
(43) 公開日	平成21年10月29日 (2009.10.29)	(74) 代理人	100113077
審査請求日	平成22年10月5日 (2010.10.5)		弁理士 高橋 省吾
		(74) 代理人	100112210
			弁理士 稲葉 忠彦
		(74) 代理人	100108431
			弁理士 村上 加奈子
		(74) 代理人	100128060
			弁理士 中鶴 一隆
		(72) 発明者	中野 正嗣
			東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三
			菱電機株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 永久磁石型回転電機およびそれを用いた電動パワーステアリング装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

複数のティースを有する固定子鉄心、および前記複数のティースのそれぞれに巻き回されて複数相を構成する電機子巻線からなる固定子と、
回転子鉄心、および前記回転子鉄心の周りに周方向に並べて設けられた複数の永久磁石からなり、前記固定子に対して空隙長 g の空隙を介して配置された回転子とを備え、
前記永久磁石は、前記固定子に対向する面が曲率半径 Rm の曲面であり、前記永久磁石の周方向中央部の厚みを $h1$ 、前記永久磁石の周方向の幅を W として、

$$0.65 \leq Rm \times h1 / W / (h1 + g) \leq 1.37$$

の関係を満たすような形状であることを特徴とする永久磁石型回転電機。

10

【請求項 2】

前記電機子巻線は、隣り合った前記ティースに同相で逆方向に巻き回されたことを特徴とする請求項 1 に記載の永久磁石型回転電機。

【請求項 3】

前記複数の永久磁石によって形成される磁極の数を N 、前記ティースの数を M とし、前記磁極の数 N と前記ティースの数 M との関係が、

$$6/7 \leq M/N \leq 6/5$$

を満たすことを特徴とする請求項 2 に記載の永久磁石型回転電機。

【請求項 4】

前記複数の永久磁石によって形成される磁極の数を N 、前記ティースの数を M とし、前記

20

磁極の数 N と前記ティースの数 M との関係が、

$$3/4 < M/N < 3/2$$

を満たすことを特徴とする請求項 2 に記載の永久磁石型回転電機。

【請求項 5】

前記複数の永久磁石によって形成される磁極の数を N 、前記ティースの数を M とし、前記磁極の数 N と前記ティースの数 M との関係が、

$$N : M = 1/2n \pm 2n : 1/2n \quad (n \text{ は } 1 \text{ 以上の整数})$$

であることを特徴とする請求項 1 に記載の永久磁石型回転電機。

【請求項 6】

前記複数の永久磁石によって形成される磁極の数を N 、前記ティースの数を M とし、前記磁極の数 N と前記ティースの数 M との関係が、

$$N : M = 9n \pm n : 9n \quad (n \text{ は } 1 \text{ 以上の整数})$$

であることを特徴とする請求項 1 に記載の永久磁石型回転電機。

【請求項 7】

隣り合う前記永久磁石の間に、前記回転子鉄心から突設された磁性体からなる突起部を設けたことを特徴とする請求項 1 ないし 6 のいずれか 1 項に記載の永久磁石型回転電機。

【請求項 8】

前記突起部の高さを h_3 とし、前記永久磁石の周方向中央部の厚みを h_1 、前記永久磁石の周方向端部の厚みを h_2 とし、

前記突起部および前記永久磁石が、

$$h_3/h_2 = 0.38、\text{かつ、} h_1 = h_3$$

の関係を満たすような形状であることを特徴とする請求項 7 に記載の永久磁石型回転電機。

【請求項 9】

上記固定子鉄心は分割された鉄心により構成されていることを特徴とする請求項 1 ないし 8 のいずれか 1 項に記載の永久磁石型回転電機。

【請求項 10】

上記複数の永久磁石の周りに金属製の管を設けたことを特徴とする請求項 1 ないし 9 のいずれか 1 項に記載の永久磁石型回転電機。

【請求項 11】

請求項 1 ないし 10 のいずれか 1 項に記載の永久磁石型回転電機を備えたことを特徴とする電動パワーステアリング装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は、永久磁石型回転電機に関するものであり、例えば、自動車用電動パワーステアリング装置に用いられるモータに関する。

【背景技術】

【0002】

従来の永久磁石型回転電機においては、固定子コアと永久磁石の相互作用でコギングトルクというトルク脈動が発生する。コギングトルクは振動の原因となるので、コギングトルクの低減が強く望まれている。このため、コギングトルクを低減する様々な技術が提案されており、コギングトルクを低減するための永久磁石の形状について検討されている。例えば、12個の永久磁石と9個の磁極とを有するモータの一例として、永久磁石の固定子に対向する曲面を円弧状として、回転子の半径を永久磁石の固定子対向面の曲率で割った値を、コギングトルクを低減する値に設定している（例えば、特許文献1参照）。また、極数6、ティースの数18の永久磁石モータであって、永久磁石の外側輪郭を通る外径が、隣接する永久磁石の輪郭の頂点を通る外径よりも小さくなるように外径の中心を偏心させて、回転子の表面形状を花弁状としている（例えば、特許文献2参照）。

【0003】

10

20

30

40

50

【特許文献 1】特開 2 0 0 5 - 3 4 1 6 8 8 号公報 (第 3 ~ 4 頁、第 2 , 3 図)

【特許文献 2】特開 2 0 0 0 - 3 5 0 3 9 3 号公報 (第 3 頁、第 1 図)

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 0 4 】

従来の永久磁石型回転電機では、永久磁石の固定子に対向する曲面を円弧状としてコギングトルクを低減することができるものの、永久磁石の周方向端部の高さが小さくなり、永久磁石の周方向端部で不可逆減磁が発生しやすくなるという問題点があった。高温下で永久磁石型回転電機が動作する場合、永久磁石の保磁力が低下するために、不可逆減磁がさらに発生しやすくなるという問題点があった。不可逆減磁が発生すると、トルクの低下が生じるのはもちろん、永久磁石が発生する磁束が設計時と異なってしまうため、コギングトルクやトルクリップルが増大し、振動・騒音の原因となる。このため、自動車用の電動パワーステアリング装置に使う用途であれば、良好な操舵感覚を得られなくなってしまう。

10

【 0 0 0 5 】

この発明は、上述のような課題を解決するためになされたもので、コギングトルクの低減と不可逆減磁の低減とを両立する永久磁石型回転電機を得るものである。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 0 6 】

この発明に係る永久磁石型回転電機は、複数のティースを有する固定子鉄心、および複数のティースのそれぞれに巻き回されて複数相を構成する電機子巻線からなる固定子と、回転子鉄心、および回転子鉄心の周りに周方向に並べて設けられた複数の永久磁石からなり、固定子に対して空隙長 g の空隙を介して配置された回転子とを備え、永久磁石は、固定子に対向する面が曲率半径 R_m の曲面であり、永久磁石の周方向中央部の厚みを h_1 、永久磁石の周方向の幅を W として、 $0.65 \leq R_m \times h_1 / W \leq 1.37$ の関係を満たすような形状であることを特徴とするものである。

20

【発明の効果】

【 0 0 0 8 】

この発明に係る永久磁石型回転電機は、回転子鉄心の周りに周方向に複数の永久磁石を並べて設け、永久磁石の固定子に対向する面が曲率半径 R_m の曲面とし、永久磁石の周方向中央部の厚みを h_1 、永久磁石の周方向の幅を W 、固定子と回転子の空隙を g として、永久磁石が $0.65 \leq R_m \times h_1 / W \leq 1.37$ の関係を満たすような形状にしたので、コギングトルクを低減することができ、さらに高温下で電機子巻線に電流を通電しても不可逆減磁を低減することができる。

30

【発明を実施するための最良の形態】

【 0 0 1 0 】

実施の形態 1 .

図 1 は、この発明を実施するための実施の形態 1 を示す永久磁石型回転電機の構成図であり、永久磁石型回転電機の軸方向から見た断面を示している。図 1 において、フレームやインシュレータ、磁石の飛散防止のための金属性の管などの詳細部分は省略し、簡略化して示している。固定子鉄心 1 は内側に突出したティース 2 を有し、ティース 2 は周方向に配置されている。永久磁石型回転電機は、固定子および回転子によって構成されており、回転子は固定子に対して空隙長 g の空隙を介して配置されている。図 1 に示すように、空隙長 g は、永久磁石 4 の固定子対向面とティース 2 先端との距離で定義される。固定子は、固定子鉄心 1、ティース 2、および電機子巻線 3 によって構成されている。電機子巻線 3 は、複数のティース 2 のそれぞれに巻き回されて複数相を構成する。図 1 では、12 個のティース 2 が配置され、それぞれのティース 2 に電機子巻線 3 が集中巻で巻き回されている。

40

【 0 0 1 1 】

一方、回転子は、永久磁石 4、回転子鉄心 5 およびシャフト 6 によって構成されている

50

。図1では、永久磁石4が回転子鉄心5の周りに周方向に並べられて10個配置されている。本実施の形態の永久磁石型回転電機は、極数10、ティースの数12で構成されている。ここで、極数は複数の永久磁石4によって形成される磁極の数である。また、回転子鉄心5の中心部分にはシャフト6が挿入されている。固定子鉄心1および回転子鉄心5は磁性材料で構成されていて、例えば電磁鋼板を積層して作られる。回転子鉄心5は、塊状鉄心を削って作ってもよい。

【0012】

電機子巻線3は12個あり、 $U+$ 、 $U-$ 、 $V-$ 、 $V+$ 、 $W+$ 、 $W-$ 、 $U-$ 、 $U+$ 、 $V+$ 、 $V-$ 、 $W-$ 、 $W+$ の順に配置されている。ここで、 $+$ と $-$ では巻き方向が逆であることを示している。この配置によってU相、V相、W相の計3相の電機子巻線3が構成される。電機子巻線3の結線としては、図2のように直列に2つ接続された電機子巻線がさらに並列に接続されて各相の結線が構成され、各相の結線がデルタ結線される場合が考えられる。なお、デルタ結線をスター結線としてもよいし、各相の結線における電機子巻線を並列ではなく直列としてもよい。なお、自動車用の電動パワーステアリングなどに適用する場合には、12Vのバッテリー電圧で駆動されることが多く、デルタ結線であればスター結線に比べて、巻数が約 $\sqrt{3}$ 倍多くなるので、その分、電機子巻線3の線径を細くすることができ、巻線作業性が向上する。ただし、バッテリー電圧よりも高い電圧で駆動される場合には、スター結線でもよい。

10

【0013】

このような構成の永久磁石型回転電機において、永久磁石と固定子鉄心との相互作用によって発生するコギングトルクを低減するために、引用文献1、2のように永久磁石の固定子に対向する曲面を円弧状とする方法がある。しかしながら、永久磁石の固定子に対向する曲面を円弧状とした永久磁石型回転電機においては、永久磁石の周方向端部の高さが小さくなるため、永久磁石の周方向端部で不可逆減磁が発生しやすくなる。また、高温下で永久磁石型回転電機が動作する場合、永久磁石の保磁力が低下するために、不可逆減磁がさらに発生しやすくなる。

20

【0014】

ここで、永久磁石の減磁と電機子巻線の配置との関係について考える。まず、異なる相の電機子巻線が隣り合っている場合の電機子電流による逆磁界について説明する。例えば、極数8、ティースの数12の永久磁石型回転電機の場合、電機子巻線の配置はU、V、W、U、V、W、U、V、Wの順になっている。また、極数12、ティースの数9の永久磁石型回転電機の場合、電機子巻線の配置はU、W、V、U、W、V、U、W、Vの順になっている。このように異なる相が隣り合っている場合には、U相に最大電流が流れても、両隣のV相、W相に流れる電流はU相に流れる電流の $1/2$ の振幅となり小さい。また、隣り合った電機子巻線に同じ振幅の電流が流れるのは、いずれかの相の電流がゼロとなるときである。3相の各相が互いに 120° ずれていることを考慮すると、同じ振幅の電流は、最大電流の $\cos(30^\circ)$ 倍、すなわち $\sqrt{3}/2$ 倍の振幅となる。

30

【0015】

一方、本実施の形態のような極数10、ティースの数12の永久磁石型回転電機の場合、図1に示すように隣り合ったティース2に同相で逆方向に巻きまわされた電機子巻線3が配置されている。例えば、 $U+$ と $U-$ が隣り合っている。このような配置にすると、いずれかの相に最大電流が流れたとき、その相の電機子巻線3が巻き回されたティース2付近の永久磁石4には大きな逆磁界がかかることになる。これを電流条件で言い換えれば、極数10、ティースの数12の場合、極数8、ティースの数12のように異なる相の電機子巻線が隣り合っている場合に比べて $3/\sqrt{2}$ 倍=約1.15倍の大きな電流が電機子巻線に流れたのと同じ効果があることがわかる。つまり、極数10、ティースの数12の回転電機は、極数8、ティースの数12の回転電機に比べて、電流条件で約1.15倍、不可逆減磁が発生しやすい条件になっているといえる。不可逆減磁は保磁力の限界を超えると急激に増加するため、1.15倍の差は設計に影響を与えることになる。

40

【0016】

50

特に、この逆磁界のかかる部分に永久磁石の周方向端部が近づいた位置関係となる場合には、永久磁石に不可逆減磁が発生しやすいという課題がある。図3に、軸方向から見た永久磁石型回転電機の構成図の部分拡大図を示す。この図を用いて、不可逆減磁の発生について説明する。U相電流が最大になると、U+とU-のティースを通る閉磁路50の起磁力が大きくなる。このとき、永久磁石4aの周方向端部（図では左側の端部）に大きな逆磁界がかかるため不可逆減磁が発生しやすくなり、電機子巻線が同相で逆方向に巻き回された巻線が隣り合ったティースに配置されている構成では更に不可逆減磁が発生しやすくなる。そこで、本発明は、このような逆磁界がかかる状態においても、不可逆減磁が発生しない構成としたものである。

【0017】

10

図4は、本実施の形態における永久磁石を配置した回転子の構成図である。永久磁石4は、固定子に対向する面を円弧状とした形状である。この永久磁石4の周方向の幅をW、周方向中央部の高さをh1、周方向端部の高さをh2とした。また、永久磁石4の円弧の曲率半径をRmとし、回転子の半径（軸中心から永久磁石の固定子対向面までの距離）をRrとした。永久磁石4は、曲率半径Rmが大きくなると周方向端部の高さh2が大きくなり、平板に近づいていく。このことは、曲率半径Rmが大きくなると永久磁石4の周方向端部での減磁量が小さくなることを意味する。

【0018】

図5は、永久磁石の幅Wと減磁率との関係の一例を示すものである。減磁率は、永久磁石の減磁量を示すものであり、永久磁石内部の磁束密度Bに対する不可逆減磁量の割合である。図5において、永久磁石の幅Wを回転子の半径Rrで規格化している。図5より、永久磁石の幅が大きくなると、永久磁石の減磁率が大きくなることが分かる。さらに、回転子と固定子との空隙長gを考慮し、永久磁石の残留磁束密度をBrとし、永久磁石内部の磁束密度をBとすると、およそ、式(1)のような関係がある。

20

【0019】

【数1】

$$B = \frac{h1/\mu_r}{h1/\mu_r + g} B_r \quad \text{--- (1)}$$

【0020】

30

ここで、 μ_r はリコイル比透磁率である。 μ_r はネオジ系希土類の焼結磁石の場合1.05ぐらいの値であり、式(1)を式(2)のように近似することができる。

【0021】

【数2】

$$B = \frac{h1}{h1 + g} B_r \quad \text{--- (2)}$$

【0022】

式(2)から、 $h1/(h1 + g)$ が大きいほど、永久磁石内部の磁束密度Bが大きくなるので、永久磁石の不可逆減磁が発生しにくくなることがわかる。これらのことから、本発明では、永久磁石の不可逆減磁を評価するパラメータとして、式(3)に示す減磁評価パラメータを用いて永久磁石の最適形状の設計を行う。

40

【0023】

【数3】

$$\frac{Rmh1}{W(h1 + g)} \quad \text{--- (3)}$$

【0024】

この減磁評価パラメータは、値が大きくなると減磁量が大きくなるものはそのまま乗じ、値が大きくなると減磁量が小さくなるものは逆数を乗じることで構成されている。図6

50

は、減磁評価パラメータに対するコギングトルクおよび永久磁石の減磁量を示す減磁率との関係を示したものである。図 6 において、横軸は減磁評価パラメータ、縦軸はコギングトルクおよび永久磁石の減磁率である。減磁は磁石温度が 140、電流は回転電機の定格電流より大きな電流が流れた状態を想定した。

【 0 0 2 5 】

永久磁石型回転電機が自動車用電動パワーステアリング装置に組み込まれる場合には、ハンドルの操舵感覚の観点から、コギングトルクは 0.01 Nm 以下、好ましくは 0.005 Nm 以下とすることが望ましい。一方、トルクの低下やコギングトルクやトルクリップルが増大に伴う振動・騒音の低減の観点から、減磁率は 1 % 以下にすることが望ましい。この両者の条件を満たすためには、図 6 からわかるように、式 (3) の減磁評価パラメータを以下の式 (4) で示した範囲内、好ましくは式 (5) で示した範囲内に収めなければならない。

10

【 0 0 2 6 】

【数 4】

$$0.65 \leq \frac{R_m h_1}{W(h_1 + g)} \leq 1.37 \quad \text{--- (4)}$$

【 0 0 2 7 】

【数 5】

$$0.65 \leq \frac{R_m h_1}{W(h_1 + g)} \leq 1.12 \quad \text{--- (5)}$$

20

【 0 0 2 8 】

図 7 にコギングトルクの波形の例を示す。図 7 において、横軸は回転子の回転角度 [電気角]、縦軸はコギングトルクである。減磁評価パラメータの値が 0.80 の場合と 1.80 の場合とで比較している。式 (4) で示した範囲に収まっている 0.80 の場合には、その範囲に収まっていない 1.80 の場合に比べて大幅にコギングトルクが低減できていることが分かる。

【 0 0 2 9 】

次に、別の観点から見た、永久磁石の形状と永久磁石の不可逆減磁等との関係について説明する。図 8 は、永久磁石の厚みとコギングトルクおよび永久磁石の減磁率との関係について示したものである。図 8 において、横軸は永久磁石の中央部分の厚み h_1 と周方向端部の厚み h_2 との比である h_2 / h_1 、縦軸はコギングトルクおよび永久磁石の減磁量を示す減磁率である。上述のとおり、コギングトルクは 0.01 Nm 以下、好ましくは 0.005 Nm 以下とすることが望ましい。一方、減磁率は 1 % 以下にすることが望ましい。この両者の条件を満たすためには、図 8 からわかるように、厚みの比 h_2 / h_1 を以下の式 (6) で示した範囲内、好ましくは式 (7) で示した範囲内に収めなければならない。

30

【 0 0 3 0 】

【数 6】

$$0.40 \leq \frac{h_2}{h_1} \leq 0.73 \quad \text{--- (6)}$$

40

【 0 0 3 1 】

【数 7】

$$0.40 \leq \frac{h_2}{h_1} \leq 0.65 \quad \text{--- (7)}$$

【 0 0 3 2 】

以上のような構成にすることによって、従来例と比べコギングトルクを低減することが

50

でき、さらに、永久磁石の不可逆減磁を抑制できる。特に、電機子巻線が同相で逆方向に巻きまわされた巻線が隣り合ったティースに配置されている永久磁石型回転電機においては、異なる相が隣り合っている場合に比べて不可逆減磁が大きくなる傾向があったが、本発明を適用することによってコギングトルクを低減することができる。さらに、高温下で電機子巻線に電流を通電しても不可逆減磁を低減することができ、トルクリップルを低減することができる。

【 0 0 3 3 】

なお、本実施の形態の構成による極数 10、ティースの数 12 の集中巻の永久磁石型回転電機においては、巻線係数が 0.933 となる。これに対し、従来広く用いられている極数 8、ティースの数 12 の永久磁石型回転電機の場合、巻線係数は 0.866 となる。10
両者を比較すると、本実施の形態の構成の方が、巻線係数が高くなる。また、極数とティースの数との最小公倍数を比較しても、本実施の形態の構成では 60 であるのに対し、従来から広く用いられている極数 8、ティースの数 12 の場合は 24 であり、最小公倍数も本実施の形態の構成の方が大きい。極数とティースの数との最小公倍数は、回転電機の回転子が 1 回転するときのコギングトルクの脈動数であり、最小公倍数が大きい方がコギングトルクは小さくなる傾向にある。よって、本実施の形態の構成の永久磁石型回転電機の方がコギングトルクの小さい回転電機といえる。したがって、本実施の形態の構成によれば、従来例よりも不可逆減磁を低減しつつコギングトルクを低減することができる。また、極数 10、ティースの数 12 としたため、巻線係数も大きくでき、永久磁石が発生する磁束の利用効率を向上できるので、小型軽量化で、高効率な永久磁石型回転電機を得ること20
ができる。

【 0 0 3 4 】

実施の形態 2 .

図 9 は、この発明を実施するための実施の形態 2 を示す永久磁石型回転電機の回転子の部分拡大図であり、回転子の一部を軸方向から見た断面を示している。本実施の形態の永久磁石型回転電機は、隣り合う永久磁石の間に設けた突起部の形状を、実施の形態 1 よりも詳細に設定したものである。図 9 において、図 1 と同一の符号を付したものは、同一またはこれに相当するものであり、このことは明細書の全文において共通することである。また、明細書全文に表れている構成要素の態様は、あくまで例示であってこれらの記載に30
限定されるものではない。

【 0 0 3 5 】

図 9 (a) は比較のために示した突起部がない場合、図 9 (b) は隣り合う永久磁石 4 の間に突起部 7 を設けた場合を示す。この突起部 7 は、磁性材料で形成され、回転子鉄心 5 から突設されている。例えば、電磁鋼板を金型で打ち抜いて回転子鉄心 5 を作成する際に、一緒に突起部 7 を形成してもよいし、回転子鉄心 5 作成後に磁性材料を付加してもよい。

【 0 0 3 6 】

ここで、突起部 7 の高さを h_3 、永久磁石 4 の周方向端部の高さ h_2 とし、両者の比 h_3 / h_2 と永久磁石の減磁量との関係について説明する。図 10 は、高さの比 h_3 / h_2 に対する永久磁石の減磁量との関係を示したものである。図 10 において、横軸は高さの40
比 h_3 / h_2 、縦軸は永久磁石の減磁量を示す減磁率の差である。減磁率の差は、永久磁石内部の磁束密度 B に対する減磁量の差である。減磁量の差は、突起部 7 を設けた場合の減磁量から突起部を設けない場合の減磁量を差し引いた値である。減磁量の差が負の値を示しているのは突起部 7 の効果で不可逆減磁が軽減できていることを示す。図 10 からわかるように、高さの比 h_3 / h_2 を以下の式 (8) で示した範囲内に収めることで、不可逆減磁の影響がなくなることがわかる。なお、固定子との衝突を防ぐために、突起部 7 の高さ h_3 は、永久磁石 4 の周方向中央部の高さ h_1 以下の値に設定する必要がある。

【 0 0 3 7 】

【数 8】

$$\frac{h_3}{h_2} \geq 0.38 \quad \text{--- (8)}$$

【0038】

磁性材料からなる突起部 7 を設けることによって、固定子側から永久磁石 4 の周方向端部を通過する磁束の一部が突起部 7 に回り込むため、永久磁石 4 の周方向端部を通過する磁束が減少する。このため、不可逆減磁が軽減されることになる。以上のような構成によって、永久磁石 4 の周方向端部の逆磁界を緩和することができ、結果として減磁量を低減することができる。また、隣り合う永久磁石 4 の間に突起部 7 を設けているため、永久磁石 4 の位置決めも容易となる。

10

【0039】

実施の形態 3 .

図 1 1 および図 1 2 は、この発明を実施するための実施の形態 3 を示す永久磁石型回転電機の構成図であり、永久磁石型回転電機の軸方向から見た断面を示している。本実施の形態の永久磁石型回転電機は、極数およびティースの数が実施の形態 1 と異なっている。実施の形態 1 では、極数 10、ティースの数 12 の永久磁石型回転電機について述べたが、本発明はこの極数とティースの数との組合せ以外の組合せについても適用できる。

【0040】

図 1 1 に、極数が 14、ティースの数が 12 の場合の永久磁石型回転電機を示す。電機子巻線 3 は 12 個あり、U + , U - , W - , W + , V + , V - , U - , U + , W + , W - , V - , V + の順に配置されている。ここで、+ と - では巻き方向が逆であることを示している。この配置によって U 相、V 相、W 相の計 3 相の電機子巻線 3 が構成される。電機子巻線の結線としては、直列に 2 つ接続された電機子巻線がさらに並列に接続されて各相の結線が構成され、各相の結線がデルタ結線される場合が考えられる。なお、デルタ結線をスター結線としてもよいし、各相の結線における電機子巻線を並列ではなく直列としてもよい。

20

【0041】

この場合においても同相で逆方向に巻き回された電機子巻線 3 が隣り合ったティース 2 に配置されているため、実施の形態 1 で説明したように、いずれかの相に最大電流が流れたとき、大きな逆磁界が永久磁石 4 にかかり、永久磁石の周方向端部に不可逆減磁が発生する。しかしながら、本実施の形態においても、実施の形態 1 で示したように、式 (4)、式 (5) を満足するように減磁評価パラメータを設定するか、式 (6)、式 (7) を満足するように永久磁石の厚みの比 h_2 / h_1 を設定するか、実施の形態 2 で示したように、式 (8) を満足するように永久磁石の周方向端部の高さに対する突起部の高さの比 h_3 / h_2 を設定する。このことによって、従来の永久磁石式回転電機と比べて、コギングトルクを低減することができる。さらに、高温下で電機子巻線 3 に電流を通電しても不可逆減磁を低減することができ、トルクリップルを低減することができる。

30

【0042】

また、別の極数およびティースの数の組合せに対しても本発明を適用することができる。図 1 2 に、極数が 8、ティースの数が 9 の場合の永久磁石型回転電機を示す。この場合、電機子巻線 3 は 9 個あり、U + , U - , U + , V + , V - , V + , W + , W - , W + の順で配置されている。ここで、+ と - では巻き方向が逆であることを示している。U + , U - , U + は直列で接続されて U 相を構成し、V 相、W 相も同様に直列に 3 つの巻線が接続されて構成されている。そして、各相がデルタ結線あるいはスター結線によって接続される。このような永久磁石型回転電機の場合でも、同相で逆方向に巻き回された電機子巻線 3 が隣り合ったティース 2 に配置されているため、いずれかの相の電流が最大となったときに、大きな逆磁界が永久磁石 4 にかかる。このため、永久磁石 4 を式 (4) ~ 式 (8) を満たす形状にすることによって、従来の永久磁石式回転電機と比べて、コギングトルクを低減することができる。さらに、高温下で電機子巻線 3 に電流を通電しても不可逆減

40

50

磁を低減することができ、トルクリップルを低減することができる。

【 0 0 4 3 】

なお、図示しないがこの他にも極数が 10、ティースの数が 9 の永久磁石式回転電機でも同様の効果が得られる。また、一般に、

極数：ティースの数 = $12n \pm 2n : 12n$

極数：ティースの数 = $9n \pm n : 9n$

($n : 1$ 以上の整数)

となるような極数およびティースの数の永久磁石式回転電機においても、同相で逆方向に巻き回された巻線が隣り合ったティースに配置されており、永久磁石の形状を式(4)～式(8)を満たす構成にすることによって、コギングトルクを低減することができる。さらに、高温下で電機子巻線 3 に電流を通電しても不可逆減磁を低減することができ、トルクリップルを低減することができる。

10

【 0 0 4 4 】

そして、極数 14、ティースの数 12 の集中巻の永久磁石型回転電機においては、巻線係数が 0.933、極数とティースの数との最小公倍数が 84 となる。これは、従来から広く用いられている極数 8、ティースの数 12 の永久磁石型回転電機の場合よりも大きい。ため、本実施の形態の構成によれば、従来例よりもコギングトルクが小さく、巻線係数も大きいので、小型軽量化が可能であり、高効率な永久磁石型回転電機を得ることができる。また、極数が 8、ティースの数が 9 の集中巻の永久磁石型回転電機においては、巻線係数が 0.946、極数とティースの数との最小公倍数が 72 となり、極数が 10、ティースの数が 9 の集中巻の永久磁石型回転電機においては、巻線係数が 0.946、極数とティースの数との最小公倍数が 90 となる。これらの値は、従来から広く用いられている極数 12、ティースの数 9 の永久磁石型回転電機の巻線係数 0.866、極数とティースの数との最小公倍数 36 に比べて大きい。ため、本実施の形態の構成によれば、従来例よりもコギングトルクが小さく、巻線係数も大きいので、小型軽量化が可能であり、高効率な永久磁石型回転電機を得ることができる。

20

【 0 0 4 5 】

以上のことから、極数 10、ティースの数 12 の永久磁石型回転電機、極数 14、ティースの数 12 の永久磁石型回転電機、および極数 8、ティースの数 9 の永久磁石型回転電機においては、同相で逆方向に巻き回された巻線が隣り合ったティースに配置されており、永久磁石の形状を式(4)～式(8)を満たす構成にすることによって、コギングトルクを低減することができる。さらに、高温下で電機子巻線 3 に電流を通電しても不可逆減磁を低減することができ、トルクリップルを低減することができる。このことから、電機子巻線は同相で逆方向に巻き回されことになる、以下の式(9)で表される極数 N とティースの数 M との組合せにおいて、本発明を適用することができる。

30

$$6/7 \leq M/N \leq 6/5 \quad \text{--- (9)}$$

ここで、N と M は異なる整数である。また、電機子巻線が同相で逆方向に巻き回す必要がない従来の永久磁石型回転電機の極数 N とティースの数 M との組合せにおいては、本発明の適用の効果は低い。このため、従来の永久磁石型回転電機における極数 N とティースの数 M との組合せを除く、以下の式(10)で表される範囲内で極数 N とティースの数 M との組合せてもよい。

40

$$3/4 < M/N < 3/2 \quad \text{--- (10)}$$

【 0 0 4 6 】

実施の形態 4 .

図 13 は、この発明を実施するための実施の形態 4 を示す永久磁石型回転電機の構成図であり、永久磁石型回転電機の軸方向から見た断面を示している。本実施の形態の永久磁石型回転電機は、固定子鉄心が分割された鉄心を連結した構成である点が実施の形態 1 と異なっている。

【 0 0 4 7 】

固定子鉄心 11 は、金型によって一体で打ち抜いて作成される場合と異なり、周方向に

50

分割された鉄心を連結して作成されている。図 13 のように 1 つのティース 12 毎に分割されている場合、あるいはコアバックを略円形で打ち抜き、ティースを嵌め込む構造の場合など種々作成方法が考えられる。このように分割された鉄心によって固定子鉄心 11 が構成される場合は、金型によって一体で打ち抜いて作成される場合と比べて、固定子鉄心 11 の内周形状の精度すなわち真円度が劣る可能性がある。固定子鉄心 11 の形状精度が悪くなると、回転子が一回転する毎に極数と同じ脈動数のコギングトルク成分が発生する。したがって、電動パワーステアリング装置のような低コギングトルクを要求される用途に用いる場合には、極数とティースの数との最小公倍数の脈動数で発生する成分だけではなく、回転数 1 回転毎に極数と同じ脈動数で発生する成分のコギングトルクも考慮する必要がある。

10

【0048】

しかしながら、実施の形態 1 で示したような永久磁石 4 を式 (4) ~ 式 (8) を満たす形状にすることによって、極数とティースの数との最小公倍数の脈動数で発生するコギングトルク成分を十分低減することができる。このため、回転数 1 回転毎に極数と同じ脈動数のコギングトルク成分があったとしても、低コギングトルクの永久磁石型回転電機を得ることができる。

【0049】

図 14 に、具体例として固定子鉄心が分割された固定子鉄心により構成された極数 10、ティースの数 12 の永久磁石型回転電機のコギングトルクの波形の例を示す。従来の永久磁石型回転電機では、極数とティースの数との最小公倍数 60 に一致する脈動数のコギングトルク成分と回転数 1 回転毎に極数と同じ 10 回脈動する成分とが大きく、コギングトルクの振幅としては大きい。しかしながら、本発明の永久磁石型回転電機では、最小公倍数 60 に一致する脈動数のコギングトルク成分が十分低減できているので、ほぼ極数と同じ 10 回脈動する成分だけとなっている。このことは、すなわち固定子鉄心 11 の形状精度が悪くてもコギングトルクを十分小さく抑制することができることを示している。

20

【0050】

さらに、金型によって一体で打ち抜くことによって、特に複数のティース間に形成されるスロット開口幅が小さい場合には電機子巻線を巻くための巻線機のノズルをスロットに入れることが困難であるので、電機子巻線の占積率を向上するのが困難であった。しかしながら、分割された固定子鉄心によって固定子鉄心 11 が構成される場合には、スロット開口幅が小さくても電機子巻線 3 の占積率を向上することができ、結果として銅損とコイルエンドが小さくなり小型軽量化、高効率化が可能となる。

30

【0051】

実施の形態 5 .

図 15、図 16 は、この発明を実施するための実施の形態 5 を示す永久磁石型回転電機の回転子の構成図であり、永久磁石型回転電機の軸方向から見た断面を示している。本実施の形態の永久磁石型回転電機は、回転子の永久磁石の周りに、永久磁石の飛散防止のための金属製の管が設けられている点が実施の形態 1 と異なっている。図 15、図 16 において、回転子鉄心 5 および複数の永久磁石 4 を囲むように、永久磁石 4 の飛散防止のための金属製の管 8、9 が設けられている。金属製の管は高速で回転子が回転したときの遠心力によって永久磁石 4 が飛散することを防止する役割がある。

40

【0052】

図 17 は、従来の永久磁石型回転電機の回転子の永久磁石 24 の周辺に金属製の管 28 が設けられた場合を示すものである。軸方向から見た永久磁石 24 の断面形状は長方形となっており、永久磁石 24 の角の部分と金属製の管 28 が接触した状態で、永久磁石 24 を保護している。遠心力がかかると、永久磁石 24 の角と接触している部分に強い応力が集中し金属製の管 28 が破損しやすいという課題がある。また、永久磁石 24 の角が鋭いため、製造工程においても金属製の管 28 に傷がつきやすく、この傷が原因で破損しやすいという課題があった。特に、永久磁石 24 の断面形状が長方形の場合には、永久磁石 24 を含めた回転子の最大外径が永久磁石 24 の角の部分になり、金属製の管 28 とこの角

50

とが接触しやすくなる。

【0053】

しかしながら、図15に示すように、永久磁石4の固定子に対向する曲面を円弧状とし、実施の形態1で示したような永久磁石4を式(4)～式(8)を満たす形状にすることによって、永久磁石4と金属製の管8が接触する面積が大きくなり、応力を緩和することができる。このため、遠心力によっても金属製の管8が破損しにくくなる。また、製造工程においても、金属製の管8に傷がつきにくくなる。これらのことから、金属の管8を薄く構成しても、遠心力に耐える構造とすることができる。例えば、0.2mm以下、さらには0.1mm以下のステンレス製の管によって金属製の管8を構成することができる。金属製の管8を薄くすることによって、永久磁石型回転電機の回転子と固定子との空隙長を低減することができるため、少ない永久磁石4でも十分な磁束を発生させることができるので、永久磁石4の材料使用量の低減が図れる。この結果、永久磁石型回転電機の小型軽量化、高効率化が可能となる。なお、金属製の管8を設けた場合でも、空隙長gは永久磁石4の固定子対向面とティース2先端との距離で定義される。

10

【0054】

また、図16は、金属製の管を円筒ではなく、断面形状が略多角形とした永久磁石型回転電機の回転子の構成図である。断面形状が略多角形の金属製の管9は、周方向位置が永久磁石4の円弧部分に相当する部分では永久磁石4の形状に沿わせた形状とし、隣り合う永久磁石間ではほぼ直線状とした形状としている。このような形状にすることで、金属製の管9によって各永久磁石4が接触連結されているので、金属製の管9と永久磁石4との接触面積が増大し、金属製の管9および永久磁石4に渦電流による発熱が生じて、永久磁石4の局所的な昇温が緩和されて永久磁石4の減磁耐力が向上する。さらに、金属製の管9と永久磁石4との接触面積が大きくなることで、応力が緩和されて高速回転時の遠心力に対しても強くなる。

20

【0055】

なお、図16では、金属製の管9を永久磁石4の形状に沿わせて、永久磁石4の円弧状の部分の大部分と接触している例を示したが、金属製の管の形状はこれに限らない。例えば、永久磁石4の円弧状の部分の一部と接触していてもよく、図15に示した金属製の管8に比べて、永久磁石4との接触面積が増えているような形状になっていれば渦電流による発熱が生じて局所的な昇温が緩和されることはいうまでもない。

30

【0056】

さらに、金属製の管がステンレス製であれば、断面形状が多角形となっても磁気回路に影響を与えないためコギングトルク発生の要因とならないので、低コギングトルクの永久磁石型回転電機を得ることができる。

【0057】

実施の形態6.

図18は、この発明を実施するための実施の形態6を示す本発明の永久磁石型回転電機を用いた車両用の電動パワーステアリング装置の概念図である。図18において、電動パワーステアリング装置には、ステアリングホイール30から操舵力を伝えるためのコラムシャフト31が設けられている。コラムシャフト31にはウォームギヤ32(図では詳細は省略し、ギヤボックスのみ示している)が接続されており、コントローラ33によって駆動されるモータ34の出力(トルク、回転数)を、回転方向を直角に変えながら伝達し、同時に減速し、アシストトルクを増加させる。35はハンドルジョイントであり、操舵力を伝えると共に、回転方向も変える。36はステアリングギヤ(図では詳細は省略し、ギヤボックスのみ示している)であり、コラムシャフト31の回転を減速し、同時にラック37の直線運動に変換し、所要の変位を得る。このラック37の直線運動により車輪を動かし、車両の方向転換等を可能とする。

40

【0058】

このような電動パワーステアリング装置では、モータ34にて発生するトルクの脈動がウォームギヤ32とコラムシャフト31を介して、ステアリングホイール30に伝達され

50

る。したがって、モータ34が大きなトルク脈動を発生する場合、滑らかなステアリング感覚を得ることが出来ない。また、電動機がアシストするためのトルクを発生しない状態においても、電動機が大きなコギングトルクを発生するものであれば、滑らかなステアリング感覚を得ることが出来ない。

【0059】

しかしながら、本発明に係る永久磁石型回転電機を本実施の形態の電動パワーステアリング装置のモータ34として組み込むことによって、コギングトルクが低減できる。また、高温下でモータ34の電機子巻線に電流が通電された場合においても不可逆減磁がほとんど発生しないので、振動・騒音の原因となるトルクリップルも低減する。このため、電動パワーステアリング装置における操舵感覚を向上できる。

10

【0060】

また、電動パワーステアリング装置用のモータは小型化と永久磁石の使用量低減のために、回転子と固定子の磁気的空隙長は1mm以下で設計されることが多い。このような小さい空隙長であっても、永久磁石の形状が適切でないと例えば温度140℃のような高温下で不可逆減磁が発生してしまう。特に、

極数：ティースの数 = $12n \pm 2n : 12n$

極数：ティースの数 = $9n \pm n : 9n$

(n : 1以上の整数)

の関係となる永久磁石型回転電機では、同相で逆方向に巻きまわされた巻線が隣り合ったティースに配置されており不可逆減磁が問題となる。しかしながら、実施の形態1～5で示した永久磁石型回転電機を電動パワーステアリング装置に用いることによって、永久磁石に不可逆減磁はほとんど発生せず、コギングトルクも小さくできるので操舵感覚を向上できる。また、従来の永久磁石型回転電機より極数とティースの数との最小公倍数も大きく、巻線係数も大きいため、コギングトルクが小さくできるとともに小型軽量化が可能で、高効率な永久磁石型回転電機を得ることができる。

20

【図面の簡単な説明】

【0061】

【図1】この発明の実施の形態1における永久磁石型回転電機の構成図である。

【図2】この発明の実施の形態1における電機子巻線の結線図である。

【図3】この発明の実施の形態1における永久磁石型回転電機の部分拡大図である。

30

【図4】この発明の実施の形態1における回転子の構成図である。

【図5】永久磁石の幅Wと減磁率との関係の一例を示す図である。

【図6】この発明の実施の形態1における減磁評価パラメータとコギングトルクおよび永久磁石の減磁率との関係を示す図である。

【図7】この発明の実施の形態1におけるコギングトルクの波形を示す図である。

【図8】この発明の実施の形態1における永久磁石の厚みとコギングトルクおよび永久磁石の減磁率との関係を示す図である。

【図9】この発明の実施の形態2における回転子の部分拡大図である。

【図10】この発明の実施の形態2における永久磁石の周方向端部の高さに対する突起部の高さの比と永久磁石の減磁率との関係を示す図である。

40

【図11】この発明の実施の形態3における永久磁石型回転電機の構成図である。

【図12】この発明の実施の形態3における別の永久磁石型回転電機の構成図である。

【図13】この発明の実施の形態4における永久磁石型回転電機の構成図である。

【図14】この発明の実施の形態4におけるコギングトルクの波形を示す図である。

【図15】この発明の実施の形態5における回転子の構成図である。

【図16】この発明の実施の形態5における別の回転子の構成図である。

【図17】従来の回転子の構成図である。

【図18】この発明の実施の形態6における永久磁石型回転電機を用いた車両用の電動パワーステアリング装置の概念図である。

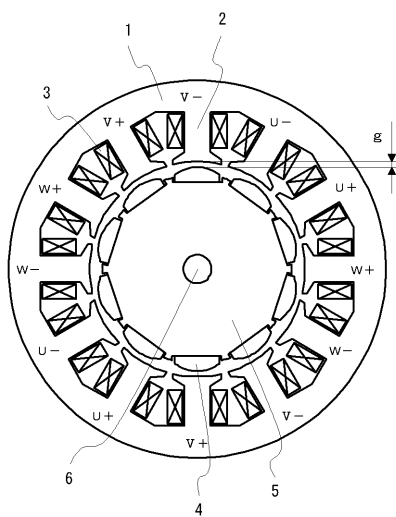
【符号の説明】

50

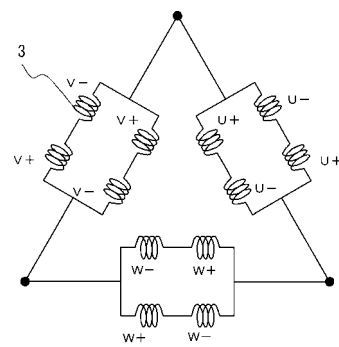
【 0 0 6 2 】

1, 11 固定子鉄心、2, 12 ティース、3 電機子巻線、4 永久磁石、5 回転子鉄心、6 シャフト、7 突起部、8, 9 金属製の管。

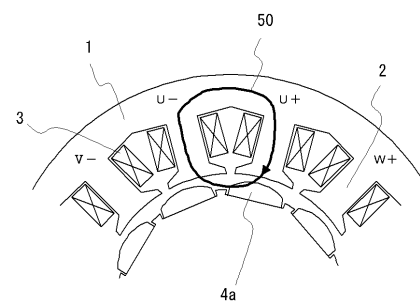
【 図 1 】



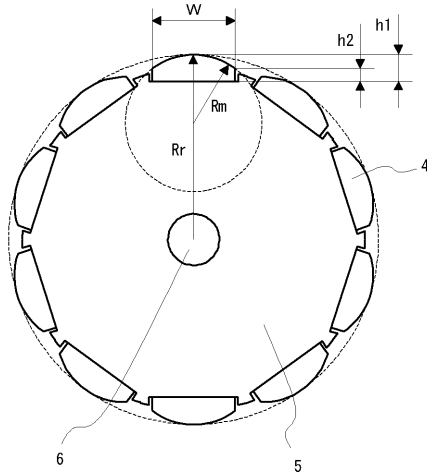
【 図 2 】



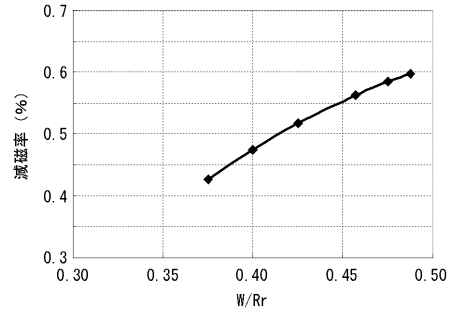
【 図 3 】



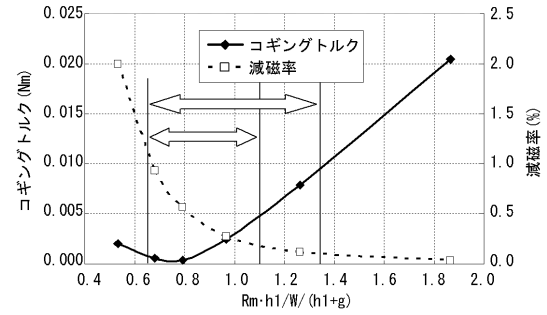
【図 4】



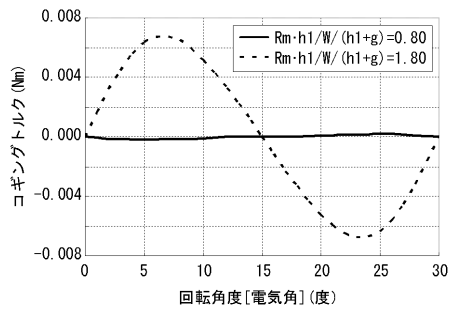
【図 5】



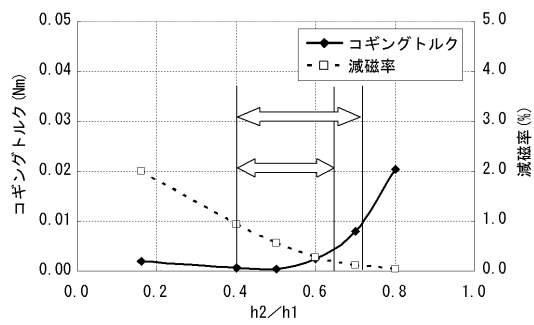
【図 6】



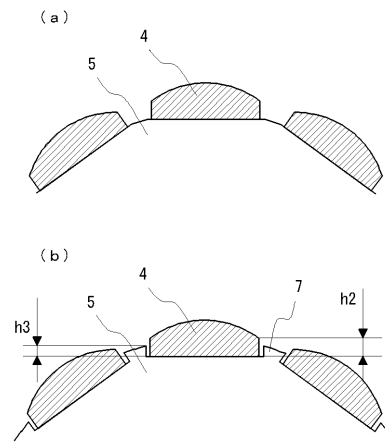
【図 7】



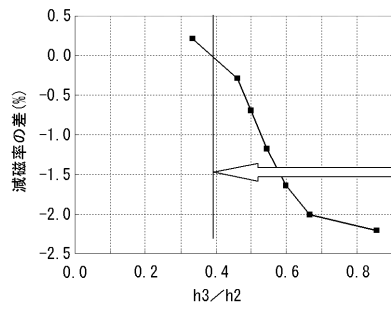
【図 8】



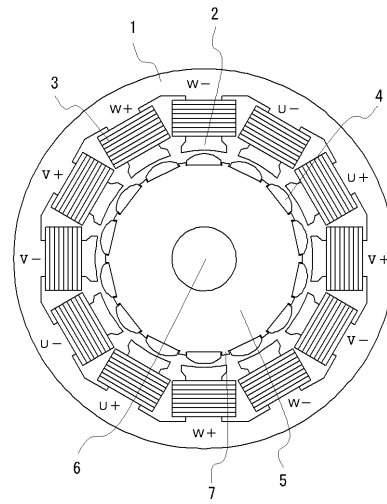
【図 9】



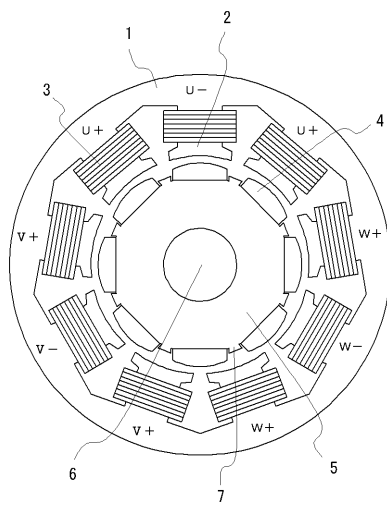
【図 10】



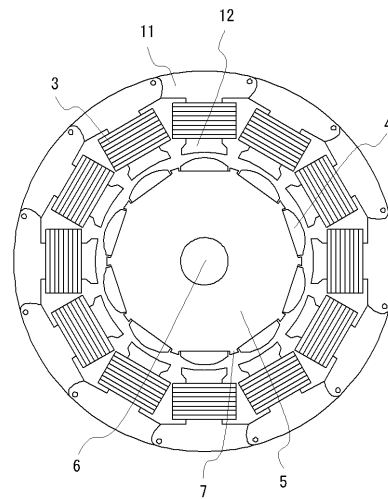
【図 11】



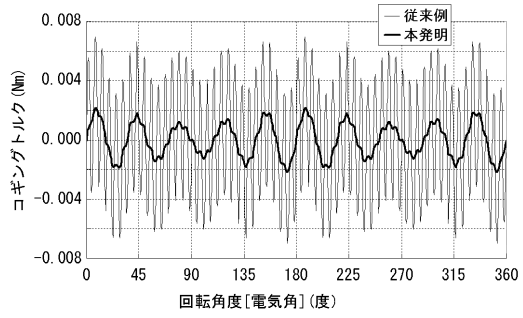
【図 12】



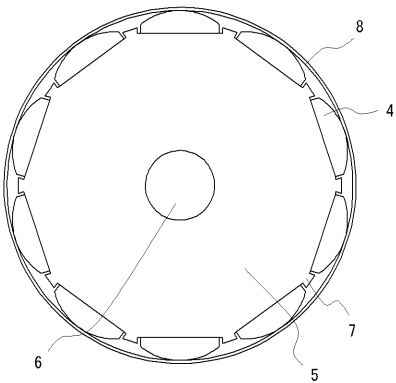
【図 13】



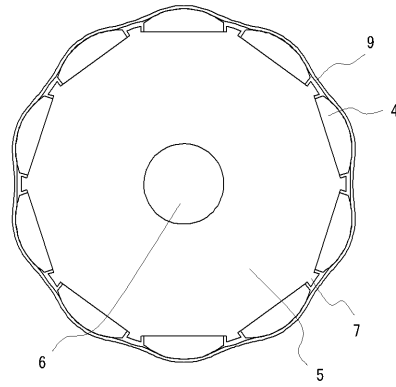
【図 14】



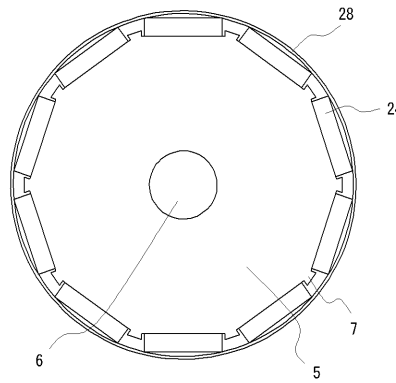
【図 15】



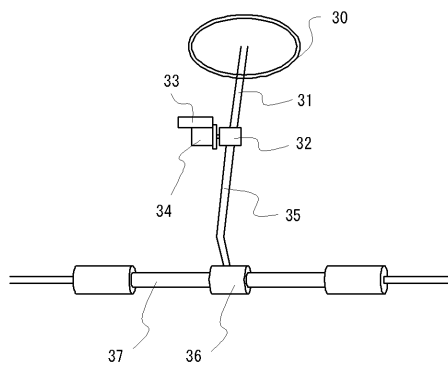
【図 16】



【図 17】



【図 18】



フロントページの続き

- (72)発明者 高島 和久
東京都千代田区九段北一丁目13番5号 三菱電機エンジニアリング株式会社内
- (72)発明者 阿久津 悟
東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内
- (72)発明者 浅尾 淑人
東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内

審査官 森山 拓哉

- (56)参考文献 特開2004-208341(JP,A)
特開平06-217478(JP,A)
特開2007-221961(JP,A)
特開2007-318998(JP,A)
実開平05-048552(JP,U)
特開2006-304407(JP,A)
特開2006-320135(JP,A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H02K 1/27
H02K 21/00 - 21/48