

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2020年1月30日(30.01.2020)



(10) 国際公開番号

WO 2020/021985 A1

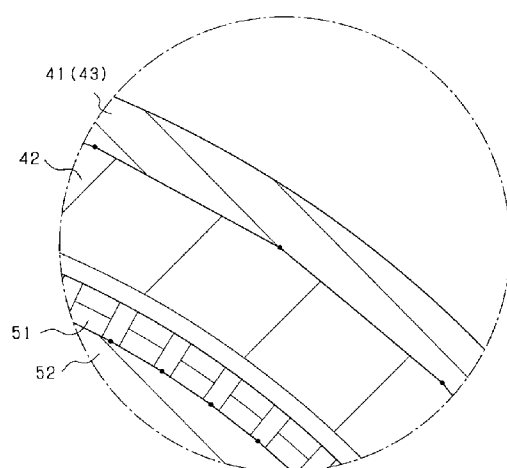
- (51) 国際特許分類:
H02K 21/22 (2006.01) *H02K 1/27* (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2019/026160
- (22) 国際出願日: 2019年7月1日(01.07.2019)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2018-140742 2018年7月26日(26.07.2018) JP
- (71) 出願人: 株式会社デンソー (DENSO CORPORATION) [JP/JP]; 〒4488661 愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地 Aichi (JP).
- (72) 発明者: 高橋 裕樹 (TAKAHASHI, Yuki); 〒4488661 愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地 株式会社デンソー内 Aichi (JP).
- (74) 代理人: 山田 強 (YAMADA, Tsuyoshi); 〒4500002 愛知県名古屋市中村区名駅三丁目13番24号 第一はせ川ビル6階 Aichi (JP).

- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS,

(54) Title: DYNAMO-ELECTRIC MACHINE

(54) 発明の名称: 回転電機



(57) Abstract: A dynamo-electric machine (10) is provided with a casing (64). The casing has an annular peripheral wall extending in the axial direction of a rotor (40), and has a space formed radially inside the peripheral wall. The stator (50) of the dynamo-electric machine has an annular base member (52) disposed radially outside the peripheral wall and having a stator winding (51) provided on the outer peripheral surface thereof which radially faces the rotor. The rotor has an annular magnet holding member (41) disposed radially outside the peripheral wall and having a magnet section (42) provided on the peripheral surface thereof which radially faces the stator. A lateral cross-section perpendicular to the axial direction of each of a peripheral surface of the peripheral wall, the peripheral surface of the magnet holding member, to which the magnet section is provided, and the peripheral surface of the base member, to which the stator winding is provided, has a polygonal shape, and the number of corners of the lateral cross-sectional shape of each of the peripheral wall, the magnet holding member, and the base member is different from each other.

SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM,
GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類：

一 国際調査報告（条約第21条(3)）

(57) 要約：回転電機（10）は、ケーシング（64）を備えている。ケーシングは、回転子（40）の軸方向に延びる環状の周壁を有し、周壁の径方向内側となる位置に空間が形成されたものである。回転電機の固定子（50）は、周壁の径方向外側となる位置に配置され、径方向において回転子と対向する周面に固定子巻線（51）が設けられた環状のベース部材（52）を有している。回転子は、周壁の径方向外側となる位置に配置され、径方向において固定子と対向する周面に磁石部（42）が設けられた環状の磁石保持部材（41）を有している。周壁の周面、磁石保持部材において磁石部が設けられた周面、及びベース部材において固定子巻線が設けられた周面それぞれの軸方向に直交する方向の横断面形状が多角形状とされており、周壁、磁石保持部材及びベース部材それぞれの横断面形状の角数が互いに異なっている。

明 細 書

発明の名称： 回転電機

関連出願の相互参照

[0001] 本出願は、2018年7月26日に出願された日本出願番号2018-140742号に基づくもので、ここにその記載内容を援用する。

技術分野

[0002] この明細書における開示は、回転電機に関する。

背景技術

[0003] 従来、例えば特許文献1に記載されているように、周方向に極性が交互となる複数の磁極を有する磁石部を含む界磁子と、多相の電機子巻線を有する電機子と、を備える回転電機が知られている。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：特開2014-93859号公報

発明の概要

[0005] 回転電機として、ケーシング、ベース部材及び磁石保持部材を備えるものがある。ケーシングは、回転子の軸方向に延びる環状の周壁を有しており、この周壁の径方向内側となる位置に空間が形成されている。この空間には、回転電機を構成する内部コンポーネントが配置される。ベース部材は、電機子を構成するとともに環状をなし、上記周壁の径方向外側となる位置に配置されている。ベース部材のうち径方向において界磁子と対向する周面には、電機子巻線が設けられている。磁石保持部材は、界磁子を構成するとともに環状をなし、上記周壁の径方向外側となる位置に配置されている。磁石保持部材のうち径方向において電機子と対向する周面には、磁石部が設けられている。

[0006] ここで、電機子巻線に通電されて回転子が回転する場合において、回転電機にトルクリップルが生じる。このトルクリップルが加振力となり、ケーシ

ングの周壁や、磁石保持部材、ベース部材が共振し、回転電機の振動が増加し得る。

[0007] 本開示は、上記事情に鑑みてなされたものであり、回転電機の振動を低減できる回転電機を提供することを主たる目的とする。

[0008] この明細書における開示された複数の態様は、それぞれの目的を達成するために、互いに異なる技術的手段を採用する。この明細書に開示される目的、特徴、および効果は、後続の詳細な説明、および添付の図面を参照することによってより明確になる。

[0009] 手段1は、周方向に極性が交互となる複数の磁極を有する磁石部を含む界磁子と、

多相の電機子巻線を有する電機子と、を備え、前記界磁子及び前記電機子のうちいずれかが回転子とされている回転電機において、

前記回転子の軸方向に延びる環状の周壁を有し、該周壁の径方向内側となる位置に空間が形成されたケーシングを備え、

前記電機子は、前記周壁の径方向外側となる位置に配置され、径方向において前記界磁子と対向する周面に前記電機子巻線が設けられた環状のベース部材を有し、

前記界磁子は、前記周壁の径方向外側となる位置に配置され、径方向において前記電機子と対向する周面に前記磁石部が設けられた環状の磁石保持部材を有し、

前記周壁の周面、前記磁石保持部材において前記磁石部が設けられた周面、及び前記ベース部材において前記電機子巻線が設けられた周面それぞれの前記軸方向に直交する方向の横断面形状が多角形状とされており、

前記周壁、前記磁石保持部材及び前記ベース部材それぞれの前記横断面形状の角数が互いに異なっている。

[0010] 手段1では、ケーシングの周壁の周面、磁石保持部材において磁石部が設けられた周面、及びベース部材において電機子巻線が設けられた周面それぞれの横断面形状が多角形状とされている。また、ケーシングの周壁、磁石保

持部材及びベース部材それぞれの横断面形状の角数が互いに異なっている。多角形の角数を各部材で異ならせることにより、ケーシングの周壁、磁石保持部材及びベース部材それぞれの共振周波数が一致又は近接することを回避できる。これにより、回転電機のトルクリップルが発生する場合において、ケーシングの周壁、磁石保持部材及びベース部材のうち少なくとも1つに共振が発生することを防止することができ、回転電機の振動を低減することができる。

[0011] なお、前記周壁、前記磁石保持部材及び前記ベース部材それぞれの前記横断面形状は、手段2のように、正多角形状とされていてもよい。

[0012] 手段3では、手段1又は2において、前記電機子巻線は、前記磁石部に対向する位置で周方向に所定間隔で配置された導線部を有し、

前記電機子において、

周方向における前記各導線部の間に導線間部材を設け、かつその導線間部材として、1磁極における前記導線間部材の周方向の幅寸法を W_t 、前記導線間部材の飽和磁束密度を B_s 、1磁極における前記磁石部の周方向の幅寸法を W_m 、前記磁石部の残留磁束密度を B_r とした場合に、 $W_t \times B_s \leq W_m \times B_r$ の関係となる磁性材料、若しくは非磁性材料を用いる構成か、

又は周方向における前記各導線部の間に導線間部材を設けていない構成となっている。

[0013] 従来、電機子として、ヨーク部から所定間隔で径方向に延びる複数のティースを有し、周方向に隣り合うティース間にスロットが形成され、スロット内に電機子巻線が収容されているものがある。この電機子では、磁石部の磁石磁束の大部分がティースを介してヨーク部に流れる。その結果、ティースで磁気飽和が生じ、回転電機を高トルク化できない懸念がある。

[0014] これに対し、手段3には、ティース又はティースに相当する構成が備えられていない。このため、各導線部の間で生じる磁気飽和に起因するトルク制限を抑制するとともに、導線部を扁平薄型にすることでトルク低下を抑制するものとしている。この場合、回転電機の外径寸法が同じであっても、電機

子の薄型化により、ケーシングの周壁の径方向内側に形成される空間を拡張することができる。

[0015] ここで、手段3の回転電機によれば、径方向内側に形成される空間を拡張することはできるものの、ティース又はティースに相当する構成が備えられる場合よりも、ベース部材に対する電機子巻線の結合が弱くなる傾向にある。このため、ベース部材の振動が大きくなると、例えば、ベース部材から電機子巻線が外れやすくなる懸念がある。このため、ティース又はティースに相当する構成が備えられていない手段3においては、回転電機の振動を低減するために、ケーシングの周壁、磁石保持部材及びベース部材それぞれの横断面形状の角数が互いに異なっている構成が適用されるメリットが大きい。

[0016] 手段4では、手段1～3のいずれか1つにおいて、前記ベース部材の前記横断面形状の角数が、前記周壁及び前記磁石保持部材それぞれの前記横断面形状の角数よりも大きい。

[0017] 手段4によれば、ベース部材と磁石部との間のエアギャップを周方向において極力均一化することができる。これにより、電機子及び界磁子の磁気回路を適正化することができ、例えば回転電機のトルクリップルを低減することができる。

図面の簡単な説明

[0018] 本開示についての上記目的およびその他の目的、特徴や利点は、添付の図面を参照しながら下記の詳細な記述により、より明確になる。その図面は、
[図1]図1は、回転電機の縦断面斜視図であり、
[図2]図2は、回転電機の縦断面図であり、
[図3]図3は、図2のIII-III線断面図であり、
[図4]図4は、図3の一部を拡大して示す断面図であり、
[図5]図5は、回転電機の分解図であり、
[図6]図6は、インバータユニットの分解図であり、
[図7]図7は、固定子巻線のアンペアターンとトルク密度との関係を示すトルク線図であり、

- [図8]図8は、回転子及び固定子の横断面図であり、
- [図9]図9は、図8の一部を拡大して示す図であり、
- [図10]図10は、固定子の横断面図であり、
- [図11]図11は、固定子の縦断面図であり、
- [図12]図12は、固定子巻線の斜視図であり、
- [図13]図13は、導線の構成を示す斜視図であり、
- [図14]図14は、素線の構成を示す模式図であり、
- [図15]図15は、 n 層目における各導線の形態を示す図であり、
- [図16]図16は、 n 層目と $n+1$ 層目の各導線を示す側面図であり、
- [図17]図17は、実施形態の磁石について電気角と磁束密度との関係を示す図であり、
- [図18]図18は、比較例の磁石について電気角と磁束密度との関係を示す図であり、
- [図19]図19は、回転電機の制御システムの電気回路図であり、
- [図20]図20は、制御装置による電流フィードバック制御処理を示す機能ブロック図であり、
- [図21]図21は、制御装置によるトルクフィードバック制御処理を示す機能ブロック図であり、
- [図22]図22は、第2実施形態における回転子及び固定子の横断面図であり、
- [図23]図23は、図22の一部を拡大して示す図であり、
- [図24]図24は、磁石ユニットにおける磁束の流れを具体的に示す図であり、
- [図25]図25は、変形例1における固定子の断面図であり、
- [図26]図26は、変形例1における固定子の断面図であり、
- [図27]図27は、変形例2における固定子の断面図であり、
- [図28]図28は、変形例3における固定子の断面図であり、
- [図29]図29は、変形例4における固定子の断面図であり、

[図30]図30は、変形例7における回転子及び固定子の横断面図であり、

[図31]図31は、変形例8において操作信号生成部の処理の一部を示す機能ブロック図であり、

[図32]図32は、キャリア周波数変更処理の手順を示すフローチャートであり、

[図33]図33は、変形例9において導線群を構成する各導線の接続形態を示す図であり、

[図34]図34は、変形例9において4対の導線が積層配置されている構成を示す図であり、

[図35]図35は、変形例10において回転電機の横断面図の一部を拡大して示す図であり、

[図36]図36は、図35の一部を拡大して示す図であり、

[図37]図37は、変形例11における回転子の構成を示す縦断面図であり、

[図38]図38は、変形例12においてインナロータ型の回転子及び固定子の横断面図であり、

[図39]図39は、図38の一部を拡大して示す図であり、

[図40]図40は、インナロータ型の回転電機の縦断面図であり、

[図41]図41は、インナロータ型の回転電機の概略構成を示す縦断面図であり、

[図42]図42は、変形例13においてインナロータ構造の回転電機の構成を示す図であり、

[図43]図43は、変形例13においてインナロータ構造の回転電機の構成を示す図であり、

[図44]図44は、変形例14において回転電機子形の回転電機の構成を示す図であり、

[図45]図45は、変形例16における導線の構成を示す断面図であり、

[図46]図46は、リラクタンストルク、磁石トルク及びDMの関係を示す図であり、

[図47]図47は、ティースを示す図である。

発明を実施するための形態

[0019] 図面を参照しながら、複数の実施形態を説明する。複数の実施形態において、機能的におよび／または構造的に対応する部分および／または関連付けられる部分には同一の参照符号、または百以上の位が異なる参照符号が付される場合がある。対応する部分および／または関連付けられる部分については、他の実施形態の説明を参照することができる。

[0020] 本実施形態における回転電機は、例えば車両動力源として用いられるものとなっている。ただし、回転電機は、産業用、車両用、家電用、OA機器用、遊技機用などとして広く用いられることが可能となっている。なお、以下の各実施形態相互において、互いに同一又は均等である部分には、図中、同一符号を付しており、同一符号の部分についてはその説明を援用する。

[0021] (第1実施形態)

本実施形態に係る回転電機10は、同期式多相交流モータであり、アウトロータ構造（外転構造）のものとなっている。回転電機10の概要を図1乃至図5に示す。図1は、回転電機10の縦断面斜視図であり、図2は、回転電機10の回転軸11に沿う方向での縦断面図であり、図3は、回転軸11に直交する方向での回転電機10の横断面図（図2のIII-III線断面図）であり、図4は、図3の一部を拡大して示す断面図であり、図5は、回転電機10の分解図である。なお、図3では、図示の都合上、回転軸11を除き、切断面を示すハッチングを省略している。以下の記載では、回転軸11が延びる方向を軸方向とし、回転軸11の中心から放射状に延びる方向を径方向とし、回転軸11を中心として円周状に延びる方向を周方向としている。

[0022] 回転電機10は、大別して、軸受ユニット20と、ハウジング30と、回転子40と、固定子50と、インバータユニット60とを備えている。これら各部材は、いずれも回転軸11と共に同軸上に配置され、所定順序で軸方向に組み付けられることで回転電機10が構成されている。本実施形態の回転電機10は、「界磁子」としての回転子40と、「電機子」としての固定

子50とを有する構成となっており、回転界磁形の回転電機として具体化されるものとなっている。

[0023] 軸受ユニット20は、軸方向に互いに離間して配置される2つの軸受21、22と、その軸受21、22を保持する保持部材23とを有している。軸受21、22は、例えばラジアル玉軸受であり、それぞれ外輪25と、内輪26と、それら外輪25及び内輪26の間に配置された複数の玉27とを有している。保持部材23は円筒状をなしており、その径方向内側に軸受21、22が組み付けられている。そして、軸受21、22の径方向内側に、回転軸11及び回転子40が回転自在に支持されている。軸受21、22により、回転軸11を回転可能に支持する一組の軸受が構成されている。

[0024] 各軸受21、22では、不図示のリテーナにより玉27が保持され、その状態で各玉同士のピッチが保たれている。軸受21、22は、リテーナの軸方向上下部に封止部材を有し、その内部に非導電性グリース（例えば非導電性のウレア系グリース）が充填されている。また、内輪26の位置がスペーサにより機械的に保持され、内側から上下方向に凸となる定圧予圧が施されている。

[0025] ハウジング30は、円筒状をなす周壁31を有する。周壁31は、その軸方向に対向する第1端と第2端を有する。周壁31は、第1端に端面32と有するとともに、第2端に開口33を有する。開口33は、第2端の全体において開放されている。端面32には、その中央に円形の孔34が形成されており、その孔34に挿通させた状態で、ネジやリベット等の固定具により軸受ユニット20が固定されている。また、ハウジング30内、すなわち周壁31及び端面32により区画された内部スペースには、中空円筒状の回転子40と中空円筒状の固定子50とが収容されている。本実施形態では回転電機10がアウトロータ式であり、ハウジング30内には、筒状をなす回転子40の径方向内側に固定子50が配置されている。回転子40は、軸方向において端面32の側で回転軸11に片持ち支持されている。

[0026] 回転子40は、中空筒状に形成された磁石ホルダ41と、その磁石ホルダ

4 1 の径方向内側に設けられた環状の磁石ユニット 4 2 とを有している。磁石ホルダ 4 1 は、略カップ状をなし、磁石保持部材としての機能を有する。磁石ホルダ 4 1 は、円筒状をなす円筒部 4 3 と、同じく円筒状をなしかつ円筒部 4 3 よりも小径の固定部（attachment） 4 4 と、それら円筒部 4 3 及び固定部 4 4 を繋ぐ部位となる中間部 4 5 とを有している。円筒部 4 3 の内周面に磁石ユニット 4 2 が取り付けられている。

[0027] なお、磁石ホルダ 4 1 は、機械強度が充分な冷間圧延鋼板（S P C C）や、鍛造用鋼、炭素繊維強化プラスチック（C F R P）等により構成されている。

[0028] 固定部 4 4 の貫通孔 4 4 a には回転軸 1 1 が挿通される。貫通孔 4 4 a 内に配置された回転軸 1 1 に対して固定部 4 4 が固定されている。つまり、固定部 4 4 により、回転軸 1 1 に対して磁石ホルダ 4 1 が固定されている。なお、固定部 4 4 は、凹凸を利用したスプライン結合やキー結合、溶接、又はかしめ等により回転軸 1 1 に対して固定されているとよい。これにより、回転子 4 0 が回転軸 1 1 と一体に回転する。

[0029] また、固定部 4 4 の径方向外側には、軸受ユニット 2 0 の軸受 2 1, 2 2 が組み付けられている。上述のとおり軸受ユニット 2 0 はハウジング 3 0 の端面 3 2 に固定されているため、回転軸 1 1 及び回転子 4 0 は、ハウジング 3 0 に回転可能に支持されるものとなっている。これにより、ハウジング 3 0 内において回転子 4 0 が回転自在となっている。

[0030] 回転子 4 0 には、その軸方向に対向する二つの端部の一方にのみ固定部 4 4 が設けられており、これにより、回転子 4 0 が回転軸 1 1 に片持ち支持されている。ここで、回転子 4 0 の固定部 4 4 は、軸受ユニット 2 0 の軸受 2 1, 2 2 により、軸方向に異なる 2 位置で回転可能に支持されている。すなわち、回転子 4 0 は、磁石ホルダ 4 1 の、その軸方向に対向する二つの端部の一方において、その軸方向に離間する二つの軸受 2 1, 2 2 により回転可能に支持されている。そのため、回転子 4 0 が回転軸 1 1 に片持ち支持される構造であっても、回転子 4 0 の安定回転が実現されるようになっている。

この場合、回転子40の軸方向中心位置に対して片側にずれた位置で、回転子40が軸受21、22により支持されている。

[0031] また、軸受ユニット20において回転子40の中心寄り（図の下側）の軸受22と、その逆側（図の上側）の軸受21とは、外輪25及び内輪26と玉27との間の隙間寸法が相違しており、例えば回転子40の中心寄りの軸受22の方が、その逆側の軸受21よりも隙間寸法が大きいものとなっている。この場合、回転子40の中心寄りの側において、回転子40の振れや、部品公差に起因するインバランスによる振動が軸受ユニット20に作用しても、その振れや振動の影響が良好に吸収される。具体的には、回転子40の中心寄り（図の下側）の軸受22において予圧により遊び寸法（隙間寸法）を大きくしていることで、片持ち構造において生じる振動がその遊び部分により吸収される。前記予圧は、定位置予圧、又は定圧予圧のいずれであっても良い。定位置予圧の場合、軸受21と軸受22の外輪25はいずれも保持部材23に対して、圧入、又は接着等の方法を用いて接合されている。また、軸受21と軸受22の内輪26はいずれも回転軸11に対して、圧入、又は接着等の方法を用いて接合されている。ここで軸受21の外輪25を軸受21の内輪26に対して軸方向に異なる位置に配置する事で予圧を発生させることができる。軸受22の外輪25を軸受22の内輪26に対して軸方向に異なる位置に配置する事で予圧を発生させることができる。

[0032] また定圧予圧を採用する場合には、軸方向において、軸受22と軸受21に挟まれた領域から軸受22の外輪25に向けて予圧が発生する様に予圧用バネ、例えばウェーブワッシャ24等を軸受22と軸受21に挟まれた同領域に配置する。この場合も、軸受21と軸受22の内輪26はいずれも回転軸11に対して、圧入、又は接着等の方法を用いて接合されている。軸受21、又は軸受22の外輪25は、保持部材23に対して所定のクリアランスを介して配置される。このような構成とすることで、軸受22の外輪25には軸受21から離れる方向に予圧用バネのバネ力が作用する。そして、この力が回転軸11を伝わることで、軸受21の内輪26を軸受22の方向に押

し付ける力が作用する。これにより、軸受 2 1, 2 2 とともに、外輪 2 5 と内輪 2 6 の軸方向の位置がずれ、前述した定位置予圧と同様に 2 つのベアリングに予圧を掛けることができる。

[0033] なお、定圧予圧を発生させる際には、必ずしも図 2 に示す様に軸受 2 2 の外輪 2 5 にバネ力を印加する必要は無い。例えば、軸受 2 1 の外輪 2 5 にバネ力を印加しても良い。また軸受 2 1, 2 2 のいずれかの内輪 2 6 を回転軸 1 1 に対して所定のクリアランスを介して配置し、軸受 2 1, 2 2 の外輪 2 5 を保持部材 2 3 に対して圧入、又は接着等の方法を用いて接合することで、2 つのベアリングに予圧を掛けても良い。

[0034] 更には、軸受 2 1 の内輪 2 6 が軸受 2 2 に対して離れるように力を作用させる場合には、軸受 2 2 の内輪 2 6 も軸受 2 1 に対して離れるように力を作用させる方が良い。逆に、軸受 2 1 の内輪 2 6 が軸受 2 2 に対して近づくように力を作用させる場合には、軸受 2 2 の内輪 2 6 も軸受 2 1 に対して近づくように力を作用させる方が良い。

[0035] なお、本回転電機 1 0 を車両動力源等の目的で車両に適用する場合には、予圧を発生させる機構に対して予圧の発生方向の成分を持つ振動が加わる可能性や、予圧を印加する対象物に掛る重力の方向が変動してしまう可能性がある。その為、本回転電機 1 0 を車両に適用する場合には、定位置予圧を採用することが望ましい。

[0036] また、中間部 4 5 は、環状の内側肩部 4 9 a と環状の外側肩部 4 9 b を有する。外側肩部 4 9 b は、中間部 4 5 の径方向において内側肩部 4 9 a の外側に位置している。内側肩部 4 9 a と外側肩部 4 9 b は、中間部 4 5 の軸方向において互いに離間している。これにより、中間部 4 5 の径方向において、円筒部 4 3 と固定部 4 4 とは部分的に重複している。つまり、固定部 4 4 の基端部（図の下側の奥側端部）よりも軸方向外側に、円筒部 4 3 が突出するものとなっている。本構成では、中間部 4 5 が段差無しで平板状に設けられる場合に比べて、回転子 4 0 の重心近くの位置で、回転軸 1 1 に対して回転子 4 0 を支持させることが可能となり、回転子 4 0 の安定動作が実現でき

るものとなっている。

[0037] 上述した中間部45の構成によれば、回転子40には、径方向において固定部44を囲みかつ中間部45の内寄りとなる位置に、軸受ユニット20の一部を収容する軸受収容凹部46が環状に形成されるとともに、径方向において軸受収容凹部46を囲みかつ中間部45の外寄りとなる位置に、後述する固定子50の固定子巻線51のコイルエンド54を収容するコイル収容凹部47が形成されている。そして、これら各収容凹部46, 47が、径方向の内外で隣り合うように配置されるようになっている。つまり、軸受ユニット20の一部と、固定子巻線51のコイルエンド54とが径方向内外に重複するように配置されている。これにより、回転電機10において軸方向の長さ寸法の短縮が可能となっている。

[0038] 中間部45は、回転軸11側から径方向外側に張り出すように設けられている。そして、その中間部45に、軸方向に延び、固定子50の固定子巻線51のコイルエンド54に対する接触を回避する接触回避部が設けられている。中間部45が張出部に相当する。

[0039] コイルエンド54は、径方向の内側又は外側に曲げられることで、そのコイルエンド54の軸方向寸法を小さくすることができ、固定子50の軸長を短縮することが可能である。コイルエンド54の曲げ方向は、回転子40との組み付けを考慮したものであるとよい。回転子40の径方向内側に固定子50を組み付けることを想定すると、その回転子40に対する挿入先端側では、コイルエンド54が径方向内側に曲げられるとよい。コイルエンド54の反対側のコイルエンドの曲げ方向は任意でよいが、空間的に余裕のある外側に曲げた形状が製造上好ましい。

[0040] また、磁石部としての磁石ユニット42は、円筒部43の径方向内側において、周方向に沿って極性が交互に変わるように配置された複数の永久磁石により構成されている。これにより、磁石ユニット42は、周方向に複数の磁極を有する。ただし、磁石ユニット42の詳細については後述する。

[0041] 固定子50は、回転子40の径方向内側に設けられている。固定子50は

、略筒状（環状）に巻回形成された固定子巻線 5 1 と、その径方向内側に配置されたベース部材としての固定子コア 5 2 とを有しており、固定子巻線 5 1 が、所定のエアギャップを挟んで円環状の磁石ユニット 4 2 に対向するように配置されている。固定子巻線 5 1 は複数の相巻線よりなる。それら各相巻線は、周方向に配列された複数の導線が所定ピッチで互いに接続されることで構成されている。本実施形態では、U 相、V 相及び W 相の 3 相巻線と、X 相、Y 相及び Z 相の 3 相巻線とを用い、それら 3 相の巻線を 2 つ用いることで、固定子巻線 5 1 が 6 相の相巻線として構成されている。

[0042] 固定子コア 5 2 は、軟磁性材である電磁鋼板が積層された積層鋼板により円環状に形成されており、固定子巻線 5 1 の径方向内側に組み付けられている。電磁鋼板は、例えば鉄に数%程度（例えば 3 %）の珪素を添加した珪素鋼板である。固定子巻線 5 1 が電機子巻線に相当し、固定子コア 5 2 が電機子コアに相当する。

[0043] 固定子巻線 5 1 は、径方向において固定子コア 5 2 に重複する部分であり、かつ固定子コア 5 2 の径方向外側となるコイルサイド部 5 3 と、軸方向において固定子コア 5 2 の一端側及び他端側にそれぞれ張り出すコイルエンド 5 4、5 5 とを有している。コイルサイド部 5 3 は、径方向において固定子コア 5 2 と回転子 4 0 の磁石ユニット 4 2 にそれぞれ対向している。回転子 4 0 の内側に固定子 5 0 が配置された状態では、軸方向両側のコイルエンド 5 4、5 5 のうち軸受ユニット 2 0 の側（図の上側）となるコイルエンド 5 4 が、回転子 4 0 の磁石ホルダ 4 1 により形成されたコイル収容凹部 4 7 に収容されている。ただし、固定子 5 0 の詳細については後述する。

[0044] インバータユニット 6 0 は、ハウジング 3 0 に対してボルト等の締結具により固定されるユニットベース 6 1 と、そのユニットベース 6 1 に組み付けられる複数の電気コンポーネント 6 2 とを有している。ユニットベース 6 1 は、例えば炭素繊維強化プラスチック（CFRP）により構成されている。ユニットベース 6 1 は、ハウジング 3 0 の開口 3 3 の縁に対して固定されるエンドプレート 6 3 と、そのエンドプレート 6 3 に一体に設けられ、軸方向

に延びるケーシング６４とを有している。エンドプレート６３は、その中心部に円形の開口６５を有しており、開口６５の周縁部から起立するようにしてケーシング６４が形成されている。

[0045] ケーシング６４の外周面には固定子５０が組み付けられている。つまり、ケーシング６４の外径寸法は、固定子コア５２の内径寸法と同じか、又は固定子コア５２の内径寸法よりも僅かに小さい寸法になっている。ケーシング６４の外側に固定子コア５２が組み付けられることで、固定子５０とユニットベース６１とが一体化されている。また、ユニットベース６１がハウジング３０に固定されることからすると、ケーシング６４に固定子コア５２が組み付けられた状態では、固定子５０がハウジング３０に対して一体化された状態となっている。

[0046] なお、固定子コア５２は、ユニットベース６１に対して接着、焼きばめ、圧入等により組み付けられているとよい。これにより、ユニットベース６１側に対する固定子コア５２の周方向又は軸方向の位置ずれが抑制される。

[0047] また、ケーシング６４の径方向内側は、電気コンポーネント６２を収容する収容空間となっており、その収容空間には、回転軸１１を囲むようにして電気コンポーネント６２が配置されている。ケーシング６４は、収容空間形成部としての役目を有している。電気コンポーネント６２は、インバータ回路を構成する半導体モジュール６６や、制御基板６７、コンデンサモジュール６８を具備する構成となっている。

[0048] なお、ユニットベース６１が、固定子５０の径方向内側に設けられ、固定子５０を保持する固定子ホルダ（電機子ホルダ）に相当する。ハウジング３０及びユニットベース６１により、回転電機１０のモータハウジングが構成されている。このモータハウジングでは、回転子４０を挟んで軸方向の一方側においてハウジング３０に対して保持部材２３が固定されるとともに、他方側においてハウジング３０及びユニットベース６１が互いに結合されている。例えば電気自動車である電動車両等においては、その車両等の側にモータハウジングが取り付けられることで、回転電機１０が車両等に装着される

。

[0049] ここで、上記図1～図5に加え、インバータユニット60の分解図である図6を用いて、インバータユニット60の構成をさらに説明する。

[0050] ユニットベース61において、ケーシング64は、筒状部71と、その軸方向において対向する両端の一方（軸受ユニット20側の端部）に設けられた端面72とを有している。筒状部71の軸方向両端部のうち端面72の反対側は、エンドプレート63の開口65を通じて全面的に開放されている。端面72には、その中央に円形の孔73が形成されており、その孔73に回転軸11が挿通可能となっている。孔73には、回転軸11の外周面との間の空隙を封鎖するシール材171が設けられている。シール材171は、例えば樹脂材料よりなる摺動シールであるとよい。

[0051] ケーシング64の筒状部71は、その径方向外側に配置される回転子40及び固定子50と、その径方向内側に配置される電気コンポーネント62との間を仕切る仕切り部となっており、筒状部71を挟んで径方向内外に、回転子40及び固定子50と電気コンポーネント62とが並ぶようにそれぞれ配置されている。

[0052] また、電気コンポーネント62は、インバータ回路を構成する電気部品であり、固定子巻線51の各相巻線に対して所定順序で電流を流して回転子40を回転させる力行機能と、回転軸11の回転に伴い固定子巻線51に流れる3相交流電流を入力し、発電電力として外部に出力する発電機能とを有している。なお、電気コンポーネント62は、力行機能と発電機能とのうちいずれか一方のみを有するものであってもよい。発電機能は、例えば回転電機10が車両用動力源として用いられる場合、回生電力として外部に出力する回生機能である。

[0053] 電気コンポーネント62の具体的な構成として、図4に示すように、回転軸11の周りには、中空円筒状をなすコンデンサモジュール68が設けられており、そのコンデンサモジュール68の外周面上に、複数の半導体モジュール66が周方向に並べて配置されている。コンデンサモジュール68は、

互いに並列接続された平滑用のコンデンサ 68 a を複数備えている。具体的には、コンデンサ 68 a は、複数枚のフィルムコンデンサが積層されてなる積層型フィルムコンデンサであり、横断面が台形状をなしている。コンデンサモジュール 68 は、12 個のコンデンサ 68 a が環状に並べて配置されることで構成されている。

[0054] なお、コンデンサ 68 a の製造過程においては、例えば、複数のフィルムが積層されてなる所定幅の長尺フィルムを用い、フィルム幅方向を台形高さ方向とし、かつ台形の上底と下底とが交互になるように長尺フィルムが等脚台形状に切断されることにより、コンデンサ素子が作られる。そして、そのコンデンサ素子に電極等を取り付けることでコンデンサ 68 a が作製される。

[0055] 半導体モジュール 66 は、例えば MOSFET や IGBT 等の半導体スイッチング素子を有し、略板状に形成されている。本実施形態では、回転電機 10 が 2 組の 3 相巻線を備えており、その 3 相巻線ごとにインバータ回路が設けられていることから、計 12 個の半導体モジュール 66 を環状に並べて形成された半導体モジュール群 66 A が電気コンポーネント 62 に設けられている。

[0056] 半導体モジュール 66 は、ケーシング 64 の筒状部 71 とコンデンサモジュール 68 との間に挟まれた状態で配置されている。半導体モジュール群 66 A の外周面は筒状部 71 の内周面に当接し、半導体モジュール群 66 A の内周面はコンデンサモジュール 68 の外周面に当接している。この場合、半導体モジュール 66 で生じた熱は、ケーシング 64 を介してエンドプレート 63 に伝わり、エンドプレート 63 から放出される。

[0057] 半導体モジュール群 66 A は、外周面側、すなわち径方向において半導体モジュール 66 と筒状部 71 との間にスペーサ 69 を有しているとよい。この場合、コンデンサモジュール 68 では軸方向に直交する横断面の断面形状が正 12 角形である一方、筒状部 71 の内周面の横断面形状が円形であるため、スペーサ 69 は、内周面が平坦面、外周面が曲面となっている。スペー

サ 6 9 は、半導体モジュール群 6 6 A の径方向外側において円環状に連なるように一体に設けられていてもよい。スペーサ 6 9 は、良熱伝導体であり、例えばアルミニウム等の金属、又は放熱ゲルシート等であるとよい。なお、筒状部 7 1 の内周面の横断面形状をコンデンサモジュール 6 8 と同じ 1 2 角形にすることも可能である。この場合、スペーサ 6 9 の内周面及び外周面がいずれも平坦面であるとよい。

[0058] また、本実施形態では、ケーシング 6 4 の筒状部 7 1 に、冷却水を流通させる冷却水通路 7 4 が形成されており、半導体モジュール 6 6 で生じた熱は、冷却水通路 7 4 を流れる冷却水に対しても放出される。つまり、ケーシング 6 4 は水冷機構を備えている。図 3 や図 4 に示すように、冷却水通路 7 4 は、電気コンポーネント 6 2（半導体モジュール 6 6 及びコンデンサモジュール 6 8）を囲むように環状に形成されている。半導体モジュール 6 6 は筒状部 7 1 の内周面に沿って配置されており、その半導体モジュール 6 6 に対して径方向内外に重なる位置に冷却水通路 7 4 が設けられている。

[0059] 筒状部 7 1 の外側には固定子 5 0 が配置され、内側には電気コンポーネント 6 2 が配置されていることから、筒状部 7 1 に対しては、その外側から固定子 5 0 の熱が伝わるとともに、内側から電気コンポーネント 6 2 の熱（例えば半導体モジュール 6 6 の熱）が伝わることになる。この場合、固定子 5 0 と半導体モジュール 6 6 とを同時に冷やすことが可能となっており、回転電機 1 0 における発熱部材の熱を効率良く放出することができる。

[0060] 更に、固定子巻線 5 1 への通電を行うことで回転電機を動作させるインバータ回路の一部、又は全部を構成する半導体モジュール 6 6 の少なくとも一部が、ケーシング 6 4 の筒状部 7 1 の径方向外側に配置された固定子コア 5 2 に囲まれた領域内に配置されている。望ましくは、1 つの半導体モジュール 6 6 の全体が固定子コア 5 2 に囲まれた領域内に配置されている。更に、望ましくは、全ての半導体モジュール 6 6 の全体が固定子コア 5 2 に囲まれた領域内に配置されている。

[0061] また、半導体モジュール 6 6 の少なくとも一部が、冷却水通路 7 4 により

囲まれた領域内に配置されている。望ましくは、全ての半導体モジュール66の全体がヨーク141に囲まれた領域内に配置されている。

[0062] また、電気コンポーネント62は、軸方向において、コンデンサモジュール68の一方の端面に設けられた絶縁シート75と、他方の端面に設けられた配線モジュール76とを備えている。この場合、コンデンサモジュール68は、その軸方向に対向した二つの端面、すなわち第1端面と第2端面を有している。コンデンサモジュール68の軸受ユニット20に近い第1端面は、ケーシング64の端面72に対向しており、絶縁シート75を挟んだ状態で端面72に重ね合わされている。また、コンデンサモジュール68の開口65に近い第2端面には、配線モジュール76が組み付けられている。

[0063] 配線モジュール76は、合成樹脂材よりなり円形板状をなす本体部76aと、その内部に埋設された複数のバスバー76b、76cを有しており、そのバスバー76b、76cにより、半導体モジュール66やコンデンサモジュール68と電氣的接続がなされている。具体的には、半導体モジュール66は、その軸方向端面から延びる接続ピン66aを有しており、その接続ピン66aが、本体部76aの径方向外側においてバスバー76bに接続されている。また、バスバー76cは、本体部76aの径方向外側においてコンデンサモジュール68とは反対側に延びており、その先端部にて配線部材79に接続されるようになっている（図2参照）。

[0064] 上記のとおりコンデンサモジュール68の軸方向に対向する第1端面に絶縁シート75が設けられ、かつコンデンサモジュール68の第2端面に配線モジュール76が設けられた構成によれば、コンデンサモジュール68の放熱経路として、コンデンサモジュール68の第1端面および第2端面から端面72及び筒状部71に至る経路が形成される。すなわち、第1端面から端面72への経路と、第2端面から筒状部71へ至る経路が形成される。これにより、コンデンサモジュール68において半導体モジュール66が設けられた外周面以外の端面部からの放熱が可能になっている。つまり、径方向への放熱だけでなく、軸方向への放熱も可能となっている。

- [0065] また、コンデンサモジュール 6 8 は中空円筒状をなし、その内周部には所定の隙間を介在させて回転軸 1 1 が配置されることから、コンデンサモジュール 6 8 の熱はその中空部からも放出可能となっている。この場合、回転軸 1 1 の回転により空気の流れが生じることにより、その冷却効果が高められるようになっている。
- [0066] 配線モジュール 7 6 には、円板状の制御基板 6 7 が取り付けられている。制御基板 6 7 は、所定の配線パターンが形成されたプリントサーキットボード（P C B）を有しており、そのボード上には各種 I C や、マイコン等からなる制御部に相当する制御装置 7 7 が実装されている。制御基板 6 7 は、ネジ等の固定具により配線モジュール 7 6 に固定されている。制御基板 6 7 は、その中央部に、回転軸 1 1 を挿通させる挿通孔 6 7 a を有している。
- [0067] なお、配線モジュール 7 6 は、軸方向に互いに対向する、すなわち、その厚み方向において互いに対向する第 1 面と第 2 面を有する。第 1 面は、コンデンサモジュール 6 8 に面する。配線モジュール 7 6 は、その第 2 面に、制御基板 6 7 を設けている。制御基板 6 7 の両面の一方側から他方側に配線モジュール 7 6 のバスバー 7 6 c が延びる構成となっている。かかる構成において、制御基板 6 7 には、バスバー 7 6 c との干渉を回避する切欠が設けられているとよい。例えば、円形状をなす制御基板 6 7 の外縁部の一部が切り欠かれているとよい。
- [0068] 上述のとおり、ケーシング 6 4 に囲まれた空間内に電気コンポーネント 6 2 が収容され、その外側に、ハウジング 3 0、回転子 4 0 及び固定子 5 0 が層状に設けられている構成によれば、インバータ回路で生じる電磁ノイズが好適にシールドされるようになっている。すなわち、インバータ回路では、所定のキャリア周波数による P W M 制御を利用して各半導体モジュール 6 6 でのスイッチング制御が行われ、そのスイッチング制御により電磁ノイズが生じることが考えられるが、その電磁ノイズを、電気コンポーネント 6 2 の径方向外側のハウジング 3 0、回転子 4 0、固定子 5 0 等により好適にシールドできる。

[0069] 更に、半導体モジュール66の少なくとも一部が、ケーシング64の筒状部71の径方向外側に配置された固定子コア52に囲まれた領域内に配置することで、半導体モジュール66と固定子巻線51とが固定子コア52を介さずに配置されている構成に比べて、半導体モジュール66から磁束が発生したとしても、固定子巻線51に影響を与えにくい。また、固定子巻線51から磁束が発生したとしても、半導体モジュール66に影響を与えにくい。なお、半導体モジュール66の全体が、ケーシング64の筒状部71の径方向外側に配置された固定子コア52に囲まれた領域内に配置されると更に効果的である。また、半導体モジュール66の少なくとも一部が、冷却水通路74により囲まれている場合、固定子巻線51や磁石ユニット42からの発熱が半導体モジュール66に届きにくいという効果を得ることができる。

[0070] 筒状部71においてエンドプレート63の付近には、その外側の固定子50と内側の電気コンポーネント62とを電氣的に接続する配線部材79（図2参照）を挿通させる貫通孔78が形成されている。図2に示すように、配線部材79は、圧着、溶接などにより、固定子巻線51の端部と配線モジュール76のバスバー76cとにそれぞれ接続されている。配線部材79は、例えばバスバーであり、その接合面は平たく潰されていることが望ましい。貫通孔78は、1カ所又は複数箇所に設けられているとよく、本実施形態では2カ所に貫通孔78が設けられている。2カ所に貫通孔78が設けられる構成では、2組の3相巻線から延びる巻線端子を、それぞれ配線部材79により容易に結線することが可能となり、多相結線を行う上で好適なものとなっている。

[0071] 上述のとおりハウジング30内には、図4に示すように径方向外側から順に回転子40、固定子50が設けられ、固定子50の径方向内側にインバータユニット60が設けられている。ここで、ハウジング30の内周面の半径を d とした場合に、回転子40の回転中心から $d \times 0.705$ の距離よりも径方向外側に回転子40と固定子50とが配置されている。この場合、回転子40及び固定子50のうち径方向内側の固定子50の内周面（すなわち固

定子コア 52 の内周面) から径方向内側となる領域を第 1 領域 X 1、径方向において固定子 50 の内周面からハウジング 30 までの間の領域を第 2 領域 X 2 とすると、第 1 領域 X 1 の横断面の面積は、第 2 領域 X 2 の横断面の面積よりも大きい構成となっている。また、径方向において回転子 40 の磁石ユニット 42 及び固定子巻線 51 が重複する範囲で見て、第 1 領域 X 1 の容積が第 2 領域 X 2 の容積よりも大きい構成となっている。

[0072] なお、回転子 40 及び固定子 50 を磁気回路コンポーネントアセンブリとすると、ハウジング 30 内において、その磁気回路コンポーネントアセンブリの内周面から径方向内側となる第 1 領域 X 1 が、径方向において磁気回路コンポーネントアセンブリの内周面からハウジング 30 までの間の第 2 領域 X 2 よりも容積が大きい構成となっている。

[0073] 次に、回転子 40 及び固定子 50 の構成をより詳しく説明する。

[0074] 一般に、回転電機における固定子の構成として、積層鋼板よりなりかつ円環状をなす固定子コアに周方向に複数のスロットを設け、そのスロット内に固定子巻線を巻装するものが知られている。具体的には、固定子コアは、ヨークから所定間隔で径方向に延びる複数のティースを有しており、周方向に隣り合うティース間にスロットが形成されている。そして、スロット内に、例えば径方向に複数層の導線が収容され、その導線により固定子巻線が構成されている。

[0075] ただし、上述した固定子構造では、固定子巻線の通電時において、固定子巻線の起磁力が増加するのに伴い固定子コアのティース部分で磁気飽和が生じ、それに起因して回転電機のトルク密度が制限されることが考えられる。つまり、固定子コアにおいて、固定子巻線の通電により生じた回転磁束がティースに集中することで、磁気飽和が生じると考えられる。

[0076] また、一般的に、回転電機における I P M (Interior Permanent Magnet) ロータの構成として、永久磁石が d - q 座標系における d 軸に配置され、q 軸にロータコアが配置されたものが知られている。このような場合、d 軸近傍の固定子巻線が励磁されることで、フレミングの法則により固定子から回

転子の q 軸に励磁磁束が流入される。そしてこれにより、回転子の q 軸コア部分に、広範囲の磁気飽和が生じると考えられる。

[0077] 図 7 は、固定子巻線の起磁力を示すアンペアターン [A T] とトルク密度 [N m / L] との関係を示すトルク線図である。破線が一般的な I P M ロータ型の回転電機における特性を示す。図 7 に示すように、一般的な回転電機では、固定子において起磁力を増加させていくことにより、スロット間のティース部分及び q 軸コア部分の 2 カ所で磁気飽和が生じ、それが原因でトルクの増加が制限されてしまう。このように、当該一般的な回転電機では、アンペアターン設計値が A 1 で制限されることになる。

[0078] そこで本実施形態では、磁気飽和に起因する制限を解消すべく、回転電機 1 0 において、以下に示す構成を付与するものとしている。すなわち、第 1 の工夫として、固定子において固定子コアのティースで生じる磁気飽和をなくすべく、固定子 5 0 においてスロットレス構造を採用し、かつ I P M ロータの q 軸コア部分で生じる磁気飽和をなくすべく、S P M (Surface Permanent Magnet) ロータを採用している。第 1 の工夫によれば、磁気飽和が生じる上記 2 カ所の部分をなくすることができるが、低電流域でのトルクが減少することが考えられる (図 7 の一点鎖線参照)。そのため、第 2 の工夫として、S P M ロータの磁束増強を図ることでトルク減少を挽回すべく、回転子 4 0 の磁石ユニット 4 2 において磁石磁路を長くして磁力を高めた極異方構造を採用している。

[0079] また、第 3 の工夫として、固定子巻線 5 1 のコイルサイド部 5 3 において導線の固定子 5 0 における径方向厚さを小さくした扁平導線構造を採用してトルク減少の挽回を図っている。ここで、上述の磁力を高めた極異方構造によって、磁石ユニット 4 2 に対向する固定子巻線 5 1 には、より大きな渦電流が発生することが考えられる。しかしながら、第 3 の工夫によれば、径方向に薄い扁平導線構造のため、固定子巻線 5 1 における径方向の渦電流の発生を抑制することができる。このように、これら第 1 ~ 第 3 の各構成によれば、図 7 に実線で示すように、磁力の高い磁石を採用してトルク特性の大幅

な改善を見込みつつも、磁力の高い磁石ゆえに生じ得る大きい渦電流発生の懸念も改善できるものとなっている。

[0080] さらに、第4の工夫として、極異方構造を利用し正弦波に近い磁束密度分布を有する磁石ユニットを採用している。これによれば、後述するパルス制御等によって正弦波整合率を高めてトルク増強を図ることができるとともに、ラジアル磁石と比べ緩やかな磁束変化のため渦電流損（渦電流による銅損：eddy current loss）もまた更に抑制することができるのである。

[0081] 以下、正弦波整合率について説明する。正弦波整合率は、磁石の表面を磁束プローブでなぞる等して計測した表面磁束密度分布の実測波形と周期及びピーク値が同じ正弦波との比較から求める事ができる。そして、回転電機の基本波である1次波形の振幅が、実測波形の振幅、即ち基本波に他の高調波成分を加えた振幅に対して、占める割合が正弦波整合率に相当する。正弦波整合率が高くなると、表面磁束密度分布の波形が正弦波形状に近づいていく。そして、正弦波整合率を向上させた磁石を備えた回転電機に対して、インバータから1次の正弦波の電流を供給すると、磁石の表面磁束密度分布の波形が正弦波形状に近い事と相まって、大きなトルクを発生させることができる。なお、表面磁束密度分布は実測以外の方法、例えばマクスウェルの方程式を用いた電磁界解析によって推定しても良い。

[0082] また、第5の工夫として、固定子巻線51を複数の素線を寄せ集めて束ねた素線導体構造としている。これによれば、素線が並列結線されているため、大電流が流せるとともに、扁平導線構造で固定子50の周方向に広がった導線で発生する渦電流の発生を、素線それぞれの断面積が小さくなるため、第3の工夫による径方向に薄くする以上に効果的に抑制することができる。そして、複数の素線を撚り合わせた構成にすることで、導体からの起磁力に対しては、電流通電方向に対して右ネジの法則で発生する磁束に対する渦電流を相殺することができる。

[0083] このように、第4の工夫、第5の工夫をさらに加えると、第2の工夫である磁力の高い磁石を採用しながら、さらにその高い磁力に起因する渦電流損

を抑制しながらトルク増強を図ることができる。

[0084] 以下に、上述した固定子50のスロットレス構造、固定子巻線51の扁平導線構造、及び磁石ユニット42の極異方構造について個別に説明を加える。ここではまずは、固定子50におけるスロットレス構造と固定子巻線51の扁平導線構造とを説明する。図8は、回転子40及び固定子50の横断面図であり、図9は、図8に示す回転子40及び固定子50の一部を拡大して示す図である。図10は、図11のX-X線に沿った固定子50の横断面を示す断面図であり、図11は、固定子50の縦断面を示す断面図である。また、図12は、固定子巻線51の斜視図である。なお、図8及び図9には、磁石ユニット42における磁石の磁化方向を矢印にて示している。

[0085] 図8乃至図11に示すように、固定子コア52は、軸方向に複数の電磁鋼板が積層され、かつ径方向に所定の厚さを有する円筒状をなしており、回転子40側となる径方向外側に固定子巻線51が組み付けられるものとなっている。固定子コア52において、回転子40側の外周面が導線設置部（導体エリア）となっている。固定子コア52の外周面は凹凸のない曲面状をなしており、その外周面において周方向に所定間隔で複数の導線群81が配置されている。固定子コア52は、回転子40を回転させるための磁気回路の一部となるバックヨークとして機能する。この場合、周方向に隣り合う各2つの導線群81の間には軟磁性材からなるティース（つまり、鉄心）が設けられていない構成（つまり、スロットレス構造）となっている。本実施形態において、それら各導線群81の間隙56には、封止部材57の樹脂材料が入り込む構造となっている。つまり、固定子50において、周方向における各導線群81の間に設けられる導線間部材が、非磁性材料である封止部材57として構成されている。封止部材57の封止前の状態と言えば、固定子コア52の径方向外側には、それぞれ導線間領域である間隙56を隔てて周方向に所定間隔で導線群81が配置されており、これによりスロットレス構造の固定子50が構築されている。言い換えれば、各導線群81は、後述するように二つの導線（conductor）82からなり、固定子50の周方向に隣り合う

各二つの導線群 8 1 の間は、非磁性材のみが占有している。この非磁性材とは、封止部材 5 7 以外に空気などの非磁性気体や非磁性液体などをも含む。なお、以下において、封止部材 5 7 は導線間部材 (conductor-to-conductor member) ともいう。

[0086] なお、周方向に並ぶ各導線群 8 1 の間においてティースが設けられている構成とは、ティースが、径方向に所定厚さを有し、かつ周方向に所定幅を有することで、各導線群 8 1 の間に磁気回路の一部、すなわち磁石磁路を形成する構成であると言える。この点において、各導線群 8 1 の間にティースが設けられていない構成とは、上記の磁気回路の形成がなされていない構成であると言える。

[0087] 図 10 に示すように、固定子巻線 (すなわち電機子巻線) 5 1 は、所定の厚み T_2 (以下、第 1 寸法とも言う) と幅 W_2 (以下、第 2 寸法とも言う) を有するように形成されている。厚み T_2 は、固定子巻線 5 1 の径方向において互いに対向する外側面と内側面との間の最短距離である。幅 W_2 は、固定子巻線 5 1 の多相 (実施例では 3 相: U 相、V 相及び W 相の 3 相あるいは X 相、Y 相及び Z 相の 3 相) の一つとして機能する固定子巻線 5 1 の一部分の固定子巻線 5 1 の周方向の長さである。具体的には、図 10 において、周方向に隣り合う 2 つの導線群 8 1 が 3 相の内の一つである例えば U 相として機能する場合、周方向において当該 2 つの導線群 8 1 の端から端までの幅 W_2 である。そして、厚み T_2 は幅 W_2 より小さくなっている。

[0088] なお、厚み T_2 は、幅 W_2 内に存在する 2 つの導線群 8 1 の合計幅寸法より小さいことが好ましい。また、仮に固定子巻線 5 1 (より詳しくは導線 8 2) の断面形状が真円形状や楕円形状、又は多角形状である場合、固定子 5 0 の径方向に沿った導線 8 2 の断面のうち、その断面において固定子 5 0 の径方向の最大の長さを W_{12} 、同断面のうち固定子 5 0 の周方向の最大の長さを W_{11} としても良い。

[0089] 図 10 及び図 11 に示すように、固定子巻線 5 1 は、封止材 (モールド材) としての合成樹脂材からなる封止部材 5 7 により封止されている。つまり

、固定子巻線 5 1 は、固定子コア 5 2 と共にモールド材によりモールドされている。なお樹脂は、非磁性体、又は非磁性体の均等物として $B_s = 0$ と看做することができる。

[0090] 図 10 の横断面で見れば、封止部材 5 7 は、各導線群 8 1 の間、すなわち間隙 5 6 に合成樹脂材が充填されて設けられており、封止部材 5 7 により、各導線群 8 1 の間に絶縁部材が介在する構成となっている。つまり、間隙 5 6 において封止部材 5 7 が絶縁部材として機能する。封止部材 5 7 は、固定子コア 5 2 の径方向外側において、各導線群 8 1 を全て含む範囲、すなわち径方向の厚さ寸法が各導線群 8 1 の径方向の厚さ寸法よりも大きくなる範囲で設けられている。

[0091] また、図 11 の縦断面で見れば、封止部材 5 7 は、固定子巻線 5 1 のターン部 8 4 を含む範囲で設けられている。固定子巻線 5 1 の径方向内側では、固定子コア 5 2 の軸方向に対向する端面の少なくとも一部を含む範囲で封止部材 5 7 が設けられている。この場合、固定子巻線 5 1 は、各相の相巻線の端部、すなわちインバータ回路との接続端子を除く略全体で樹脂封止されている。

[0092] 封止部材 5 7 が固定子コア 5 2 の端面を含む範囲で設けられた構成では、封止部材 5 7 により、固定子コア 5 2 の積層鋼板を軸方向内側に押さえ付けることができる。これにより、封止部材 5 7 を用いて、各鋼板の積層状態を保持することができる。なお、本実施形態では、固定子コア 5 2 の内周面を樹脂封止していないが、これに代えて、固定子コア 5 2 の内周面を含む固定子コア 5 2 の全体を樹脂封止する構成であってもよい。

[0093] 回転電機 10 が車両動力源として使用される場合には、封止部材 5 7 が、高耐熱のフッ素樹脂や、エポキシ樹脂、PPS 樹脂、PEEK 樹脂、LCP 樹脂、シリコン樹脂、PAI 樹脂、PI 樹脂等により構成されていることが好ましい。また、膨張差による割れ抑制の観点から線膨張係数を考えると、固定子巻線 5 1 の導線の外被膜と同じ材質であることが望ましい。すなわち、線膨張係数が、一般的に他樹脂の倍以上であるシリコン樹脂は望ましくは

除外される。なお、電気車両の如く、燃焼を利用した機関を持たない電気製品においては、180℃程度の耐熱性を持つPPO樹脂やフェノール樹脂、FRP樹脂も候補となる。回転電機の周囲温度が100℃未満と見做せる分野においては、この限りではない。

[0094] 回転電機10のトルクは磁束の大きさに比例する。ここで、固定子コアがティースを有している場合には、固定子での最大磁束量がティースでの飽和磁束密度に依存して制限されるが、固定子コアがティースを有していない場合には、固定子での最大磁束量が制限されない。そのため、固定子巻線51に対する通電電流を増加して回転電機10のトルク増加を図る上で、有利な構成となっている。

[0095] 本実施形態では、固定子50においてティースを無くした構造（スロットレス構造）を用いたことにより、固定子50のインダクタンスが低減される。具体的には、複数のティースにより仕切られた各スロットに導線が収容される一般的な回転電機の固定子ではインダクタンスが例えば1mH前後であるのに対し、本実施形態の固定子50ではインダクタンスが5～60μH程度に低減される。本実施形態では、アウトロータ構造の回転電機10としつつも、固定子50のインダクタンス低減により機械的時定数 T_m を下げる事が可能となっている。つまり、高トルク化を図りつつ、機械的時定数 T_m の低減が可能となっている。なお、イナーシャを J 、インダクタンスを L 、トルク定数を K_t 、逆起電力定数を K_e とすると、機械的時定数 T_m は、次式により算出される。

$$T_m = (J \times L) / (K_t \times K_e)$$

この場合、インダクタンス L の低減により機械的時定数 T_m が低減されることが確認できる。

[0096] 固定子コア52の径方向外側における各導線群81は、断面が扁平矩形状をなす複数の導線82が固定子コア52の径方向に並べて配置されて構成されている。各導線82は、横断面において「径方向寸法<周方向寸法」となる向きで配置されている。これにより、各導線群81において径方向の薄肉

化が図られている。また、径方向の薄肉化を図るとともに、導体領域が、ティースが従来あった領域まで平らに延び、扁平導線領域構造となっている。これにより、薄肉化により断面積が小さくなることで懸念される導線の発熱量の増加を、周方向に扁平化して導体の断面積を稼ぐことで抑えている。なお、複数の導線を周方向に並べ、かつそれらを並列結線とする構成であっても、導体被膜分の導体断面積低下は起こるものの、同じ理屈に依る効果が得られる。なお、以下において、導線群 8 1 のそれぞれ、および導線 8 2 のそれぞれを、伝導部材 (conductive member) とも言う。

[0097] スロットがないことから、本実施形態における固定子巻線 5 1 では、その周方向の一周における固定子巻線 5 1 が占める導体領域を、固定子巻線 5 1 が存在しない導体非占有領域より大きく設計することができる。なお、従来の車両用回転電機は、固定子巻線の周方向の一周における導体領域／導体非占有領域は 1 以下であるのが当然であった。一方、本実施形態では、導体領域が導体非占有領域と同等又は導体領域が導体非占有領域よりも大きくなるようにして、各導線群 8 1 が設けられている。ここで、図 10 に示すように、周方向において導線 8 2 (つまり、後述する直線部 8 3) が配置された導線領域を WA、隣り合う導線 8 2 の間となる導線間領域を WB とすると、導線領域 WA は、導線間領域 WB より周方向において大きいものとなっている。

[0098] 固定子巻線 5 1 における導線群 8 1 の構成として、その導線群 8 1 の径方向の厚さ寸法は、1 磁極内における 1 相分の周方向の幅寸法よりも小さいものとなっている。すなわち、導線群 8 1 が径方向に 2 層の導線 8 2 よりなり、かつ 1 磁極内に 1 相につき周方向に 2 つの導線群 8 1 が設けられる構成では、各導線 8 2 の径方向の厚さ寸法を T_c 、各導線 8 2 の周方向の幅寸法を W_c とした場合に、「 $T_c \times 2 < W_c \times 2$ 」となるように構成されている。なお、他の構成として、導線群 8 1 が 2 層の導線 8 2 よりなり、かつ 1 磁極内に 1 相につき周方向に 1 つの導線群 8 1 が設けられる構成では、「 $T_c \times 2 < W_c$ 」の関係となるように構成されるとよい。要するに、固定子巻線 5

1において周方向に所定間隔で配置される導線部（導線群81）は、その径方向の厚さ寸法が、1磁極内における1相分の周方向の幅寸法よりも小さいものとなっている。

[0099] 言い換えると、1本1本の各導線82は、径方向の厚さ寸法 T_c が周方向の幅寸法 W_c よりも小さいとよい。またさらに、径方向に2層の導線82よりなる導線群81の径方向の厚さ寸法（ $2T_c$ ）、すなわち導線群81の径方向の厚さ寸法（ $2T_c$ ）が周方向の幅寸法 W_c よりも小さいとよい。

[0100] 回転電機10のトルクは、導線群81の固定子コア52の径方向の厚さに略反比例する。この点、固定子コア52の径方向外側において導線群81の厚さを薄くしたことにより、回転電機10のトルク増加を図る上で有利な構成となっている。その理由としては、回転子40の磁石ユニット42から固定子コア52までの距離（つまり鉄の無い部分の距離）を小さくして磁気抵抗を下げることができるためである。これによれば、永久磁石による固定子コア52の鎖交磁束を大きくすることができ、トルクを増強することができる。

[0101] また、導線群81の厚さを薄くしたことにより、導線群81から磁束が漏れても固定子コア52に回収されやすくなり、磁束がトルク向上のために有効に利用されずに外部に漏れることを抑制することができる。つまり、磁束漏れにより磁力が低下することを抑制でき、永久磁石による固定子コア52の鎖交磁束を大きくして、トルクを増強することができる。

[0102] 導線82 (conductor)は、導体(conductor body)82aの表面が絶縁被膜82bにより被覆された被覆導線よりなり、径方向に互いに重なる導線82同士の間、及び導線82と固定子コア52との間においてそれぞれ絶縁性が確保されている。この絶縁被膜82bは、後述する素線86が自己融着被覆線であるならその被膜、又は、素線86の被膜とは別に重ねられた絶縁部材で構成されている。なお、導線82により構成される各相巻線は、接続のための露出部分を除き、絶縁被膜82bによる絶縁性が保持されるものとなっている。露出部分としては、例えば、入出力端子部や、星形結線とする場合の

中性点部分である。導線群 8 1 では、樹脂固着や自己融着被覆線を用いて、径方向に隣り合う各導線 8 2 が相互に固着されている。これにより、導線 8 2 同士が擦れ合うことによる絶縁破壊や、振動、音が抑制される。

[0103] 本実施形態では、導体 8 2 a が複数の素線(wire) 8 6 の集合体として構成されている。具体的には、図 1 3 に示すように、導体 8 2 a は、複数の素線 8 6 を撚ることで撚糸状に形成されている。また、図 1 4 に示すように、素線 8 6 は、細い繊維状の導電材 8 7 を束ねた複合体として構成されている。例えば、素線 8 6 は C N T (カーボンナノチューブ) 繊維の複合体であり、C N T 繊維として、炭素の少なくとも一部をホウ素で置換したホウ素含有微細繊維を含む繊維が用いられている。炭素系微細繊維としては、C N T 繊維以外に、気相成長法炭素繊維 (V G C F) 等を用いることができるが、C N T 繊維を用いることが好ましい。なお、素線 8 6 の表面は、エナメルなどの高分子絶縁層で覆われている。また、素線 8 6 の表面は、ポリイミドの被膜やアミドイミドの被膜からなる、いわゆるエナメル被膜で覆われていることが好ましい。

[0104] 導線 8 2 は、固定子巻線 5 1 において n 相の巻線を構成する。そして導線 8 2 (すなわち、導体 8 2 a) の各々の素線 8 6 は、互いに接触状態で隣接している。導線 8 2 は、巻線導体が、複数の素線 8 6 が撚られて形成される部位を、相内の 1 か所以上に持つとともに、撚られた素線 8 6 間の抵抗値が素線 8 6 そのものの抵抗値よりも大きい素線集合体となっている。言い換えると、隣接する各 2 つの素線 8 6 はその隣接する方向において第 1 電気抵抗率を有し、素線 8 6 の各々はその長さ方向において第 2 電気抵抗率を有する場合、第 1 電気抵抗率は第 2 電気抵抗率より大きい値になっている。なお、導線 8 2 が複数の素線 8 6 により形成されるとともに、第 1 電気抵抗率が極めて高い絶縁部材により複数の素線 8 6 を覆う素線集合体となっても良い。また、導線 8 2 の導体 8 2 a は、撚り合わされた複数の素線 8 6 により構成されている。

[0105] 上記の導体 8 2 a では、複数の素線 8 6 が撚り合わされて構成されている

ため、各素線 8 6 での渦電流の発生が抑えられ、導体 8 2 a における渦電流の低減を図ることができる。また、各素線 8 6 が捻られていることで、1 本の素線 8 6 において磁界の印加方向が互いに逆になる部位が生じて逆起電圧が相殺される。そのため、やはり渦電流の低減を図ることができる。特に、素線 8 6 を繊維状の導電材 8 7 により構成することで、細線化することと捻り回数を格段に増やすことが可能になり、渦電流をより好適に低減することができる。

[0106] なお、ここでいう素線 8 6 同士の絶縁方法は、前述の高分子絶縁膜に限定されず、接触抵抗を利用し撚られた素線 8 6 間で電流を流れにくくする方法であってもよい。すなわち撚られた素線 8 6 間の抵抗値が、素線 8 6 そのものの抵抗値よりも大きい関係になっていれば、抵抗値の差に起因して発生する電位差により、上記効果を得ることができる。たとえば、素線 8 6 を作成する製造設備と、回転電機 1 0 の固定子 5 0（電機子）を作成する製造設備とを別の非連続の設備として用いることで、移動時間や作業間隔などから素線 8 6 が酸化し、接触抵抗を増やすことができ、好適である。

[0107] 上述のとおり導線 8 2 は、断面が扁平矩形状をなし、径方向に複数並べて配置されるものとなっており、例えば融着層と絶縁層とを備えた自己融着被覆線で被覆された複数の素線 8 6 を撚った状態で集合させ、その融着層同士を融着させることで形状を維持している。なお、融着層を備えない素線や自己融着被覆線の素線を撚った状態で合成樹脂等により所望の形状に固めて成形してもよい。導線 8 2 における絶縁被膜 8 2 b の厚さを例えば $80\ \mu\text{m}$ ～ $100\ \mu\text{m}$ とし、一般に使用される導線の被膜厚さ（ $5\sim40\ \mu\text{m}$ ）よりも厚肉とした場合、導線 8 2 と固定子コア 5 2 との間に絶縁紙等を介在させることをしなくても、これら両者の間の絶縁性が確保することができる。

[0108] また、絶縁被膜 8 2 b は、素線 8 6 の絶縁層よりも高い絶縁性能を有し、相間を絶縁することができるように構成されていることが望ましい。例えば、素線 8 6 の高分子絶縁層の厚さを例えば $5\ \mu\text{m}$ 程度にした場合、導線 8 2 の絶縁被膜 8 2 b の厚さを $80\ \mu\text{m}$ ～ $100\ \mu\text{m}$ 程度にして、相間の絶縁を

好適に実施できるようにすることが望ましい。

[0109] また、導線 8 2 は、複数の素線 8 6 が撚られることなく束ねられている構成であってもよい。つまり、導線 8 2 は、その全長において複数の素線 8 6 が撚られている構成、全長のうち一部で複数の素線 8 6 が撚られている構成、全長において複数の素線 8 6 が撚られることなく束ねられている構成のいずれかであればよい。まとめると、導線部を構成する各導線 8 2 は、複数の素線 8 6 が束ねられているとともに、束ねられた素線間の抵抗値が素線 8 6 そのものの抵抗値よりも大きい素線集合体となっている。

[0110] 各導線 8 2 は、固定子巻線 5 1 の周方向に所定の配置パターンで配置されるように折り曲げ形成されており、これにより、固定子巻線 5 1 として相ごとの相巻線が形成されている。図 1 2 に示すように、固定子巻線 5 1 では、各導線 8 2 のうち軸方向に直線状に延びる直線部 8 3 によりコイルサイド部 5 3 が形成され、軸方向においてコイルサイド部 5 3 よりも両外側に突出するターン部 8 4 によりコイルエンド 5 4, 5 5 が形成されている。各導線 8 2 は、直線部 8 3 とターン部 8 4 とが交互に繰り返されることにより、波巻状の一連の導線として構成されている。直線部 8 3 は、磁石ユニット 4 2 に対して径方向に対向する位置に配置されており、磁石ユニット 4 2 の軸方向外側となる位置において所定間隔を隔てて配置される同相の直線部 8 3 同士が、ターン部 8 4 により互いに接続されている。なお、直線部 8 3 が「磁石対向部」に相当する。

[0111] 本実施形態では、固定子巻線 5 1 が分布巻きにより円環状に巻回形成されている。この場合、コイルサイド部 5 3 では、相ごとに、磁石ユニット 4 2 の 1 極対に対応する間隔で周方向に直線部 8 3 が配置され、コイルエンド 5 4, 5 5 では、相ごとの各直線部 8 3 が、略 V 字状に形成されたターン部 8 4 により互いに接続されている。1 極対に対応して対となる各直線部 8 3 は、それぞれ電流の向きが互いに逆になるものとなっている。また、一方のコイルエンド 5 4 と他方のコイルエンド 5 5 とでは、ターン部 8 4 により接続される一对の直線部 8 3 の組み合わせがそれぞれ相違しており、そのコイル

エンド 5 4, 5 5 での接続が周方向に繰り返されることにより、固定子巻線 5 1 が略円筒状に形成されている。

[0112] より具体的には、固定子巻線 5 1 は、各相 2 対ずつの導線 8 2 を用いて相ごとの巻線を構成しており、固定子巻線 5 1 のうち一方の 3 相巻線 (U 相、V 相、W 相) と他方の 3 相巻線 (X 相、Y 相、Z 相) とが径方向内外の 2 層に設けられるものとなっている。この場合、固定子巻線 5 1 の相数を S (実施例の場合は 6)、導線 8 2 の一相あたりの数を m とすれば、極対ごとに $2 \times S \times m = 2 S m$ 個の導線 8 2 が形成されることになる。本実施形態では、相数 S が 6、数 m が 4 であり、8 極対 (16 極) の回転電機であることから、 $6 \times 4 \times 8 = 192$ の導線 8 2 が固定子コア 5 2 の周方向に配置されている。

[0113] 図 1 2 に示す固定子巻線 5 1 では、コイルサイド部 5 3 において、径方向に隣接する 2 層で直線部 8 3 が重ねて配置されるとともに、コイルエンド 5 4, 5 5 において、径方向に重なる各直線部 8 3 から、互いに周方向逆となる向きでターン部 8 4 が周方向に延びる構成となっている。つまり、径方向に隣り合う各導線 8 2 では、固定子巻線 5 1 の端部を除き、ターン部 8 4 の向きが互いに逆となっている。

[0114] ここで、固定子巻線 5 1 における導線 8 2 の巻回構造を具体的に説明する。本実施形態では、波巻にて形成された複数の導線 8 2 を、径方向に隣接する複数層 (例えば 2 層) に重ねて設ける構成としている。図 1 5 (a)、図 1 5 (b) は、 n 層目における各導線 8 2 の形態を示す図であり、図 1 5 (a) には、固定子巻線 5 1 の側方から見た導線 8 2 の形状を示し、図 1 5 (b) には、固定子巻線 5 1 の軸方向一側から見た導線 8 2 の形状を示している。なお、図 1 5 (a)、図 1 5 (b) では、導線群 8 1 が配置される位置をそれぞれ $D 1$, $D 2$, $D 3$, ... と示している。また、説明の便宜上、3 本の導線 8 2 のみを示しており、それを第 1 導線 8 2 __A、第 2 導線 8 2 __B、第 3 導線 8 2 __C としている。

[0115] 各導線 8 2 __A ~ 8 2 __C では、直線部 8 3 が、いずれも n 層目の位置、

すなわち径方向において同じ位置に配置され、周方向に6位置（ $3 \times m$ 対分）ずつ離れた直線部83同士がターン部84により互いに接続されている。換言すると、各導線82__A～82__Cでは、いずれも回転子40の軸心を中心とする同一の円上において、固定子巻線51の周方向に隣接して並ぶ7個の直線部83の両端の二つが一つのターン部84により互いに接続されている。例えば第1導線82__Aでは、一对の直線部83がD1, D7にそれぞれ配置され、その一对の直線部83同士が、逆V字状のターン部84により接続されている。また、他の導線82__B, 82__Cは、同じn層目において周方向の位置を1つずつずらしてそれぞれ配置されている。この場合、各導線82__A～82__Cは、いずれも同じ層に配置されるため、ターン部84が互いに干渉することが考えられる。そのため本実施形態では、各導線82__A～82__Cのターン部84に、その一部を径方向にオフセットした干渉回避部を形成することとしている。

[0116] 具体的には、各導線82__A～82__Cのターン部84は、同一の円（第1の円）上で周方向に延びる部分である1つの傾斜部84aと、傾斜部84aからその同一の円よりも径方向内側（図15（b）において上側）にシフトし、別の円（第2の円）に達する頂部84b、第2の円上で周方向に延びる傾斜部84c及び第1の円から第2の円に戻る戻り部84dとを有している。頂部84b、傾斜部84c及び戻り部84dが干渉回避部に相当する。なお、傾斜部84cは、傾斜部84aに対して径方向外側にシフトする構成であってもよい。

[0117] つまり、各導線82__A～82__Cのターン部84は、周方向の中央位置である頂部84bを挟んでその両側に、一方側の傾斜部84aと他方側の傾斜部84cとを有しており、それら各傾斜部84a, 84cの径方向の位置（図15（a）では紙面前後方向の位置、図15（b）では上下方向の位置）が互いに相違するものとなっている。例えば第1導線82__Aのターン部84は、n層のD1位置を始点位置として周方向に沿って延び、周方向の中央位置である頂部84bで径方向（例えば径方向内側）に曲がった後、周方

向に再度曲がることで、再び周方向に沿って延び、さらに戻り部 8 4 d で再び径方向（例えば径方向外側）に曲がることで、終点位置である n 層の D 7 位置に達する構成となっている。

[0118] 上記構成によれば、導線 8 2 __ A ~ 8 2 __ C では、一方の各傾斜部 8 4 a が、上から第 1 導線 8 2 __ A → 第 2 導線 8 2 __ B → 第 3 導線 8 2 __ C の順に上下に並ぶとともに、頂部 8 4 b で各導線 8 2 __ A ~ 8 2 __ C の上下が入れ替わり、他方の各傾斜部 8 4 c が、上から第 3 導線 8 2 __ C → 第 2 導線 8 2 __ B → 第 1 導線 8 2 __ A の順に上下に並ぶ構成となっている。そのため、各導線 8 2 __ A ~ 8 2 __ C が互いに干渉することなく周方向に配置できるようになっている。

[0119] ここで、複数の導線 8 2 を径方向に重ねて導線群 8 1 とする構成において、複数層の各直線部 8 3 のうち径方向内側の直線部 8 3 に接続されたターン部 8 4 と、径方向外側の直線部 8 3 に接続されたターン部 8 4 とが、それら各直線部 8 3 同士よりも径方向に離して配置されているとよい。また、ターン部 8 4 の端部、すなわち直線部 8 3 との境界部付近で、複数層の導線 8 2 が径方向の同じ側に曲げられる場合に、その隣り合う層の導線 8 2 同士の干渉により絶縁性が損なわれることが生じないようにするとよい。

[0120] 例えば図 1 5 (a)、図 1 5 (b) の D 7 ~ D 9 では、径方向に重なる各導線 8 2 が、ターン部 8 4 の戻り部 8 4 d でそれぞれ径方向に曲げられる。この場合、図 1 6 に示すように、 n 層目の導線 8 2 と $n + 1$ 層目の導線 8 2 とで、曲がり部の曲率半径を相違させるとよい。具体的には、径方向内側（ n 層目）の導線 8 2 の曲率半径 R_1 を、径方向外側（ $n + 1$ 層目）の導線 8 2 の曲率半径 R_2 よりも小さくする。

[0121] また、 n 層目の導線 8 2 と $n + 1$ 層目の導線 8 2 とで、径方向のシフト量を相違させるとよい。具体的には、径方向内側（ n 層目）の導線 8 2 のシフト量 S_1 を、径方向外側（ $n + 1$ 層目）の導線 8 2 のシフト量 S_2 よりも大きくする。

[0122] 上記構成により、径方向に重なる各導線 8 2 が同じ向きに曲げられる場合

であっても、各導線82の相互干渉を好適に回避することができる。これにより、良好な絶縁性が得られることとなる。

[0123] 次に、回転子40における磁石ユニット42の構造について説明する。本実施形態では、磁石ユニット42が永久磁石からなり、残留磁束密度 $B_r = 1.0$ [T]、固有保磁力 $H_{cj} = 400$ [kA/m]以上のものを想定している。要は、本実施形態で用いる永久磁石は、粒状の磁性材料を焼結して成型固化した焼結磁石であり、J-H曲線上の固有保磁力 H_{cj} は 400 [kA/m]以上であり、かつ残留磁束密度 B_r は 1.0 [T]以上である。 $5000 \sim 10000$ [AT]が相間励磁により掛かる場合、1極対、すなわちN極とS極の磁氣的長さ、言い換えれば、N極とS極間の磁束が流れる経路のうち、磁石内を通る長さが 25 [mm]の永久磁石を使えば、 $H_{cj} = 10000$ [A]となり、減磁をしないことが伺える。

[0124] また換言すれば、磁石ユニット42は、飽和磁束密度 J_s が 1.2 [T]以上で、かつ結晶粒径が 10 [μ m]以下であり、配向率を α とした場合に $J_s \times \alpha$ が 1.0 [T]以上であるものとなっている。

[0125] 以下に磁石ユニット42について補足する。磁石ユニット42（磁石）は、 2.15 [T] $\geq J_s \geq 1.2$ [T]であることが特徴である。言い換えれば、磁石ユニット42に用いられる磁石として、NdFe11TiN、Nd2Fe14B、Sm2Fe17N3、L10型結晶を有するFeNi磁石などが挙げられる。なお、通例サマコバと言われるSmCo5や、FePt、Dy2Fe14B、CoPtなどの構成は使うことができない。注意としては、同型の化合物、例えばDy2Fe14BとNd2Fe14Bのように、一般的に、重希土類であるディスプロシウムを利用して、ネオジウムの高い J_s 特性を少しだけ失いながらも、Dyの持つ高い保磁力を持たせた磁石でも 2.15 [T] $\geq J_s \geq 1.2$ [T]を満たす場合があり、この場合も採用可能である。このような場合は、例えば([Nd $_{1-x}$ Dy $_x$]2Fe14B)と呼ぶこととする。更に、異なる組成の2種類以上の磁石、例えば、FeNiプラスSm2Fe17N3というように2種類以上の材料からなる磁石でも、達成が可能であるし、例えば、 $J_s = 1.6$ [T]と、 J_s に余裕のあるNd2Fe14Bの磁石に、 $J_s < 1$ [

T] の、例えばDy₂Fe₁₄Bを少量混ぜ、保磁力を増加させた混合磁石などでも達成が可能である。

[0126] また、人間の活動範囲外の温度、例えば砂漠の温度を超える60℃以上で動作されるような回転電機、例えば、夏においておけば車中温度が80℃近くなる車両用モータ用途などにおいては、特に温度依存係数の小さい、FeNi、Sm₂Fe₁₇N₃の成分を含むことが望ましい。これは、人間の活動範囲内である北欧の-40℃近い温度状態から、先述の砂漠温度を超える60℃以上、又はコイルエナメル被膜の耐熱温度180～240℃程度までのモータ動作において温度依存係数によって大きくモータ特性を異ならせるため、同一のモータドライバでの最適制御などが困難となるためである。前記L10型結晶を有するFeNi、又はSm₂Fe₁₇N₃などを用いれば、Nd₂Fe₁₄Bと比べ、半分以上の温度依存係数を所持しているその特性から、モータドライバの負担を好適に減らすことができる。

[0127] 加えて、磁石ユニット42は、前記磁石配合を用いて、配向以前の微粉体状態の粒子径の大きさが10μm以下、単磁区粒子径以上としていることを特徴としている。磁石では、粉体の粒子を数百nmオーダーまで微細化することにより保磁力が大きくなるため、近年では、できるだけ微細化された粉体を使用されている。ただし、細かくしすぎると、酸化などにより磁石のBH積が落ちてしまうため、単磁区粒子径以上が好ましい。単磁区粒子径までの粒子径であれば、微細化により保磁力が上昇することが知られている。なお、ここで述べてきた粒子径の大きさは、磁石の製造工程でいうところの配向工程の際の微粉体状態の粒子径の大きさである。

[0128] 更に、磁石ユニット42の第1磁石91と第2磁石92の各々は、磁性粉末を高温で焼き固めた、いわゆる焼結により形成された焼結磁石である。この焼結は、磁石ユニット42の飽和磁化J_sが1.2T以上で、第1磁石91および第2磁石92の結晶粒径が10μm以下であり、配向率をαとした場合、J_s×αが1.0T（テスラ）以上の条件を満足するよう行われる。また、第1磁石91と第2磁石92の各々は、以下の条件を満足するように

焼結されている。そして、その製造過程において配向工程にて配向が行われることにより、等方性磁石の着磁工程による磁力方向の定義とは異なり、配向率 (orientation ratio) を持つ。本実施形態の磁石ユニット 42 の飽和磁化 J_s が 1.2 T 以上で、第 1 磁石 91 と第 2 磁石 92 の配向率 α が、 $J_r \geq J_s \times \alpha \geq 1.0$ [T] となるように高い配向率を設定されている。なお、ここで言う配向率 α とは、第 1 磁石 91 又は第 2 磁石 92 の各々において、例えば、磁化容易軸が 6 つあり、そのうちの 5 つが同じ方向である方向 A10 を向き、残りの一つが方向 A10 に対して 90 度傾いた方向 B10 を向いている場合、 $\alpha = 5/6$ であり、残りの一つが方向 A10 に対して 45 度傾いた方向 B10 を向いている場合には、残りの一つは方向 A10 を向く成分は $\cos 45^\circ = 0.707$ であるため、 $\alpha = (5 + 0.707)/6$ となる。本実施例では焼結により第 1 磁石 91 と第 2 磁石 92 を形成しているが、上記条件が満足されれば、第 1 磁石 91 と第 2 磁石 92 は他の方法により成形してもよい。例えば、MQ3 磁石などを形成する方法を採用することができる。

[0129] 本実施形態においては、配向により磁化容易軸をコントロールした永久磁石を利用しているから、その磁石内部の磁気回路長を、従来 1.0 [T] 以上を出す直線配向磁石の磁気回路長と比べて、長くすることができる。すなわち、1 極あたりの磁気回路長を、少ない磁石量で達成できる他、従来の直線配向磁石を利用した設計と比べ、過酷な高熱条件に曝されても、その可逆減磁範囲を保つことができる。また、本願開示者は、従来技術の磁石を用いても、極異方性磁石と近い特性を得られる構成を見いだした。

[0130] なお、磁化容易軸は、磁石において磁化されやすい結晶方位のことをいう。磁石における磁化容易軸の向きとは、磁化容易軸の方向が揃っている程度を示す配向率が 50% 以上となる方向、又は、その磁石の配向の平均となる方向である。

[0131] 図 8 及び図 9 に示すように、磁石ユニット 42 は、円環状をなしており、磁石ホルダ 41 の内側（詳しくは円筒部 43 の径方向内側）に設けられてい

る。磁石ユニット42は、それぞれ極異方性磁石でありかつ極性が互いに異なる第1磁石91及び第2磁石92を有している。第1磁石91及び第2磁石92は周方向に交互に配置されている。第1磁石91は、固定子巻線51に近い部分においてN極を形成する磁石であり、第2磁石92は、固定子巻線51に近い部分においてS極を形成する磁石である。第1磁石91及び第2磁石92は、例えばネオジム磁石等の希土類磁石からなる永久磁石である。

[0132] 各磁石91, 92では、図9に示すように、公知の $d-q$ 座標系において磁極中心である d 軸(direct-axis)とN極とS極の磁極境界である(言い換えれば、磁束密度が0テスラである) q 軸(quadrature-axis)との間において磁化方向が円弧状に延びている。各磁石91, 92それぞれにおいて、 d 軸側では磁化方向が円環状の磁石ユニット42の径方向とされ、 q 軸側では円環状の磁石ユニット42の磁化方向が周方向とされている。以下、更に詳細に説明する。磁石91, 92のそれぞれは、図9に示すように、第1部分250と、磁石ユニット42の周方向において第1部分250の両側に位置する二つの第2部分260とを有する。言い換えれば、第1部分250は、第2部分260より d 軸に近く、第2部分260は、第1部分250より q 軸に近い。そして、第1部分250の磁化容易軸300の方向は、第2部分260の磁化容易軸310の方向よりも d 軸に対してより平行となるように磁石ユニット42が構成されている。言い換えれば、第1部分250の磁化容易軸300が d 軸となす角度 θ_{11} が、第2部分260の磁化容易軸310が q 軸となす角度 θ_{12} よりも小さくなるように磁石ユニット42が構成されている。

[0133] より詳細には、角度 θ_{11} は、 d 軸において固定子50(電機子)から磁石ユニット42に向かう方向を正とした時に、 d 軸と磁化容易軸300となす角度である。角度 θ_{12} は、 q 軸において固定子50(電機子)から磁石ユニット42に向かう方向を正とした時に、 q 軸と磁化容易軸310となす角度である。なお角度 θ_{11} 及び角度 θ_{12} 共に、本実施形態では90

° 以下である。ここでいう、磁化容易軸 3 0 0, 3 1 0 のそれぞれは、以下の定義による。磁石 9 1, 9 2 のそれぞれの部分において、一つの磁化容易軸が方向 A 1 1 を向き、もう一つの磁化容易軸が方向 B 1 1 を向いているとした場合、方向 A 1 1 と方向 B 1 1 の成す角度 θ のコサインの絶対値 ($|\cos \theta|$) を磁化容易軸 3 0 0 或いは磁化容易軸 3 1 0 とする。

[0134] すなわち、各磁石 9 1, 9 2 のそれぞれは、d 軸側 (d 軸寄りの部分) と q 軸側 (q 軸寄りの部分) とで磁化容易軸の向きが相違しており、d 軸側では磁化容易軸の向きが d 軸に平行な方向に近い向きとなり、q 軸側では磁化容易軸の向きが q 軸に直交する方向に近い向きとなっている。そして、この磁化容易軸の向きに応じて円弧状の磁石磁路が形成されている。なお、各磁石 9 1, 9 2 において、d 軸側では磁化容易軸を d 軸に平行な向きとし、q 軸側では磁化容易軸を q 軸に直交する向きとしてもよい。

[0135] また、磁石 9 1, 9 2 では、各磁石 9 1, 9 2 の周面のうち固定子 5 0 側 (図 9 の下側) となる固定子側外面と、周方向において q 軸側の端面とが、磁束の流入流出面である磁束作用面となっており、それらの磁束作用面 (固定子側外面及び q 軸側の端面) を繋ぐように磁石磁路が形成されている。

[0136] 磁石ユニット 4 2 では、各磁石 9 1, 9 2 により、隣接する N, S 極間を円弧状に磁束が流れるため、例えばラジアル異方性磁石に比べて磁石磁路が長くなっている。このため、図 1 7 に示すように、磁束密度分布が正弦波に近いものとなる。その結果、図 1 8 に比較例として示すラジアル異方性磁石の磁束密度分布とは異なり、磁極の中心側に磁束を集中させることができ、回転電機 1 0 のトルクを高めることができる。また、本実施形態の磁石ユニット 4 2 では、従来のハルバッハ配列の磁石と比べても、磁束密度分布の差異があることが確認できる。なお、図 1 7 及び図 1 8 において、横軸は電気角を示し、縦軸は磁束密度を示す。また、図 1 7 及び図 1 8 において、横軸の 9 0° は d 軸 (すなわち磁極中心) を示し、横軸の 0°, 1 8 0° は q 軸を示す。

[0137] つまり、上記構成の各磁石 9 1, 9 2 によれば、d 軸での磁石磁束が強化

され、かつ q 軸付近での磁束変化が抑えられる。これにより、各磁極において q 軸から d 軸にかけての表面磁束変化がなだらかなる磁石 9 1, 9 2 を好適に実現することができる。

[0138] 磁束密度分布の正弦波整合率は、例えば 40%以上の値とされていればよい。このようにすれば、正弦波整合率が 30%程度であるラジアル配向磁石、平行配向磁石を用いる場合に比べ、確実に波形中央部分の磁束量を向上させることができる。また、正弦波整合率を 60%以上とすれば、ハルバツハ配列のような磁束集中配列と比べ、確実に波形中央部分の磁束量を向上させることができる。

[0139] 図 18 に示すラジアル異方性磁石では、q 軸付近において磁束密度が急峻に変化する。磁束密度の変化が急峻なほど、固定子巻線 5 1 に発生する渦電流が増加してしまう。また、固定子巻線 5 1 側での磁束変化も急峻となる。これに対し、本実施形態では、磁束密度分布が正弦波に近い磁束波形となる。このため、q 軸付近において、磁束密度の変化が、ラジアル異方性磁石の磁束密度の変化よりも小さい。これにより、渦電流の発生を抑制することができる。

[0140] 磁石ユニット 4 2 では、各磁石 9 1, 9 2 の d 軸付近（すなわち磁極中心）において、固定子 5 0 側の磁束作用面 2 8 0 に直交する向きで磁束が生じ、その磁束は、固定子 5 0 側の磁束作用面 2 8 0 から離れるほど、d 軸から離れるような円弧状をなす。また、磁束作用面に直交する磁束であるほど、強い磁束となる。この点において、本実施形態の回転電機 1 0 では、上述のとおり各導線群 8 1 を径方向に薄くしたため、導線群 8 1 の径方向の中心位置が磁石ユニット 4 2 の磁束作用面に近づくことになり、固定子 5 0 において回転子 4 0 から強い磁石磁束を受けることができる。

[0141] また、固定子 5 0 には、固定子巻線 5 1 の径方向内側、すなわち固定子巻線 5 1 を挟んで回転子 4 0 の逆側に円筒状の固定子コア 5 2 が設けられている。そのため、各磁石 9 1, 9 2 の磁束作用面から延びる磁束は、固定子コア 5 2 に引きつけられ、固定子コア 5 2 を磁路の一部として用いつつ周回す

る。この場合、磁石磁束の向き及び経路を適正化することができる。

[0142] 以下に、回転電機 10 の製造方法として、図 5 に示す軸受ユニット 20、ハウジング 30、回転子 40、固定子 50 及びインバータユニット 60 についての組み付け手順について説明する。なお、インバータユニット 60 は、図 6 に示すようにユニットベース 61 と電気コンポーネント 62 とを有しており、それらユニットベース 61 及び電気コンポーネント 62 の組み付け工程を含む各作業工程を説明する。以下の説明では、固定子 50 及びインバータユニット 60 よりなる組立品を第 1 ユニット、軸受ユニット 20、ハウジング 30 及び回転子 40 よりなる組立品を第 2 ユニットとしている。

[0143] 本製造工程は、

- ・ユニットベース 61 の径方向内側に電気コンポーネント 62 を装着する第 1 工程と、
 - ・固定子 50 の径方向内側にユニットベース 61 を装着して第 1 ユニットの製作する第 2 工程と、
 - ・ハウジング 30 に組み付けられた軸受ユニット 20 に、回転子 40 の固定部 44 を挿入して第 2 ユニットの製作する第 3 工程と、
 - ・第 2 ユニットの径方向内側に第 1 ユニットの装着する第 4 工程と、
 - ・ハウジング 30 とユニットベース 61 とを締結固定する第 5 工程と、
- を有している。これら各工程の実施順序は、第 1 工程→第 2 工程→第 3 工程→第 4 工程→第 5 工程である。

[0144] 上記の製造方法によれば、軸受ユニット 20、ハウジング 30、回転子 40、固定子 50 及びインバータユニット 60 を複数の組立品（サブアセンブリ）として組み立てた後に、それら組立品同士を組み付けるようにしたため、ハンドリングのし易さやユニット毎の検査完結などを実現でき、合理的な組み立てラインの構築が可能となる。したがって、多品種生産にも容易に対応が可能となる。

[0145] 第 1 工程では、ユニットベース 61 の径方向内側及び電気コンポーネント 62 の径方向外部の少なくともいずれかに、熱伝導が良好な良熱伝導体を塗

布や接着等により付着させておき、その状態で、ユニットベース 61 に対して電気コンポーネント 62 を装着するとよい。これにより、半導体モジュール 66 の発熱をユニットベース 61 に対して効果的に伝達させることが可能となる。

[0146] 第3工程では、ハウジング 30 と回転子 40 との同軸を維持しながら、回転子 40 の挿入作業を実施するとよい。具体的には、例えばハウジング 30 の内周面を基準として回転子 40 の外周面（磁石ホルダ 41 の外周面）又は回転子 40 の内周面（磁石ユニット 42 の内周面）の位置を定める治具を用い、その治具に沿ってハウジング 30 及び回転子 40 のいずれかをスライドさせながら、ハウジング 30 と回転子 40 との組み付けを実施する。これにより、軸受ユニット 20 に偏荷重を掛けることなく重量部品を組み付けることが可能となり、軸受ユニット 20 の信頼性が向上する。

[0147] 第4工程では、第1ユニットと第2ユニットとの同軸を維持しながら、それら両ユニットの組み付けを実施するとよい。具体的には、例えば回転子 40 の固定部 44 の内周面を基準としてユニットベース 61 の内周面の位置を定める治具を用い、その治具に沿って第1ユニット及び第2ユニットのいずれかをスライドさせながら、これら各ユニットの組み付けを実施する。これにより、回転子 40 と固定子 50 との極少隙間間での互いの干渉を防止しながら組み付けることが可能となるため、固定子巻線 51 へのダメージや永久磁石の欠け等、組み付け起因の不良品の撲滅が可能となる。

[0148] 上記各工程の順序を、第2工程→第3工程→第4工程→第5工程→第1工程とすることも可能である。この場合、デリケートな電気コンポーネント 62 を最後に組み付けることになり、組み付け工程内での電気コンポーネント 62 へのストレスを最小限にとどめることができる。

[0149] 次に、回転電機 10 を制御する制御システムの構成について説明する。図 19 は、回転電機 10 の制御システムの電気回路図であり、図 20 は、制御装置 110 による制御処理を示す機能ブロック図である。

[0150] 図 19 では、固定子巻線 51 として 2 組の 3 相巻線 51 a, 51 b が示さ

れており、3相巻線51aはU相巻線、V相巻線及びW相巻線よりなり、3相巻線51bはX相巻線、Y相巻線及びZ相巻線よりなる。3相巻線51a, 51bごとに、電力変換器に相当する第1インバータ101と第2インバータ102とがそれぞれ設けられている。インバータ101, 102は、相巻線の相数と同数の上下アームを有するフルブリッジ回路により構成されており、各アームに設けられたスイッチ（半導体スイッチング素子）のオンオフにより、固定子巻線51の各相巻線において通電電流が調整される。

[0151] 各インバータ101, 102には、直流電源103と平滑用のコンデンサ104とが並列に接続されている。直流電源103は、例えば複数の単電池が直列接続された組電池により構成されている。なお、インバータ101, 102の各スイッチが、図1等を示す半導体モジュール66に相当し、コンデンサ104が、図1等を示すコンデンサモジュール68に相当する。

[0152] 制御装置110は、CPUや各種メモリからなるマイコンを備えており、回転電機10における各種の検出情報や、力行駆動及び発電の要求に基づいて、インバータ101, 102における各スイッチのオンオフにより通電制御を実施する。制御装置110が、図6に示す制御装置77に相当する。回転電機10の検出情報には、例えば、レゾルバ等の角度検出器により検出される回転子40の回転角度（電気角情報）や、電圧センサにより検出される電源電圧（インバータ入力電圧）、電流センサにより検出される各相の通電電流が含まれる。制御装置110は、インバータ101, 102の各スイッチを操作する操作信号を生成して出力する。なお、発電の要求は、例えば回転電機10が車両用動力源として用いられる場合、回生駆動の要求である。

[0153] 第1インバータ101は、U相、V相及びW相からなる3相において上アームスイッチ S_p と下アームスイッチ S_n との直列接続体をそれぞれ備えている。各相の上アームスイッチ S_p の高電位側端子は直流電源103の正極端子に接続され、各相の下アームスイッチ S_n の低電位側端子は直流電源103の負極端子（グランド）に接続されている。各相の上アームスイッチ S_p と下アームスイッチ S_n との間の中間接続点には、それぞれU相巻線、V

相巻線、W相巻線の一端が接続されている。これら各相巻線は星形結線（Y結線）されており、各相巻線他端は中性点にて互いに接続されている。

[0154] 第2インバータ102は、第1インバータ101と同様の構成を有しており、X相、Y相及びZ相からなる3相において上アームスイッチ S_p と下アームスイッチ S_n との直列接続体をそれぞれ備えている。各相の上アームスイッチ S_p の高電位側端子は直流電源103の正極端子に接続され、各相の下アームスイッチ S_n の低電位側端子は直流電源103の負極端子（グランド）に接続されている。各相の上アームスイッチ S_p と下アームスイッチ S_n との間の中間接続点には、それぞれX相巻線、Y相巻線、Z相巻線の一端が接続されている。これら各相巻線は星形結線（Y結線）されており、各相巻線他端は中性点で互いに接続されている。

[0155] 図20には、U、V、W相の各相電流を制御する電流フィードバック制御処理と、X、Y、Z相の各相電流を制御する電流フィードバック制御処理とが示されている。ここではまず、U、V、W相側の制御処理について説明する。

[0156] 図20において、電流指令値設定部111は、トルクー dq マップを用い、回転電機10に対する力行トルク指令値又は発電トルク指令値や、電気角 θ を時間微分して得られる電気角速度 ω に基づいて、 d 軸の電流指令値と q 軸の電流指令値とを設定する。なお、電流指令値設定部111は、U、V、W相側及びX、Y、Z相側において共通に設けられている。なお、発電トルク指令値は、例えば回転電機10が車両用動力源として用いられる場合、回生トルク指令値である。

[0157] dq 変換部112は、相ごとに設けられた電流センサによる電流検出値（3つの相電流）を、界磁方向(direction of an axis of a magnetic field, or field direction)を d 軸とする直交2次元回転座標系の成分である d 軸電流と q 軸電流とに変換する。

[0158] d 軸電流フィードバック制御部113は、 d 軸電流を d 軸の電流指令値にフィードバック制御するための操作量として d 軸の指令電圧を算出する。ま

た、 q 軸電流フィードバック制御部114は、 q 軸電流を q 軸の電流指令値にフィードバック制御するための操作量として q 軸の指令電圧を算出する。これら各フィードバック制御部113, 114では、 d 軸電流及び q 軸電流の電流指令値に対する偏差に基づき、PIフィードバック手法を用いて指令電圧が算出される。

[0159] 3相変換部115は、 d 軸及び q 軸の指令電圧を、 U 相、 V 相及び W 相の指令電圧に変換する。なお、上記の各部111～115が、 dq 変換理論による基本波電流のフィードバック制御を実施するフィードバック制御部であり、 U 相、 V 相及び W 相の指令電圧がフィードバック制御値である。

[0160] そして、操作信号生成部116は、周知の三角波キャリア比較方式を用い、3相の指令電圧に基づいて、第1インバータ101の操作信号を生成する。具体的には、操作信号生成部116は、3相の指令電圧を電源電圧で規格化した信号と、三角波信号等のキャリア信号との大小比較に基づくPWM制御により、各相における上下アームのスイッチ操作信号（デューティ信号）を生成する。

[0161] また、 X 、 Y 、 Z 相側においても同様の構成を有しており、 dq 変換部122は、相ごとに設けられた電流センサによる電流検出値（3つの相電流）を、界磁方向を d 軸とする直交2次元回転座標系の成分である d 軸電流と q 軸電流とに変換する。

[0162] d 軸電流フィードバック制御部123は d 軸の指令電圧を算出し、 q 軸電流フィードバック制御部124は q 軸の指令電圧を算出する。3相変換部125は、 d 軸及び q 軸の指令電圧を、 X 相、 Y 相及び Z 相の指令電圧に変換する。そして、操作信号生成部126は、3相の指令電圧に基づいて、第2インバータ102の操作信号を生成する。具体的には、操作信号生成部126は、3相の指令電圧を電源電圧で規格化した信号と、三角波信号等のキャリア信号との大小比較に基づくPWM制御により、各相における上下アームのスイッチ操作信号（デューティ信号）を生成する。

[0163] ドライバ117は、操作信号生成部116, 126にて生成されたスイッ

チ操作信号に基づいて、各インバータ 101, 102 における各 3 相のスイッチ S_p , S_n をオンオフさせる。

[0164] 続いて、トルクフィードバック制御処理について説明する。この処理は、例えば高回転領域及び高出力領域等、各インバータ 101, 102 の出力電圧が大きくなる運転条件において、主に回転電機 10 の高出力化や損失低減の目的で用いられる。制御装置 110 は、回転電機 10 の運転条件に基づいて、トルクフィードバック制御処理及び電流フィードバック制御処理のいずれか一方の処理を選択して実行する。

[0165] 図 21 には、U, V, W 相に対応するトルクフィードバック制御処理と、X, Y, Z 相に対応するトルクフィードバック制御処理とが示されている。なお、図 21 において、図 20 と同じ構成については、同じ符号を付して説明を省略する。ここではまず、U, V, W 相側の制御処理について説明する。

[0166] 電圧振幅算出部 127 は、回転電機 10 に対する力行トルク指令値又は発電トルク指令値と、電気角 θ を時間微分して得られる電気角速度 ω とに基づいて、電圧ベクトルの大きさの指令値である電圧振幅指令を算出する。

[0167] トルク推定部 128a は、d-q 変換部 112 により変換された d 軸電流と q 軸電流とに基づいて、U, V, W 相に対応するトルク推定値を算出する。なお、トルク推定部 128a は、d 軸電流、q 軸電流及び電圧振幅指令が関係付けられたマップ情報に基づいて、電圧振幅指令を算出すればよい。

[0168] トルクフィードバック制御部 129a は、力行トルク指令値又は発電トルク指令値にトルク推定値をフィードバック制御するための操作量として、電圧ベクトルの位相の指令値である電圧位相指令を算出する。トルクフィードバック制御部 129a では、力行トルク指令値又は発電トルク指令値に対するトルク推定値の偏差に基づき、PI フィードバック手法を用いて電圧位相指令が算出される。

[0169] 操作信号生成部 130a は、電圧振幅指令、電圧位相指令及び電気角 θ に基づいて、第 1 インバータ 101 の操作信号を生成する。具体的には、操作

信号生成部 130a は、電圧振幅指令、電圧位相指令及び電気角 θ に基づいて 3 相の指令電圧を算出し、算出した 3 相の指令電圧を電源電圧で規格化した信号と、三角波信号等のキャリア信号との大小比較に基づく PWM 制御により、各相における上下アームのスイッチ操作信号を生成する。

[0170] ちなみに、操作信号生成部 130a は、電圧振幅指令、電圧位相指令、電気角 θ 及びスイッチ操作信号が関係付けられたマップ情報であるパルスパターン情報、電圧振幅指令、電圧位相指令並びに電気角 θ に基づいて、スイッチ操作信号を生成してもよい。

[0171] また、X、Y、Z 相側においても同様の構成を有しており、トルク推定部 128b は、dq 変換部 122 により変換された d 軸電流と q 軸電流とに基づいて、X、Y、Z 相に対応するトルク推定値を算出する。

[0172] トルクフィードバック制御部 129b は、力行トルク指令値又は発電トルク指令値にトルク推定値をフィードバック制御するための操作量として、電圧位相指令を算出する。トルクフィードバック制御部 129b では、力行トルク指令値又は発電トルク指令値に対するトルク推定値の偏差に基づき、PI フィードバック手法を用いて電圧位相指令が算出される。

[0173] 操作信号生成部 130b は、電圧振幅指令、電圧位相指令及び電気角 θ に基づいて、第 2 インバータ 102 の操作信号を生成する。具体的には、操作信号生成部 130b は、電圧振幅指令、電圧位相指令及び電気角 θ に基づいて 3 相の指令電圧を算出し、算出した 3 相の指令電圧を電源電圧で規格化した信号と、三角波信号等のキャリア信号との大小比較に基づく PWM 制御により、各相における上下アームのスイッチ操作信号を生成する。ドライバ 117 は、操作信号生成部 130a、130b にて生成されたスイッチ操作信号に基づいて、各インバータ 101、102 における各 3 相のスイッチ S_p 、 S_n をオンオフさせる。

[0174] ちなみに、操作信号生成部 130b は、電圧振幅指令、電圧位相指令、電気角 θ 及びスイッチ操作信号が関係付けられたマップ情報であるパルスパターン情報、電圧振幅指令、電圧位相指令並びに電気角 θ に基づいて、スイッ

チ操作信号を生成してもよい。

[0175] ところで、回転電機 10 においては、軸電流の発生に伴い軸受 21, 22 の電食が生じることが懸念されている。例えば固定子巻線 51 の通電がスイッチングにより切り替えられる際に、スイッチングタイミングの微小なずれ（スイッチングの不均衡）により磁束の歪みが生じ、それに起因して、回転軸 11 を支持する軸受 21, 22 において電食が生じることが懸念される。磁束の歪みは固定子 50 のインダクタンスに応じて生じ、その磁束の歪みにより生じる軸方向の起電圧によって、軸受 21, 22 内での絶縁破壊が起こり電食が進行する。

[0176] この点本実施形態では、電食対策として、以下に示す 3 つの対策を講じている。第 1 の電食対策は、固定子 50 のコアレス化に伴いインダクタンスを低減したこと、及び磁石ユニット 42 の磁石磁束をなだらかにしたことによる電食抑制対策である。第 2 の電食対策は、回転軸を軸受 21, 22 による片持ち構造としたことによる電食抑制対策である。第 3 の電食対策は、円環状の固定子巻線 51 を固定子コア 52 と共にモールド材によりモールドしたことによる電食抑制対策である。以下には、これら各対策の詳細を個々に説明する。

[0177] まず第 1 の電食対策では、固定子 50 において、周方向における各導線群 81 の間をティースレスとし、各導線群 81 の間に、ティース（鉄心）の代わりに非磁性材料よりなる封止部材 57 を設ける構成としている（図 10 参照）。これにより、固定子 50 のインダクタンス低減が可能となっている。固定子 50 におけるインダクタンス低減を図ることで、仮に固定子巻線 51 の通電時にスイッチングタイミングのずれが生じて、そのスイッチングタイミングのずれに起因する磁束歪みの発生を抑制し、ひいては軸受 21, 22 の電食抑制が可能になっている。なお、d 軸のインダクタンスが q 軸のインダクタンス以下になっているとよい。

[0178] また、磁石 91, 92 において、d 軸側において q 軸側に比べて磁化容易軸の向きが d 軸に平行となるように配向がなされた構成とした（図 9 参照）

。これにより、d軸での磁石磁束が強化され、各磁極においてq軸からd軸にかけての表面磁束変化（磁束の増減）がなだらかになる。そのため、スイッチング不均衡に起因する急激な電圧変化が抑制され、ひいては電食抑制に寄与できる構成となっている。

[0179] 第2の電食対策では、回転電機10において、各軸受21, 22を、回転子40の軸方向中央に対して軸方向のいずれか一方側に偏って配置している（図2参照）。これにより、複数の軸受が軸方向において回転子を挟んで両側にそれぞれ設けられる構成と比べて、電食の影響を軽減できる。つまり、回転子を複数の軸受により両持ち支持する構成では、高周波磁束の発生に伴い回転子、固定子及び各軸受（すなわち、回転子を挟んで軸方向両側の各軸受）を通る閉回路が形成され、軸電流により軸受の電食が懸念される。これに対し、回転子40を複数の軸受21, 22により片持ち支持する構成では上記閉回路が形成されず、軸受の電食が抑制される。

[0180] また、回転電機10は、軸受21, 22の片側配置のための構成に絡み、以下の構成を有する。磁石ホルダ41において、回転子40の径方向に張り出す中間部45に、軸方向に延びて固定子50に対する接触を回避する接触回避部が設けられている（図2参照）。この場合、磁石ホルダ41を経由して軸電流の閉回路が形成される場合にあっては、閉回路長を長くしてその回路抵抗を大きくすることが可能となる。これにより、軸受21, 22の電食の抑制を図ることができる。

[0181] 回転子40を挟んで軸方向の一方側においてハウジング30に対して軸受ユニット20の保持部材23が固定されるとともに、他方側においてハウジング30及びユニットベース61（固定子ホルダ）が互いに結合されている（図2参照）。本構成によれば、回転軸11の軸方向においてその軸方向の片側に各軸受21, 22を偏って配置する構成を好適に実現することができる。また本構成では、ユニットベース61がハウジング30を介して回転軸11に繋がる構成となるため、ユニットベース61を、回転軸11から電氣的に離れた位置に配置することができる。なお、ユニットベース61とハウ

ジング 30 との間に樹脂等の絶縁部材を介在させれば、ユニットベース 61 と回転軸 11 とが電氣的に一層離れた構成となる。これにより、軸受 21, 22 の電食を適正に抑制することができる。

[0182] 本実施形態の回転電機 10 では、各軸受 21, 22 の片側配置等により、軸受 21, 22 に作用する軸電圧が低減されている。また、回転子 40 と固定子 50 との間の電位差が低減されている。そのため、軸受 21, 22 において導電性グリースを用いなくても、軸受 21, 22 に作用する電位差の低減が可能になっている。導電性グリースは、一般的にカーボンなどの細かい粒子を含むため音鳴りが生じることが考えられる。この点、本実施形態では、軸受 21, 22 において非導電性グリースを用いる構成としている。そのため、軸受 21, 22 において音鳴りが生じる不都合を抑制できる。例えば電気自動車などの電動車両への適用時には回転電機 10 の音鳴り対策が必要になると考えられるが、その音鳴り対策を好適に実施することが可能となる。

[0183] 第 3 の電食対策では、固定子巻線 51 を固定子コア 52 と共にモールド材によりモールドすることで、固定子 50 での固定子巻線 51 の位置ずれを抑制する構成としている（図 11 参照）。特に本実施形態の回転電機 10 では、固定子巻線 51 における周方向の各導線群 81 の間に導線間部材（テークス）を有していないため、固定子巻線 51 における位置ずれ生じる懸念が考えられるが、固定子巻線 51 を固定子コア 52 と共にモールドすることにより、固定子巻線 51 の導線位置にずれが抑制される。したがって、固定子巻線 51 の位置ずれによる磁束の歪みや、それに起因する軸受 21, 22 の電食の発生を抑制することができる。

[0184] なお、固定子コア 52 を固定するハウジング部材としてのユニットベース 61 を、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）により構成したため、例えばアルミ等により構成する場合に比べて、ユニットベース 61 への放電が抑制され、ひいては好適な電食対策が可能となっている。

[0185] その他、軸受 21, 22 の電食対策として、外輪 25 及び内輪 26 の少な

くともいずれかをセラミックス材により構成する、又は、外輪 25 の外側に絶縁スリーブを設ける等の構成を用いることも可能である。

[0186] 以下に、他の実施形態を第 1 実施形態との相違点を中心に説明する。

[0187] (第 2 実施形態)

本実施形態では、回転子 40 における磁石ユニット 42 の極異方構造を変更しており、以下に詳しく説明する。

[0188] 図 22 及び図 23 に示すように、磁石ユニット 42 は、ハルバッハ配列と称される磁石配列を用いて構成されている。すなわち、磁石ユニット 42 は、磁化方向（磁化ベクトルの向き）を径方向とする第 1 磁石 131 と、磁化方向（磁化ベクトルの向き）を周方向とする第 2 磁石 132 とを有しており、周方向に所定間隔で第 1 磁石 131 が配置されるとともに、周方向において隣り合う第 1 磁石 131 の間となる位置に第 2 磁石 132 が配置されている。第 1 磁石 131 及び第 2 磁石 132 は、例えばネオジム磁石等の希土類磁石からなる永久磁石である。

[0189] 第 1 磁石 131 は、固定子 50 に対向する側（径方向内側）の極が交互に N 極、S 極となるように周方向に互いに離間して配置されている。また、第 2 磁石 132 は、各第 1 磁石 131 の隣において周方向に極性が交互となるように配置されている。これら各磁石 131、132 を囲うように設けられる円筒部 43 は、軟磁性材料よりなる軟磁性体コアであるとしてよく、バックコアとして機能する。なお、この第 2 実施形態の磁石ユニット 42 も、 $d-q$ 座標系において、 d 軸や q 軸に対する磁化容易軸の関係は上記第 1 実施形態と同じである。

[0190] また、第 1 磁石 131 の径方向外側、すなわち磁石ホルダ 41 の円筒部 43 の側には、軟磁性材料よりなる磁性体 133 が配置されている。例えば磁性体 133 は、電磁鋼板や軟鉄、圧粉鉄心材料により構成されているとよい。この場合、磁性体 133 の周方向の長さは第 1 磁石 131 の周方向の長さ（特に第 1 磁石 131 の外周部の周方向の長さ）と同じである。また、第 1 磁石 131 と磁性体 133 とを一体化した状態でのその一体物の径方向の厚

さは、第2磁石132の径方向の厚さと同じである。換言すれば、第1磁石131は第2磁石132よりも磁性体133の分だけ径方向の厚さが薄くなっている。各磁石131、132と磁性体133とは、例えば接着剤により相互に固着されている。磁石ユニット42において第1磁石131の径方向外側は、固定子50とは反対側であり、磁性体133は、径方向における第1磁石131の両側のうち、固定子50とは反対側（反固定子側）に設けられている。

[0191] 磁性体133の外周部には、径方向外側、すなわち磁石ホルダ41の円筒部43の側に突出する凸部としてのキー134が形成されている。また、円筒部43の内周面には、磁性体133のキー134を収容する凹部としてのキー溝135が形成されている。キー134の突出形状とキー溝135の溝形状とは同じであり、各磁性体133に形成されたキー134に対応して、キー134と同数のキー溝135が形成されている。キー134及びキー溝135の係合により、第1磁石131及び第2磁石132と磁石ホルダ41との周方向（回転方向）の位置ずれが抑制されている。なお、キー134及びキー溝135（凸部及び凹部）を、磁石ホルダ41の円筒部43及び磁性体133のいずれに設けるかは任意でよく、上記とは逆に、磁性体133の外周部にキー溝135を設けるとともに、磁石ホルダ41の円筒部43の内周部にキー134を設けることも可能である。

[0192] ここで、磁石ユニット42では、第1磁石131と第2磁石132とを交互に配列することにより、第1磁石131での磁束密度を大きくすることが可能となっている。そのため、磁石ユニット42において、磁束の片面集中を生じさせ、固定子50寄りの側での磁束強化を図ることができる。

[0193] また、第1磁石131の径方向外側、すなわち反固定子側に磁性体133を配置したことにより、第1磁石131の径方向外側での部分的な磁気飽和を抑制でき、ひいては磁気飽和に起因して生じる第1磁石131の減磁を抑制できる。これにより、結果的に磁石ユニット42の磁力を増加させることが可能となっている。本実施形態の磁石ユニット42は、言うなれば、第1

磁石 1 3 1 において減磁が生じ易い部分を磁性体 1 3 3 に置き換えた構成となっている。

[0194] 図 2 4 (a)、図 2 4 (b) は、磁石ユニット 4 2 における磁束の流れを具体的に示す図であり、図 2 4 (a) は、磁石ユニット 4 2 において磁性体 1 3 3 を有していない従来構成を用いた場合を示し、図 2 4 (b) は、磁石ユニット 4 2 において磁性体 1 3 3 を有している本実施形態の構成を用いた場合を示している。なお、図 2 4 (a)、図 2 4 (b) では、磁石ホルダ 4 1 の円筒部 4 3 及び磁石ユニット 4 2 を直線状に展開して示しており、図の下側が固定子側、上側が反固定子側となっている。

[0195] 図 2 4 (a) の構成では、第 1 磁石 1 3 1 の磁束作用面と第 2 磁石 1 3 2 の側面とが、それぞれ円筒部 4 3 の内周面に接触している。また、第 2 磁石 1 3 2 の磁束作用面が第 1 磁石 1 3 1 の側面に接触している。この場合、円筒部 4 3 には、第 2 磁石 1 3 2 の外側経路を通して第 1 磁石 1 3 1 との接触面に入る磁束 F 1 と、円筒部 4 3 と略平行で、かつ第 2 磁石 1 3 2 の磁束 F 2 を引きつける磁束との合成磁束が生じる。そのため、円筒部 4 3 において第 1 磁石 1 3 1 と第 2 磁石 1 3 2 との接触面付近において、部分的に磁気飽和が生じることが懸念される。

[0196] これに対し、図 2 4 (b) の構成では、第 1 磁石 1 3 1 の固定子 5 0 とは反対側において第 1 磁石 1 3 1 の磁束作用面と円筒部 4 3 の内周面との間に磁性体 1 3 3 が設けられているため、その磁性体 1 3 3 で磁束の通過が許容される。したがって、円筒部 4 3 での磁気飽和を抑制でき、減磁に対する耐力が向上する。

[0197] また、図 2 4 (b) の構成では、図 2 4 (a) とは異なり、磁気飽和を促す F 2 を消すことができる。これにより、磁気回路全体のパーミアンスを効果的に向上させることができる。このように構成することで、その磁気回路特性を、過酷な高熱条件下でも保つことができる。

[0198] また、従来の SPM ロータにおけるラジアル磁石と比べて、磁石内部を通る磁石磁路が長くなる。そのため、磁石パーミアンスが上昇し、磁力を上げ

、トルクを増強することができる。さらに、磁束がd軸の中央に集まることにより、正弦波整合率を高くすることができる。特に、PWM制御により、電流波形を正弦波や台形波とする、又は120度通電のスイッチングICを利用すると、より効果的にトルクを増強することができる。

[0199] なお、固定子コア52が電磁鋼板により構成される場合において、固定子コア52の径方向厚さは、磁石ユニット42の径方向厚さの $1/2$ 、又は $1/2$ よりも大きいとよい。例えば、固定子コア52の径方向厚さは、磁石ユニット42において磁極中心に設けられる第1磁石131の径方向厚さの $1/2$ 以上であるとよい。また、固定子コア52の径方向厚さは、磁石ユニット42の径方向厚さより小さいとよい。この場合、磁石磁束は約1[T]であり、固定子コア52の飽和磁束密度は2[T]であるため、固定子コア52の径方向厚さを、磁石ユニット42の径方向厚さの $1/2$ 以上にする事で、固定子コア52の内周側への磁束漏洩を防ぐことができる。

[0200] ハルバツハ構造や極異方構造の磁石では、磁路が擬似円弧状になっているため、周方向の磁束を扱う磁石厚みに比例して、その磁束を上昇させることができる。こういった構成においては、固定子コア52に流れる磁束は、周方向の磁束を超えることはないと考えられる。すなわち、磁石の磁束1[T]に対して飽和磁束密度2[T]の鉄系金属を利用した場合、固定子コア52の厚みを磁石厚みの半分以上とすれば、磁気飽和せず好適に小型かつ軽量の回転電機を提供することができる。ここで、磁石磁束に対して固定子50からの反磁界が作用するため、磁石磁束は一般的に0.9[T]以下となる。そのため、固定子コアは磁石の半分の厚みを持てば、その透磁率を好適に高く保つことができる。

[0201] 以下に、上述した構成の一部を変更した変形例について説明する。

[0202] (変形例1)

上記実施形態では、固定子コア52の外周面を凹凸のない曲面状とし、その外周面に所定間隔で複数の導線群81を並べて配置する構成としたが、これを変更してもよい。例えば、図25に示すように、固定子コア52は、固

定子巻線 5 1 の径方向両側のうち回転子 4 0 とは反対側（図の下側）に設けられた円環状のヨーク 1 4 1 と、そのヨーク 1 4 1 から、周方向に隣り合う直線部 8 3 の間に向かって突出するように延びる突起部 1 4 2 とを有している。突起部 1 4 2 は、ヨーク 1 4 1 の径方向外側、すなわち回転子 4 0 側に所定間隔で設けられている。固定子巻線 5 1 の各導線群 8 1 は、突起部 1 4 2 と周方向において係合しており、突起部 1 4 2 を導線群 8 1 の位置決め部として用いつつ周方向に並べて配置されている。なお、突起部 1 4 2 が「導線間部材」に相当する。

[0203] 突起部 1 4 2 は、ヨーク 1 4 1 からの径方向の厚さ寸法、言い換えれば、図 2 5 に示すように、ヨーク 1 4 1 の径方向において、直線部 8 3 のヨーク 1 4 1 に隣接する内側面 3 2 0 から突起部 1 4 2 の頂点までの距離 W が、径方向内外の複数層の直線部 8 3 のうち、ヨーク 1 4 1 に径方向に隣接する直線部 8 3 の径方向の厚さ寸法の $1/2$ （図の $H1$ ）よりも小さい構成となっている。言い換えれば、固定子巻線 5 1（固定子コア 5 2）の径方向における導線群 8 1（伝導部材）の寸法（厚み） $T1$ （導線 8 2 の厚みの 2 倍、言い換えれば、導線群 8 1 の固定子コア 5 2 に接する面 3 2 0 と、導線群 8 1 の回転子 4 0 に向いた面 3 3 0 との最短距離）の 4 分の 3 の範囲は非磁性部材（封止部材 5 7）が占有していればよい。こうした突起部 1 4 2 の厚さ制限により、周方向に隣り合う導線群 8 1（すなわち直線部 8 3）の間において突起部 1 4 2 がティースとして機能せず、ティースによる磁路形成がなされないようになっている。突起部 1 4 2 は、周方向に並ぶ各導線群 8 1 の間ごとに全て設けられていなくてもよく、周方向に隣り合う少なくとも 1 組の導線群 8 1 の間に設けられていればよい。例えば、突起部 1 4 2 は、周方向において各導線群 8 1 の間の所定数ごとに等間隔で設けられているとよい。突起部 1 4 2 の形状は、矩形状、円弧状など任意の形状でよい。

[0204] また、固定子コア 5 2 の外周面では、直線部 8 3 が一層で設けられていてもよい。したがって、広義には、突起部 1 4 2 におけるヨーク 1 4 1 からの径方向の厚さ寸法は、直線部 8 3 における径方向の厚さ寸法の $1/2$ よりも

小さいものであればよい。

[0205] なお、回転軸 11 の軸心を中心とし、かつヨーク 141 に径方向に隣接する直線部 83 の径方向の中心位置を通る仮想円を想定すると、突起部 142 は、その仮想円の範囲内においてヨーク 141 から突出する形状、換言すれば仮想円よりも径方向外側（すなわち回転子 40 側）に突出しない形状をしているとよい。

[0206] 上記構成によれば、突起部 142 は、径方向の厚さ寸法が制限されており、周方向に隣り合う直線部 83 の間においてティースとして機能するものではないため、各直線部 83 の間にティースが設けられている場合に比べて、隣り合う各直線部 83 を近づけることができる。これにより、導体 82a の断面積を大きくすることができ、固定子巻線 51 の通電に伴い生じる発熱を低減することができる。かかる構成では、ティースがないことで磁気飽和の解消が可能となり、固定子巻線 51 への通電電流を増大させることが可能となる。この場合において、その通電電流の増大に伴い発熱量が増えることに好適に対処することができる。また、固定子巻線 51 では、ターン部 84 が、径方向にシフトされ、他のターン部 84 との干渉を回避する干渉回避部を有することから、異なるターン部 84 同士を径方向に離して配置することができる。これにより、ターン部 84 においても放熱性の向上を図ることができる。以上により、固定子 50 での放熱性能を適正化することが可能になっている。

[0207] また、固定子コア 52 のヨーク 141 と、回転子 40 の磁石ユニット 42（すなわち各磁石 91, 92）とが所定距離以上離れていれば、突起部 142 の径方向の厚さ寸法は、図 25 の H1 に縛られるものではない。具体的には、ヨーク 141 と磁石ユニット 42 とが 2 mm 以上離れていれば、突起部 142 の径方向の厚さ寸法は、図 25 の H1 以上であってもよい。例えば、直線部 83 の径方向厚み寸法が 2 mm を越えており、かつ導線群 81 が径方向内外の 2 層の導線 82 により構成されている場合に、ヨーク 141 に隣接していない直線部 83、すなわちヨーク 141 から数えて 2 層目の導線 82

の半分位置までの範囲で、突起部 142 が設けられていてもよい。この場合、突起部 142 の径方向厚さ寸法が「 $H1 \times 3 / 2$ 」までになっていれば、導線群 81 における導体断面積を大きくすることで、前記効果を少なからず得ることはできる。

[0208] また、固定子コア 52 は、図 26 に示す構成であってもよい。なお、図 26 では、封止部材 57 を省略しているが、封止部材 57 が設けられていてもよい。図 26 では、便宜上、磁石ユニット 42 及び固定子コア 52 を直線状に展開して示している。

[0209] 図 26 の構成では、固定子 50 は、周方向に隣接する導線 82（すなわち直線部 83）の間に、導線間部材としての突起部 142 を有している。固定子 50 は、固定子巻線 51 が通電されると、磁石ユニット 42 の磁極の一つ（N 極、または S 極）とともに磁氣的に機能し、固定子 50 の周方向に延びる一部分 350 を有する。この部分 350 の固定子 50 の周方向への長さを W_n とすると、この長さ範囲 W_n に存在する突起部 142 の合計の幅（すなわち、固定子 50 の周方向への合計の寸法）を W_t とし、突起部 142 の飽和磁束密度を B_s 、磁石ユニット 42 の 1 極分の周方向の幅寸法を W_m 、磁石ユニット 42 の残留磁束密度を B_r とする場合、突起部 142 は、
$$W_t \times B_s \leq W_m \times B_r \quad \dots (1)$$
となる磁性材料により構成されている。

[0210] なお、範囲 W_n は、周方向に隣接する複数の導線群 81 であって、励磁時期が重複する複数の導線群 81 を含むように設定される。その際、範囲 W_n を設定する際の基準（境界）として、導線群 81 の間隙 56 の中心を設定することが好ましい。例えば、図 26 に例示する構成の場合、周方向において N 極の磁極中心からの距離が最も短いものから順番に、4 番目までの導線群 81 が、当該複数の導線群 81 に相当する。そして、当該 4 つの導線群 81 を含むように範囲 W_n が設定される。その際、範囲 W_n の端（起点と終点）が間隙 56 の中心とされている。

[0211] 図 26 において、範囲 W_n の両端には、それぞれ突起部 142 が半分ずつ

含まれていることから、範囲 W_n には、合計4つ分の突起部142が含まれている。したがって、突起部142の幅（すなわち、固定子50の周方向における突起部142の寸法、言い換えれば、隣接する導線群81の間隔）を A とすると、範囲 W_n に含まれる突起部142の合計の幅は、 $W_t = 1/2 A + A + A + A + 1/2 A = 4 A$ となる。

[0212] 詳しくは、本実施形態では、固定子巻線51の3相巻線が分布巻であり、その固定子巻線51では、磁石ユニット42の1極に対して、突起部142の数、すなわち各導線群81の間となる間隙56の数が「相数 $\times Q$ 」個となっている。ここで Q とは、1相の導線82のうち固定子コア52と接する数である。なお、導線82が回転子40の径方向に積層された導線群81である場合には、1相の導線群81の内周側の導線82の数であるともいえる。この場合、固定子巻線51の3相巻線が各相所定順序で通電されると、1極内において2相分の突起部142が励磁される。したがって、磁石ユニット42の1極分の範囲において固定子巻線51の通電により励磁される突起部142の周方向の合計幅寸法 W_t は、突起部142（つまり、間隙56）の周方向の幅寸法を A とすると、「励磁される相数 $\times Q \times A = 2 \times 2 \times A$ 」となる。

[0213] そして、こうして合計幅寸法 W_t が規定された上で、固定子コア52において、突起部142が、上記（1）の関係を満たす磁性材料として構成されている。なお、合計幅寸法 W_t は、1極内において比透磁率が1よりも大きくなりえる部分の周方向寸法でもある。また、余裕を考えて、合計幅寸法 W_t を、1磁極における突起部142の周方向の幅寸法としてもよい。具体的には、磁石ユニット42の1極に対する突起部142の数が「相数 $\times Q$ 」であることから、1磁極における突起部142の周方向の幅寸法（合計幅寸法 W_t ）を、「相数 $\times Q \times A = 3 \times 2 \times A = 6 A$ 」としてもよい。

[0214] なお、ここでいう分布巻とは、磁極の1極対周期（N極とS極）で、固定子巻線51の一極対があるものである。ここでいう固定子巻線51の一極対は、電流が互いに逆方向に流れ、ターン部84で電氣的に接続された2つの

直線部 8 3 とターン部 8 4 からなる。上記条件みたすものであれば、短節巻 (Short Pitch Winding) であっても、全節巻 (Full Pitch Winding) の分布巻の均等物とみなす。

[0215] 次に、集中巻の場合の例を示す。ここでいう集中巻とは、磁極の 1 極対の幅と、固定子巻線 5 1 の一極対の幅とが異なるものである。集中巻の一例としては、1 つの磁極対に対して導線群 8 1 が 3 つ、2 つの磁極対に対して導線群 8 1 が 3 つ、4 つの磁極対に対して導線群 8 1 が 9 つ、5 つの磁極対に対して導線群 8 1 が 9 つのような関係であるものが挙げられる。

[0216] ここで、固定子巻線 5 1 を集中巻とする場合には、固定子巻線 5 1 の 3 相巻線が所定順序で通電されると、2 相分の固定子巻線 5 1 が励磁される。その結果、2 相分の突起部 1 4 2 が励磁される。したがって、磁石ユニット 4 2 の 1 極分の範囲において固定子巻線 5 1 の通電により励磁される突起部 1 4 2 の周方向の幅寸法 W_t は、「 $A \times 2$ 」となる。そして、こうして幅寸法 W_t が規定された上で、突起部 1 4 2 が、上記 (1) の関係を満たす磁性材料として構成されている。なお、上記で示した集中巻の場合は、同一相の導線群 8 1 に囲まれた領域において、固定子 5 0 の周方向にある突起部 1 4 2 の幅の総和を A とする。また、集中巻における W_m は「磁石ユニット 4 2 のエアギャップに対向する面の全周」 $\times$ 「相数」 $\div$ 「導線群 8 1 の分散数」に相当する。

[0217] ちなみに、ネオジム磁石やサマリウムコバルト磁石、フェライト磁石といった BH 積が $20 [MG \cdot Oe (kJ/m^3)]$ 以上の磁石では $B_d = 1.0$ 強 $[T]$ 、鉄では $B_r = 2.0$ 強 $[T]$ である。そのため、高出力モータとしては、固定子コア 5 2 において、突起部 1 4 2 が、 $W_t < 1/2 \times W_m$ の関係を満たす磁性材料であればよい。

[0218] また、後述するように導線 8 2 が外層被膜 1 8 2 を備える場合には、導線 8 2 同士の外層被膜 1 8 2 が接触するように、導線 8 2 を固定子コア 5 2 の周方向に配置しても良い。この場合は、 W_t は、0 又は接触する両導線 8 2 の外層被膜 1 8 2 の厚さ、と看做することができる。

[0219] 図25や図26の構成では、回転子40側の磁石磁束に対して不相応に小さい導線間部材（突起部142）を有する構成となっている。なお、回転子40は、インダクタンスが低くかつ平坦な表面磁石型ロータであり、磁気抵抗的に突極性を有していないものとなっている。かかる構成では、固定子50のインダクタンス低減が可能となっており、固定子巻線51のスイッチングタイミングのずれに起因する磁束歪みの発生が抑制され、ひいては軸受21、22の電食が抑制される。

[0220] （変形例2）

上記式（1）の関係を満たす導線間部材を用いる固定子50として、以下の構成を採用することも可能である。図27では、固定子コア52の外周面側（図の上面側）に、導線間部材として歯状部143が設けられている。歯状部143は、ヨーク141から突出するようにして周方向に所定間隔で設けられており、径方向に導線群81と同じ厚み寸法を有している。歯状部143の側面は導線群81の各導線82に接している。ただし、歯状部143と各導線82との間に隙間があってもよい。

[0221] 歯状部143は、周方向における幅寸法に制限が付与されており、磁石量に対して不相応に細い極歯（ステータティース）を備えるものとなっている。かかる構成により、歯状部143は、1.8T以上で磁石磁束により確実に飽和し、パーミアンスの低下によりインダクタンスを下げることができる。

[0222] ここで、磁石ユニット42において、固定子側における磁束作用面の1極あたりの表面積を S_m 、磁石ユニット42の残留磁束密度を B_r とすると、磁石ユニット側の磁束は、例えば「 $S_m \times B_r$ 」となる。また、各歯状部143における回転子側の表面積を S_t 、導線82の一相あたりの数を m とし、固定子巻線51の通電により1極内において2相分の歯状部143が励磁されたとすると、固定子側の磁束は、例えば「 $S_t \times m \times 2 \times B_s$ 」となる。この場合、

$$S_t \times m \times 2 \times B_s < S_m \times B_r \quad \cdots (2)$$

の関係が成立するように歯状部 1 4 3 の寸法を制限することで、インダクタンスの低減が図られている。

[0223] なお、磁石ユニット 4 2 と歯状部 1 4 3 とで軸方向の寸法が同一である場合、磁石ユニット 4 2 の 1 極分の周方向の幅寸法を W_m 、歯状部 1 4 3 の周方向の幅寸法を W_{st} とすると、上記式 (2) は、式 (3) のように置き換えられる。

$$W_{st} \times m \times 2 \times B_s < W_m \times B_r \quad \dots (3)$$

より具体的には、例えば $B_s = 2 \text{ T}$ 、 $B_r = 1 \text{ T}$ であり、 $m = 2$ であると想定すると、上記式 (3) は、「 $W_{st} < W_m / 8$ 」の関係となる。この場合、歯状部 1 4 3 の幅寸法 W_{st} を、磁石ユニット 4 2 の 1 極分の幅寸法 W_m の $1 / 8$ よりも小さくすることで、インダクタンスの低減が図られている。なお、数 m が 1 であれば、歯状部 1 4 3 の幅寸法 W_{st} を、磁石ユニット 4 2 の 1 極分の幅寸法 W_m の $1 / 4$ よりも小さくするとよい。

[0224] なお、上記式 (3) において、「 $W_{st} \times m \times 2$ 」は、磁石ユニット 4 2 の 1 極分の範囲において固定子巻線 5 1 の通電により励磁される歯状部 1 4 3 の周方向の幅寸法に相当する。

[0225] 図 2 7 の構成では、上述した図 2 5、図 2 6 の構成と同様に、回転子 4 0 側の磁石磁束に対して不相应に小さい導線間部材 (歯状部 1 4 3) を有する構成となっている。かかる構成では、固定子 5 0 のインダクタンス低減が可能となっており、固定子巻線 5 1 のスイッチングタイミングのずれに起因する磁束歪みの発生が抑制され、ひいては軸受 2 1、2 2 の電食が抑制される。

[0226] (変形例 3)

上記実施形態では、固定子巻線 5 1 を覆う封止部材 5 7 を、固定子コア 5 2 の径方向外側において各導線群 8 1 を全て含む範囲、すなわち径方向の厚さ寸法が各導線群 8 1 の径方向の厚さ寸法よりも大きくなる範囲で設ける構成としたが、これを変更してもよい。例えば、図 2 8 に示すように、封止部材 5 7 を、導線 8 2 の一部がはみ出すように設ける構成とする。より具体的

には、封止部材 57 を、導線群 81 において最も径方向外側となる導線 82 の一部を径方向外側、すなわち固定子 50 側に露出させた状態で設ける構成とする。この場合、封止部材 57 の径方向の厚さ寸法は、各導線群 81 の径方向の厚さ寸法と同じ、又はその厚さ寸法よりも小さいとよい。

[0227] (変形例 4)

図 29 に示すように、固定子 50 において、各導線群 81 が封止部材 57 により封止されていない構成としてもよい。つまり、固定子巻線 51 を覆う封止部材 57 を用いない構成とする。この場合、周方向に並ぶ各導線群 81 の間に導線間部材が設けられず空隙となっている。要するに、周方向に並ぶ各導線群 81 の間に導線間部材が設けられていない構成となっている。なお、空気を非磁性体、又は非磁性体の均等物として $B_s = 0$ と看做し、この空隙に空気を配置しても良い。

[0228] (変形例 5)

固定子 50 おける導線間部材を非磁性材料により構成する場合に、その非磁性材料として、樹脂以外の材料を用いることも可能である。例えば、オーステナイト系のステンレス鋼である SUS304 を用いる等、金属系の非磁性材料を用いてもよい。

[0229] (変形例 6)

固定子 50 が固定子コア 52 を具備していない構成としてもよい。この場合、固定子 50 は、図 12 に示す固定子巻線 51 により構成されることになる。なお、固定子コア 52 を具備していない固定子 50 において、固定子巻線 51 を封止材により封止する構成としてもよい。又は、固定子 50 が、軟磁性材からなる固定子コア 52 に代えて、合成樹脂等の非磁性材からなる円環状の巻線保持部を備える構成であってもよい。

[0230] (変形例 7)

上記第 1 実施形態では、回転子 40 の磁石ユニット 42 として周方向に並べた複数の磁石 91, 92 を用いる構成としたが、これを変更し、磁石ユニット 42 として円環状の永久磁石である環状磁石を用いる構成としてもよい。

。具体的には、図30に示すように、磁石ホルダ41の円筒部43の径方向内側に、環状磁石95が固定されている。環状磁石95には、周方向に極性が交互となる複数の磁極が設けられており、d軸及びq軸のいずれにおいても一体的に磁石が形成されている。環状磁石95には、各磁極のd軸において配向の向きが径方向となり、各磁極間のq軸において配向の向きが周方向となるような円弧状の磁石磁路が形成されている。

[0231] なお、環状磁石95では、d軸寄りの部分において磁化容易軸がd軸に平行又はd軸に平行に近い向きとなり、かつq軸寄りの部分において磁化容易軸がq軸に直交又はq軸に直交に近い向きとなる円弧状の磁石磁路が形成されるように配向がなされていればよい。

[0232] (変形例8)

本変形例では、制御装置110の制御手法の一部を変更している。本変形例では、主に、第1実施形態で説明した構成に対する相違部分について説明する。

[0233] まず、図31を用いて、図20に示した操作信号生成部116、126及び図21に示した操作信号生成部130a、130b内の処理について説明する。なお、各操作信号生成部116、126、130a、130bにおける処理は基本的には同様である。このため、以下では、操作信号生成部116の処理を例にして説明する。

[0234] 操作信号生成部116は、キャリア生成部116aと、U、V、W相比較器116bU、116bV、116bWとを備えている。本実施形態において、キャリア生成部116aは、キャリア信号SigCとして三角波信号を生成して出力する。

[0235] U、V、W相比較器116bU、116bV、116bWには、キャリア生成部116aより生成されたキャリア信号SigCと、3相変換部115により算出されたU、V、W相指令電圧とが入力される。U、V、W相指令電圧は、例えば正弦波状の波形であり、電気角で位相が120°ずつずれている。

- [0236] U, V, W相比較器 116 b U, 116 b V, 116 b Wは、U, V, W相指令電圧とキャリア信号 S_{igC} との大小比較に基づく PWM (PWM: pulse width modulation) 制御により、第1インバータ 101におけるU, V, W相の上アーム及び下アームの各スイッチ S_p, S_n の操作信号を生成する。具体的には、操作信号生成部 116は、U, V, W相指令電圧を電源電圧で規格化した信号と、キャリア信号との大小比較に基づく PWM制御により、U, V, W相の各スイッチ S_p, S_n の操作信号を生成する。ドライバ 117は、操作信号生成部 116により生成された操作信号に基づいて、第1インバータ 101におけるU, V, W相の各スイッチ S_p, S_n をオンオフさせる。
- [0237] 制御装置 110は、キャリア信号 S_{igC} のキャリア周波数 f_c 、すなわち各スイッチ S_p, S_n のスイッチング周波数を変更する処理を行う。キャリア周波数 f_c は、回転電機 10の低トルク領域又は高回転領域において高く設定され、回転電機 10の高トルク領域において低く設定される。この設定は、各相巻線に流れる電流の制御性の低下を抑制するためになされる。
- [0238] つまり、固定子 50のコアレス化に伴い、固定子 50におけるインダクタンスの低減を図ることができる。ここで、インダクタンスが低くなると、回転電機 10の電氣的時定数が小さくなる。その結果、各相巻線に流れる電流のリプルが増加して巻線に流れる電流の制御性が低下し、電流制御が発散する懸念がある。この制御性低下の影響は、巻線に流れる電流（例えば、電流の実効値）が高電流領域に含まれる場合よりも低電流領域に含まれる場合に顕著となり得る。この問題に対処すべく、本変形例において、制御装置 110はキャリア周波数 f_c を変更する。
- [0239] 図32を用いて、キャリア周波数 f_c を変更する処理について説明する。この処理は、操作信号生成部 116の処理として、制御装置 110により、例えば所定の制御周期で繰り返し実行される。
- [0240] ステップ S10では、各相の巻線 51aに流れる電流が低電流領域に含まれているか否かを判定する。この処理は、回転電機 10の現在のトルクが低

トルク領域であることを判定するための処理である。低電流領域に含まれているか否かの判定手法としては、例えば、以下の第 1, 第 2 の方法が挙げられる。

[0241] <第 1 の方法>

d q 変換部 112 により変換された d 軸電流と q 軸電流とに基づいて、回転電機 10 のトルク推定値を算出する。そして、算出したトルク推定値がトルク閾値未満であると判定した場合、巻線 51a に流れる電流が低電流領域に含まれていると判定し、トルク推定値がトルク閾値以上であると判定した場合、高電流領域に含まれていると判定する。ここで、トルク閾値は、例えば、回転電機 10 の起動トルク（拘束トルクともいう）の $1/2$ に設定されていればよい。

[0242] <第 2 の方法>

角度検出器により検出された回転子 40 の回転角度が速度閾値以上であると判定した場合、巻線 51a に流れる電流が低電流領域に含まれている、すなわち高回転領域であると判定する。ここで、速度閾値は、例えば、回転電機 10 の最大トルクがトルク閾値となる場合の回転速度に設定されていればよい。

[0243] ステップ S10 において否定判定した場合には、高電流領域であると判定し、ステップ S11 に進む。ステップ S11 では、キャリア周波数 f_c を第 1 周波数 f_L に設定する。

[0244] ステップ S10 において肯定判定した場合には、ステップ S12 に進み、キャリア周波数 f_c を、第 1 周波数 f_L よりも高い第 2 周波数 f_H に設定する。

[0245] 以上説明した本変形例によれば、各相巻線に流れる電流が高電流領域に含まれる場合よりも低電流領域に含まれる場合においてキャリア周波数 f_c が高く設定される。このため、低電流領域において、スイッチ S_p , S_n のスイッチング周波数を高くすることができ、電流リップルの増加を抑制することができる。これにより、電流制御性の低下を抑制することができる。

[0246] 一方、各相巻線に流れる電流が高電流領域に含まれる場合、低電流領域に含まれる場合よりもキャリア周波数 f_c が低く設定される。高電流領域においては、低電流領域よりも巻線に流れる電流の振幅が大きいため、インダクタンスが低くなったことに起因する電流リップルの増加が、電流制御性に及ぼす影響が小さい。このため、高電流領域においては、低電流領域よりもキャリア周波数 f_c を低く設定することができ、各インバータ 101, 102 のスイッチング損失を低減することができる。

[0247] 本変形例においては、以下に示す形態の実施が可能である。

[0248] ・キャリア周波数 f_c が第1周波数 f_L に設定されている場合において、図32のステップS10において肯定判定されたとき、キャリア周波数 f_c を、第1周波数 f_L から第2周波数 f_H に向かって徐変させてもよい。

[0249] また、キャリア周波数 f_c が第2周波数 f_H に設定されている場合において、ステップS10において否定判定されたとき、キャリア周波数 f_c を、第2周波数 f_H から第1周波数 f_L に向かって徐変させてもよい。

[0250] ・PWM制御に代えて、空間ベクトル変調（SVM: space vector modulation）制御によりスイッチの操作信号が生成されてもよい。この場合であっても、上述したスイッチング周波数の変更を適用することができる。

[0251] （変形例9）

上記各実施形態では、導線群81を構成する各相2対ずつの導線が、図33（a）に示すように並列接続されていた。図33（a）は、2対の導線である第1, 第2導線88a, 88bの電氣的接続を示す図である。ここで、図33（a）に示す構成に代えて、図33（b）に示すように、第1, 第2導線88a, 88bが直列接続されていてもよい。

[0252] また、3対以上の多層導線が径方向に積層配置されていてもよい。図34に、4対の導線である第1～第4導線88a～88dが積層配置されている構成を示す。第1～第4導線88a～88dは、固定子コア52に近い方から、第1, 第2, 第3, 第4導線88a, 88b, 88c, 88dの順に径方向に並んで配置されている。

[0253] ここで、図33(c)に示すように、第3、第4導線88c、88dが並列接続されるとともに、この並列接続体の一端に第1導線88aが接続され、他端に第2導線88bが接続されていてもよい。並列接続にすると、その並列接続された導線の電流密度を低下させることができ、通電時の発熱を抑制できる。そのため、冷却水通路74が形成されたハウジング（ユニットベース61）に筒状の固定子巻線を組み付ける構成において、並列接続されていない第1、第2導線88a、88bがユニットベース61に当接する固定子コア52側に配置され、並列接続された第3、第4導線88c、88dが反固定子コア側に配置されている構成とする。これにより、多層導線構造における各導線88a～88dの冷却性能を均等化することができる。

[0254] なお、第1～第4導線88a～88dからなる導線群81の径方向の厚さ寸法は、1磁極内における1相分の周方向の幅寸法よりも小さいものとされていけばよい。

[0255] （変形例10）

本変形例では、ケーシング64、固定子コア52及び磁石ホルダ41の構造を変更している。本変形例では、主に、上記各変形例等で説明した構成に対する相違部分について説明する。

[0256] 図35に示すように、ケーシング64を構成する筒状部71の内周面の軸方向と直交する方向の横断面形状が、全ての内角の大きさが等しい正多角形状とされている。このため、筒状部71の内周面は平坦面とされている。本変形例では、筒状部71の内周面の横断面形状が正六角形とされている。これは、筒状部71の径方向内側の環状空間に半導体モジュール66が6つ配置されるとともに、コンデンサモジュール68が、6個のコンデンサ68aが環状に並べて配置されることで構成されているためである。筒状部71の各内周面に1つの半導体モジュール66の外周面が当接している。なお、半導体モジュール66が6つ配置されているのは、上、下アームスイッチSp、Snの直列接続体を1つ内蔵している半導体モジュール66が、相数分（U、V、W、X、Y、Z相分）配置されているためである。

[0257] 図35及び図36に示すように、磁石ホルダ41において磁石ユニット42が設けられた内周面の軸方向と直交する方向の横断面形状が正多角形状とされている。このため、磁石ホルダ41において磁石ユニット42が設けられた内周面は平坦面とされている。図36は、図35において一点鎖線で囲まれた部分の拡大図である。本変形例では、磁石ホルダ41の内周面の横断面形状が正32角形とされている。これは、磁石ユニット42の極数が32極であるためである。図36において、磁石ホルダ41の内周面の横断面形状の頂点を丸で示している。磁石ホルダ41の各平坦面に1極分の磁石が取り付けられている。磁石ホルダ41の内周面が平坦面とされているため、第1磁石91及び第2磁石92それぞれの磁石ホルダ41側の外周面も平坦面とされている。磁石ホルダ41の平坦な内周面に、第1、第2磁石91、92の平坦な外周面が接着等により取り付けられることにより、第1、第2磁石91、92を磁石ホルダ41に強固に取り付けることができる。

[0258] 固定子コア52において固定子巻線51が設けられた外周面の軸方向に直交する方向の横断面形状が正多角形状とされている。このため、固定子コア52において固定子巻線51が設けられた外周面は平坦面とされている。本変形例では、固定子コア52の外周面の横断面形状が正96角形とされている。これは、相数Sが3、対数mが2であり、8極対（16極）の回転電機であることから、 $2 \times 3 \times 2 \times 8 = 96$ の導線群81が周方向に配置されているためである。図36において、固定子コア52の外周面の横断面形状の頂点を丸で示している。固定子コア52の各平坦面に、1つの導線群81が取り付けられている。固定子コア52の外周面が平坦面とされているため、導線82の固定子コア52側の内周面も平坦面とされている。固定子コア52の平坦な外周面に、固定子巻線51の平坦な内周面が接着等により取り付けられることにより、固定子巻線51を固定子コア52に強固に取り付けることができる。

[0259] 本変形例では、筒状部71、磁石ホルダ41及び固定子コア52それぞれの横断面形状の角数が互いに異なっている。特に本実施形態では、筒状部7

1、磁石ホルダ41及び固定子コア52のうち、横断面形状の角数が最も大きい固定子コア52の角数が、筒状部71の角数及び磁石ホルダ41の角数の最小公倍数となっている。

[0260] 角数を互いに異ならせる構成は、回転電機10の振動を低減するためである。つまり、U、V、W相の組と、X、Y、Z相の組とのそれぞれに対応したトルクには、電気角速度の6倍の角速度で変動するトルクリップルが含まれている。このトルクリップルが加振力となり、筒状部71や、磁石ホルダ41、固定子コア52が共振し、回転電機10の振動が増加するおそれがある。

[0261] ここで、筒状部71、磁石ホルダ41及び固定子コア52それぞれの横断面形状の角数が互いに異なっている構成によれば、筒状部71、磁石ホルダ41及び固定子コア52それぞれの共振周波数が一致又は近接することを回避できる。これにより、回転電機10のトルクリップルが発生する場合において、筒状部71、磁石ホルダ41及び固定子コア52のうち少なくとも1つに共振が発生することを防止することができる。例えば、磁石ホルダ41が共振する場合であっても、筒状部71及び固定子コア52の共振の発生を防止することができる。また、例えば、筒状部71、磁石ホルダ41及び固定子コア52の全ての共振の発生を防止することができる。これにより、回転電機10の振動を低減することができる。

[0262] 特に、固定子コア52に対する固定子巻線51の取り付け強度が弱くなる傾向にあるスロットレス構造に対して、振動を低減するために、筒状部71、磁石ホルダ41及び固定子コア52それぞれの横断面形状の角数が互いに異なっている構成が適用されるメリットが大きい。なお、スロットレス構造は、図10、図25～図29等を用いて説明した構造である。

[0263] また、本変形例では、固定子コア52の横断面形状の角数が、筒状部71及び磁石ホルダ41それぞれの横断面形状の角数よりも大きくされている。この構成によれば、固定子コア52の外周面の横断面形状を真円形状に近づけることができ、固定子コア52と磁石ユニット42との間のエアギャップ

を周方向において極力均一化することができる。これにより、固定子50及び回転子40の磁気回路を適正化することができ、例えば回転電機10のトルクリップルを低減することができる。

[0264] 本変形例においては、以下に示す形態の実施が可能である。

[0265] ・磁石ホルダ41の内周面の横断面形状の角数が、固定子コア52の外周面の横断面形状の角数よりも大きくてもよい。例えば、磁石ユニット42の極数が128極の場合、固定子コア52の外周面の横断面形状の角数が96であるのに対し、磁石ホルダ41の内周面の横断面形状の角数が128とされる。

[0266] ・筒状部71、磁石ホルダ41及び固定子コア52の横断面形状のうち、最も角数の大きい固定子コア52の角数が、筒状部71の角数及び磁石ホルダ41の角数の最小公倍数からずれていてもよい。例えば、固定子コア52の横断面形状の角数が95とされていてもよい。

[0267] ・磁石ホルダ41の内周面、固定子コア52の外周面及び筒状部71の内周面のうち少なくとも1つの横断面形状は、全ての内角の大きさが等しくない多角形状であってもよい。

[0268] ・固定子コア52の外周面の各平坦面に、複数の導線群81が配置されていてもよい。また、磁石ホルダ41の内周面の各閉端面に、複数の磁石が配置されていてもよい。また、筒状部71の内周面の各平坦面に、複数の半導体モジュール66が配置されていてもよい。

[0269] (変形例11)

回転電機10において回転子40を以下のように構成してもよい。すなわち、図37では、磁石ホルダ41の円筒部43に、複数の電磁鋼板を積層してなるバックコア48が設けられ、その径方向内側に磁石ユニット42が設けられている。より具体的には、バックコア48の内周側には、磁石ユニット42を収容する収容凹部48aが設けられており、その収容凹部48aに一部又は全部が入り込む状態で磁石ユニット42が配置されている。この場合、磁石ユニット42の軸方向両端面がバックコア48に当接する構成とな

っている。本構成によれば、磁石ユニット42の軸方向端部からの磁束もれを抑制できる。また、各磁石ユニット42における磁石の耐減磁能力を、鉄による磁気抵抗の削減から大きく上げることができる。

[0270] (変形例12)

回転電機10をインナロータ構造（内転構造）としてもよい。この場合、例えばハウジング30内において、径方向外側に固定子50が設けられ、その径方向内側に回転子40が設けられるとよい。また、固定子50及び回転子40の軸方向両端のうちその一方の側又はその両方の側にインバータユニット60が設けられているとよい。図38は、回転子40及び固定子50の横断面図であり、図39は、図38に示す回転子40及び固定子50の一部を拡大して示す図である。

[0271] インナロータ構造を前提とする図38及び図39の構成は、アウトロータ構造を前提とする図8及び図9の構成に対して、回転子40及び固定子50が径方向内外で逆になっていることを除いて、同様の構成となっている。簡単に説明すると、固定子50は、扁平導線構造の固定子巻線51と、ティースを持たない固定子コア52とを有している。固定子巻線51は、固定子コア52の径方向内側に組み付けられている。固定子コア52は、アウトロータ構造の場合と同様に、以下のいずれかの構成を有する。

(A) 固定子50において、周方向における各導線部の間に導線間部材を設け、かつその導線間部材として、1磁極における導線間部材の周方向の幅寸法を W_t 、導線間部材の飽和磁束密度を B_s 、1磁極における磁石ユニットの周方向の幅寸法を W_m 、磁石ユニットの残留磁束密度を B_r とした場合に、 $W_t \times B_s \leq W_m \times B_r$ の関係となる磁性材料を用いている。

(B) 固定子50において、周方向における各導線部の間に導線間部材を設け、かつその導線間部材として、非磁性材料を用いている。

(C) 固定子50において、周方向における各導線部の間に導線間部材を設けていない構成となっている。

[0272] また、磁石ユニット42の各磁石91、92についても同様である。つま

り、磁石ユニット42は、磁極中心であるd軸の側において、磁極境界であるq軸の側に比べて磁化容易軸の向きがd軸に平行となるように配向がなされた磁石91, 92を用いて構成されている。各磁石91, 92における磁化方向等の詳細は既述のとおりである。磁石ユニット42において環状磁石95（図30参照）を用いることも可能である。

[0273] 図40は、インナロータ型とした場合における回転電機10の縦断面図であり、これは既述の図2に対応する図面である。図2の構成との相違点を簡単に説明する。図40において、ハウジング30の内側には、環状の固定子50が固定され、その固定子50の内側には、所定のエアギャップを挟んで回転子40が回転可能に設けられている。図2と同様に、各軸受21, 22は、回転子40の軸方向中央に対して軸方向のいずれか一方側に偏って配置されており、これにより、回転子40が片持ち支持されている。また、回転子40の磁石ホルダ41の内側に、インバータユニット60が設けられている。

[0274] 図41には、インナロータ構造の回転電機10として別の構成を示す。図41において、ハウジング30には、軸受21, 22により回転軸11が回転可能に支持されており、その回転軸11に対して回転子40が固定されている。図2等に出す構成と同様に、各軸受21, 22は、回転子40の軸方向中央に対して軸方向のいずれか一方側に偏って配置されている。回転子40は、磁石ホルダ41と磁石ユニット42とを有している。

[0275] 図41の回転電機10では、図40の回転電機10との相違点として、回転子40の径方向内側にインバータユニット60が設けられていない構成となっている。磁石ホルダ41は、磁石ユニット42の径方向内側となる位置で回転軸11に連結されている。また、固定子50は、固定子巻線51と固定子コア52とを有しており、ハウジング30に対して取り付けられている。

[0276] なお、インナロータ構造においても、変形例10の構成を適用することができる。この場合、磁石ホルダ41において磁石ユニット42が設けられた

外周面の軸方向と直交する方向の横断面形状が正多角形状とされている。このため、磁石ホルダ４１において磁石ユニット４２が設けられた外周面は平坦面とされている。磁石ホルダ４１の外周面が平坦面とされているため、第１、第２磁石９１、９２それぞれの磁石ホルダ４１側の内周面も平坦面とされている。これにより、第１、第２磁石９１、９２を磁石ホルダ４１に強固に取り付けることができる。

[0277] 固定子コア５２において固定子巻線５１が設けられた内周面の軸方向に直交する方向の横断面形状が正多角形状とされている。このため、固定子コア５２において固定子巻線５１が設けられた内周面は平坦面とされている。固定子コア５２の内周面が平坦面とされているため、導線８２の固定子コア５２側の外周面も平坦面とされている。

[0278] この構成において、筒状部７１、磁石ホルダ４１及び固定子コア５２それぞれの横断面形状の角数が互いに異なっている。例えば、磁石ホルダ４１の内周面の横断面形状が正３２角形とされ、固定子コア５２の外周面の横断面形状が正９６角形とされ、筒状部７１の内周面の横断面形状が正６角形とされている。

[0279] （変形例１２）

インナロータ構造の回転電機として別の構成を以下に説明する。図４２は、回転電機２００の分解斜視図であり、図４３は、回転電機２００の側面断面図である。なおここでは、図４２及び図４３の状態を基準に上下方向を示すこととしている。

[0280] 図４２及び図４３に示すように、回転電機２００は、環状の固定子コア２０１及び多相の固定子巻線２０２を有する固定子２０３と、固定子コア２０１の内側に回転自在に配設される回転子２０４とを備えている。固定子２０３が電機子に相当し、回転子２０４が界磁子に相当する。固定子コア２０１は、多数の珪素鋼板が積層されて構成されており、その固定子コア２０１に対して固定子巻線２０２が取り付けられている。図示は省略するが、回転子２０４は、回転子コアと、磁石ユニットとして複数の永久磁石とを有してい

る。回転子コアには、円周方向に等間隔で複数の磁石挿入孔が設けられている。磁石挿入孔のそれぞれには、隣接する磁極毎に交互に磁化方向が変わるように磁化された永久磁石が装着されている。なお、磁石ユニットの永久磁石は、図23で説明したようなハルバッハ配列又はそれに類する構成を有するものであるとよい。又は、磁石ユニットの永久磁石は、図9や図30で説明したような磁極中心であるd軸と磁極境界であるq軸との間において配向方向（磁化方向）が円弧状に延びている極異方性の特性を備えるものであるとよい。

[0281] ここで、固定子203は、以下のいずれかの構成であるとしてよい。

(A) 固定子203において、周方向における各導線部の間に導線間部材を設け、かつその導線間部材として、1磁極における導線間部材の周方向の幅寸法を W_t 、導線間部材の飽和磁束密度を B_s 、1磁極における磁石ユニットの周方向の幅寸法を W_m 、磁石ユニットの残留磁束密度を B_r とした場合に、 $W_t \times B_s \leq W_m \times B_r$ の関係となる磁性材料を用いている。

(B) 固定子203において、周方向における各導線部の間に導線間部材を設け、かつその導線間部材として、非磁性材料を用いている。

(C) 固定子203において、周方向における各導線部の間に導線間部材を設けていない構成となっている。

[0282] また、回転子204において、磁石ユニットは、磁極中心であるd軸の側において、磁極境界であるq軸の側に比べて磁化容易軸の向きがd軸に平行となるように配向がなされた複数の磁石を用いて構成されている。

[0283] 回転電機200の軸方向の一端側には、環状のインバータケース211が設けられている。インバータケース211は、ケース下面が固定子コア201の上面に接するように配置されている。インバータケース211内には、インバータ回路を構成する複数のパワーモジュール212と、半導体スイッチング素子のスイッチング動作により生じる電圧・電流の脈動（リップル）を抑制する平滑コンデンサ213と、制御部を有する制御基板214と、相電流を検出する電流センサ215と、回転子204の回転数センサであるレ

ゾルバステータ 216 とが設けられている。パワーモジュール 212 は、半導体スイッチング素子である IGBT やダイオードを有している。

[0284] インバータケース 211 の周縁には、車両に搭載されるバッテリーの直流回路と接続されるパワーコネクタ 217 と、回転電機 200 側と車両側制御装置との間で各種信号の受け渡しに用いられる信号コネクタ 218 とが設けられている。インバータケース 211 はトップカバー 219 で覆われている。車載バッテリーからの直流電力は、パワーコネクタ 217 を介して入力され、パワーモジュール 212 のスイッチングにより交流に変換されて各相の固定子巻線 202 に送られる。

[0285] 固定子コア 201 の軸方向両側のうちインバータケース 211 の反対側には、回転子 204 の回転軸を回転可能に保持する軸受ユニット 221 と、その軸受ユニット 221 を収容する環状のリアケース 222 とが設けられている。軸受ユニット 221 は、例えば 2 つ一組の軸受を有しており、回転子 204 の軸方向中央に対して軸方向のいずれか一方側に偏って配置されている。ただし、軸受ユニット 221 における複数の軸受を固定子コア 201 の軸方向両側に分散させて設け、それら各軸受により回転軸を両持ち支持する構成であってもよい。リアケース 222 が車両のギアケースや変速機などの取付部にボルト締結して固定されることで、回転電機 200 が車両側に取り付けられるようになっている。

[0286] インバータケース 211 内には、冷媒を流すための冷却流路 211a が形成されている。冷却流路 211a は、インバータケース 211 の下面から環状に凹設された空間を固定子コア 201 の上面で閉塞して形成されている。冷却流路 211a は、固定子巻線 202 のコイルエンドを囲むように形成されている。冷却流路 211a 内には、パワーモジュール 212 のモジュールケース 212a が挿入されている。リアケース 222 にも、固定子巻線 202 のコイルエンドを囲むように冷却流路 222a が形成されている。冷却流路 222a は、リアケース 222 の上面から環状に凹設された空間を固定子コア 201 の下面で閉塞して形成されている。

[0287] (変形例 1 4)

これまでは、回転界磁形の回転電機にて具体化した構成を説明したが、これを変更し、回転電機子形の回転電機にて具体化することも可能である。図 4 4 に、回転電機子形の回転電機 2 3 0 の構成を示す。

[0288] 図 4 4 の回転電機 2 3 0 において、ハウジング 2 3 1 a, 2 3 1 b にはそれぞれ軸受 2 3 2 が固定され、その軸受 2 3 2 により回転軸 2 3 3 が回転自在に支持されている。軸受 2 3 2 は、例えば多孔質金属に油を含ませてなる含油軸受である。回転軸 2 3 3 には、電機子としての回転子 2 3 4 が固定されている。回転子 2 3 4 は、回転子コア 2 3 5 とその外周部に固定された多相の回転子巻線 2 3 6 とを有している。回転子 2 3 4 において、回転子コア 2 3 5 はスロットレス構造を有し、回転子巻線 2 3 6 は扁平導線構造を有している。つまり、回転子巻線 2 3 6 は、1 相ごとの領域が径方向よりも周方向に長い扁平構造となっている。

[0289] また、回転子 2 3 4 の径方向外側には、界磁子としての固定子 2 3 7 が設けられている。固定子 2 3 7 は、ハウジング 2 3 1 a に固定された固定子コア 2 3 8 と、その固定子コア 2 3 8 の内周側に固定された磁石ユニット 2 3 9 とを有している。磁石ユニット 2 3 9 は、周方向に極性が交互となる複数の磁極を含む構成となっており、既述した磁石ユニット 4 2 等と同様に、磁極中心である d 軸の側において、磁極境界である q 軸の側に比べて磁化容易軸の向きが d 軸に平行となるように配向がなされて構成されている。磁石ユニット 2 3 9 は、配向が行われた焼結ネオジム磁石を有しており、その固有保磁力は 400 [k A/m] 以上、かつ残留磁束密度は 1.0 [T] 以上となっている。

[0290] 本例の回転電機 2 3 0 は、2 極 3 コイルのブラシ付コアレスモータであり、回転子巻線 2 3 6 は 3 つに分割され、磁石ユニット 2 3 9 は 2 極である。ブラシ付きモータの極数とコイル数は、2 : 3、4 : 10、4 : 21 などその用途に応じて様々である。

[0291] 回転軸 2 3 3 にはコミュテータ 2 4 1 が固定されており、その径方向外側

には複数のブラシ 242 が配置されている。コミュテータ 241 は、回転軸 233 に埋め込まれた導線 243 を介して回転子巻線 236 に電気接続されている。これらコミュテータ 241、ブラシ 242、導線 243 を通じて、回転子巻線 236 に対する直流電流の流入及び流出が行われる。コミュテータ 241 は、回転子巻線 236 の相数に応じて周方向に適宜分割されて構成されている。なお、ブラシ 242 は、そのまま電気配線を介して蓄電池などの直流電源に接続されていてもよいし、端子台などを介して直流電源に接続されていてもよい。

[0292] 回転軸 233 には、軸受 232 とコミュテータ 241 との間に、シール材としての樹脂ワッシャ 244 が設けられている。樹脂ワッシャ 244 により、含油軸受である軸受 232 からしみ出た油がコミュテータ 241 側に流れ出ることが抑制される。

[0293] なお、回転電機子形の回転電機においても、変形例 10 の構成を適用することができる。

[0294] (変形例 15)

回転電機 10 の固定子巻線 51 において、各導線 82 を、内外に複数の絶縁被膜を有する構成としてもよい。例えば、絶縁被膜付きの複数の導線（素線）を 1 本に束ね、それを外層被膜により覆って導線 82 を構成するとよい。この場合、素線の絶縁被膜が内側の絶縁被膜を構成し、外層被膜が外側の絶縁被膜を構成する。また特に、導線 82 における複数の絶縁被膜のうち外側の絶縁被膜の絶縁能力を、内側の絶縁被膜の絶縁能力よりも高めておくともよい。具体的には、外側の絶縁被膜の厚さを、内側の絶縁被膜の厚さよりも厚くする。例えば、外側の絶縁被膜の厚さを $100\ \mu\text{m}$ 、内側の絶縁被膜の厚さを $40\ \mu\text{m}$ とする。又は、外側の絶縁被膜として、内側の絶縁被膜よりも誘電率の低い材料を用いるともよい。これらは少なくともいずれかが適用されればよい。なお、素線が、複数の導電材の集合体として構成されているともよい。

[0295] 上記のとおり導線 82 における最外層の絶縁を強くすることにより、高電

圧の車両用システムに用いる場合に好適なものとなる。また、気圧の低い高地などでも、回転電機 10 の適正な駆動が可能となる。

[0296] (変形例 16)

内外に複数の絶縁被膜を有する導線 82 において、外側の絶縁被膜と内側の絶縁被膜とで、線膨張率（線膨張係数）及び接着強さの少なくともいずれかが異なる構成としてもよい。本変形例における導線 82 の構成を図 45 に示す。

[0297] 図 45 において、導線 82 は、複数（図では 4 本）の素線 181 と、その複数の素線 181 を囲む例えば樹脂製の外層被膜 182（外側絶縁被膜）と、外層被膜 182 内において各素線 181 の周りに充填された中間層 183（中間絶縁被膜）とを有している。素線 181 は、銅材よりなる導電部 181a と、絶縁材料よりなる導体被膜 181b（内側絶縁被膜）とを有している。固定子巻線として見れば、外層被膜 182 により相間が絶縁される。なお、素線 181 が、複数の導電材の集合体として構成されているとよい。

[0298] 中間層 183 は、素線 181 の導体被膜 181b よりも高い線膨張率を有し、かつ外層被膜 182 よりも低い線膨張率を有している。つまり、導線 82 では、外側ほど線膨張率が高くなっている。一般的に、外層被膜 182 では導体被膜 181b よりも線膨張係数が高いが、それらの間にその中間の線膨張率を有する中間層 183 を設けることにより、その中間層 183 がクッション材として機能し、外層側及び内層側での同時割れを防ぐことができる。

[0299] また、導線 82 では、素線 181 において導電部 181a と導体被膜 181b とが接着されるとともに、導体被膜 181b と中間層 183、中間層 183 と外層被膜 182 がそれぞれ接着されており、それら各接着部分では、導線 82 の外側ほど、接着強さが弱くなっている。つまり、導電部 181a 及び導体被膜 181b の接着強さは、導体被膜 181b 及び中間層 183 の接着強さ、中間層 183 及び外層被膜 182 の接着強さよりも弱くなっている。また、導体被膜 181b 及び中間層 183 の接着強さと、中間層 183

及び外層被膜 182 の接着強さとを比較すると、後者の方（外側の方）が弱い、又は同等であるとよい。なお、各被膜同士の接着強さの大きさは、例えば 2 層の被膜を引き剥がす際に要する引っ張り強さ等により把握可能である。上記のごとく導線 82 の接着強さが設定されていることで、発熱又は冷却による内外温度差が生じて、内層側及び外層側で共に割れが生じること（共割れ）を抑制することができる。

[0300] ここで、回転電機の発熱、温度変化は、主に素線 181 の導電部 181a から発熱される銅損と、鉄心内から発せられる鉄損として生じるが、それら 2 種類の損失は、導線 82 内の導電部 181a、又は導線 82 の外部より伝わるものであり、中間層 183 に発熱源があるわけではない。この場合、中間層 183 が両方に対してクッションとなり得る接着力を持つことで、その同時割れを防ぐことができる。したがって、車両用途など、高耐圧又は温度変化の大きい分野での使用に際しても、好適なる使用が可能となる。

[0301] 以下に補足する。素線 181 は、例えばエナメル線であってもよく、かかる場合には PA、PI、PAI 等の樹脂被膜層（導体被膜 181b）を有する。また、素線 181 より外側の外層被膜 182 は、同様の PA、PI、PAI 等よりなり、かつ厚みが厚いものであることが望ましい。これにより、線膨張率差による被膜の破壊が抑えられる。なお、外層被膜 182 としては、PA、PI、PAI 等の前記材料を厚くして対応するものとは別に、PPS、PEEK、フッ素、ポリカーボネート、シリコン、エポキシ、ポリエチレンナフタレート、LCP といった、誘電率が PI、PAI よりも小さいものを使うことも回転機の導体密度を高めるためには望ましい。これらの樹脂であれば、導体被膜 181b 同等の PI、PAI 被膜よりも薄い、導体被膜 181b と同等の厚みであっても、その絶縁能力を高くすることができ、これにより導電部の占有率を高めることが可能となる。一般的には、上記樹脂は、誘電率がエナメル線の絶縁被膜より良好な絶縁を有している。当然、成形状態や、混ぜ物によって、その誘電率を悪くする例も存在する。中でも、PPS、PEEK は、その線膨張係数がエナメル被膜より一般的には大き

いが、他樹脂よりも小さいため、第2層の外層被膜として適するのである。

[0302] また、素線181の外側における2種類の被膜（中間絶縁被膜、外側絶縁被膜）と素線181のエナメル被膜との接着強さは、素線181における銅線とエナメル被膜との間の接着強さよりも弱いことが望ましい。これにより、エナメル被膜と前記2種類の被膜とが一度に破壊される現象が抑制される。

[0303] 固定子に水冷構造、液冷構造、空冷構造が付加されている場合には、基本的に、外層被膜182から先に熱応力や衝撃応力が掛かると考えられる。しかし、素線181の絶縁層と、前記2種類の被膜とが違う樹脂の場合でも、その被膜を接着しない部位を設けることにより、前記熱応力や衝撃応力を低減することができる。すなわち、素線（エナメル線）と空隙を設け、フッ素、ポリカーボネート、シリコン、エポキシ、ポリエチレンナフタレート、LCPを配置することで前記絶縁構造がなされる。この場合、エポキシなどからなる低誘電率で、かつ低線膨張係数からなる接着材を用いて、外層被膜と内層被膜とを接着することが望ましい。こうすることで、機械的強度だけでなく、導電部の振動による揺れなどによる摩擦による被膜破壊、または線膨張係数差による外層被膜の破壊を抑えることができる。

[0304] 上記構成の導線82に対しての、機械的強度、固定等を担う、一般的には固定子巻線周りの最終工程となる最外層固定としては、エポキシ、PPS、PEEK、LCPなどの成形性が良く、誘電率、線膨張係数といった性質がエナメル被膜と近い性質をもった樹脂が好ましい。

[0305] 一般的には、ウレタン、シリコンによる樹脂ポッティングが通例なされるが、前記樹脂においてはその線膨張係数がその他の樹脂と比べて倍近い差があり、樹脂をせん断し得る熱応力を発生する。そのため、厳しい絶縁規定が国際的に用いられる60V以上の用途には不適である。この点、エポキシ、PPS、PEEK、LCPなどにより射出成型等により容易に作られる最終絶縁工程によれば、上述の各要件を達成することが可能である。

[0306] 上記以外の変形例を以下に列記する。

- [0307] ・磁石ユニット42のうち径方向において電機子側の面と、回転子の軸心との径方向における距離DMが50mm以上とされていてもよい。具体的には、例えば、図4に示す磁石ユニット42（具体的には、第1，第2磁石91，92）のうち径方向内側の面と、回転子40の軸心との径方向における距離DMが50mm以上とされていてもよい。
- [0308] スロットレス構造の回転電機としては、その出力が数十Wから数百W級の模型用などに使用される小規模なものが知られている。そして、一般的には10kWを超すような工業用の大型の回転電機でスロットレス構造が採用された事例を本願開示者は把握していない。その理由について本願開示者は検討した。
- [0309] 近年主流の回転電機は、次の4種類に大別される。それら回転電機とは、ブラシ付きモータ、カゴ型誘導モータ、永久磁石式同期モータ及びリラクタンスモータである。
- [0310] ブラシ付きモータには、ブラシを介して励磁電流が供給される。このため、大型機のブラシ付きモータの場合、ブラシが大型化したり、メンテナンスが煩雑になったりしたりする。これにより、半導体技術の目覚ましい発達に伴い、誘導モータ等のブラシレスモータに置換されてきた経緯がある。一方、小型モータの世界では、低い慣性及び経済性の利点から、コアレスモータも多数世の中に供給されている。
- [0311] カゴ型誘導モータでは、1次側の固定子巻線で発生させる磁界を2次側の回転子の鉄心で受けてカゴ型導体に集中的に誘導電流を流して反作用磁界を形成することにより、トルクを発生させる原理である。このため、機器の小型高効率の観点からすれば、固定子側及び回転子側ともに鉄心をなくすことは必ずしも得策であるとは言えない。
- [0312] リラクタンスモータは、当に鉄心のリラクタンス変化を活用するモータであり、原理的に鉄心をなくすことは望ましくない。
- [0313] 永久磁石式同期モータでは、近年IPM（つまり埋め込み磁石型回転子）が主流であり、特に大型機においては、特殊事情がない限りIPMである場

合が多い。

[0314] IPMは、磁石トルク及びリラクタンストルクを併せ持つ特性を有しており、インバータ制御により、それらトルクの割合が適時調整されながら運転される。このため、IPMは小型で制御性に優れるモータである。

[0315] 本願開示者の分析により、磁石トルク及びリラクタンストルクを発生する回転子表面のトルクを、磁石ユニットのうち径方向において電機子側の面と、回転子の軸心との径方向における距離DM、すなわち、一般的なインナロータの固定子鉄心の半径を横軸にとって描くと図46に示すものとなる。

[0316] 磁石トルクは、下式（eq1）に示すように、永久磁石の発生する磁界強度によりそのポテンシャルが決定されるのに対し、リラクタンストルクは、下式（eq2）に示すように、インダクタンス、特にq軸インダクタンスの大きさがそのポテンシャルを決定する。

[0317] 磁石トルク = $k \cdot \Psi \cdot I_q$. . . (eq1)

リラクタンストルク = $k \cdot (L_q - L_d) \cdot I_q \cdot I_d$. . . (eq2)

ここで、永久磁石の磁界強度と巻線のインダクタンスの大きさとをDMで比較してみた。永久磁石の発する磁界強度、すなわち磁束量 Ψ は、固定子と対向する面の永久磁石の総面積に比例する。円筒型の回転子であれば円筒の表面積になる。厳密には、N極とS極とが存在するので、円筒表面の半分の専有面積に比例する。円筒の表面積は、円筒の半径と、円筒長さとの積に比例する。つまり、円筒長さが一定であれば、円筒の半径に比例する。

[0318] 一方、巻線のインダクタンス L_q は、鉄心形状に依存はするものの感度は低く、むしろ固定子巻線の巻数の2乗に比例するため、巻数の依存性が高い。なお、 μ を磁気回路の透磁率、Nを巻数、Sを磁気回路の断面積、 δ を磁気回路の有効長さとする場合、インダクタンス $L = \mu \cdot N^2 \times S / \delta$ である。巻線の巻数は、巻線スペースの大きさに依存するため、円筒型モータであれば、固定子の巻線スペース、すなわちスロット面積に依存することになる。図47に示すように、スロット面積は、スロットの形状が略四角形であるため、周方向の長さ寸法a及び径方向の長さ寸法bとの積 $a \times b$ に比例す

る。

[0319] スロットの周方向の長さ寸法は、円筒の直径が大きいほど大きくなるため、円筒の直径に比例する。スロットの径方向の長さ寸法は、常に円筒の直径に比例する。つまり、スロット面積は、円筒の直径の2乗に比例する。また、上式（eq 2）からも分かる通り、リラクタンストルクは、固定子電流の2乗に比例するため、いかに大電流を流せるかで回転電機の性能が決まり、その性能は固定子のスロット面積に依存する。以上より、円筒の長さが一定なら、リラクタンストルクは円筒の直径の2乗に比例する。このことを踏まえ、磁石トルク及びリラクタンストルクとDMとの関係性をプロットした図が図46である。

[0320] 図46に示すように、磁石トルクはDMに対して直線的に増加し、リラクタンストルクはDMに対して2次関数的に増加する。DMが比較的小さい場合は磁石トルクが支配的であり、固定子鉄心半径が大きくなるに連れてリラクタンストルクが支配的であることがわかる。本願開示者は、図46における磁石トルク及びリラクタンストルクの交点が、所定の条件下において、おおよそ固定子鉄心半径＝50mmの近傍であるとの結論に至った。つまり、固定子鉄心半径が50mmを十分に超えるような10kW級のモータでは、リラクタンストルクを活用することが現在の主流であるため鉄心無くすことは困難であり、このことが大型機分野においてスロットレス構造が採用されない理由の1つであると推定される。

[0321] 固定子に鉄心が使用される回転電機の場合、鉄心の磁気飽和が常に課題となる。特にラジアルギャップ型の回転電機では、回転軸の縦断面形状は1磁極当たり扇型となり、機器内周側磁路幅が狭くなりスロットを形成するティース部分の内周側寸法が回転電機の性能限界を決める。いかに高性能な永久磁石を使おうとも、この部分で磁気飽和が発生すると、永久磁石の性能を十分にひきだすことができない。この部分で磁気飽和が発生させないためには、内周径を大きく設計することになり結果的に機器の大型化に至ってしまうのである。

[0322] 例えば、分布巻の回転電機では、3相巻線であれば、1磁極あたり3つ乃至6つのティースで分担して磁束を流すのだが、周方向前方のティースに磁束が集中しがちであるため、3つ乃至6つのティースに均等に磁束が流れるわけではない。この場合、一部（例えば1つ又は2つ）のティースに集中的に磁束が流れながら、回転子の回転に伴って磁気飽和するティースも周方向に移動してゆく。これがスロットリップルを生む要因にもなる。

[0323] 以上から、DMが50mm以上となるスロットレス構造の回転電機において、磁気飽和を解消するために、ティースを廃止したい。しかし、ティースが廃止されると、回転子及び固定子における磁気回路の磁気抵抗が増加し、回転電機のトルクが低下してしまう。磁気抵抗増加の理由としては、例えば、回転子と固定子との間のエアギャップが大きくなることがある。このため、上述したDMが50mm以上となるスロットレス構造の回転電機において、トルクを増強することについて改善の余地がある。したがって、上述したDMが50mm以上となるスロットレス構造の回転電機に、上述したトルクを増強できる構成を適用するメリットが大きい。

[0324] なお、アウトロータ構造の回転電機に限らず、インナロータ構造の回転電機についても、磁石ユニットのうち径方向において電機子側の面と、回転子の軸心との径方向における距離DMが50mm以上とされていてもよい。

[0325] ・回転電機10の固定子巻線51において、導線82の直線部83を径方向に単層で設ける構成としてもよい。また、径方向内外に複数層で直線部83を配置する場合に、その層数は任意でよく、3層、4層、5層、6層等で設けてもよい。

[0326] ・例えば図2の構成では、回転軸11を、軸方向で回転電機10の一端側及び他端側の両方に突出するように設けたが、これを変更し、一端側にのみ突出する構成としてもよい。この場合、回転軸11は、軸受ユニット20により片持ち支持される部分を端部とし、その軸方向外側に延びるように設けられるとよい。本構成では、インバータユニット60の内部に回転軸11が突出しない構成となるため、インバータユニット60の内部空間、詳しくは

筒状部 71 の内部空間をより広く用いることができることとなる。

- [0327] ・上記構成の回転電機 10 では、軸受 21, 22 において非導電性グリースを用いる構成としたが、これを変更し、軸受 21, 22 において導電性グリースを用いる構成としてもよい。例えば、金属粒子やカーボン粒子等が含まれた導電性グリースを用いる構成とする。
- [0328] ・回転軸 11 を回転自在に支持する構成として、回転子 40 の軸方向一端側及び他端側の 2 カ所に軸受を設ける構成としてもよい。この場合、図 1 の構成で言えば、インバータユニット 60 を挟んで一端側及び他端側の 2 カ所に軸受が設けられるとよい。
- [0329] ・上記構成の回転電機 10 では、回転子 40 において磁石ホルダ 41 の中間部 45 が内側肩部 49a と感情の外側肩部 49b を有する構成としたが、これらの肩部 49a, 49b を無くし、平坦な面を有する構成としてもよい。
- [0330] ・上記構成の回転電機 10 では、固定子巻線 51 の導線 82 において導体 82a を複数の素線 86 の集合体として構成したが、これを変更し、導線 82 として断面矩形状の角形導線を用いる構成としてもよい。また、導線 82 として断面円形状又は断面楕円状の丸形導線を用いる構成としてもよい。
- [0331] ・上記構成の回転電機 10 では、固定子 50 の径方向内側にインバータユニット 60 を設ける構成としたが、これに代えて、固定子 50 の径方向内側にインバータユニット 60 を設けない構成としてもよい。この場合、固定子 50 の径方向内側となる内部領域を空間としておくことが可能である。また、その内部領域に、インバータユニット 60 とは異なる部品を配することが可能である。
- [0332] ・上記構成の回転電機 10 において、ハウジング 30 を具備しない構成としてもよい。この場合、例えばホイールや他の車両部品の一部において、回転子 40、固定子 50 等が保持される構成であってもよい。
- [0333] この明細書における開示は、例示された実施形態に制限されない。開示は、例示された実施形態と、それらに基づく当業者による変形態様を包含する

。例えば、開示は、実施形態において示された部品および／または要素の組み合わせに限定されない。開示は、多様な組み合わせによって実施可能である。開示は、実施形態に追加可能な追加的な部分をもつことができる。開示は、実施形態の部品および／または要素が省略されたものを包含する。開示は、ひとつの実施形態と他の実施形態との間における部品および／または要素の置き換え、または組み合わせを包含する。開示される技術的範囲は、実施形態の記載に限定されない。開示されるいくつかの技術的範囲は、請求の範囲の記載によって示され、さらに請求の範囲の記載と均等の意味及び範囲内での全ての変更を含むものと解されるべきである。

[0334] 本開示は、実施例に準拠して記述されたが、本開示は当該実施例や構造に限定されるものではないと理解される。本開示は、様々な変形例や均等範囲内の変形をも包含する。加えて、様々な組み合わせや形態、さらには、それらに一要素のみ、それ以上、あるいはそれ以下、を含む他の組み合わせや形態をも、本開示の範疇や思想範囲に入るものである。

請求の範囲

[請求項1] 周方向に極性が交互となる複数の磁極を有する磁石部（４２）を含む界磁子（４０）と、

多相の電機子巻線（５１）を有する電機子（５０）と、を備え、前記界磁子及び前記電機子のうちいずれかが回転子とされている回転電機（１０）において、

前記回転子の軸方向に延びる環状の周壁を有し、該周壁の径方向内側となる位置に空間が形成されたケーシング（６４）を備え、

前記電機子は、前記周壁の径方向外側となる位置に配置され、径方向において前記界磁子と対向する周面に前記電機子巻線が設けられた環状のベース部材（５２）を有し、

前記界磁子は、前記周壁の径方向外側となる位置に配置され、径方向において前記電機子と対向する周面に前記磁石部が設けられた環状の磁石保持部材（４１）を有し、

前記周壁の周面、前記磁石保持部材において前記磁石部が設けられた周面、及び前記ベース部材において前記電機子巻線が設けられた周面それぞれの前記軸方向に直交する方向の横断面形状が多角形状とされており、

前記周壁、前記磁石保持部材及び前記ベース部材それぞれの前記横断面形状の角数が互いに異なっている回転電機。

[請求項2] 前記周壁、前記磁石保持部材及び前記ベース部材それぞれの前記横断面形状が正多角形状とされている請求項１に記載の回転電機。

[請求項3] 前記電機子巻線は、前記磁石部に対向する位置で周方向に所定間隔で配置された導線部（８１，８２）を有し、

前記電機子において、

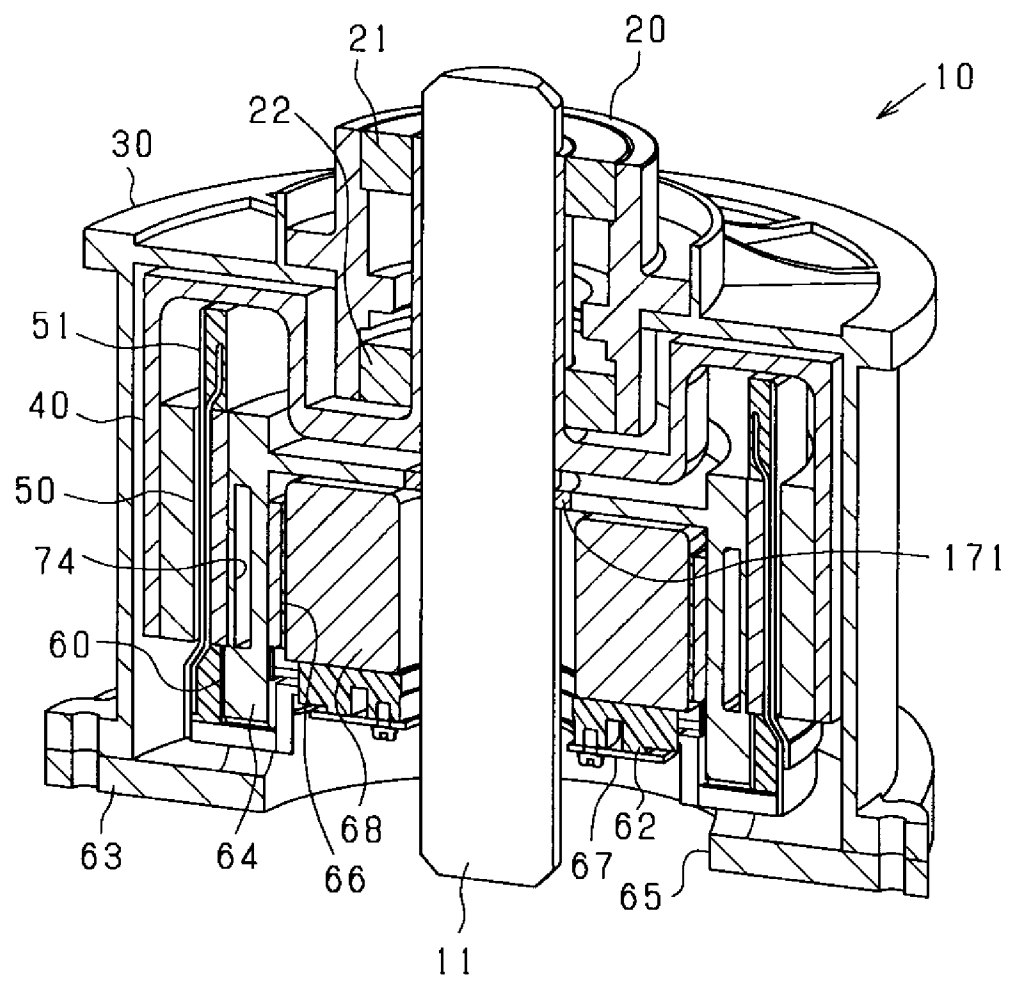
周方向における前記各導線部の間に導線間部材（５７，１４２，１４３）を設け、かつその導線間部材として、１磁極における前記導線間部材の周方向の幅寸法を W_t 、前記導線間部材の飽和磁束密度を B

s、1 磁極における前記磁石部の周方向の幅寸法を W_m 、前記磁石部の残留磁束密度を B_r とした場合に、 $W_t \times B_s \leq W_m \times B_r$ の関係となる磁性材料、若しくは非磁性材料を用いる構成か、

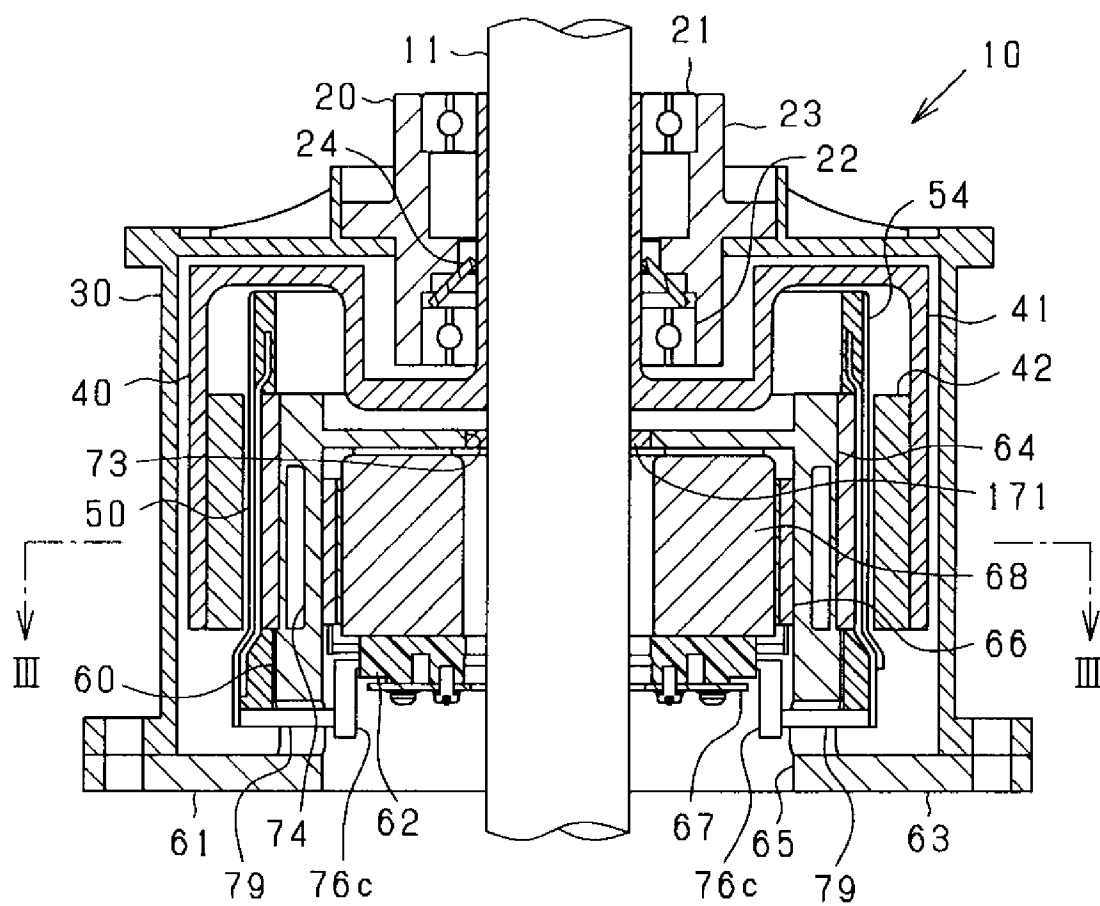
又は周方向における前記各導線部の間に導線間部材を設けていない構成となっている請求項 1 又は 2 に記載の回転電機。

[請求項4] 前記ベース部材の前記横断面形状の角数が、前記周壁及び前記磁石保持部材それぞれの前記横断面形状の角数よりも大きい請求項 1 ～ 3 のいずれか 1 項に記載の回転電機。

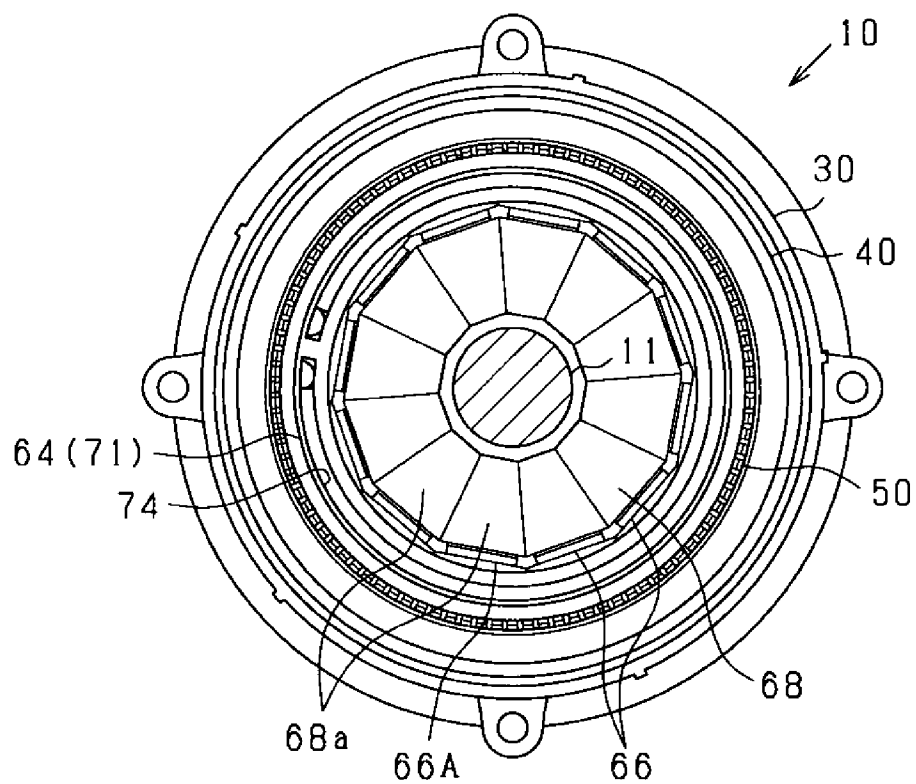
[図1]



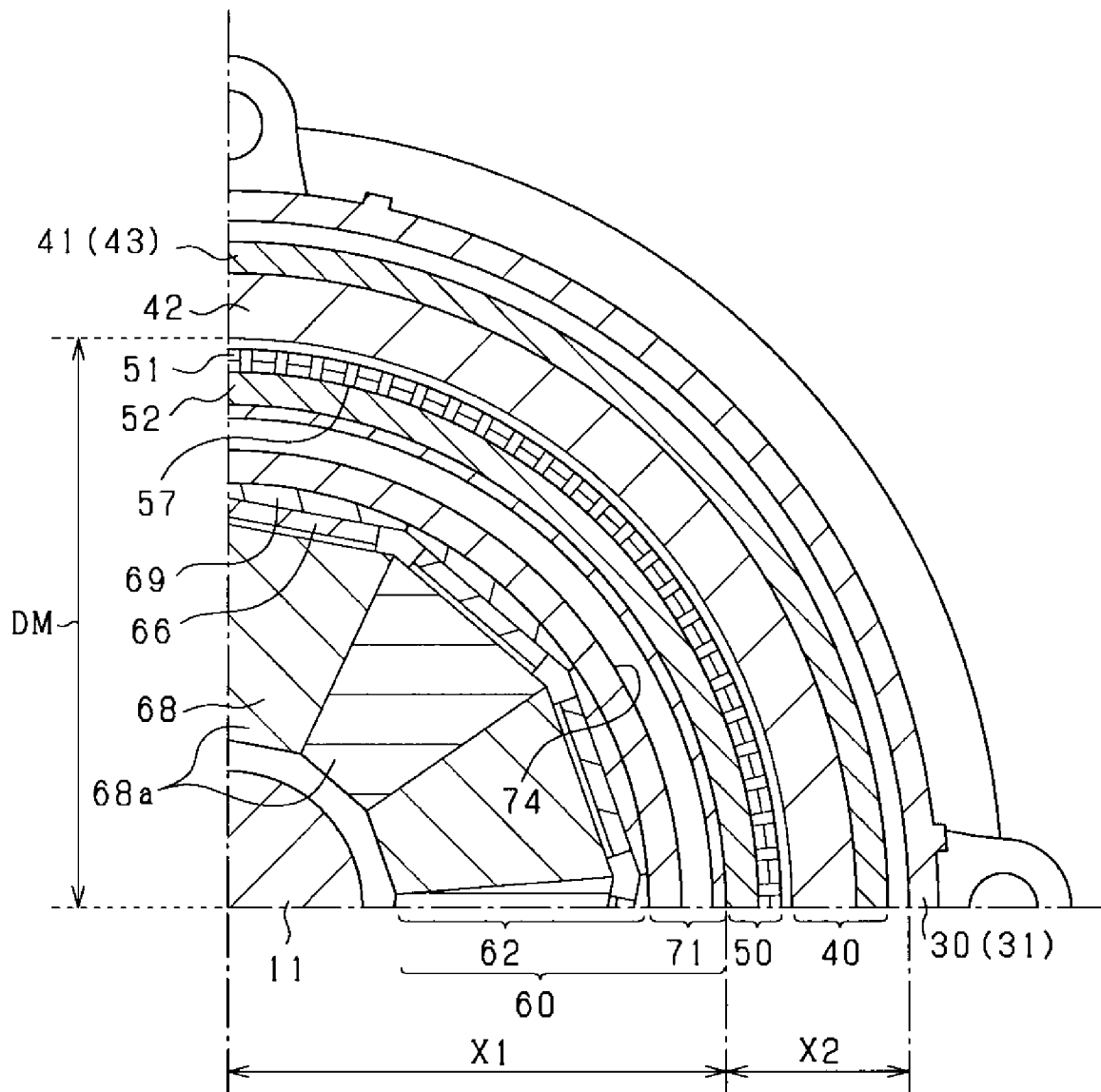
[図2]



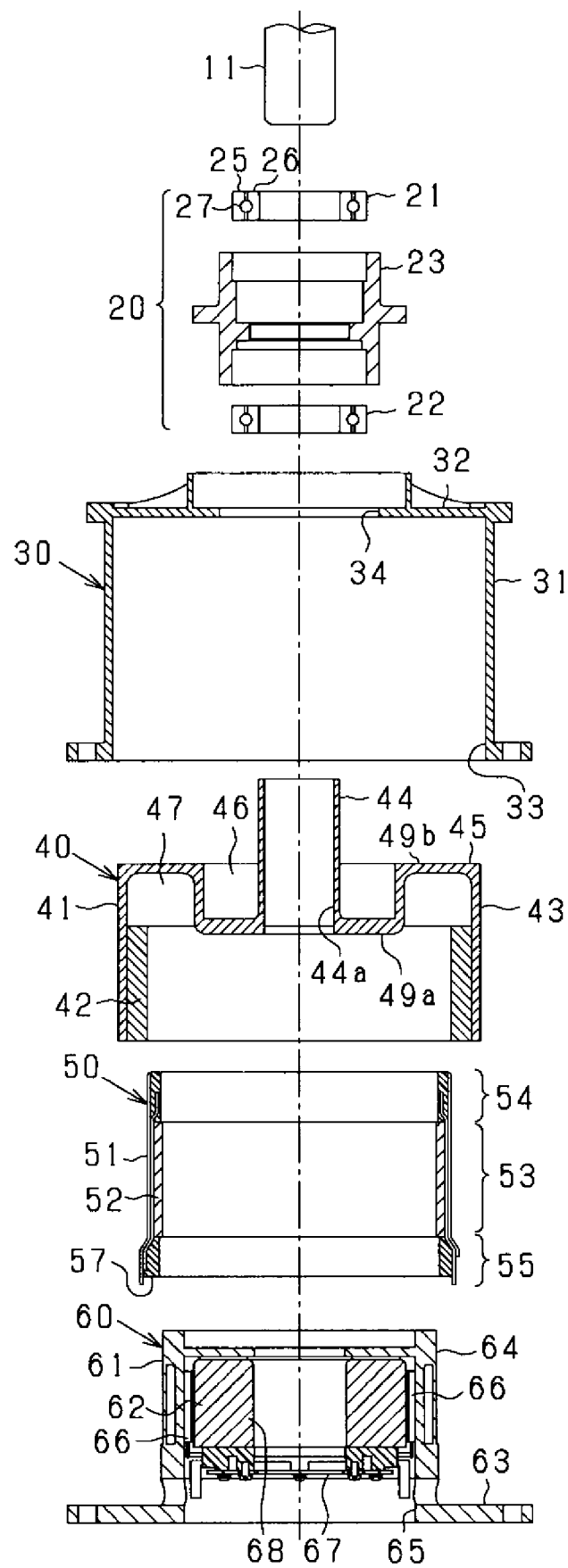
[図3]



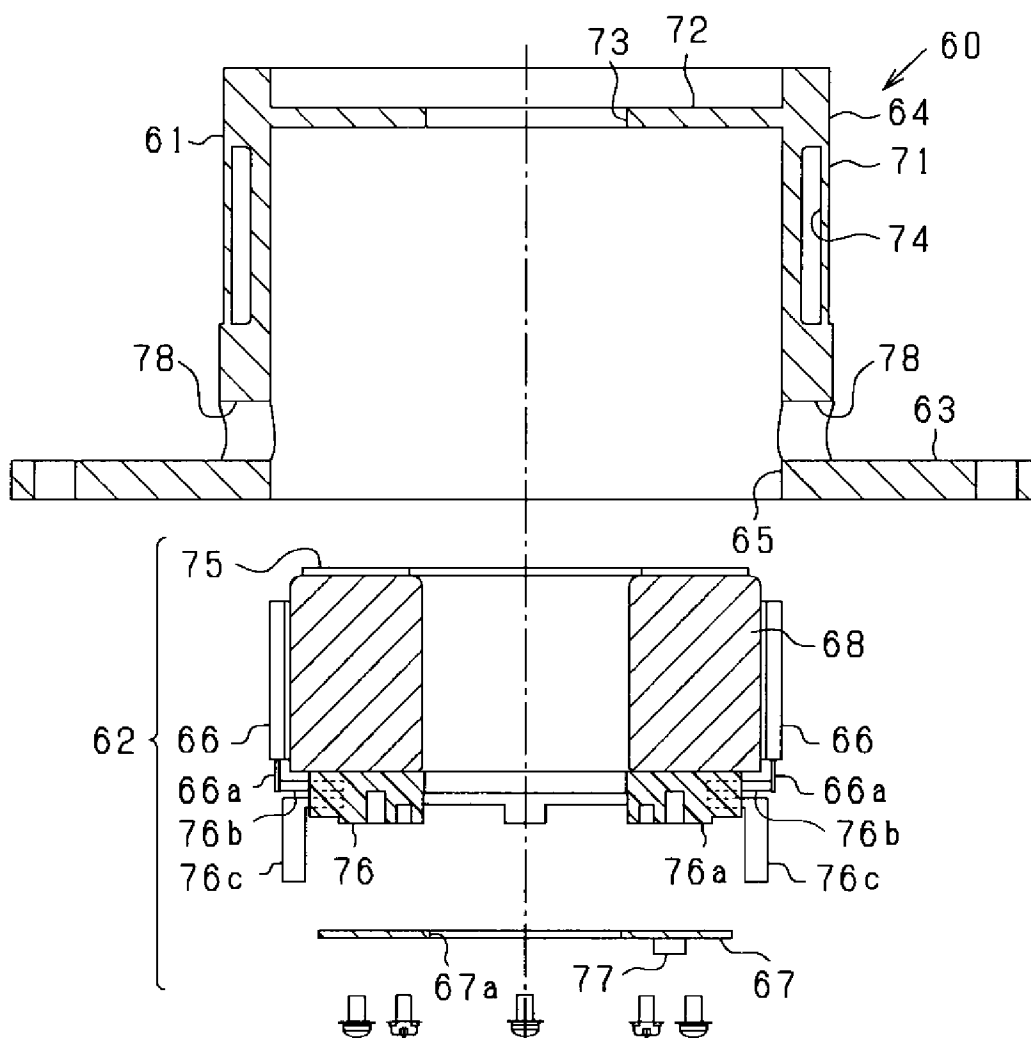
[図4]



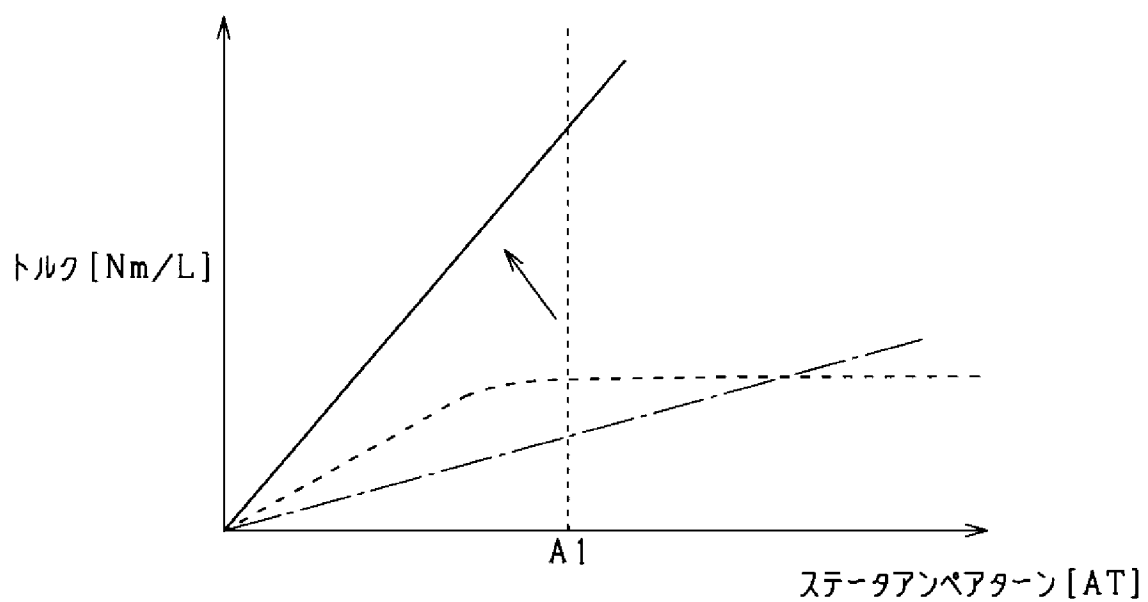
[図5]



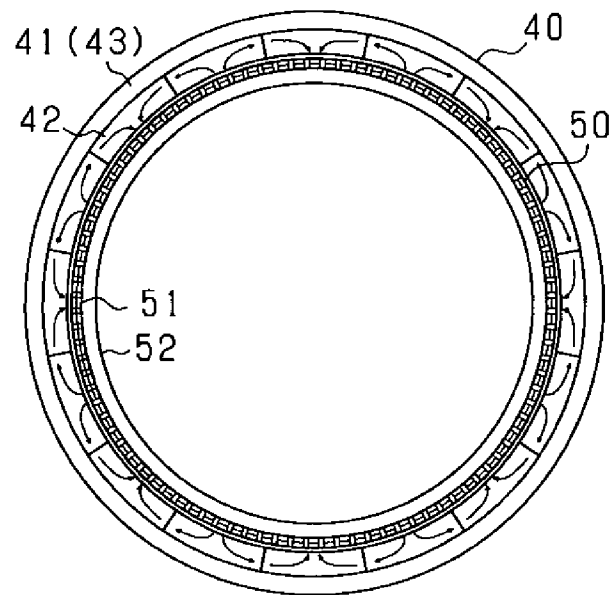
[図6]



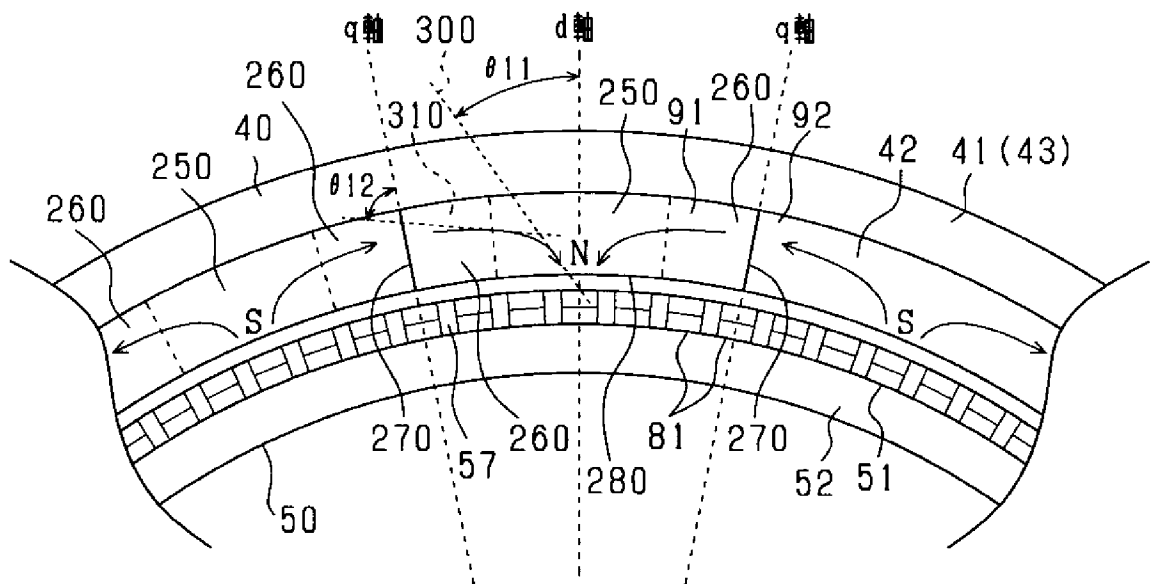
[図7]



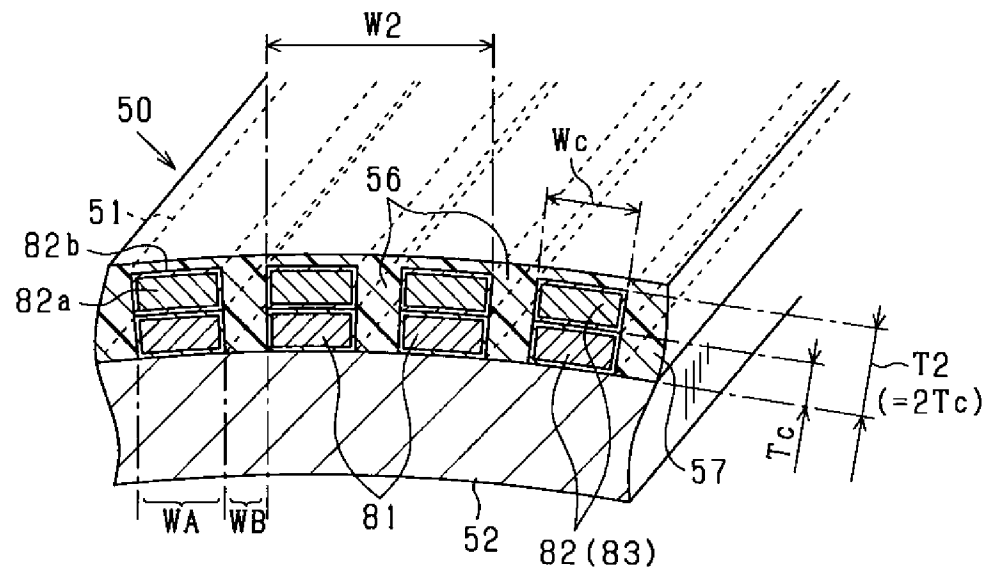
[図8]



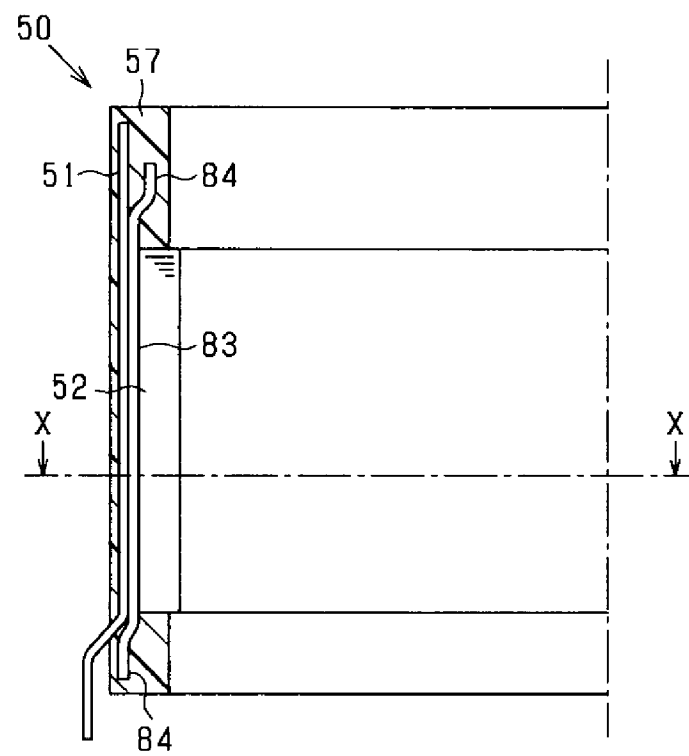
[図9]



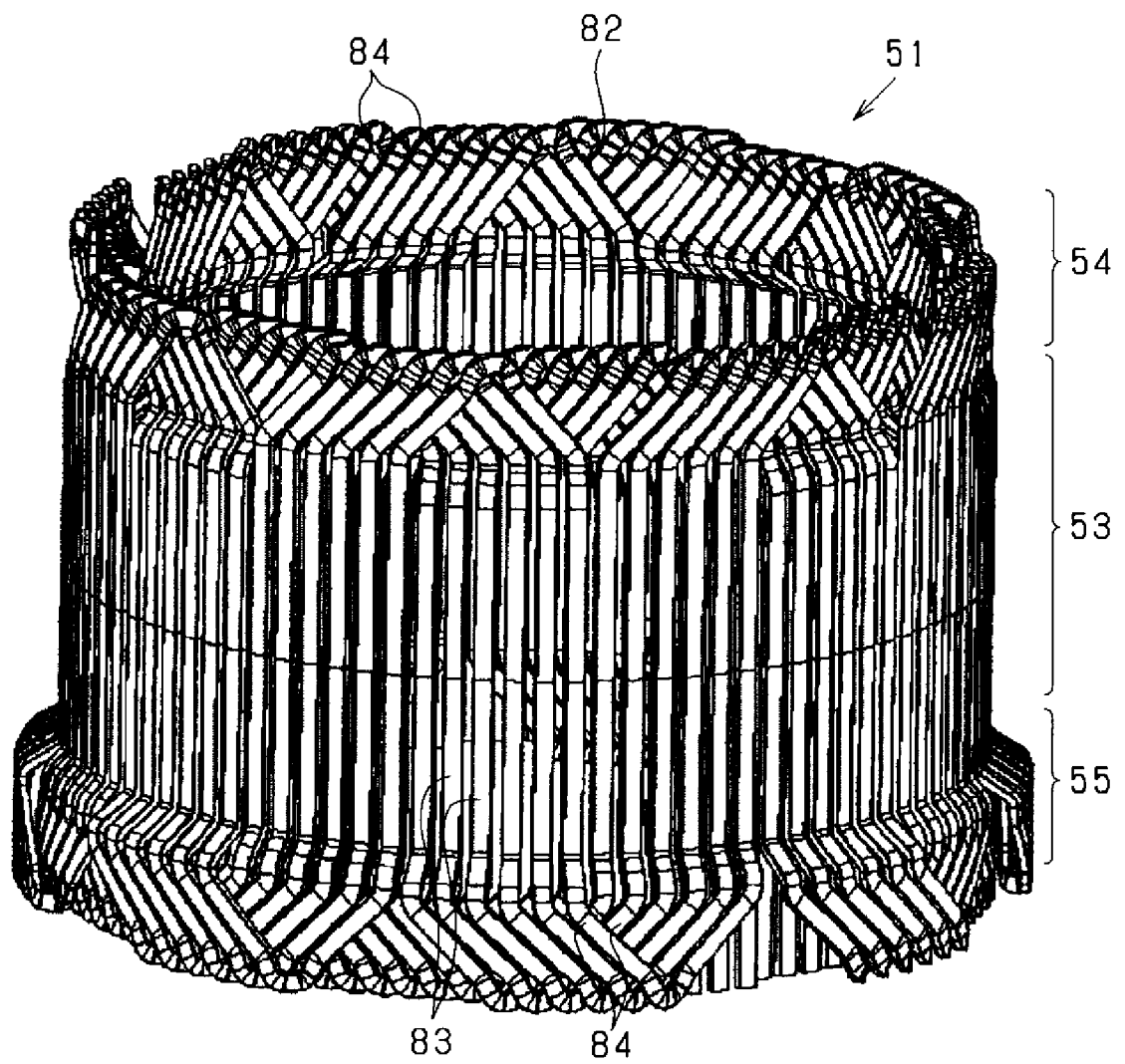
[図10]



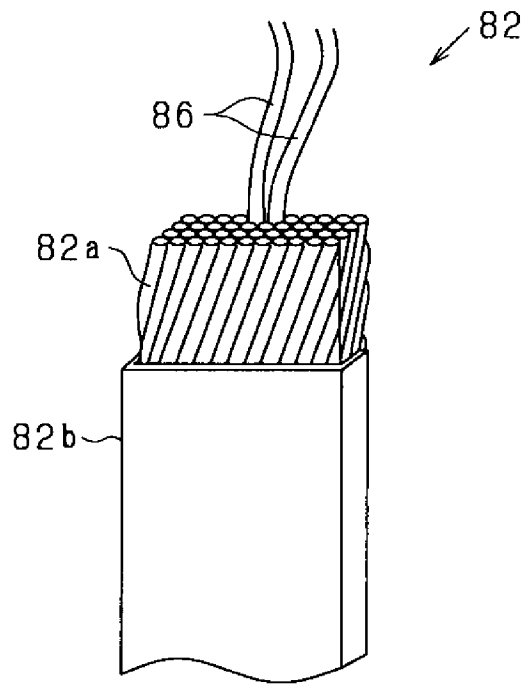
[図11]



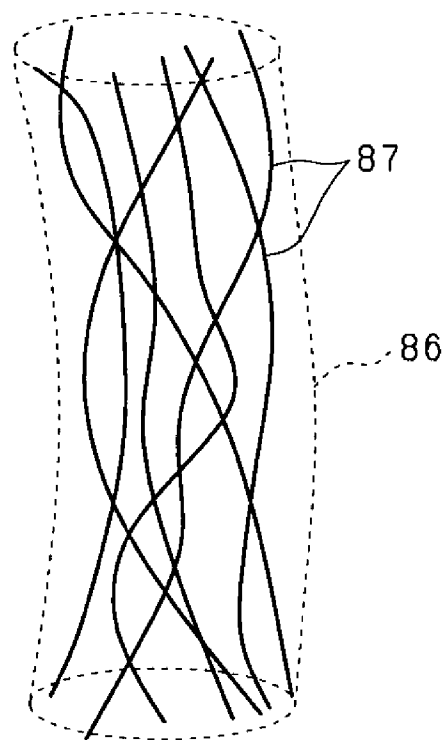
[図12]



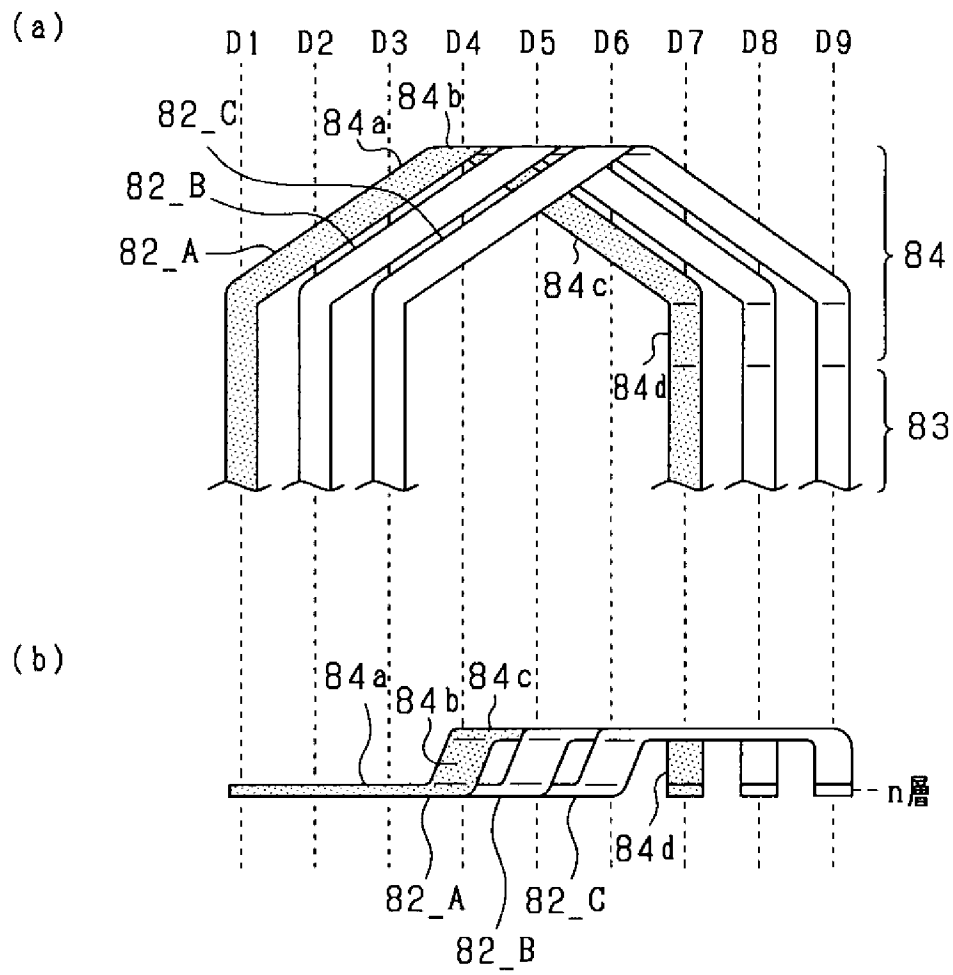
[図13]



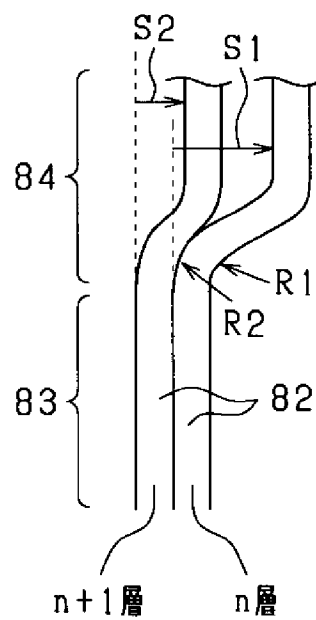
[図14]



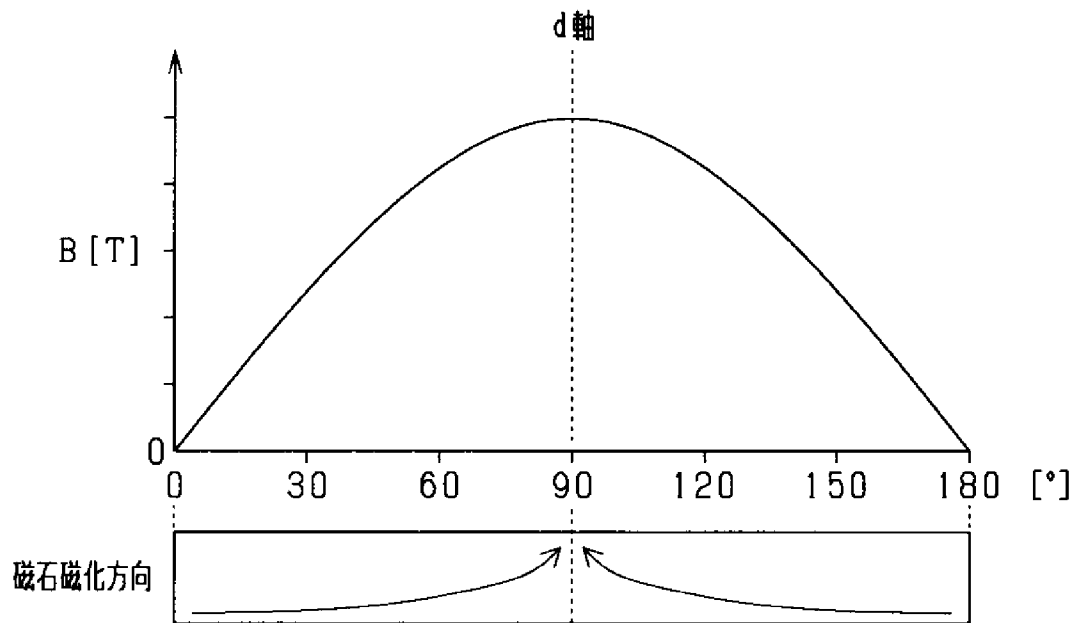
[図15]



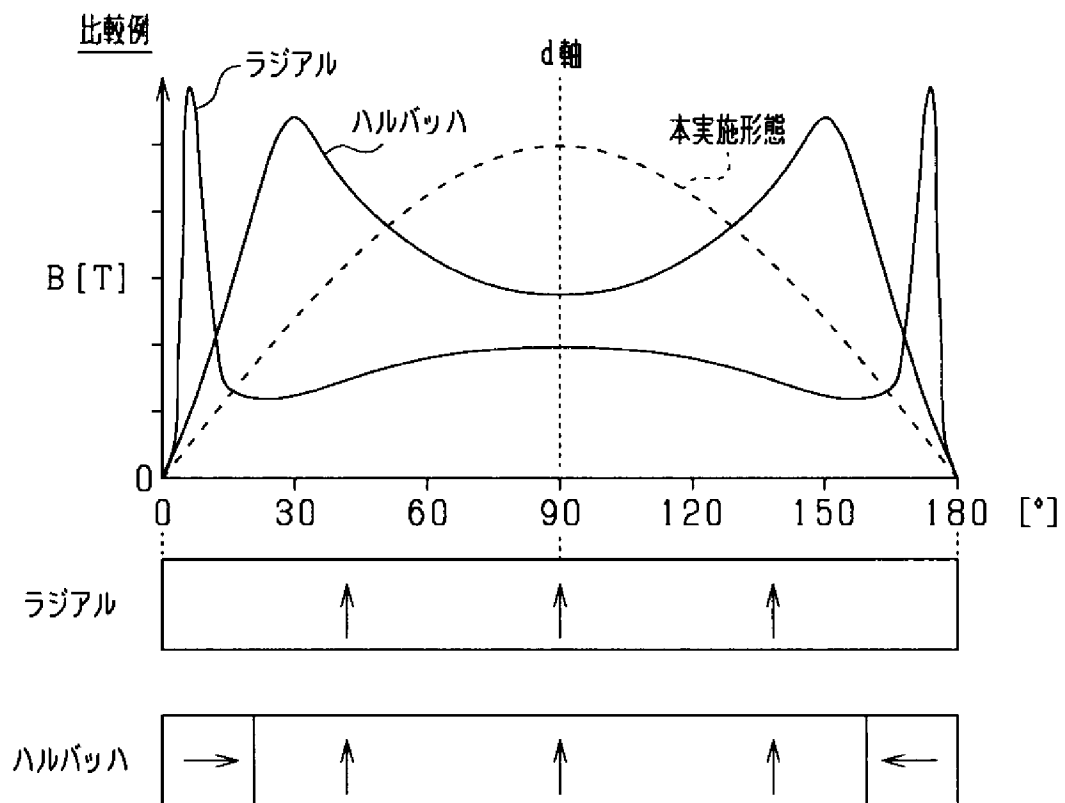
[図16]



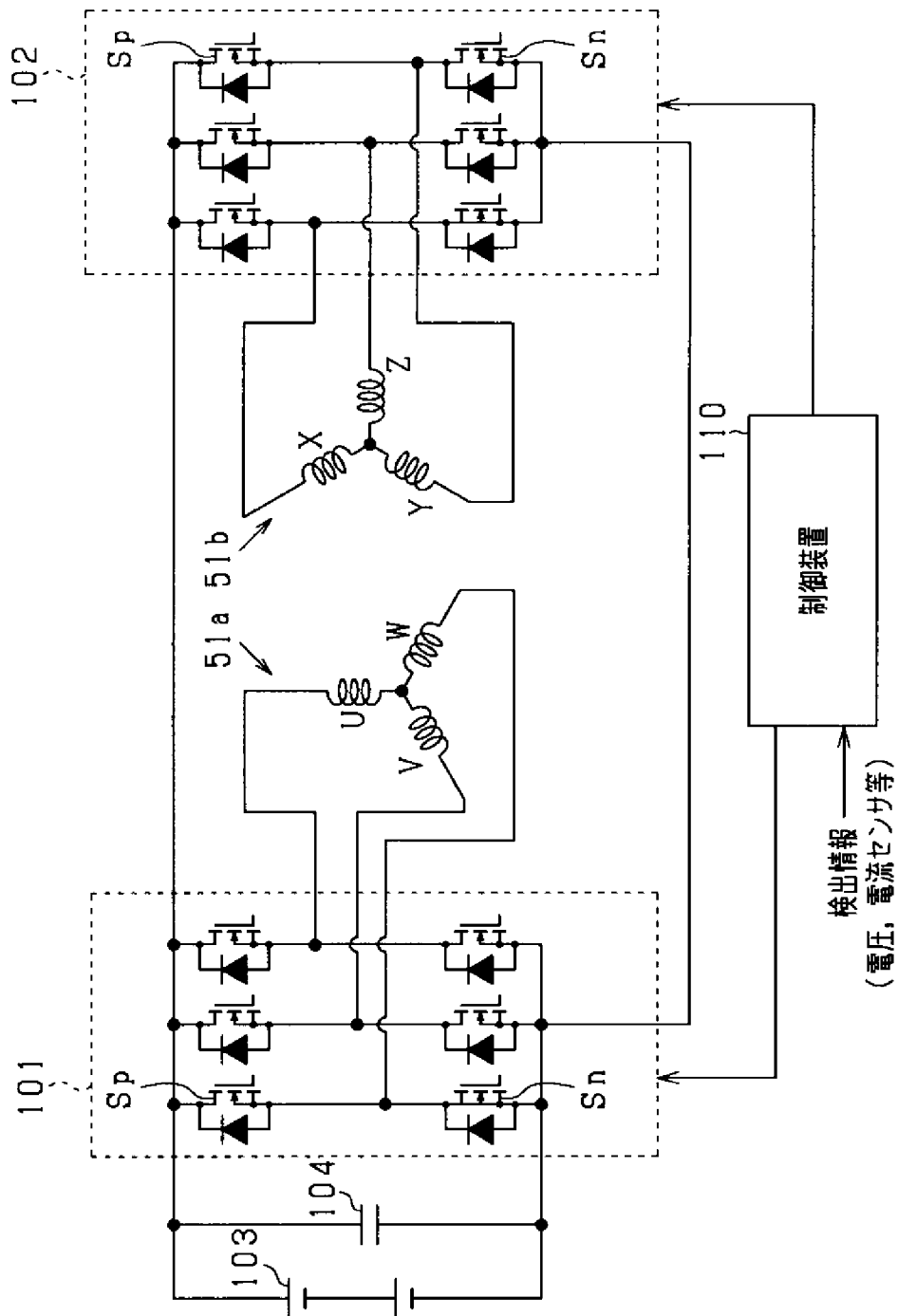
[図17]

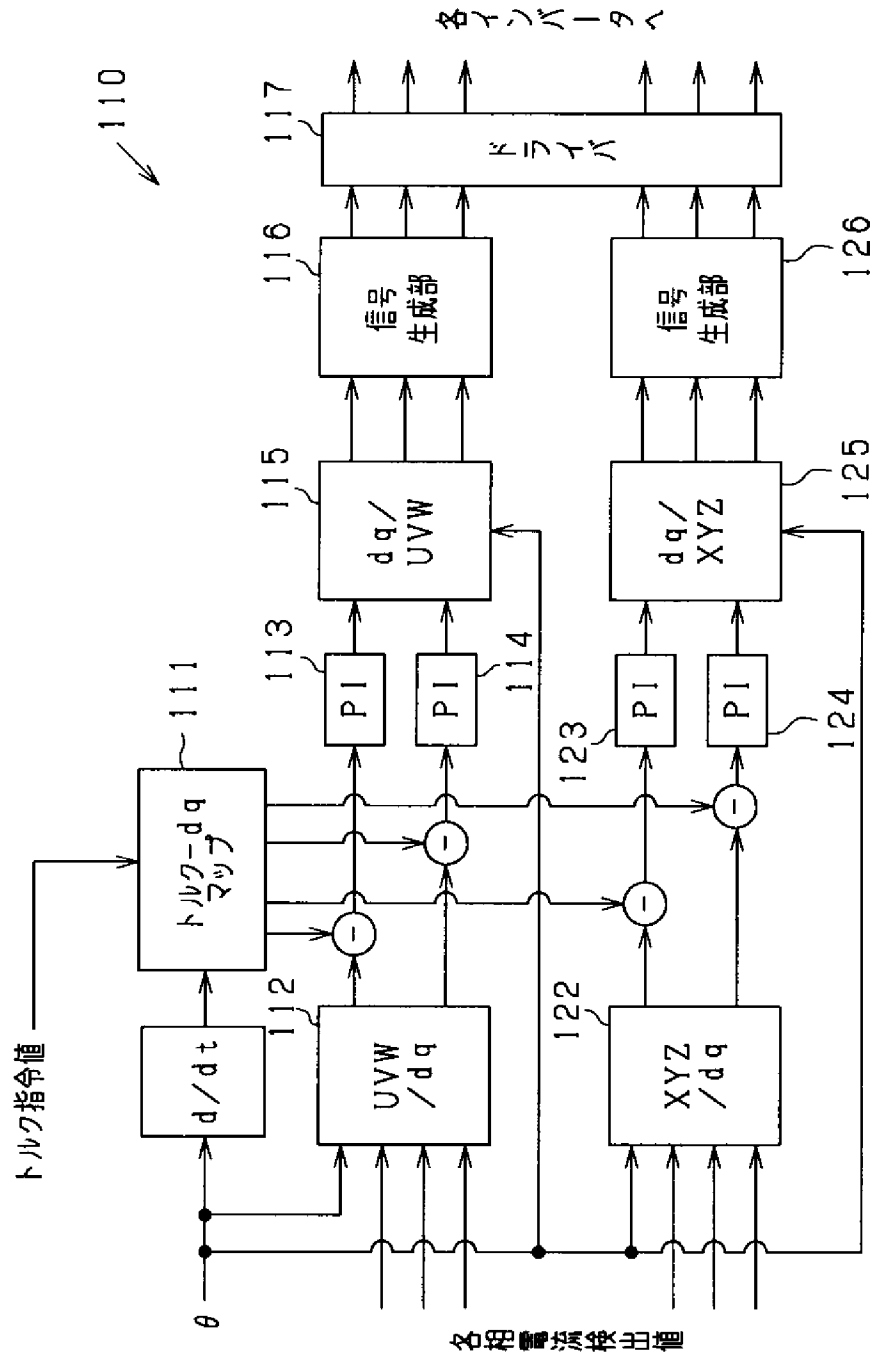


[図18]

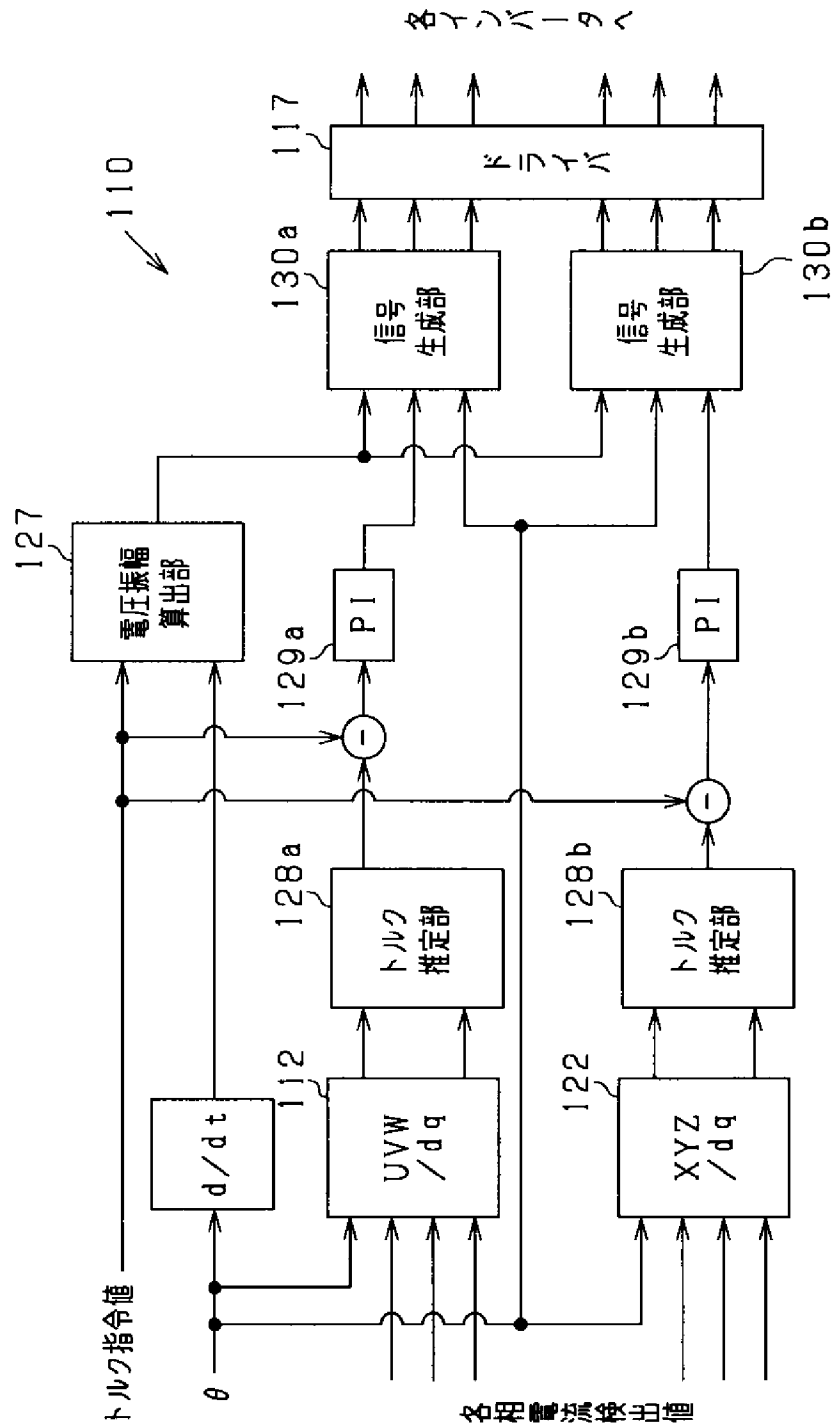


[図19]

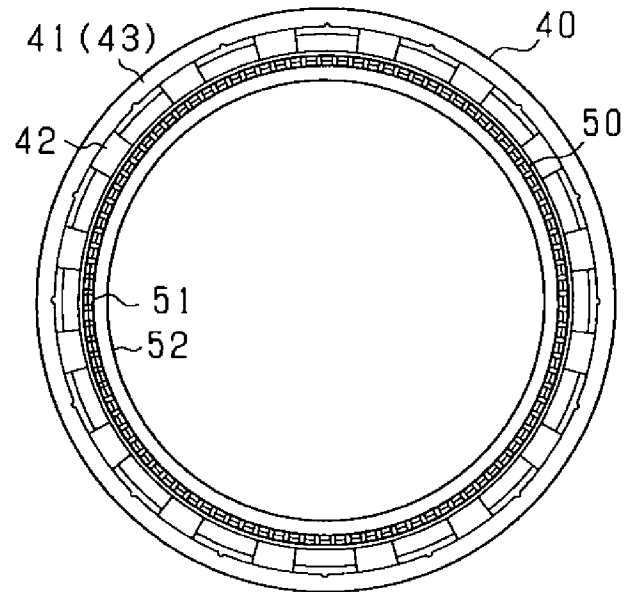




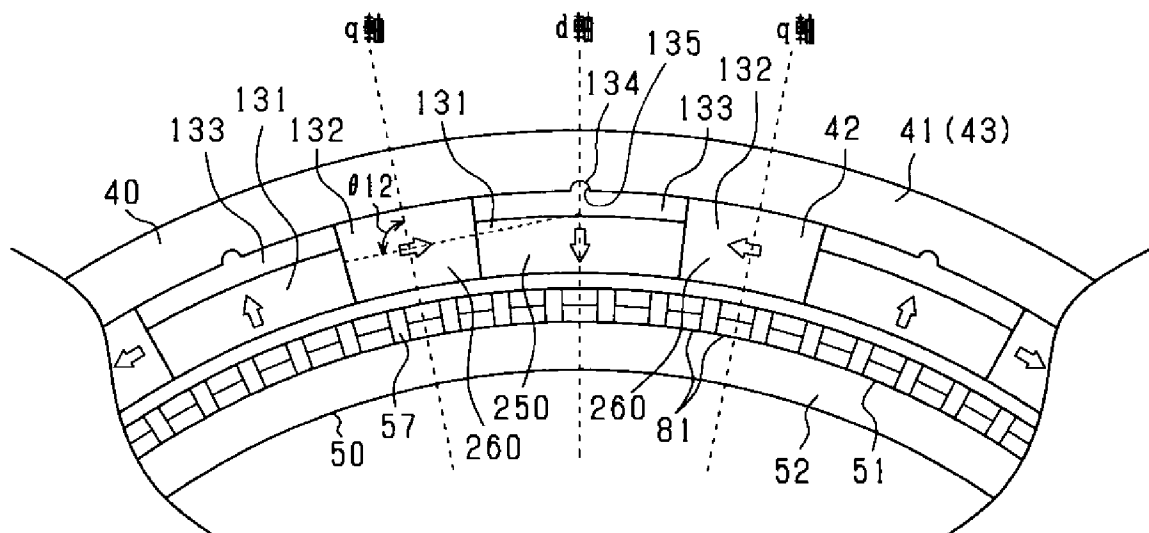
[図21]



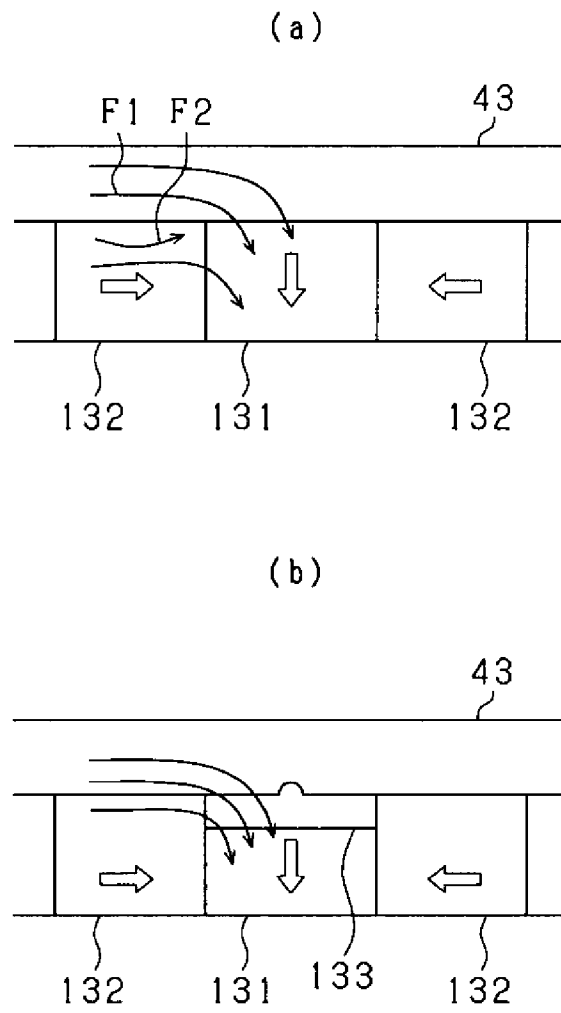
[図22]



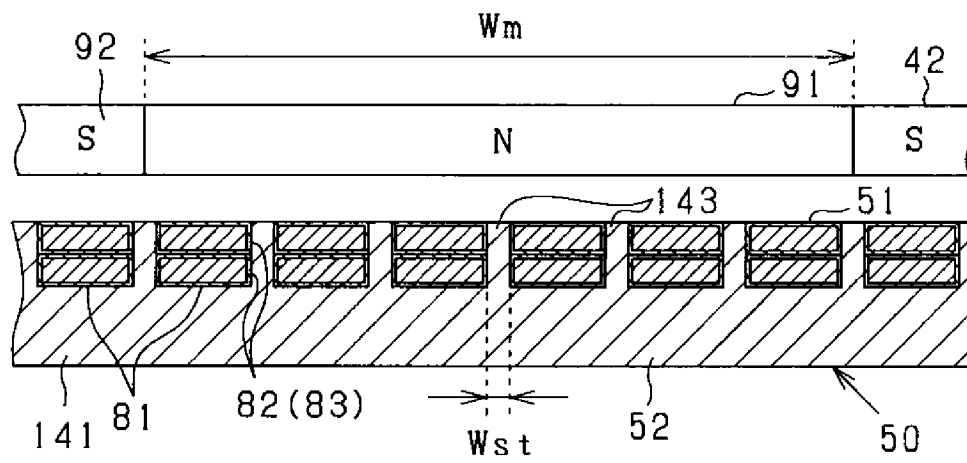
[図23]



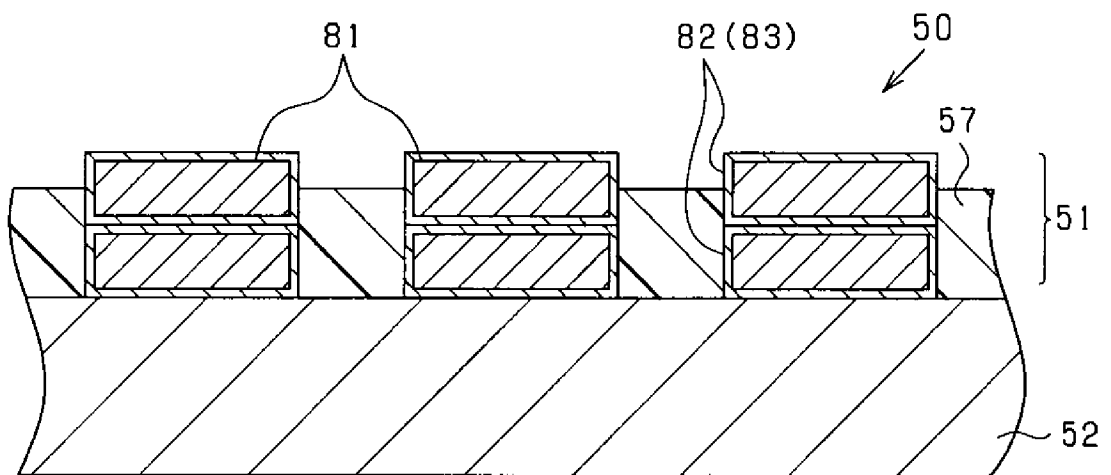
[図24]



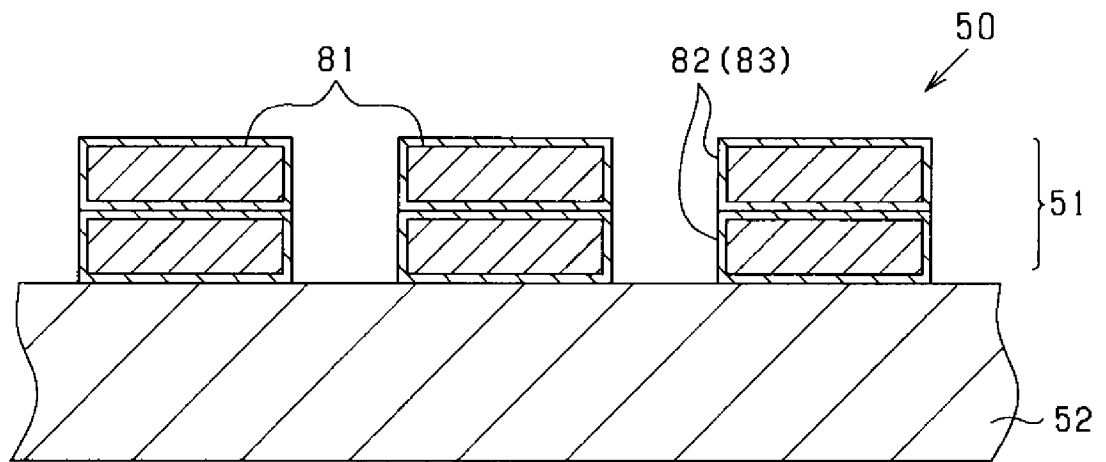
[図27]



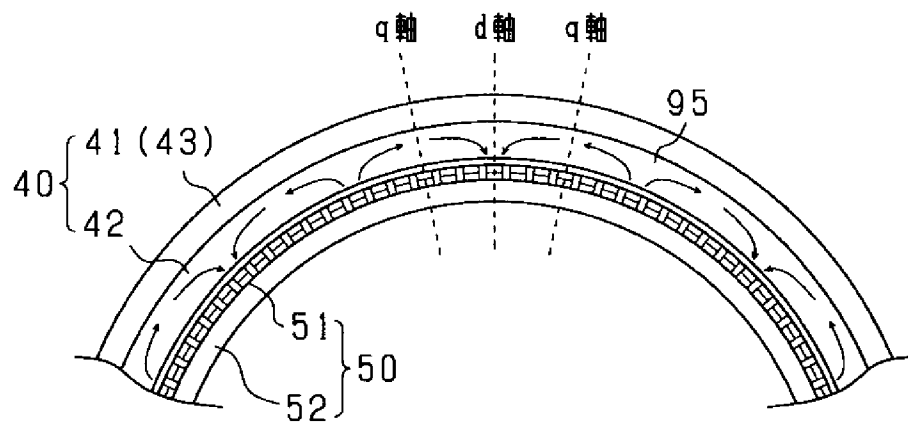
[図28]



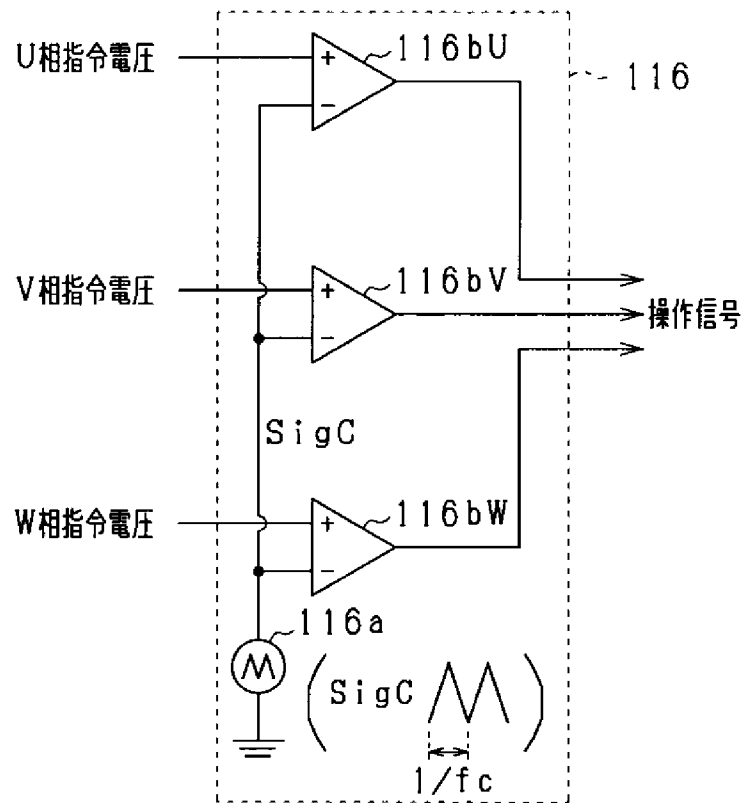
[図29]



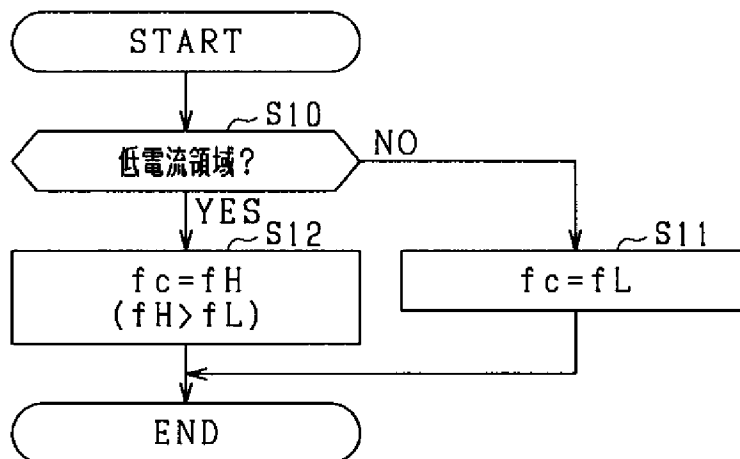
[図30]



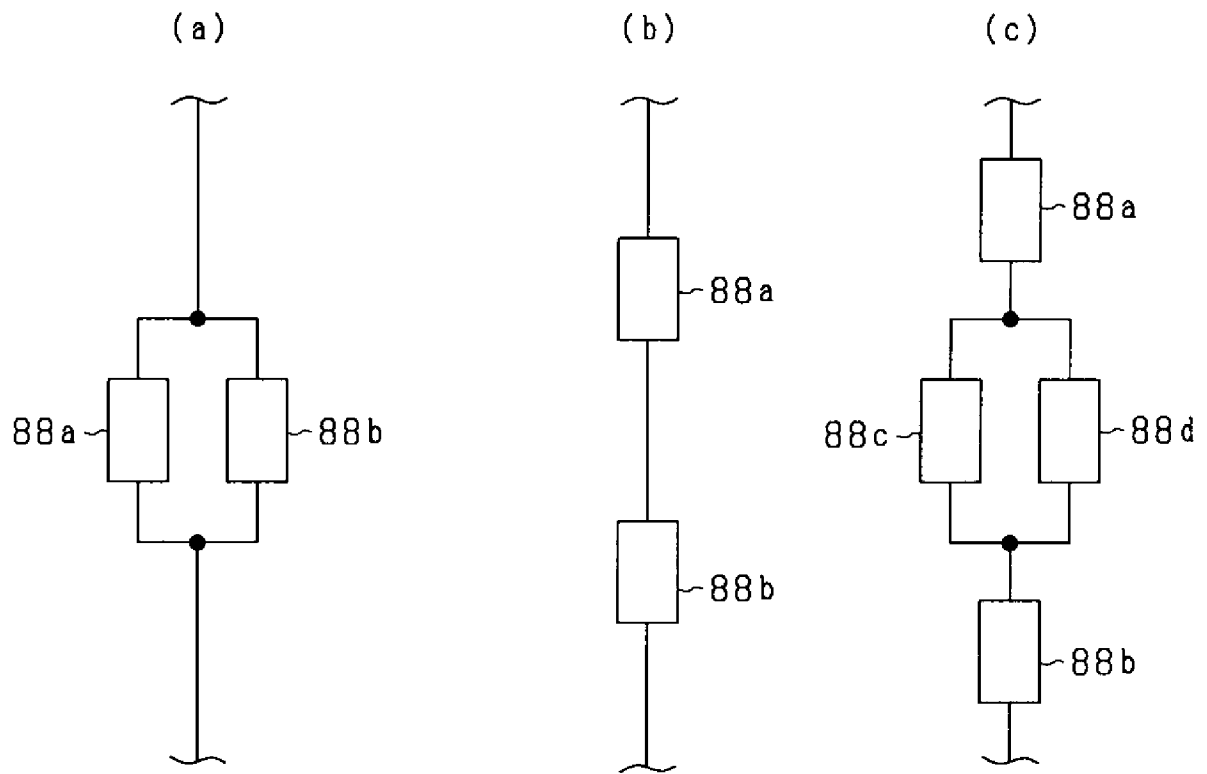
[図31]



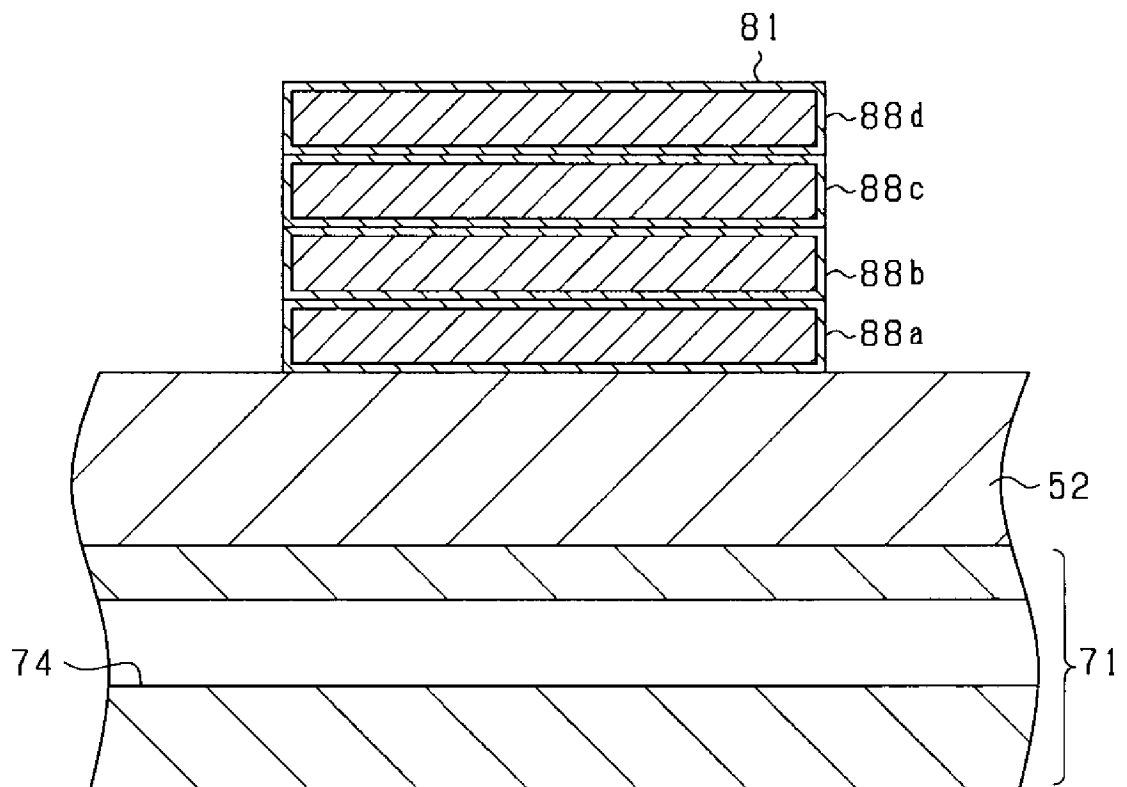
[図32]



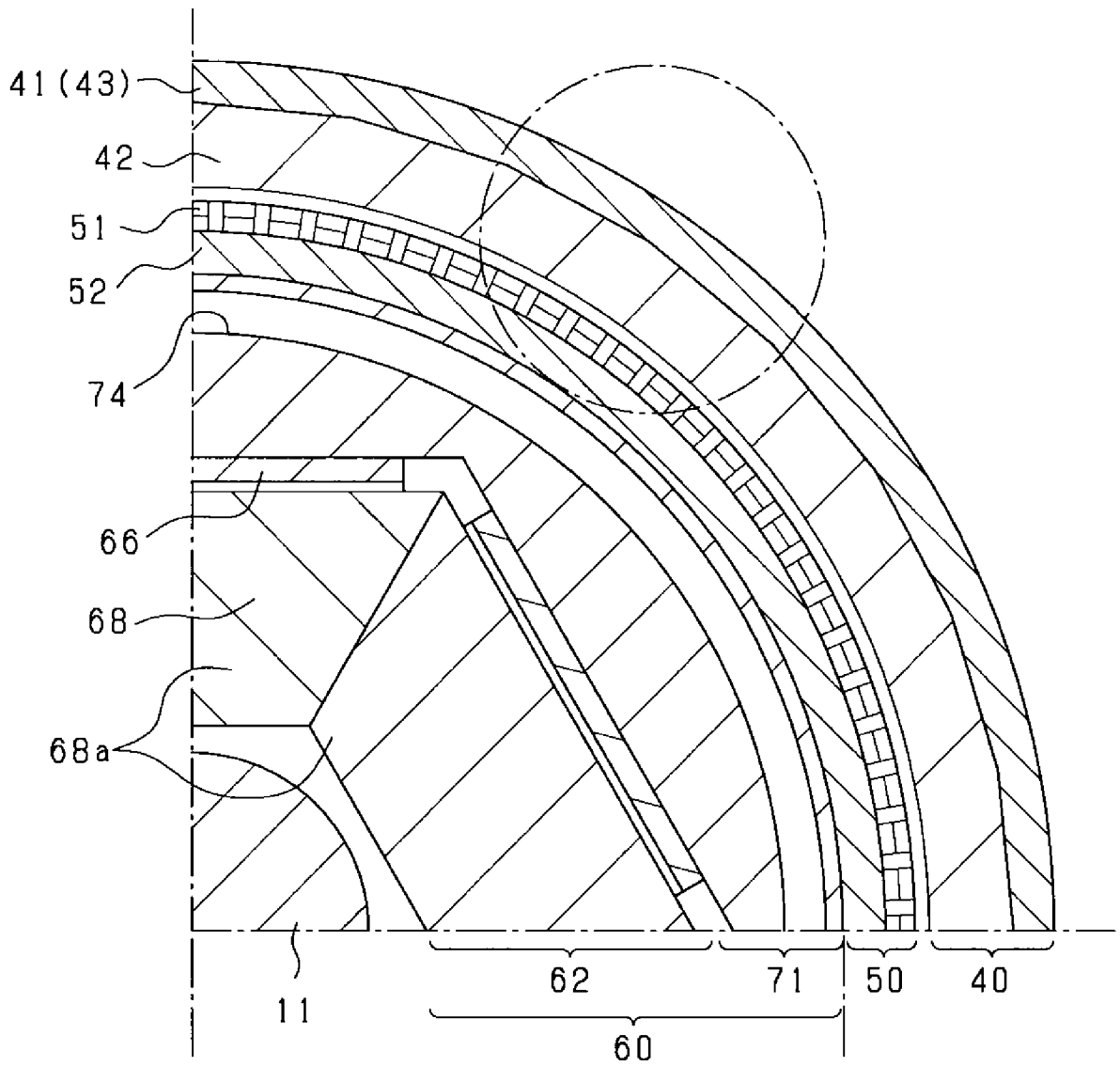
[図33]



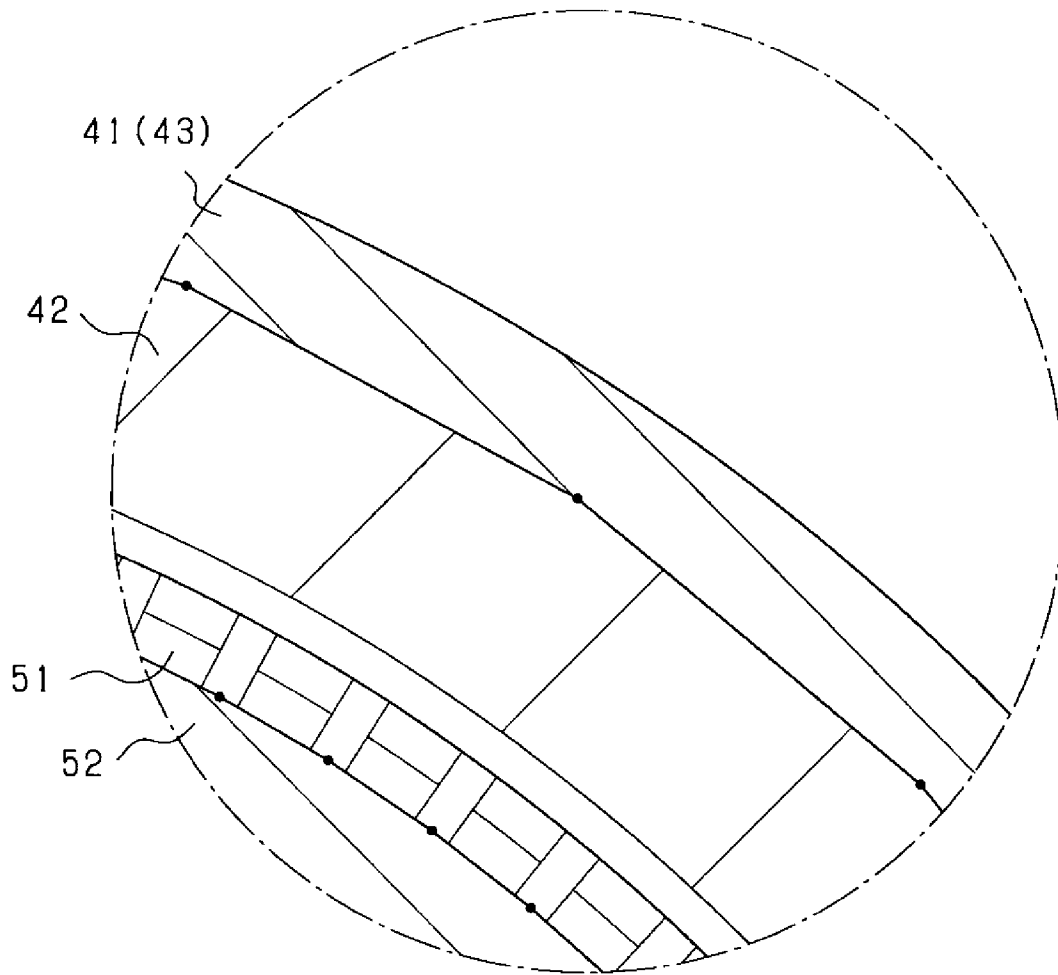
[図34]



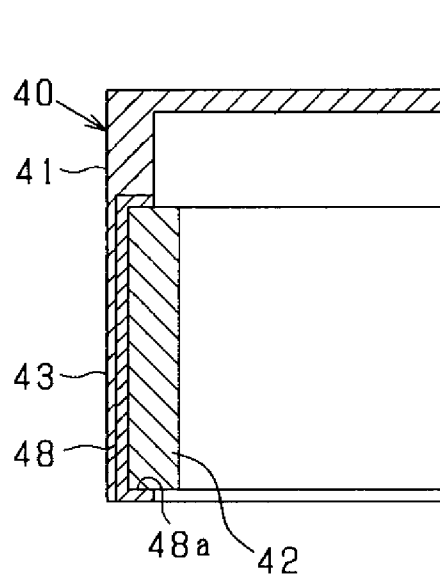
[図35]



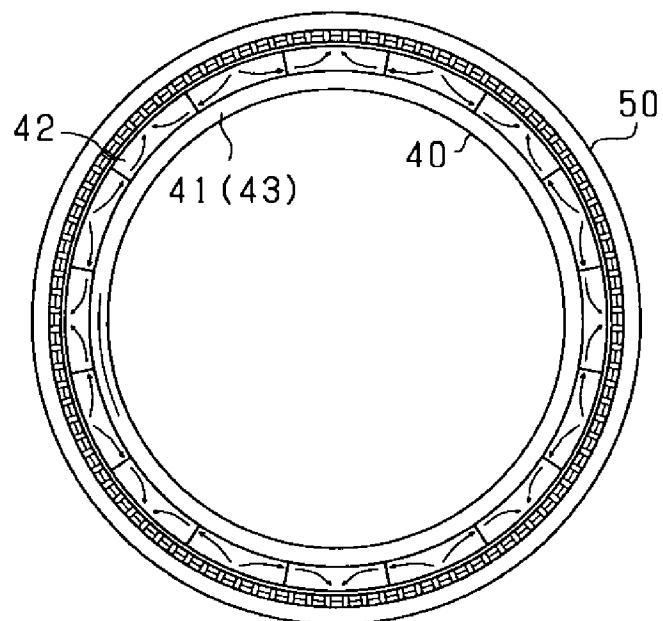
[図36]



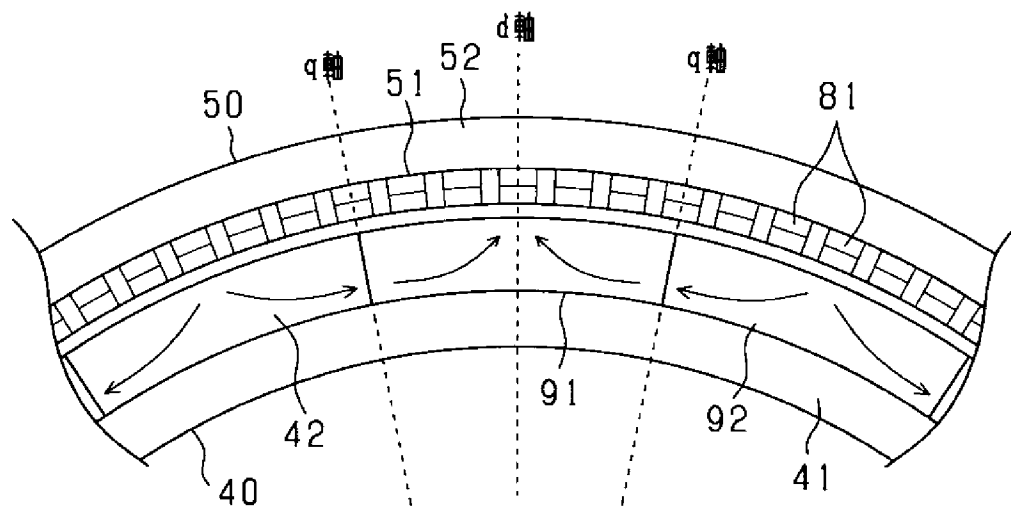
[図37]



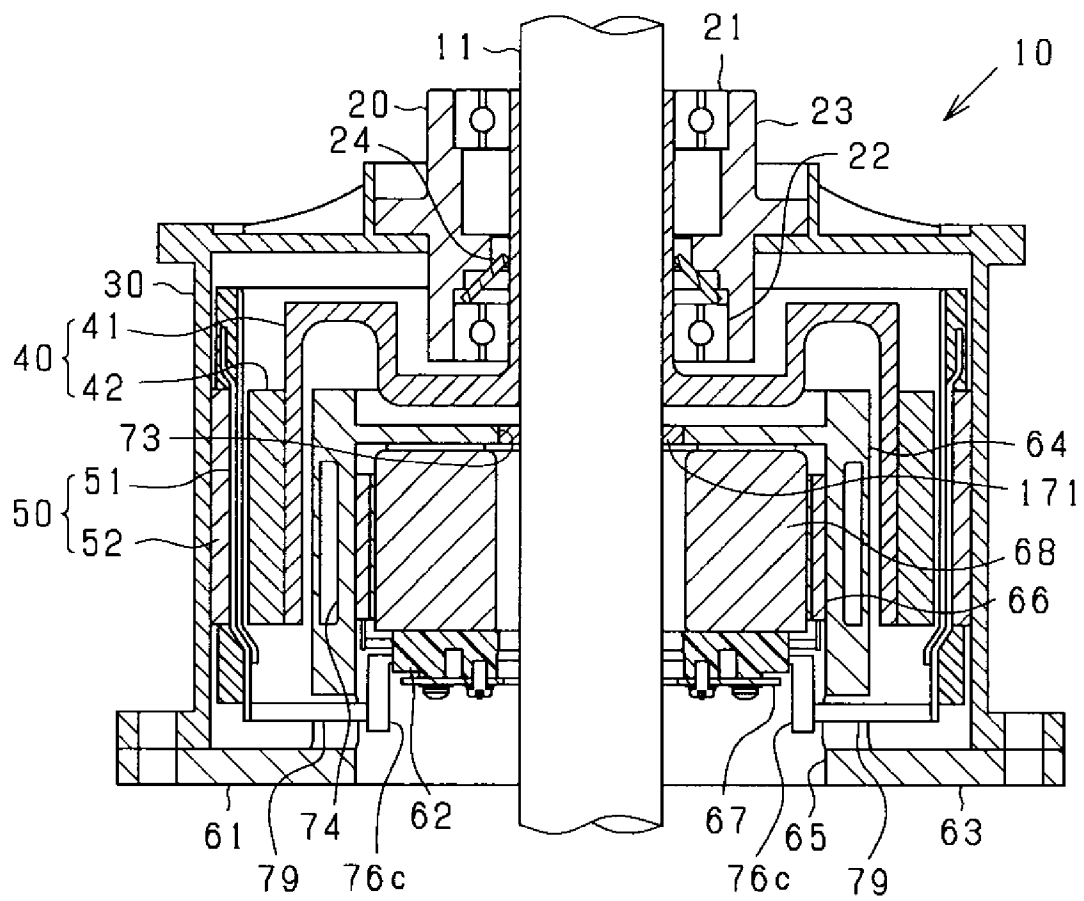
[図38]



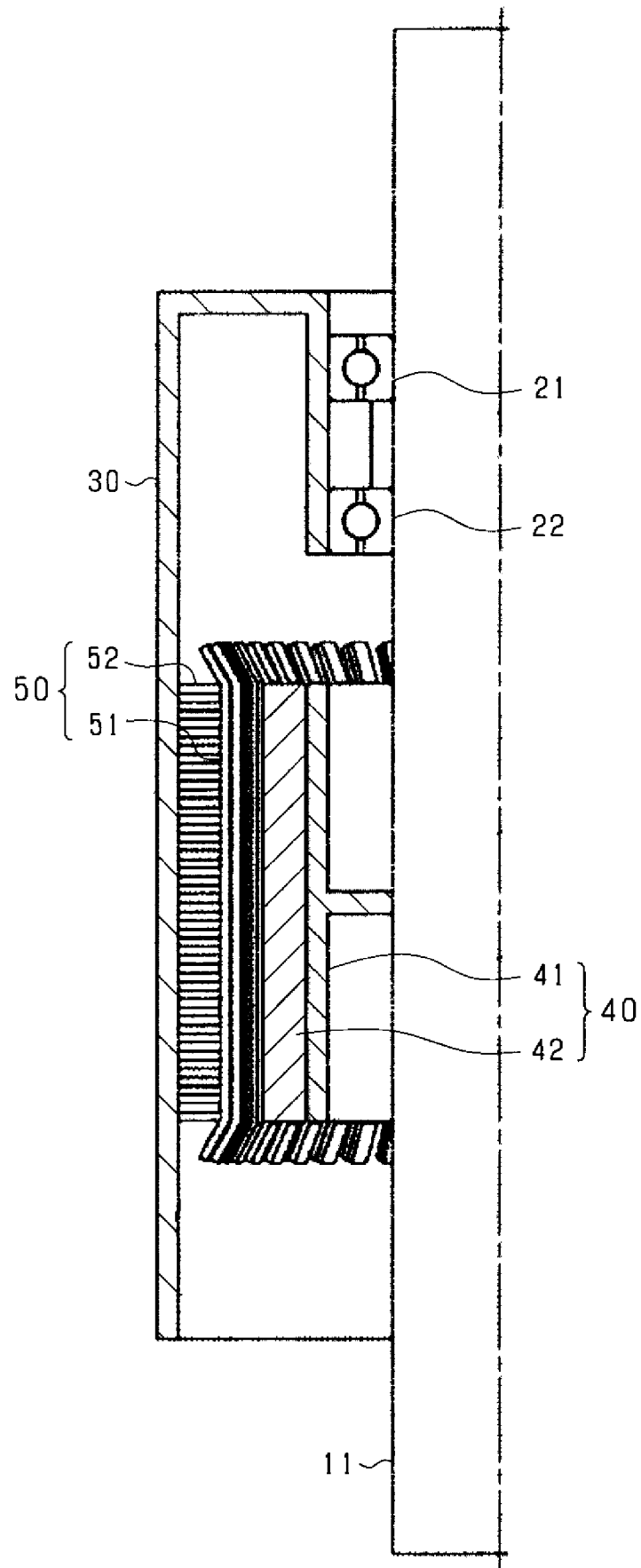
[図39]



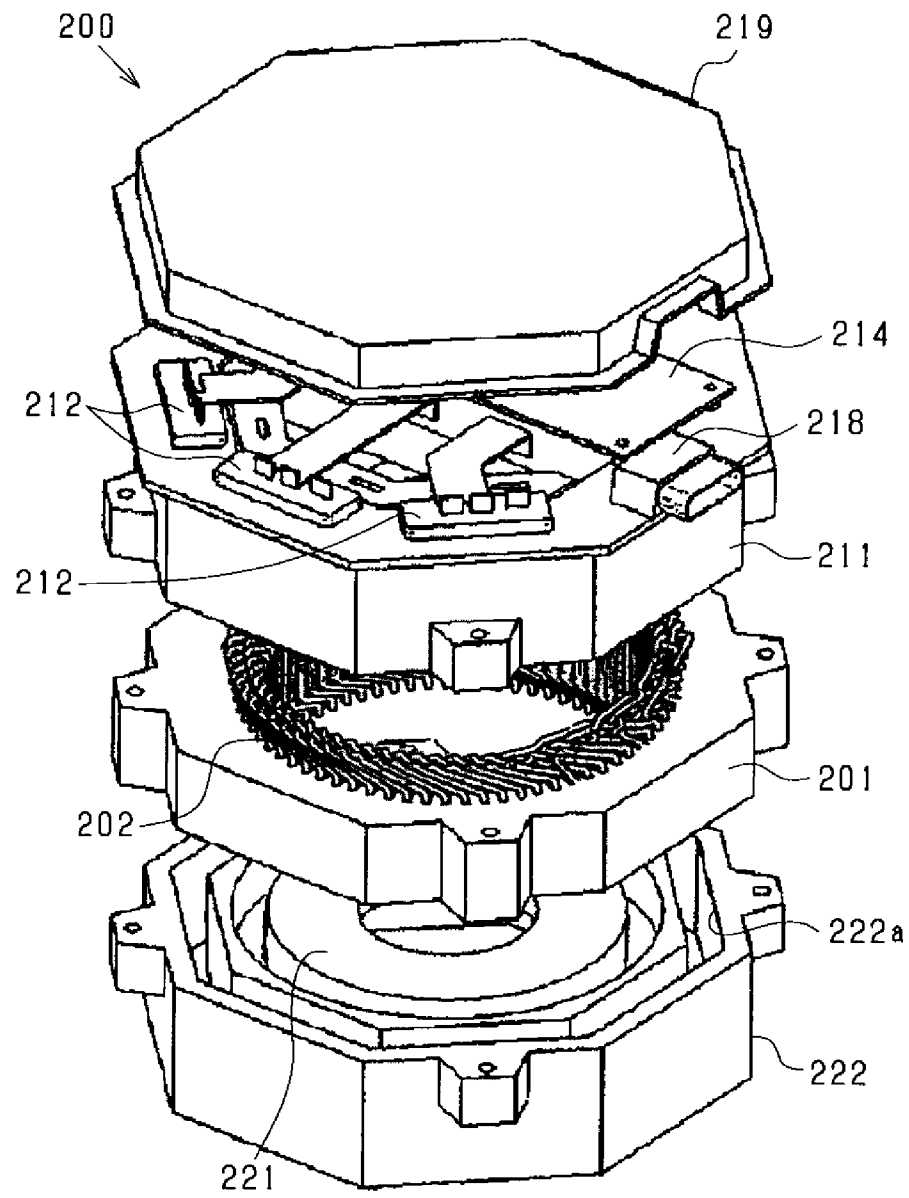
[図40]



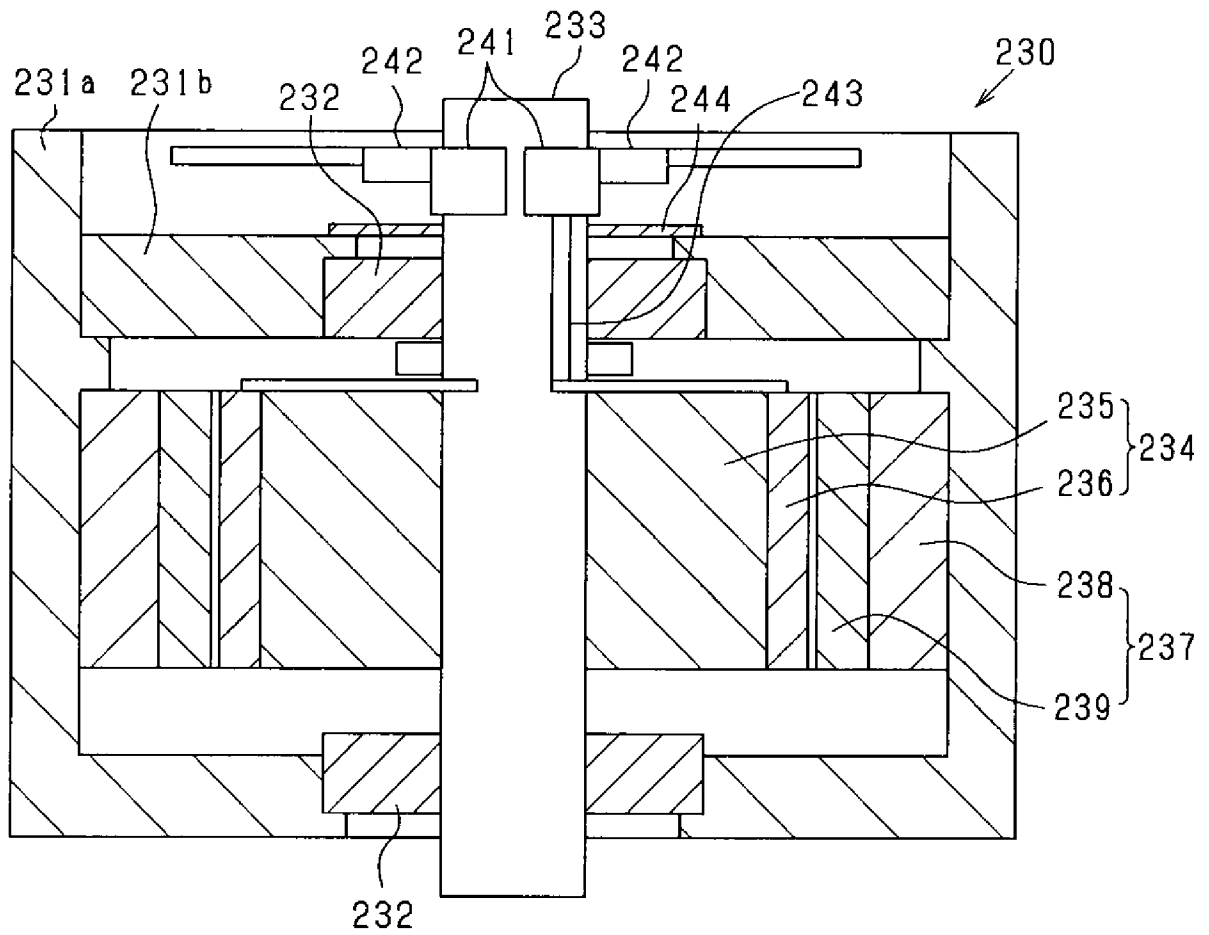
[図41]



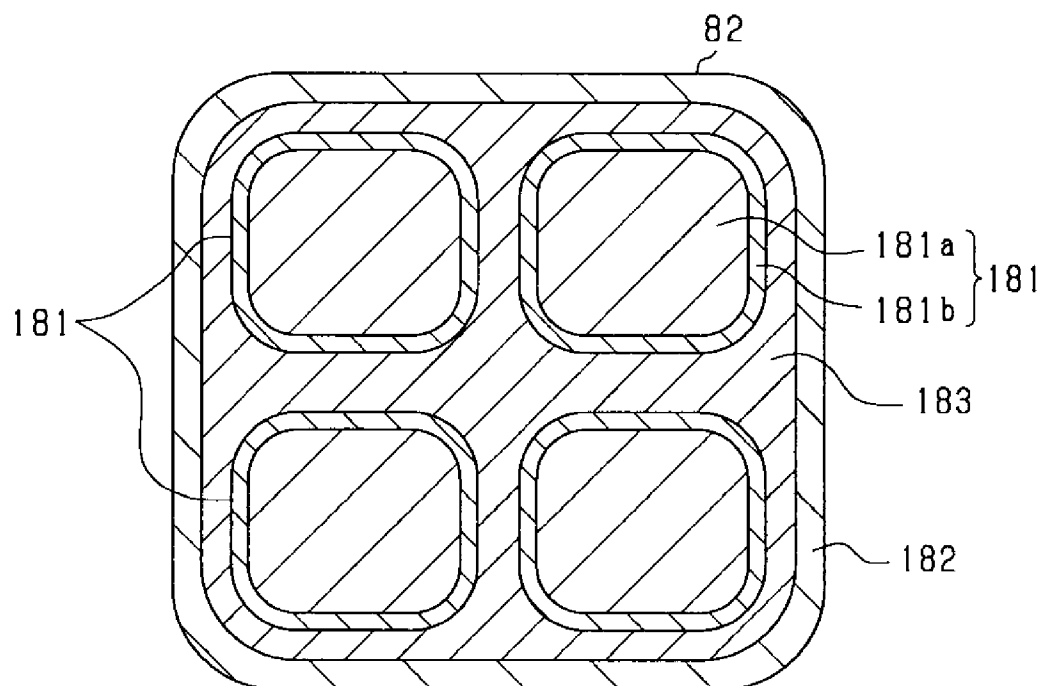
[図42]



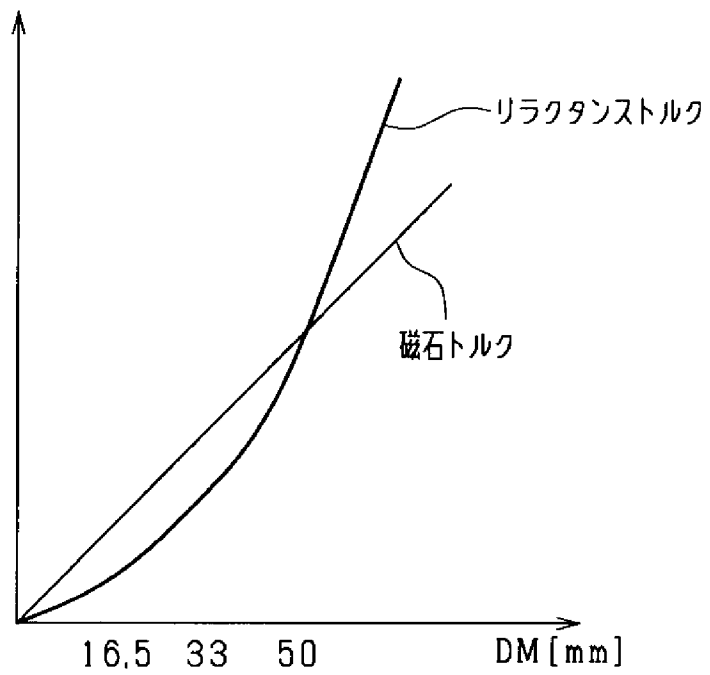
[図44]



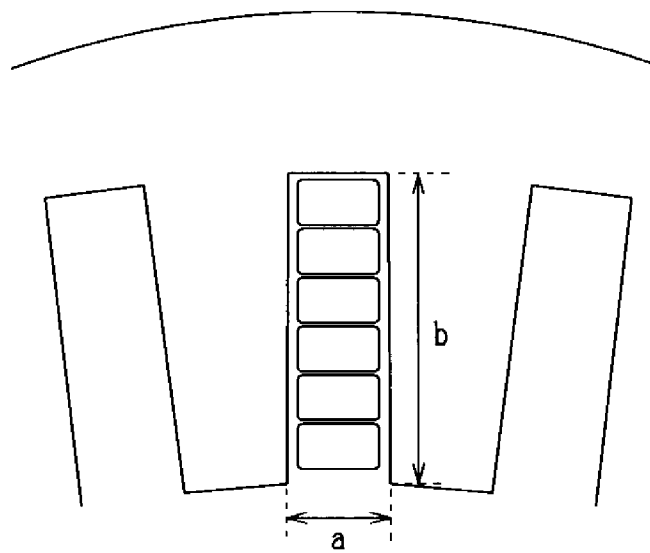
[図45]



[図46]



[図47]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/026160

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl. H02K21/22 (2006.01) i, H02K1/27 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl. H02K21/22, H02K1/27

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996

Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2019

Registered utility model specifications of Japan 1996-2019

Published registered utility model applications of Japan 1994-2019

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 6-78506 A (AIWA CO., LTD.) 18 March 1994, paragraphs [0016]-[0025], [0038]-[0041], fig. 1, 4 (Family: none)	1-4
A	Microfilm of the specification and drawings annexed to the request of Japanese Utility Model Application No. 125538/1990 (Laid-open No. 86058/1992) (SHINKO ELECTRIC CO., LTD.) 27 July 1992, specification, page 6, line 1 to page 8, line 5, fig. 1 (Family: none)	1-4
A	JP 2000-295811 A (SEIKO INSTRUMENTS INC.) 20 October 2000, paragraphs [0018]-[0028], [0039]-[0043], fig. 1, 3, 5 (Family: none)	1-4

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"I" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
28 August 2019 (28.08.2019)

Date of mailing of the international search report
10 September 2019 (10.09.2019)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. H02K21/22(2006.01)i, H02K1/27(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. H02K21/22, H02K1/27

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2019年
日本国実用新案登録公報	1996-2019年
日本国登録実用新案公報	1994-2019年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 6-78506 A（アイワ株式会社）1994.03.18, 段落[0016]-[0025], [0038]-[0041], 図1, 4（ファミリーなし）	1-4
A	日本国実用新案登録出願 2-125538 号（日本国実用新案登録出願公開 4-86058 号）の願書に添付した明細書及び図面の内容を撮影したマイ クロフィルム（神鋼電機株式会社）1992.07.27, 明細書第6ページ第1行-第8ページ第5行, 第1図 （ファミリーなし）	1-4

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

28.08.2019

国際調査報告の発送日

10.09.2019

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（ISA/J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

田村 恵里加

3 V

4788

電話番号 03-3581-1101 内線 3357

C（続き）． 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2000-295811 A（セイコーインスツルメンツ株式会社） 2000. 10. 20, 段落[0018]-[0028], [0039]-[0043], 図 1, 3, 5（ファミリーなし）	1-4