

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7354537号
(P7354537)

(45)発行日 令和5年10月3日(2023.10.3)

(24)登録日 令和5年9月25日(2023.9.25)

(51)国際特許分類

F I

H 0 2 K 3/47 (2006.01) H 0 2 K 3/47

H 0 2 K 3/04 (2006.01) H 0 2 K 3/04 E

請求項の数 5 (全68頁)

(21)出願番号	特願2018-238835(P2018-238835)	(73)特許権者	000004260
(22)出願日	平成30年12月20日(2018.12.20)		株式会社デンソー
(65)公開番号	特開2019-122248(P2019-122248 A)		愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地
(43)公開日	令和1年7月22日(2019.7.22)	(74)代理人	100121821
審査請求日	令和2年6月26日(2020.6.26)		弁理士 山田 強
(31)優先権主張番号	特願2017-255078(P2017-255078)	(74)代理人	100139480
(32)優先日	平成29年12月28日(2017.12.28)		弁理士 日野 京子
(33)優先権主張国・地域又は機関	日本国(JP)	(74)代理人	100125575
前置審査			弁理士 松田 洋
		(74)代理人	100175134
			弁理士 北 裕介
		(74)代理人	100207859
			弁理士 塩谷 尚人
		(72)発明者	高橋 裕樹
			愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地 株式
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 回転電機

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

磁石部（412）を有する界磁子（410）と、多相の電機子巻線（421）を有する電機子（420）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軸（401）と共に回転する回転電機（400）であって、

前記電機子巻線は、複数の素線（441）が束ねられ、かつその素線の長手方向に一樣に撚られた状態の導線部（423）により構成されており、軸方向両端側となるコイルエンド（426）において、前記導線部が径方向内外のいずれかにそれぞれ折り曲げられており、

前記コイルエンドよりも軸方向内側のコイルサイド（425）から軸方向に延びる巻線部分と、前記コイルエンドで径方向に延びる巻線部分との間において前記折り曲げにより湾曲状態となった部分が湾曲部分であり、

前記コイルエンドにおける前記湾曲部分は、湾曲の外側に膨らんだ形状をなし、かつ当該コイルエンドにおける前記湾曲部分以外の部位と前記コイルサイドとに比べて前記導線部内における前記素線どうしの間の離間距離が大きい部分を有している回転電機。

【請求項2】

前記導線部は、前記複数の素線を囲む状態で設けられる外側絶縁層（442）と、前記外側絶縁層の内側において前記各素線の周りに形成された中間絶縁層（443）とを有し、前記湾曲部分における径方向内外で前記素線が複数の重なる状態となっており、

前記湾曲部分では、湾曲部分以外の他部分に比べて、当該湾曲部分における径方向内外

の前記素線どうしの間の前記中間絶縁層が厚くなっている請求項 1 に記載の回転電機。

【請求項 3】

前記素線は、導体部（4 4 1 a）と、その導体部を絶縁材で囲む素線絶縁層（4 4 1 b）とを有し、

前記導線部は、前記湾曲部分において、前記コイルサイドに比べて前記導線部内における前記導体部どうしの間の絶縁厚さが大きくなっている請求項 1 又は 2 に記載の回転電機。

【請求項 4】

前記導線部は、前記湾曲部分において、前記コイルサイドに比べて導線断面積が大きくなっている請求項 1 ～ 3 のいずれか 1 項に記載の回転電機。

【請求項 5】

前記導線部は、前記コイルエンドにおいて、折り曲げ状態での軸方向の突出高さが相ごとに異なっている請求項 1 ～ 4 のいずれか 1 項に記載の回転電機。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

この明細書における開示は、回転電機に関する。

【背景技術】

【0 0 0 2】

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。電機子巻線では、周方向に各相の導線部が所定間隔で配置され、軸方向両端のコイルエンドで、同相の導線部どうしが接続される構成となっている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0 0 0 3】

【文献】特開 2 0 1 4 - 9 3 8 5 9 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0 0 0 4】

ところで、電機子巻線では、例えば複数の素線を束ねた束線を導線部として用いることで、界磁子の磁石部に径方向に対向する部分であるコイルサイドでの導体密度を高めて銅損の低減が図られている。これに対して、コイルサイドよりも軸方向外側となる部分であるコイルエンドにおいては未だ改善の余地があると考えられる。

【0 0 0 5】

本発明は、上記事情に鑑みてなされたものであり、電機子巻線の構成の適正化を図ることができる回転電機を提供することを目的とするものである。

【課題を解決するための手段】

【0 0 0 6】

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。

【0 0 0 7】

手段 1 は、

磁石部を有する界磁子と、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軸と共に回転する回転電機であって、

前記電機子巻線は、複数の素線を束ねた導線部により構成されており、軸方向両端側となるコイルエンドにおいて、そのコイルエンドよりも軸方向内側のコイルサイドに比べて前記導線部内における前記素線どうしの間の離間距離が大きい部分を有している。

【0 0 0 8】

上記構成の回転電機では、電機子巻線のコイルエンドに、コイルサイドに比べて素線ど

10

20

30

40

50

うしの間の離間距離が大きい部分が設けられている。これにより、コイルサイドでの導体密度を高めて銅損の低減を図りつつも、コイルエンドでの渦損低減や冷却性向上を図ることができる。この場合、コイルエンドでは、コイルサイドに比べて導線部の集約度（例えば導線配置スペースでの導体密度）を高める必要がなく、素線どうしの間の離間距離を大きくすることによって、電機子巻線における電気特性の向上や放熱性能の向上を好適に実現することができる。その結果、電機子巻線の構成の適正化を図ることができる。

【0009】

コイルエンドにおいて導線部内での素線どうしの間の離間距離が大きくなっている構成であれば、そのコイルエンドにおいて空気や液状冷媒による冷却が行われる場合にあって、温度変化に伴う膨張収縮により生じる素線どうしの摩擦応力を軽減できる。そのため、導線部内において絶縁状態を適正に維持することができる。

10

【0010】

なお、電機子巻線において、コイルサイドは、界磁子の磁石部に径方向に対向する部分である。また、コイルエンドは、コイルサイドよりも軸方向外側となる部分であり、相巻線を周方向に周回させる周回部分である。

【0011】

手段2は、手段1において、前記導線部は、前記コイルエンドにおいて径方向内外のいずれかにそれぞれ折り曲げられており、その折り曲げられた湾曲部分において、前記コイルサイドに比べて前記導線部内における前記素線どうしの間の離間距離が大きくなっている。

20

【0012】

複数の素線の集合体である導線部を曲げ加工する際には、それら複数の素線のまとまりが弱まり、折り曲げ後の状態において素線間の離間距離が大きくなる部分が生じることが考えられる。したがって、導線部の湾曲部分では、曲げ加工により素線どうしの間の離間距離を部分的に大きくすることができ、上記のとおり優れた効果を有する電機子巻線を簡易に作製することができる。

【0013】

手段3は、手段2において、前記素線は、導体部と、その導体部を絶縁材で囲む素線絶縁層とを有し、前記導線部は、前記湾曲部分において、前記コイルサイドに比べて前記導線部内における前記導体部どうしの間の絶縁厚さが大きくなっている。

30

【0014】

上記構成によれば、導線部の湾曲部分で、コイルサイドに比べて導線部内における導体部どうしの間の絶縁厚さが大きくなっている。この場合、やはり上記のとおり電機子巻線における電気特性の向上や放熱性能の向上を好適に実現することができる。

【0015】

手段4は、手段2又は3において、前記導線部は、前記湾曲部分において、前記コイルサイドに比べて導線断面積が大きくなっている。

【0016】

この場合、電機子巻線のコイルエンドにおいて、コイルサイドよりも素線どうしの間の離間距離が大きい部分を容易に作製することができる。

40

【0017】

手段5は、手段1～4のいずれか1つにおいて、前記導線部は、前記コイルエンドにおいて径方向内外のいずれかにそれぞれ折り曲げられており、その折り曲げ状態において相ごとに前記コイルエンドにおける軸方向の突出高さが異なっている。

【0018】

この場合、周方向に所定順序で各相の相巻線が並べて配置される構成において、コイルエンドでの互いの干渉を回避しつつ各相の相巻線を配置することができる。

【0019】

手段6は、手段1～5のいずれか1つにおいて、前記導線部は、前記コイルエンドにおいて径方向内外のいずれかにそれぞれ折り曲げられており、その折り曲げられた湾曲部分

50

において前記複数の素線が燃られていない構成となっている。

【0020】

この場合、電機子巻線の導線部は、コイルエンドでの湾曲部分において複数の素線が燃られていない構成となっているため、その湾曲部分において複数の素線が燃られている構成と比べて、曲げ加工により生じる各素線の捻じり応力を抑制できる。

【0021】

手段7は、手段1～5のいずれか1つにおいて、前記導線部は、前記コイルエンドにおいて径方向内外のいずれかにそれぞれ折り曲げられており、その折り曲げられた湾曲部分において前記複数の素線が燃られておらず、前記湾曲部分以外において前記複数の素線が燃られている構成となっている。

【0022】

この場合、電機子巻線の導線部は、コイルエンドでの湾曲部分において複数の素線が燃られていない構成となっているため、その湾曲部分において複数の素線が燃られている構成と比べて、曲げ加工により生じる各素線の捻じり応力を抑制できる。また、湾曲部分以外においては、複数の素線が燃られていることで、高調波渦電流などを好適に打ち消すことができる。

【0023】

なお、手段6、7では、導線部における複数の素線が、湾曲部分の内径側（最も曲率の小さい側）の素線群と、外径側（最も曲率の大きい側）の素線群と、それらの間の素線群とを有する場合に、少なくとも湾曲部分の内径側の素線群と外径側の素線群との少なくとも

【0024】

手段8は、手段1～5のいずれか1つにおいて、前記導線部は、少なくとも1組の前記素線を燃った素線集合体を有している。

【0025】

この場合、導線部が、少なくとも1組の素線を燃った素線集合体として構成されていることで、高調波渦電流などを好適に打ち消すことができる。つまり、各素線にて渦電流が生じる場合に、その渦電流を打ち消す磁界を生じさせて渦電流を小さくすることができる。なお、導線部は、全ての素線が燃られている構成か、又は一部の素線が燃られている構成であるとよい。

【図面の簡単な説明】

【0026】

【図1】回転電機の縦断面斜視図。

【図2】回転電機の縦断面図。

【図3】図2のIII-III線断面図。

【図4】図3の一部を拡大して示す断面図。

【図5】回転電機の分解図。

【図6】インバータユニットの分解図。

【図7】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。

【図8】回転子及び固定子の横断面図。

【図9】図8の一部を拡大して示す図。

【図10】固定子の横断面図。

【図11】固定子の縦断面図。

【図12】固定子巻線の斜視図。

【図13】導線の構成を示す斜視図。

【図14】素線の構成を示す模式図。

【図15】 n 層目における各導線の形態を示す図。

【図16】 n 層目と $n+1$ 層目の各導線を示す側面図。

【図17】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。

【図18】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。

10

20

30

40

50

- 【図 19】回転電機の制御システムの電気回路図。
【図 20】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。
【図 21】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。
【図 22】第 2 実施形態における回転子及び固定子の横断面図。
【図 23】図 22 の一部を拡大して示す図。
【図 24】磁石ユニットにおける磁束の流れを具体的に示す図。
【図 25】変形例 1 における固定子の断面図。
【図 26】変形例 1 における固定子の断面図。
【図 27】変形例 2 における固定子の断面図。
【図 28】変形例 3 における固定子の断面図。
【図 29】変形例 4 における固定子の断面図。
【図 30】変形例 7 における回転子及び固定子の横断面図。
【図 31】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。
【図 32】キャリア周波数変更処理の手順を示すフローチャート。
【図 33】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。
【図 34】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。
【図 35】変形例 10 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。
【図 36】図 35 の一部を拡大して示す図。
【図 37】インナロータ型の回転電機の縦断面図。
【図 38】インナロータ型の回転電機の概略構成を示す縦断面図。
【図 39】変形例 11 においてインナロータ構造の回転電機の構成を示す図。
【図 40】変形例 11 においてインナロータ構造の回転電機の構成を示す図。
【図 41】変形例 12 において回転電機子形の回転電機の構成を示す図。
【図 42】変形例 14 における導線の構成を示す断面図。
【図 43】変形例 15 においてアウトロータ式の回転電機の概略構成を示す縦断面図。
【図 44】固定子の構成を示す平面図。
【図 45】固定子の構成を示す斜視図。
【図 46】固定子巻線の構成を示す斜視図。
【図 47】固定子の側面図。
【図 48】導線の断面構造を示す図。
【図 49】固定子巻線を固定子コアに組み付けた状態での部分断面構造を示す図。
【図 50】導線の一部を示す外観図。
【図 51】導線の構成を示す略図。
【図 52】導線の構成を示す略図。
【図 53】リラクランストルク、磁石トルク及び DM の関係を示す図。
【図 54】ティースを示す図。
【発明を実施するための形態】

【0027】

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。

【0028】

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。

【0029】

(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 II-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。

【0030】

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。

【0031】

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。

【0032】

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、リテーナは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。

【0033】

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。

【0034】

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 41 の径方向内側に設けられた環状の磁石ユニット 42 とを有している。磁石ホルダ 41 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 41 は、円筒状をなす円筒部 43 と、同じく円筒状をなしかつ円筒部 43 よりも小径の固定部（attachment）44 と、それら円筒部 43 及び固定部 44 を繋ぐ部位となる中間部 45 とを有している。円筒部 43 の内周面に磁石ユニット 42 が取り付けられている。

【0035】

なお、磁石ホルダ 41 は、機械強度が充分な冷間圧延鋼板（SPCC）や、鍛造用鋼、

10

20

30

40

50

炭素繊維強化プラスチック（CFRP）等により構成されている。

【0036】

固定部44の貫通孔44aには回転軸11が挿通される。貫通孔44a内に配置された回転軸11に対して固定部44が固定されている。つまり、固定部44により、回転軸11に対して磁石ホルダ41が固定されている。なお、固定部44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11に対して固定されているとよい。これにより、回転子40が回転軸11と一体に回転する。

【0037】

また、固定部44の径方向外側には、軸受ユニット20の軸受21, 22が組み付けられている。上述のとおり軸受ユニット20はハウジング30の端面32に固定されているため、回転軸11及び回転子40は、ハウジング30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30内において回転子40が回転自在となっている。

【0038】

回転子40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44が設けられており、これにより、回転子40が回転軸11に片持ち支持されている。ここで、回転子40の固定部44は、軸受ユニット20の軸受21, 22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40は、磁石ホルダ41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21, 22により回転可能に支持されている。そのため、回転子40が回転軸11に片持ち支持される構造であっても、回転子40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。

【0039】

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。

【0040】

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21, 22ともに、外輪25と内輪26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。

【0041】

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。

【0042】

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。

【0043】

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。

【0044】

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。

【0045】

上述した中間部 4 5 の構成によれば、回転子 4 0 には、径方向において固定部 4 4 を囲みかつ中間部 4 5 の内寄りとなる位置に、軸受ユニット 2 0 の一部を収容する軸受収容凹部 4 6 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 4 6 を囲みかつ中間部 4 5 の外寄りとなる位置に、後述する固定子 5 0 の固定子巻線 5 1 のコイルエンド 5 4 を収容するコイル収容凹部 4 7 が形成されている。そして、これら各収容凹部 4 6, 4 7 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 2 0 の一部と、固定子巻線 5 1 のコイルエンド 5 4 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 1 0 において軸方向の長さ寸法の短縮が可能となっている。

【0046】

中間部 4 5 は、回転軸 1 1 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 4 5 に、軸方向に延び、固定子 5 0 の固定子巻線 5 1 のコイルエンド 5 4 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 4 5 が張出部に相当する。

【0047】

コイルエンド 5 4 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 5 4 の軸方向寸法を小さくすることができ、固定子 5 0 の軸長を短縮することが可能である。コイルエンド 5 4 の曲げ方向は、回転子 4 0 との組み付けを考慮したものであるとよい。回転子 4 0 の径方向内側に固定子 5 0 を組み付けることを想定すると、その回転子 4 0 に対する挿入先端側では、コイルエンド 5 4 が径方向内側に曲げられるとよい。コイルエンド 5 4 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。

【0048】

また、磁石部としての磁石ユニット 4 2 は、円筒部 4 3 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 4 2 は、周方向に複数の磁極を有する。ただし、磁石ユニット 4

10

20

30

40

50

2の詳細については後述する。

【0049】

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51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52とを有しており、固定子巻線51が、所定のエアギャップを挟んで円環状の磁石ユニット42に対向するように配置されている。固定子巻線51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51が6相の相巻線として構成されている。

10

【0050】

固定子コア52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51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51が電機子巻線に相当し、固定子コア52が電機子コアに相当する。

【0051】

固定子巻線51は、径方向において固定子コア52に重複する部分であり、かつ固定子コア52の径方向外側となるコイルサイド部53と、軸方向において固定子コア52の一端側及び他端側にそれぞれ張り出すコイルエンド54、55とを有している。コイルサイド部53は、径方向において固定子コア52と回転子40の磁石ユニット42にそれぞれ対向している。回転子40の内側に固定子50が配置された状態では、軸方向両側のコイルエンド54、55のうち軸受ユニット20の側（図の上側）となるコイルエンド54が、回転子40の磁石ホルダ41により形成されたコイル収容凹部47に収容されている。ただし、固定子50の詳細については後述する。

20

【0052】

インバータユニット60は、ハウジング30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61と、そのユニットベース61に組み付けられる複数の電気コンポーネント62とを有している。ユニットベース61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61は、ハウジング30の開口33の縁に対して固定されるエンドプレート63と、そのエンドプレート63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。

30

【0053】

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。

40

【0054】

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。

【0055】

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

50

、コンデンサモジュール 68 を具備する構成となっている。

【0056】

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。

【0057】

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。

【0058】

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。

【0059】

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。

【0060】

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。

【0061】

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 68a を複数備えている。具体的には、コンデンサ 68a 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 68a が環状に並べて配置されることで構成されている。

【0062】

なお、コンデンサ 68a 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 68a が作製される。

【0063】

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

10

20

30

40

50

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 66A が電気コンポーネント 62 に設けられている。

【0064】

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 66A 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 66A 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。

10

【0065】

半導体モジュール群 66A 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 69 は、半導体モジュール群 66A 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 69 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 71 の内周面の横断面形状をコンデンサモジュール 68 と同じ 12 角形にすることも可能である。この場合、スペーサ 69 の内周面及び外周面がいずれも平坦面であるとよい。

20

【0066】

また、本実施形態では、ケーシング 64 の筒状部 71 に、冷却水を流通させる冷却水通路 74 が形成されており、半導体モジュール 66 で生じた熱は、冷却水通路 74 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 64 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 74 は、電気コンポーネント 62（半導体モジュール 66 及びコンデンサモジュール 68）を囲むように環状に形成されている。半導体モジュール 66 は筒状部 71 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 66 に対して径方向内外に重なる位置に冷却水通路 74 が設けられている。

【0067】

筒状部 71 の外側には固定子 50 が配置され、内側には電気コンポーネント 62 が配置されていることから、筒状部 71 に対しては、その外側から固定子 50 の熱が伝わりとともに、内側から電気コンポーネント 62 の熱（例えば半導体モジュール 66 の熱）が伝わることになる。この場合、固定子 50 と半導体モジュール 66 とを同時に冷やすことが可能となっており、回転電機 10 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。

30

【0068】

更に、固定子巻線 51 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 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されている。望ましくは、1 つの半導体モジュール 66 の全体が固定子コア 52 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 66 の全体が固定子コア 52 に囲まれた領域内に配置されている。

40

【0069】

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。

【0070】

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

50

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。

【0071】

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と電気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

10

【0072】

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。

20

【0073】

また、コンデンサモジュール68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11が配置されることから、コンデンサモジュール68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11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。

【0074】

配線モジュール76には、円板状の制御基板67が取り付けられている。制御基板67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（PCB）を有しており、そのボード上には各種ICや、マイコン等からなる制御部に相当する制御装置77が実装されている。制御基板67は、ネジ等の固定具により配線モジュール76に固定されている。制御基板67は、その中央部に、回転軸11を挿通させる挿通孔67aを有している。

30

【0075】

なお、配線モジュール76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68に面する。配線モジュール76は、その第2面に、制御基板67を設けている。制御基板67の両面の一方側から他方側に配線モジュール76のバスバー76c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67には、バスバー76c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67の外縁部の一部が切り欠かれているとよい。

40

【0076】

上述のとおり、ケーシング64に囲まれた空間内に電気コンポーネント62が収容され、その外側に、ハウジング30、回転子40及び固定子50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PWM制御を利用して各半導体モジュール66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62の径方向外側のハウジング30、回転子40、固定子50等により好適にシールドできる。

【0077】

50

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。

10

【0078】

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。

20

【0079】

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 X1、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 X2 とすると、第 1 領域 X1 の横断面の面積は、第 2 領域 X2 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 X1 の容積が第 2 領域 X2 の容積よりも大きい構成となっている。

30

【0080】

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 X1 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 X2 よりも容積が大きい構成となっている。

【0081】

次いで、回転子 40 及び固定子 50 の構成をより詳しく説明する。

【0082】

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。

40

【0083】

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

50

れる。

【0084】

また、一般的に、回転電機におけるIPM (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。

【0085】

図7は、固定子巻線の起磁力を示すアンペアターン [AT] とトルク密度 [Nm/L] との関係を示すトルク線図である。破線が一般的なIPM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A1で制限されることになる。

【0086】

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10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50においてスロットレス構造を採用し、かつIPMロータのq軸コア部分で生じる磁気飽和をなくすべく、SPM (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、SPM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40の磁石ユニット42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。

【0087】

また、第3の工夫として、固定子巻線51のコイルサイド部53において導線の固定子50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42に対向する固定子巻線51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51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。

【0088】

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。

【0089】

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

10

20

30

40

50

い。

【0090】

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。

【0091】

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。

【0092】

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。

【0093】

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の封止前の状態で言えば、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81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57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57は導線間部材（conductor-to-conductor member）ともいう。

【0094】

なお、周方向に並ぶ各導線群81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81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81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。

【0095】

図10に示すように、固定子巻線（すなわち電機子巻線）51は、所定の厚みT2（以

10

20

30

40

50

下、第1寸法とも言う)と幅 $W2$ (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 $T2$ は、固定子巻線51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 $W2$ は、固定子巻線51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51の一部分の固定子巻線51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81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81の端から端までの幅 $W2$ である。そして、厚み $T2$ は幅 $W2$ より小さくなっている。

【0096】

なお、厚み $T2$ は、幅 $W2$ 内に存在する2つの導線群81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51(より詳しくは導線82)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50の径方向に沿った導線82の断面のうち、その断面において固定子50の径方向の最大の長さを $W12$ 、同断面のうち固定子50の周方向の最大の長さを $W11$ としても良い。

【0097】

図10及び図11に示すように、固定子巻線51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57により封止されている。つまり、固定子巻線51は、固定子コア52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。

【0098】

図10の横断面で見れば、封止部材57は、各導線群81の間、すなわち間隙56に合成樹脂材が充填されて設けられており、封止部材57により、各導線群81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56において封止部材57が絶縁部材として機能する。封止部材57は、固定子コア52の径方向外側において、各導線群81を全て含む範囲、すなわち径方向の厚さ寸法が各導線群81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。

【0099】

また、図11の縦断面で見れば、封止部材57は、固定子巻線51のターン部84を含む範囲で設けられている。固定子巻線51の径方向内側では、固定子コア52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57が設けられている。この場合、固定子巻線51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。

【0100】

封止部材57が固定子コア52の端面を含む範囲で設けられた構成では、封止部材57により、固定子コア52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57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52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52の内周面を含む固定子コア52の全体を樹脂封止する構成であってもよい。

【0101】

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57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51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。

【0102】

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

10

20

30

40

50

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 5 1 に対する通電電流を増加して回転電機 1 0 のトルク増加を図る上で、有利な構成となっている。

【0103】

本実施形態では、固定子 5 0 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 5 0 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 1 mH 前後であるのに対し、本実施形態の固定子 5 0 ではインダクタンスが 5 ～ 60 μ H 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 1 0 10

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

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。

【0104】

固定子コア 5 2 の径方向外側における各導線群 8 1 は、断面が扁平矩形状をなす複数の導線 8 2 が固定子コア 5 2 の径方向に並べて配置されて構成されている。各導線 8 2 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 8 1 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。

【0105】

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 1 0 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 W A、隣り合う導線 8 2 の間となる導線間領域を W B とすると、導線領域 W A は、導線間領域 W B より周方向において大きいものとなっている。

【0106】

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 8 1）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。

【0107】

10

20

30

40

50

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。

【0108】

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。

【0109】

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。

【0110】

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81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82が相互に固着されている。これにより、導線82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。

【0111】

本実施形態では、導体82aが複数の素線(wire)86の集合体として構成されている。具体的には、図13に示すように、導体82aは、複数の素線86を撚ることで撚糸状に形成されている。また、図14に示すように、素線86は、細い繊維状の導電材87を束ねた複合体として構成されている。例えば、素線86はCNT（カーボンナノチューブ）繊維の複合体であり、CNT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、CNT繊維以外に、気相成長法炭素繊維（VGCF）等を用いることができるが、CNT繊維を用いることが好ましい。なお、素線86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86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。

【0112】

導線82は、固定子巻線51においてn相の巻線を構成する。そして導線82（すなわち、導体82a）の各々の素線86は、互いに接触状態で隣接している。導線82は、巻線導体が、複数の素線86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86間の抵抗値が素線86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86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86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82が複数の素線86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86を覆う素線集合体となっても良い。また、導線82の導体82aは、撚り合わされた複数の素線86により構成されている。

【0113】

上記の導体82aでは、複数の素線86が撚り合わされて構成されているため、各素線86での渦電流の発生が抑えられ、導体82aにおける渦電流の低減を図ることができる。また、各素線86が捻られていることで、1本の素線86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86を繊維状の導電材87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。

【0114】

なお、ここでいう素線86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86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86間の抵抗値が、素線86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86を作成する製造設備と、回転電機10の固定子50（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86が酸化し、接触抵抗を増やすことができ、好適である。

【0115】

上述のとおり導線82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86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82における絶縁被膜82bの厚さを例えば80 μm ～100 μm とし、一般に使用される導線の被膜厚さ（5～40 μm ）よりも厚肉とした場合、導線82と固定子コア52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。

【0116】

また、絶縁被膜82bは、素線86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86の高分子絶縁層の厚さを例えば5 μm 程度にした場合、導線82の絶縁被膜82bの厚さを80 μm ～100 μm 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。

【0117】

また、導線82は、複数の素線86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82は、その全長において複数の素線86が撚られている構成、全長のうち一部で複数の素線86が撚られている構成、全長において複数の素線86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82は、複数の素線86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86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。

【0118】

各導線82は、固定子巻線51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51として相ごとの相巻線が形成されている。図12に示すように、固定子巻線51では、各導線82のうち軸方向に直線状に延びる直線部83によりコイルサイド部53が形成され、軸方向においてコイルサイド部53よりも両外側に突出するターン部84によりコイルエンド54、55が形成されている。各導線82は、直線部83とターン部84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83は、磁石ユニット42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42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83同士が、ターン部84により互いに接続されている。なお、直線部83が「磁石対向部」に相当する。

【0119】

本実施形態では、固定子巻線51が分布巻きにより円環状に巻回形成されている。この

10

20

30

40

50

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対の直線部 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。

【0120】

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。

【0121】

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。

【0122】

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。

【0123】

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 8 3 同士がターン部 8 4 により互いに接続されている。換言すると、各導線 8 2 __ A ~ 8 2 __ C では、いずれも回転子 4 0 の軸心を中心とする同一の円上において、固定子巻線 5 1 の周方向に隣接して並ぶ 7 個の直線部 8 3 の両端の二つが一つのターン部 8 4 により互いに接続されている。例えば第 1 導線 8 2 __ A では、一対の直線部 8 3 が $D 1$, $D 7$ にそれぞれ配置され、その一対の直線部 8 3 同士が、逆 V 字状のターン部 8 4 により接続されている。また、他の導線 8 2 __ B, 8 2 __ 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 8 2 __ A ~ 8 2 __ C は、いずれも同じ層に配置されるため、ターン部 8 4 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 8 2 __ A ~ 8 2 __ C のターン部 8 4 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。

【0124】

具体的には、各導線 8 2 __ A ~ 8 2 __ C のターン部 8 4 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 8 4 a と、傾斜部 8 4 a からその同一の円よりも径方向内側（図 1 5（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 8 4 b、第 2 の円上で周方向に延びる傾斜部 8 4 c 及び第 1 の円から第 2 の円に戻る戻り部 8 4 d とを有している。頂部 8 4 b、傾斜部 8 4 c 及び戻り部 8 4 d が干渉回避部に相

10

20

30

40

50

当する。なお、傾斜部 8 4 c は、傾斜部 8 4 a に対して径方向外側にシフトする構成であってもよい。

【0125】

つまり、各導線 8 2 __ A ~ 8 2 __ C のターン部 8 4 は、周方向の中央位置である頂部 8 4 b を挟んでその両側に、一方側の傾斜部 8 4 a と他方側の傾斜部 8 4 c とを有しており、それら各傾斜部 8 4 a , 8 4 c の径方向の位置 (図 1 5 (a) では紙面前後方向の位置、図 1 5 (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 8 2 __ A のターン部 8 4 は、n 層の D 1 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 8 4 b 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。

10

【0126】

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。

【0127】

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。

20

【0128】

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。

30

【0129】

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。

【0130】

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 8 2 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。

【0131】

次に、回転子 4 0 における磁石ユニット 4 2 の構造について説明する。本実施形態では、磁石ユニット 4 2 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 $H_{c_j} = 400$ [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_{c_j} 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 ~ 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、 $H_{c_j} = 10000$ [A] となり、減磁をしないことが伺える。

40

【0132】

50

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 [μm] 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。

【0133】

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レイウムを利用して、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。

【0134】

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°C 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°C 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°C 近い温度状態から、先述の砂漠温度を超える 60°C 以上、又はコイルエナメル被膜の耐熱温度 $180 \sim 240^\circ\text{C}$ 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、半分以下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。

【0135】

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 $10 \mu\text{m}$ 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。

【0136】

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 1.2 T以上で、第1磁石91および第2磁石92の結晶粒径が $10 \mu\text{m}$ 以下であり、配向率を α とした場合、 $J_s \times \alpha$ が 1.0 T（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

10

20

30

40

50

ている場合には、残りの一つの方向 A 1 0 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 9 1 と第 2 磁石 9 2 を形成しているが、上記条件が満足されれば、第 1 磁石 9 1 と第 2 磁石 9 2 は他の方法により成形してもよい。例えば、MQ 3 磁石などを形成する方法を採用することができる。

【0137】

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、本願発明者は、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。

【0138】

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。

【0139】

図 8 及び図 9 に示すように、磁石ユニット 4 2 は、円環状をなしており、磁石ホルダ 4 1 の内側（詳しくは円筒部 4 3 の径方向内側）に設けられている。磁石ユニット 4 2 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 9 1 及び第 2 磁石 9 2 を有している。第 1 磁石 9 1 及び第 2 磁石 9 2 は周方向に交互に配置されている。第 1 磁石 9 1 は、固定子巻線 5 1 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 9 2 は、固定子巻線 5 1 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 9 1 及び第 2 磁石 9 2 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。

【0140】

各磁石 9 1, 9 2 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 9 1, 9 2 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 4 2 の径方向とされ、q 軸側では円環状の磁石ユニット 4 2 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 9 1, 9 2 のそれぞれは、図 9 に示すように、第 1 部分 2 5 0 と、磁石ユニット 4 2 の周方向において第 1 部分 2 5 0 の両側に位置する二つの第 2 部分 2 6 0 とを有する。言い換えれば、第 1 部分 2 5 0 は、第 2 部分 2 6 0 より d 軸に近く、第 2 部分 2 6 0 は、第 1 部分 2 5 0 より q 軸に近い。そして、第 1 部分 2 5 0 の磁化容易軸 3 0 0 の方向は、第 2 部分 2 6 0 の磁化容易軸 3 1 0 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 4 2 が構成されている。言い換えれば、第 1 部分 2 5 0 の磁化容易軸 3 0 0 が d 軸となす角度 $\theta 1 1$ が、第 2 部分 2 6 0 の磁化容易軸 3 1 0 が q 軸となす角度 $\theta 1 2$ よりも小さくなるように磁石ユニット 4 2 が構成されている。

【0141】

より詳細には、角度 $\theta 1 1$ は、d 軸において固定子 5 0（電機子）から磁石ユニット 4 2 に向かう方向を正とした時に、d 軸と磁化容易軸 3 0 0 とがなす角度である。角度 $\theta 1 2$ は、q 軸において固定子 5 0（電機子）から磁石ユニット 4 2 に向かう方向を正とした時に、q 軸と磁化容易軸 3 1 0 とがなす角度である。なお角度 $\theta 1 1$ 及び角度 $\theta 1 2$ 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。

【0142】

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91, 92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。

【0143】

また、磁石91, 92では、各磁石91, 92の周面のうち固定子50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。

【0144】

磁石ユニット42では、各磁石91, 92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17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18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10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42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17及び図18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17及び図18において、横軸の90°はd軸(すなわち磁極中心)を示し、横軸の0°, 180°はq軸を示す。

【0145】

つまり、上記構成の各磁石91, 92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になる磁石91, 92を好適に実現することができる。

【0146】

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、ハルバッ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。

【0147】

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51に発生する渦電流が増加してしまう。また、固定子巻線51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。

【0148】

磁石ユニット42では、各磁石91, 92のd軸付近(すなわち磁極中心)において、固定子50側の磁束作用面280に直交する向きで磁束が生じ、その磁束は、固定子50側の磁束作用面280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10では、上述のとおり各導線群81を径方向に薄くしたため、導線群81の径方向の中心位置が磁石ユニット42の磁束作用面に近づくことになり、固定子50において回転子40から強い磁石磁束を受けることができる。

【0149】

また、固定子50には、固定子巻線51の径方向内側、すなわち固定子巻線51を挟んで回転子40の逆側に円筒状の固定子コア52が設けられている。そのため、各磁石91, 92の磁束作用面から延びる磁束は、固定子コア52に引きつけられ、固定子コア52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。

【0150】

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。

【0151】

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ユニットを製作する第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ユニットを製作する第3工程と、
 - ・第2ユニットの径方向内側に第1ユニットを装着する第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。

【0152】

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。

【0153】

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。

【0154】

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。

【0155】

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。

【0156】

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

10

20

30

40

50

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。

【0157】

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。

【0158】

図 19 では、固定子巻線 51 として 2 組の 3 相巻線 51a, 51b 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。

【0159】

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 に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 に示すコンデンサモジュール 68 に相当する。

【0160】

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。

【0161】

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 Sp と下アームスイッチ Sn 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 Sp 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 Sn 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 Sp と下アームスイッチ Sn 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。

【0162】

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 Sp と下アームスイッチ Sn 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 Sp 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 Sn 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 Sp と下アームスイッチ Sn 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にて互いに接続されている。

【0163】

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,

10

20

30

40

50

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。

【0164】

図20において、電流指令値設定部111は、トルク-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。

【0165】

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。

【0166】

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。

【0167】

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。

【0168】

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。

【0169】

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。

【0170】

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。

【0171】

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。

【0172】

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

10

20

30

40

50

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。

【0173】

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。

【0174】

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。

【0175】

トルク推定部 128 a 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 128 a 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。

【0176】

トルクフィードバック制御部 129 a 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 129 a 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。

【0177】

操作信号生成部 130 a 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 130 a 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。

【0178】

ちなみに、操作信号生成部 130 a 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。

【0179】

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 128 b は、d q 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。

【0180】

トルクフィードバック制御部 129 b 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 129 b 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。

【0181】

操作信号生成部 130 b 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 130 b 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 130 a、130 b にて生成されたスイッチ操作信号に

10

20

30

40

50

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。

【0182】

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。

【0183】

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。

【0184】

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。

【0185】

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。

【0186】

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。

【0187】

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。

【0188】

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 4 1 を経由して軸電流の閉回路が形成される場合にあつては、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 2 1, 2 2 の電食の抑制を図ることができる。

【0189】

回転子 4 0 を挟んで軸方向の一方側においてハウジング 3 0 に対して軸受ユニット 2 0 の保持部材 2 3 が固定されるとともに、他方側においてハウジング 3 0 及びユニットベース 6 1 (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 1 1 の軸方向においてその軸方向の片側に各軸受 2 1, 2 2 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 6 1 がハウジング 3 0 を介して回転軸 1 1 に繋がる構成となるため、ユニットベース 6 1 を、回転軸 1 1 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 6 1 とハウジング 3 0 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 6 1 と回転軸 1 1 とが電氣的に一層離れた構成となる。これにより、軸受 2 1, 2 2 の電食を適正に抑制することができる。

【0190】

本実施形態の回転電機 1 0 では、各軸受 2 1, 2 2 の片側配置等により、軸受 2 1, 2 2 に作用する軸電圧が低減されている。また、回転子 4 0 と固定子 5 0 との間の電位差が低減されている。そのため、軸受 2 1, 2 2 において導電性グリースを用いなくても、軸受 2 1, 2 2 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 2 1, 2 2 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 2 1, 2 2 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 1 0 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。

【0191】

第 3 の電食対策では、固定子巻線 5 1 を固定子コア 5 2 と共にモールド材によりモールドすることで、固定子 5 0 での固定子巻線 5 1 の位置ずれを抑制する構成としている (図 1 1 参照)。特に本実施形態の回転電機 1 0 では、固定子巻線 5 1 における周方向の各導線群 8 1 の間に導線間部材 (ティース) を有していないため、固定子巻線 5 1 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 5 1 を固定子コア 5 2 と共にモールドすることにより、固定子巻線 5 1 の導線位置にずれが抑制される。したがって、固定子巻線 5 1 の位置ずれによる磁束の歪みや、それに起因する軸受 2 1, 2 2 の電食の発生を抑制することができる。

【0192】

なお、固定子コア 5 2 を固定するハウジング部材としてのユニットベース 6 1 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 6 1 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。

【0193】

その他、軸受 2 1, 2 2 の電食対策として、外輪 2 5 及び内輪 2 6 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 2 5 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。

【0194】

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。

【0195】

(第 2 実施形態)

本実施形態では、回転子 4 0 における磁石ユニット 4 2 の極異方構造を変更しており、以下に詳しく説明する。

【0196】

図 2 2 及び図 2 3 に示すように、磁石ユニット 4 2 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 4 2 は、磁化方向 (磁化ベクトル

10

20

30

40

50

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。

【0197】

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。

【0198】

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。

【0199】

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。

【0200】

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。

【0201】

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131において減磁が生じ易い部分を磁性体133に置き換えた構成となっている。

【0202】

図24(a)、図24(b)は、磁石ユニット42における磁束の流れを具体的に示す

10

20

30

40

50

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。

【0203】

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。

10

【0204】

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。

【0205】

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。

20

【0206】

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。

【0207】

なお、固定子コア 5 2 が電磁鋼板により構成される場合において、固定子コア 5 2 の径方向厚さは、磁石ユニット 4 2 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 5 2 の径方向厚さは、磁石ユニット 4 2 において磁極中心に設けられる第 1 磁石 1 3 1 の径方向厚さの $1/2$ 以上であるとよい。また、固定子コア 5 2 の径方向厚さは、磁石ユニット 4 2 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 5 2 の飽和磁束密度は 2 [T] であるため、固定子コア 5 2 の径方向厚さを、磁石ユニット 4 2 の径方向厚さの $1/2$ 以上にすることで、固定子コア 5 2 の内周側への磁束漏洩を防ぐことができる。

30

【0208】

ハルバッ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 5 2 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 5 2 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 5 0 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。

40

【0209】

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。

【0210】

50

(変形例 1)

上記実施形態では、固定子コア 5 2 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 8 1 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 2 5 に示すように、固定子コア 5 2 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。

10

【0 2 1 1】

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 $4/3$ 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。

20

【0 2 1 2】

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。

30

【0 2 1 3】

なお、回転軸 1 1 の軸心を中心とし、かつヨーク 1 4 1 に径方向に隣接する直線部 8 3 の径方向の中心位置を通る仮想円を想定すると、突起部 1 4 2 は、その仮想円の範囲内においてヨーク 1 4 1 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 4 0 側）に突出しない形状をなしているとよい。

【0 2 1 4】

上記構成によれば、突起部 1 4 2 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 8 3 の間においてティースとして機能するものでないため、各直線部 8 3 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 8 3 を近づけることができる。これにより、導体 8 2 a の断面積を大きくすることができ、固定子巻線 5 1 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 5 1 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 5 1 では、ターン部 8 4 が、径方向にシフトされ、他のターン部 8 4 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 8 4 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 8 4 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 5 0 での放熱性能を適正化することが可能になっている。

40

【0 2 1 5】

また、固定子コア 5 2 のヨーク 1 4 1 と、回転子 4 0 の磁石ユニット 4 2（すなわち各

50

磁石 9 1, 9 2) とが所定距離以上離れていれば、突起部 1 4 2 の径方向の厚さ寸法は、図 2 5 の H 1 に縛られるものではない。具体的には、ヨーク 1 4 1 と磁石ユニット 4 2 とが 2 mm 以上離れていれば、突起部 1 4 2 の径方向の厚さ寸法は、図 2 5 の H 1 以上であってもよい。例えば、直線部 8 3 の径方向厚み寸法が 2 mm を越えており、かつ導線群 8 1 が径方向内外の 2 層の導線 8 2 により構成されている場合に、ヨーク 1 4 1 に隣接していない直線部 8 3、すなわちヨーク 1 4 1 から数えて 2 層目の導線 8 2 の半分位置までの範囲で、突起部 1 4 2 が設けられていてもよい。この場合、突起部 1 4 2 の径方向厚さ寸法が「 $H 1 \times 3 / 2$ 」までになっていれば、導線群 8 1 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。

【0 2 1 6】

また、固定子コア 5 2 は、図 2 6 に示す構成であってもよい。なお、図 2 6 では、封止部材 5 7 を省略しているが、封止部材 5 7 が設けられていてもよい。図 2 6 では、便宜上、磁石ユニット 4 2 及び固定子コア 5 2 を直線状に展開して示している。

【0 2 1 7】

図 2 6 の構成では、固定子 5 0 は、周方向に隣接する導線 8 2 (すなわち直線部 8 3) の間に、導線間部材としての突起部 1 4 2 を有している。固定子 5 0 は、固定子巻線 5 1 が通電されると、磁石ユニット 4 2 の磁極の一つ (N 極、または S 極) とともに磁気的に機能し、固定子 5 0 の周方向に延びる一部分 3 5 0 を有する。この部分 3 5 0 の固定子 5 0 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 1 4 2 の合計の幅 (すなわち、固定子 5 0 の周方向への合計の寸法) を W_t とし、突起部 1 4 2 の飽和磁束密度を B_s 、磁石ユニット 4 2 の 1 極分の周方向の幅寸法を W_m 、磁石ユニット 4 2 の残留磁束密度を B_r とする場合、突起部 1 4 2 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。

【0 2 1 8】

なお、範囲 W_n は、周方向に隣接する複数の導線群 8 1 であって、励磁時期が重複する複数の導線群 8 1 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 8 1 の間隙 5 6 の中心を設定することが好ましい。例えば、図 2 6 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 8 1 が、当該複数の導線群 8 1 に相当する。そして、当該 4 つの導線群 8 1 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 5 6 の中心とされている。

【0 2 1 9】

図 2 6 において、範囲 W_n の両端には、それぞれ突起部 1 4 2 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 1 4 2 が含まれている。したがって、突起部 1 4 2 の幅 (すなわち、固定子 5 0 の周方向における突起部 1 4 2 の寸法、言い換えれば、隣接する導線群 8 1 の間隔) を A とすると、範囲 W_n に含まれる突起部 1 4 2 の合計の幅は、 $W_t = 1 / 2 A + A + A + A + 1 / 2 A = 4 A$ となる。

【0 2 2 0】

詳しくは、本実施形態では、固定子巻線 5 1 の 3 相巻線が分布巻であり、その固定子巻線 5 1 では、磁石ユニット 4 2 の 1 極に対して、突起部 1 4 2 の数、すなわち各導線群 8 1 の間となる間隙 5 6 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 8 2 のうち固定子コア 5 2 と接する数である。なお、導線 8 2 が回転子 4 0 の径方向に積層された導線群 8 1 である場合には、1 相の導線群 8 1 の内周側の導線 8 2 の数であるともいえる。この場合、固定子巻線 5 1 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 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 の周方向の合計幅寸法 W_t は、突起部 1 4 2 (つまり、間隙 5 6) 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。

【0 2 2 1】

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 $\times Q \times A = 3 \times 2 \times A = 6A$ 」としてもよい。

【0222】

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83とターン部84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。

【0223】

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51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81が3つ、2つの磁極対に対して導線群81が3つ、4つの磁極対に対して導線群81が9つ、5つの磁極対に対して導線群81が9つのような関係であるものが挙げられる。

【0224】

ここで、固定子巻線51を集中巻とする場合には、固定子巻線51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51が励磁される。その結果、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、上記で示した集中巻の場合は、同一相の導線群81に囲まれた領域において、固定子50の周方向にある突起部142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42のエアギャップに対向する面の全周」 $\times$ 「相数」 $\div$ 「導線群81の分散数」に相当する。

【0225】

ちなみに、ネオジウ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[MGOe(kJ/m³)]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52において、突起部142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。

【0226】

また、後述するように導線82が外層被膜182を備える場合には、導線82同士の外層被膜182が接触するように、導線82を固定子コア52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82の外層被膜182の厚さ、と看做することができる。

【0227】

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。

【0228】

(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

10

20

30

40

50

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。

【0229】

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、1.8 T 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。

【0230】

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 が励磁されるとすると、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 143 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。

【0231】

なお、磁石ユニット 42 と歯状部 143 とで軸方向の寸法が同一である場合、磁石ユニット 42 の 1 極分の周方向の幅寸法を W_m 、歯状部 143 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。

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

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 143 の幅寸法 W_{st} を、磁石ユニット 42 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 143 の幅寸法 W_{st} を、磁石ユニット 42 の 1 極分の幅寸法 W_m の $1/4$ よりも小さくするとよい。

【0232】

なお、上記式 (3) において、「 $W_{st} \times m \times 2$ 」は、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歯状部 143 の周方向の幅寸法に相当する。

【0233】

図 27 の構成では、上述した図 25、図 26 の構成と同様に、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（歯状部 143）を有する構成となっている。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。

【0234】

（変形例 3）

上記実施形態では、固定子巻線 51 を覆う封止部材 57 を、固定子コア 52 の径方向外側において各導線群 81 を全て含む範囲、すなわち径方向の厚さ寸法が各導線群 81 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 28 に示すように、封止部材 57 を、導線 82 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。

【0235】

10

20

30

40

50

(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。

【0236】

(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。

【0237】

(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。

【0238】

(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。

【0239】

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。

【0240】

(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。

【0241】

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。

【0242】

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 S_{igC} として三角波信号を生成して出力する。

【0243】

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 S_{igC} 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、

10

20

30

40

50

電気角で位相が 120° ずつずれている。

【0244】

U, V, W相比較器116bU, 116bV, 116bWは、U, V, W相指令電圧とキャリア信号SigC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Sp, Sn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Sp, Sn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Sp, Snをオンオフさせる。

10

【0245】

制御装置110は、キャリア信号SigCのキャリア周波数fc、すなわち各スイッチSp, Sn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fc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。

【0246】

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fcを変更する。

20

【0247】

図32を用いて、キャリア周波数fc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。

【0248】

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。

30

【0249】

<第1の方法>

dq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 $1/2$ に設定されていけばよい。

40

【0250】

<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けばよい。

【0251】

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fcを第1周波数fLに設定する。

50

【0252】

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。

【0253】

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。

【0254】

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。

【0255】

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。

【0256】

・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。

【0257】

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。

【0258】

・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。

【0259】

（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。

【0260】

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。

【0261】

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

10

20

30

40

50

冷却性能を均等化することができる。

【0262】

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ればよい。

【0263】

(変形例10)

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35は、回転子40及び固定子50の横断面図であり、図36は、図35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。

【0264】

インナロータ構造を前提とする図35及び図36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。

【0265】

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。

【0266】

図37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37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。

【0267】

図38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38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等を示す構成と同様に、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。

【0268】

図38の回転電機10では、図37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。

【0269】

(変形例11)

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39は、回転電機200の分解斜視図であり、図40は、回転電機200の側面断面図である。なおここでは、図39及び図40の状態を基準に上下方向を示すこととしている。

【0270】

図39及び図40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ツ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。

【0271】

ここで、固定子203は、以下のいずれかの構成であるとよい。

(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。

【0272】

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。

【0273】

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。

【0274】

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

10

20

30

40

50

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。

【0275】

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 を收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、例えば二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つてもよい。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。

10

【0276】

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。

20

【0277】

(変形例 12)

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 41 に、回転電機子形の回転電機 230 の構成を示す。

【0278】

図 41 の回転電機 230 において、ハウジング 231a, 231b にはそれぞれ軸受 232 が固定され、その軸受 232 により回転軸 233 が回転自在に支持されている。軸受 232 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 233 には、電機子としての回転子 234 が固定されている。回転子 234 は、回転子コア 235 とその外周部に固定された多相の回転子巻線 236 とを有している。回転子 234 において、回転子コア 235 はスロットレス構造を有し、回転子巻線 236 は扁平導線構造を有している。つまり、回転子巻線 236 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。

30

【0279】

また、回転子 234 の径方向外側には、界磁子としての固定子 237 が設けられている。固定子 237 は、ハウジング 231a に固定された固定子コア 238 と、その固定子コア 238 の内周側に固定された磁石ユニット 239 とを有している。磁石ユニット 239 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 42 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 239 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 [kA/m] 以上、かつ残留磁束密度は 1.0 [T] 以上となっている。

40

【0280】

本例の回転電機 230 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 236 は 3 つに分割され、磁石ユニット 239 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。

【0281】

回転軸 233 にはコミュテータ 241 が固定されており、その径方向外側には複数のブ

50

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。

【0282】

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。

10

【0283】

(変形例 13)

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

20

【0284】

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。

【0285】

(変形例 14)

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 42 に示す。

30

【0286】

図 42 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。

【0287】

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。

40

【0288】

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 181

50

b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）が弱いか、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。

【0289】

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。

【0290】

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、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。

【0291】

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。

【0292】

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種類の被膜とが違ふ樹脂の場合でも、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。

【0293】

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。

10

20

30

40

50

【0294】

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。

【0295】

(変形例15)

以下に、変形例15の回転電機400を説明する。図43は、アウトロータ式の回転電機400の概略構成を示す縦断面図である。

【0296】

図43に示すように、回転電機400は、回転軸401に一体回転可能に固定された回転子410と、回転子410の径方向内側に設けられた固定子420とを有している。回転軸401は、既述の構成と同様、不図示の軸受により回転可能に支持されている。回転子410が「界磁子」に相当し、固定子420が「電機子」に相当する。

【0297】

回転子410は、中空筒状に形成された磁石ホルダ411と、その磁石ホルダ411の径方向内側に固定された環状の磁石ユニット412とを有している。磁石ホルダ411は、回転軸401に固定されており、磁石保持部材としての機能を有する。磁石ユニット412は、回転子410の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。磁石ユニット412が「磁石部」に相当する。これにより、磁石ユニット412は、周方向に複数の磁極を有する。磁石ユニット412は、第1実施形態の図8、図9において磁石ユニット42として説明した構成を有しており、永久磁石として、固有保磁力が400[kA/m]以上であり、かつ残留磁束密度Brが1.0[T]以上である焼結ネオジム磁石を用いて構成されている。

【0298】

磁石ユニット412は、図9等の磁石ユニット42と同様に、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。図8及び図9で説明したように、各磁石91、92ではそれぞれ、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た配向により円弧状の磁石磁路が形成されている。なお、各磁石91、92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。要するに、磁石ユニット412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て構成されている。なお、磁石ユニット412として、図22及び図23に示す磁石ユニット42の構成や、図30に示す磁石ユニット42の構成を用いることも可能である。

【0299】

また、固定子420は、電機子巻線としての固定子巻線421と、固定子コア422とを有している。固定子巻線421は、略筒状(環状)に巻回形成された複数の相巻線よりなり、その固定子巻線421の径方向内側にベース部材としての固定子コア422が組み付けられている。本例では、U相、V相及びW相の相巻線を用いることで、固定子巻線421が3相の相巻線として構成されている。各相巻線は星形結線(Y結線)されている。ただし、各相巻線がΔ結線される構成であってもよい。

【0300】

固定子コア422の径方向内側には、固定子保持部材430が組み付けられており、その固定子保持部材430により固定子420が保持されている。固定子保持部材430は、固定子コア422の径方向内側に配置される筒状部431を有しており、その筒状部431には、冷却水等の冷媒を環状に流通させる冷媒通路432が形成されている。なお、

10

20

30

40

50

筒状部 4 3 1 の径方向内側に、半導体スイッチング素子等を含む電気モジュールを配置し、冷媒通路 4 3 2 を流れる冷媒により電気モジュールを冷却する構成としてもよい。

【0301】

次に、固定子 4 2 0 の構成を詳しく説明する。図 4 4 は、固定子 4 2 0 の構成を示す平面図であり、図 4 5 は、固定子 4 2 0 の構成を示す斜視図であり、図 4 6 は、固定子巻線 4 2 1 の構成を示す斜視図であり、図 4 7 は、固定子 4 2 0 の側面図である。なお、図 4 7 には、固定子巻線 4 2 1 において同相となる相巻線（例えば U 相巻線）にドットを付して示している。

【0302】

固定子コア 4 2 2 の構成を説明する。固定子コア 4 2 2 は、既述の固定子コア 5 2 と同様に、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、固定子コア 4 2 2 において回転子 4 1 0 側となる径方向外側に固定子巻線 4 2 1 が組み付けられている。固定子コア 4 2 2 の外周面は周方向に凹凸のない曲面状をなしており、固定子巻線 4 2 1 が組み付けられた状態では、固定子コア 4 2 2 の外周面に沿って、固定子巻線 4 2 1 を構成する導線 4 2 3 が周方向に並べて配置されるようになっている。固定子コア 4 2 2 はバックコアとして機能する。

【0303】

固定子 4 2 0 は、以下の (A) ~ (C) のいずれかを用いたものであるとよい。

(A) 固定子 4 2 0 において、周方向における各導線 4 2 3 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 4 1 2 の周方向の幅寸法を W_m 、磁石ユニット 4 1 2 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 4 2 0 において、周方向における各導線 4 2 3 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 4 2 0 において、周方向における各導線 4 2 3 の間に導線間部材を設けていない構成となっている。

【0304】

こうした固定子 4 2 0 の構成によれば、固定子巻線としての各導線部の間に磁気経路を確立するためのティース（鉄心）が設けられる一般的なティース構造の回転電機に比べて、インダクタンスが低減される。具体的には、インダクタンスを $1/10$ 以下にすることが可能となっている。この場合、インダクタンスの低下に伴いインピーダンスが低下することから、回転電機 4 0 0 において入力電力に対する出力電力を大きくし、ひいてはトルク増加に貢献できるものとなっている。また、インピーダンス成分の電圧を利用してトルク出力を行う（言い換えればリラクタンストルクを利用する）埋込み磁石型回転子を用いた回転電機に比べて、大出力の回転電機を提供することが可能となっている。

【0305】

また、本例の固定子 4 2 0 ではインダクタンスを低減できることから、磁気飽和が生じにくくなっている。そのため、固定子コア 4 2 2 の肉厚（径方向厚さ）を薄くすることが可能となっている。

【0306】

また上記構成では、従来相当のティース又は当該ティースに相当する構成を備えていないため、固定子巻線 4 2 1 に実際に鎖交する磁石磁束波形を、高トルク化を実現するための磁石ユニット 4 1 2 の磁石磁束波形に近づけることができる。その結果、回転電機 4 0 0 の高トルク化の効果を高めることが可能となっている。

【0307】

本例では、固定子巻線 4 2 1 が、固定子コア 4 2 2 と共に樹脂等からなるモールド材（絶縁部材）により一体にモールドされており、周方向に並ぶ各導線 4 2 3 の間には、モールド材が介在する構成となっている。かかる構成からすると、本例の固定子 4 2 0 は、上記 (A) ~ (C) のうち (B) の構成に相当する。また、周方向に隣り合う各導線 4 2 3

は、周方向の端面同士が互いに当接するか、又は微小な間隔を隔てて近接配置されており、この構成から言えば上記（C）の構成であってもよい。なお、上記（A）の構成を採用する場合には、固定子コア422の外周面に、周方向の所定間隔で上記（A）の規定を満たす大きさ（幅又は突出高さ）の突部が設けられているとよい。

【0308】

なお、固定子巻線421に固定子コア422を組み付けて固定子420を製作する際には、固定子巻線421において円環状の一部を非接続として切り離しておき（すなわち、固定子巻線421を略C字状にしておき）、固定子巻線421の内周側に固定子コア422を組み付けた後に、切り離し部分を互いに接続させて固定子巻線421を円環状にする。これ以外に、固定子コア422を周方向にて複数（例えば3つ以上）に分割しておき、円環状に形成された固定子巻線421の内周側に、複数に分割されたコア片を組み付けるようにすることも可能である。

【0309】

次に、固定子巻線421についてより詳細に説明する。

【0310】

固定子巻線421は、相ごとの相巻線421U、421V、421Wを有し、それら各相の相巻線が周方向に所定順序で並べて配置されている（図47参照）。固定子巻線421は、各相巻線において径方向内外に1層の導線423により構成されており、分布巻きにより円環状に巻回形成されている。図47に示すように、固定子巻線421は、固定子コア422と径方向に並ぶコイルサイド425と、そのコイルサイド425よりも軸方向外側となるコイルエンド426とを有している。コイルエンド426は、固定子巻線421の軸方向両端側にそれぞれ設けられている。なお、コイルサイド425は、回転子410の磁石ユニット412に径方向に対向する部分であり、コイルエンド426は、コイルサイド425よりも軸方向外側において相巻線を周方向に周回させる周回部分である。

【0311】

固定子巻線421は、コイルサイド425において、導線423の径方向の厚さ寸法が、1磁極内における1相分の周方向尾幅寸法よりも小さくなっている構成（すなわち扁平導線構造）を有しているとよい。

【0312】

固定子巻線421の各相の相巻線は、コイルエンド426において径方向内側に向けて軸方向に垂直にそれぞれ折り曲げ形成されている。この場合、各相の相巻線は、コイルエンド426において固定子コア422の側にそれぞれ折り曲げ形成されており、コイルエンド426が固定子コア422の軸方向端面に対向する構成となっている。図44に示すように、各相の相巻線は、コイルエンド426において、径方向内側に延びる内側延出部427aと、周方向に延びる周方向延出部427bとを有しており、周方向延出部427bは、固定子コア422の内周面よりも径方向外側で固定子コア422の軸方向端面に対向する構成（すなわち固定子コア422の内周面よりも径方向内側にはみ出さない構成）となっている。

【0313】

図47に示すように、各相の相巻線は、相ごとに同一側のコイルエンド426における軸方向の突出高さが異なっていると同時に、軸方向における一端から他端までの導線長さが同じになっている。軸方向の突出高さは、図の上側のコイルエンド426において、相ごとにHu、Hv、Hwである（Hu>Hv>Hw）。なお、図の下側のコイルエンド426では、相ごとの軸方向の突出高さの大小が逆になっている。また、軸方向における一端から他端までの導線長さは、各相いずれもLAである。各相の相巻線は、コイルエンド426における折り曲げ点の位置が、少なくとも当該相巻線の径方向厚さ分だけ相ごとに異なる構成となっている。

【0314】

コイルエンド426において、各相の相巻線における軸方向の突出高さが各々異なっていることにより、各相の相巻線についてコイルエンド426での互いの干渉を回避できる

。また、軸方向における一端から他端までの導線長さが各相の相巻線と同じになっていることにより、各相の相巻線の全長、すなわち各相巻線の中性点側の端部から入出力側の端部までの導線長さを均等化することができる。これにより、相ごとにコイルエンド４２６での突出高さが相違していても、各相の相巻線について抵抗値の均等化を図ることができる。

【０３１５】

また、各相の相巻線は、コイルエンド４２６において、コイルサイド４２５に比べて異相の導線４２３どうしの間隔が大きくなっているとよい。例えば、コイルエンド４２６において、各相の相巻線における内側延出部４２７ａと周方向延出部４２７ｂとが、軸方向に互いに離間しているとよい。例えば固定子４２０において導線間部材が設けられていない構成では、導線間部材が設けられている構成に比べて導線４２３どうしが近接配置されていることから、固定子巻線４２１での発熱の影響が懸念される。この点、各相の相巻線のコイルエンド４２６において、コイルサイド４２５に比べて異相の導線４２３どうしの間隔が大きくなっている構成を用いることにより、コイルエンド４２６ではコイルサイド４２５に比べて導線４２３の集約度（例えば導線配置スペースでの導体密度）を高める必要がないことを加味しつつ、異相の導線４２３どうしの間隔を大きくして固定子巻線４２１の放熱の適正化を図ることができる。また、互いに異なる相間の絶縁を適正に図ることができる。

【０３１６】

固定子巻線４２１は、複数の素線（細線）を１本に束ねた導線４２３により構成されており、その断面構造を図４８に示す。また、固定子巻線４２１を固定子コア４２２に組み付けた状態での部分断面構造を図４９に示す。

【０３１７】

図４８に示すように、導線４２３は、横断面が略矩形状をなす角形導線であり、複数（図では６本）の素線４４１と、その複数の素線４４１を囲む例えば樹脂製の外層被膜４４２（外側絶縁層）と、外層被膜４４２内において各素線４４１の周りに充填された中間層４４３とを有している。また、素線４４１は、銅材よりなる導体部４４１ａを、絶縁材料よりなる導体被膜４４１ｂ（素線絶縁層）で被覆する構成となっている。この場合、導線４２３は、内外多層に複数の絶縁被膜を有するものとなっており、外層被膜４４２が外側絶縁被膜であり、中間層４４３が中間絶縁被膜であり、素線４４１の導体被膜４４１ｂが内側絶縁被膜である。固定子巻線として見れば、外層被膜４４２により相間が絶縁される。導線４２３は、複数の素線４４１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４４１そのものの抵抗値よりも大きい素線集合体であるとよい。なお、素線４４１が、複数の導電材の集合体として構成されていてもよい。

【０３１８】

外層被膜４４２は、導体被膜４４１ｂに比べて被膜厚さ寸法が大きくなっている。この場合、相間絶縁層である外層被膜４４２の厚さ寸法が、素線４４１の導体被膜４４１ｂよりも大きいことにより、高電圧に対する耐性強化を図ることができる。つまり、導線４２３において複数の絶縁被膜のうち外側の絶縁被膜の絶縁能力が、内側の絶縁被膜の絶縁能力よりも高められている。この場合、例えば導線の一般的な被膜厚さ（５～４０μm）よりも大きい耐圧が必要な電圧帯においても好適に用いることができる。

【０３１９】

また、図４９に示すように、固定子巻線４２１は、コイルエンド４２６において、コイルサイド４２５に比べて導線４２３内における素線４４１どうしの間の離間距離が大きい部分を有している。つまり、コイルサイド４２５とコイルエンド４２６とを比べると、コイルエンド４２６の方が、素線４４１（導体部４４１ａ）が粗となる状態（粗密度の状態）で設けられている。

【０３２０】

本構成によれば、コイルサイド４２５での導体密度を高めて銅損の低減を図りつつも、コイルエンド４２６での渦損低減や冷却性向上を図ることができる。この場合、コイルエ

10

20

30

40

50

ンド４２６では、コイルサイド４２５に比べて導線４２３の集約度（例えば導線配置スペースでの導体密度）を高める必要がなく、素線４４１どうしの間の離間距離を大きくすることによって、固定子巻線４２１における電気特性の向上や放熱性能の向上を好適に実現することができる。

【０３２１】

コイルエンド４２６において導線４２３内での素線４４１どうしの間の離間距離が大きくなっている構成では、そのコイルエンド４２６において空気や液状冷媒による冷却が行われる場合にあって、温度変化に伴う膨張収縮により生じる素線４４１どうしの摩擦応力を軽減できる。そのため、導線４２３内において絶縁状態を適正に維持することができる。

10

【０３２２】

図４９の構成では、導線４２３は、径方向に折り曲げられたコイルエンド４２６の湾曲部分Wにおいて、コイルサイド４２５に比べて導線４２３内における素線４４１どうしの間の離間距離が大きくなっている。つまり、湾曲部分Wにおいて、コイルサイド４２５に比べて導線４２３内の各素線４４１がばらけた状態となっている。より具体的には、導線４２３において折り曲げによる負荷（曲げ応力）を抑えるには、所定以上の半径で導線４２３を湾曲させることが望ましく、負荷を極力かけない状態で導線４２３を折り曲げるようにすることで、湾曲部分Wに外側への膨らみが生じている。この場合、湾曲部分Wでは、導線４２３内において素線４４１どうしの間の離間距離が局部的に大きくなっている。なお、導線４２３を、例えば５mm以上の半径（導線４２３の中心部の半径）で湾曲させるとよい。

20

【０３２３】

湾曲部分Wでは、複数の素線４４１の間に他部分よりも厚い中間層４４３が形成されている。つまり、湾曲部分Wでは、コイルサイド４２５に比べて導線４２３内における導体部４４１aどうしの間の絶縁厚さが大きくなっている。

【０３２４】

導線４２３において折り曲げによる負荷（曲げ応力）を生じさせないようにした構成では、折り曲げ後における内径側での導体圧縮が抑制され、導体断面積の減少が抑制される。そのため、導線４２３の抵抗値を小さくすることができる。

【０３２５】

ここで、複数の素線４４１の集合体である導線４２３を曲げ加工する際には、それら複数の素線４４１のまとまりが弱まり、折り曲げ後の状態において素線間の離間距離が大きくなる部分が生じることが考えられる。したがって、導線４２３の湾曲部分Wでは、曲げ加工により素線４４１どうしの間の離間距離を部分的に大きくすることができる。

30

【０３２６】

導線４２３は、湾曲部分Wとして折り曲げられる部分と、それ以外の部分（直線部分）とで異なる構成を有するものであってもよい。例えば、図５０に示すように、導線４２３に、素線４４１が密に束ねられている第１部分４５１と、第１部分４５１よりも素線４４１が粗に束ねられている第２部分４５２とを長手方向にそれぞれ設けておく構成とする。第２部分４５２は、第１部分４５１に比べて、コイルサイド４２５よりも導線断面積が大きい部分である。そして、第２部分４５２を折り曲げることで、湾曲部分Wが形成される。

40

【０３２７】

なお、導線４２３の第２部分４５２においては、例えば第１部分４５１よりも外層被膜４４２の外形寸法が大きくなっていればよく、第１部分４５１よりも中間層４４３の絶縁材料の量（樹脂量）を多くする構成としてもよい。また、第２部分４５２では中間層４４３に絶縁材料を充填しない構成であってもよい。

【０３２８】

また、コイルエンド４２６の湾曲部分Wでは、導線４２３において複数の素線４４１が撚られていない構成であるとよい。この場合、導線４２３として、複数の素線４４１が撚られていない束線を用いることが考えられる。また、導線４２３の構成を概略的に示す図

50

5 1のように、撚り線として構成される導線 4 2 3 が、部分的に複数の素線 4 4 1 が撚られていない部分 4 5 3 を有するものであってもよい。この場合、複数の素線 4 4 1 が撚られていない部分 4 5 3 を折り曲げて湾曲部分 W を形成する構成とする。つまり、固定子巻線 4 2 1 において、湾曲部分 W では複数の素線 4 4 1 が撚られておらず、湾曲部分 W 以外では複数の素線 4 4 1 が撚られている構成とする。

【0 3 2 9】

導線 4 2 3 において、コイルエンド 4 2 6 の湾曲部分 W で複数の素線 4 4 1 が撚られていない構成とすることにより、湾曲部分 W において複数の素線 4 4 1 が撚られている構成と比べて、曲げ加工により生じる各素線 4 4 1 の捻じり応力を抑制できる。また、湾曲部分 W 以外においては複数の素線 4 4 1 が撚られている構成とすることで、高調波渦電流などを好適に打ち消すことができる。

10

【0 3 3 0】

なお、導線 4 2 3 における複数の素線 4 4 1 が、湾曲部分 W の内径側（最も曲率の小さい側）の素線群と、外径側（最も曲率の大きい側）の素線群と、それらの間の素線群とを有する場合に、少なくとも湾曲部分 W の内径側の素線群と外径側の素線群との少なくともいずれかにおいて素線 4 4 1 が撚られていない構成としてもよい。

【0 3 3 1】

導線 4 2 3 として、その長手方向の全域で複数の素線 4 4 1 が撚られている撚り線を用いることも可能である。その概略構成を図 5 2 に示す。なお、導線 4 2 3 は、少なくとも 1 組の素線 4 4 1 を撚った素線集合体を有するものであればよく、全ての素線 4 4 1 が撚られている構成か、又は一部の素線 4 4 1 が撚られている構成であるとよい。この場合、導線 4 2 3 として撚り線（少なくとも 1 組の素線 4 4 1 を撚った素線集合体）を用いることで、高調波渦電流などを好適に打ち消すことができる。つまり、各素線 4 4 1 にて渦電流が生じる場合に、その渦電流を打ち消す磁界を生じさせて渦電流を小さくすることができる。

20

【0 3 3 2】

本例の回転電機 4 0 0 では、固定子巻線 4 2 1 のコイルエンド 4 2 6 において、各相の相巻線が、径方向内外のうち同じ方向にそれぞれ折り曲げられ、その折り曲げ状態において、相ごとに同一側のコイルエンド 4 2 6 における軸方向の突出高さが異なっている構成とした。これにより、コイルエンド 4 2 6 での互いの干渉を回避しつつ各相の相巻線を配置することができる。また、固定子巻線 4 2 1 において、各相の相巻線が、軸方向における一端から他端までの導線長さが同じになっていることにより、上記のとおり相ごとにコイルエンド 4 2 6 での突出高さが相違していても、各相の相巻線の抵抗値を互いに等しくすることができる。その結果、固定子巻線 4 2 1 の構成の適正化を図ることができる。

30

【0 3 3 3】

各相の相巻線が、コイルエンド 4 2 6 において軸方向に垂直に折り曲げられていることにより、コイルエンド 4 2 6 での固定子巻線 4 2 1 の軸方向突出量を最小限に抑えることができる。したがって、回転電機 4 0 0 の小型化を図る上で好適な構成を実現できる。

【0 3 3 4】

固定子巻線 4 2 1 を、コイルエンド 4 2 6 が固定子コア 4 2 2 の軸方向端面に対向するようにして径方向内側に折り曲げ形成した。これにより、固定子巻線 4 2 1 が、固定子コア 4 2 2 を軸方向両側から挟み込むようにして設けられることとなり、固定子巻線 4 2 1 の位置ずれを抑制することができる。

40

【0 3 3 5】

また、固定子 4 2 0 においてティース（導線間部材）を有していない構成とし、かつ各相の相巻線が、コイルエンド 4 2 6 において、コイルサイド 4 2 5 に比べて異相の導線 4 2 3 どうしの間隔が大きくなるように構成した。この場合、ティースレス構造の固定子 4 2 0 では、導線 4 2 3 どうしが近接配置されていることから、固定子巻線 4 2 1 での発熱の影響が懸念される。この点、各相の相巻線のコイルエンド 4 2 6 において、コイルサイド 4 2 5 に比べて異相の導線 4 2 3 どうしの間隔を大きくしたため、コイルエンド 4 2 6

50

ではコイルサイド 4 2 5 に比べて導線部の集約度（例えば導線配置スペースでの導体密度）を高める必要がないことを加味しつつ、固定子巻線 4 2 1 の放熱の適正化を図ることができる。また、互いに異なる相間の絶縁を適正に図ることができる。

【0336】

また、導線 4 2 3 の湾曲部分 W で、コイルサイド 4 2 5 に比べて素線 4 4 1 どうしの間の離間距離が大きくなるようにしたため、コイルエンド 4 2 6 において空気や液状冷媒による冷却が行われる場合にあっても、温度変化に伴う膨張収縮により生じる素線 4 4 1 どうしの摩擦応力を軽減できる。そのため、導線 4 2 3 内において絶縁状態を適正に維持することができる。またこの場合、コイルサイド 4 2 5 での導体密度を高めて銅損の低減を図りつつも、コイルエンド 4 2 6 での渦損低減や冷却性向上を図ることができる。

10

【0337】

・上記図 4 4 ～図 4 7 に示す構成の固定子巻線 4 2 1 では、コイルエンド 4 2 6 において、各相の相巻線がいずれも固定子コア 4 2 2 の側、すなわち径方向内側に向けて軸方向に垂直に折り曲げられている構成となっているが、かかる構成の変更は可能である。例えば、コイルエンド 4 2 6 において、各相の相巻線が固定子コア 4 2 2 とは反対側、すなわち径方向外側に向けて折り曲げられている構成としたり、各相の相巻線が軸方向に非垂直の角度で折り曲げられている構成としたりすることが可能である。

【0338】

・コイルエンド 4 2 6 において、各相の相巻線の軸方向に対する折り曲げ角度が各々異なってもよい。例えば、同一側のコイルエンド 4 2 6 において、軸方向の突出高さが大きい相巻線ほど、軸方向に対する折り曲げ角度が小さくなる構成にするとよい。

20

【0339】

・固定子巻線 4 2 1 において、導線 4 2 3 の湾曲部分 W でのみ、コイルサイド 4 2 5 に比べて素線 4 4 1 どうしの間の離間距離を大きくする構成に代えて、コイルエンド 4 2 6 において湾曲部分 W 以外の部分でも、コイルサイド 4 2 5 に比べて素線 4 4 1 どうしの間の離間距離を大きくする構成としてもよい。

【0340】

・アウトロータ式の回転電機に代えて、インナロータ式の回転電機での具体化も可能である。この場合、固定子 4 2 0 では、固定子巻線 4 2 1 の径方向外側に固定子コア 4 2 2 が組み付けられる。また、固定子巻線 4 2 1 のコイルエンド 4 2 6 を固定子コア 4 2 2 の軸方向端面に対向させるには、各相の相巻線が径方向外側に折り曲げ形成されるとよい。

30

【0341】

・回転電機 4 0 0 を、回転電機子形の回転電機として具体化することも可能である。この場合、電機子として回転子が設けられ、界磁子として固定子が設けられる。

【0342】

上記以外の変形例を以下に列記する。

【0343】

・磁石ユニット 4 2 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 D M が 5 0 mm 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 4 2（具体的には、第 1，第 2 磁石 9 1，9 2）のうち径方向内側の面と、回転子 4 0 の軸心との径方向における距離 D M が 5 0 mm 以上とされていてもよい。

40

【0344】

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 1 0 k W を超する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発明者は把握していない。その理由について本願発明者は検討した。

【0345】

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سモータである。

【0346】

50

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。

【0347】

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。

【0348】

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。

【0349】

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。

【0350】

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。

【0351】

本願発明者の分析により、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53に示すものとなる。

【0352】

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。

【0353】

$$\text{磁石トルク} = k \cdot \Psi \cdot I_q \quad \dots \dots \dots (\text{eq } 1)$$

$$\text{リラクタンストルク} = k \cdot (L_q - L_d) \cdot I_q \cdot I_d \quad \dots \dots \dots (\text{eq } 2)$$

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。

【0354】

一方、巻線のインダクタンスLq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54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×bに比例する。

【0355】

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、当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（eq2）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

10

20

30

40

50

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53である。

【0356】

図53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。本願発明者は、図53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、このことが大型機の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。

【0357】

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を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。

【0358】

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。

【0359】

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。

【0360】

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。

【0361】

・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。

【0362】

・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、

10

20

30

40

50

詳しくは筒状部 7 1 の内部空間をより広く用いることができることとなる。

【0363】

・上記構成の回転電機 1 0 では、軸受 2 1 , 2 2 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 2 1 , 2 2 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。

【0364】

・回転軸 1 1 を回転自在に支持する構成として、回転子 4 0 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 6 0 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。

【0365】

・上記構成の回転電機 1 0 では、回転子 4 0 において磁石ホルダ 4 1 の中間部 4 5 が内側肩部 4 9 a と環状の外側肩部 4 9 b を有する構成としたが、これらの肩部 4 9 a , 4 9 b を無くし、平坦な面を有する構成としてもよい。

【0366】

・上記構成の回転電機 1 0 では、固定子巻線 5 1 の導線 8 2 において導体 8 2 a を複数の素線 8 6 の集合体として構成したが、これを変更し、導線 8 2 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 8 2 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。

【0367】

・上記構成の回転電機 1 0 では、固定子 5 0 の径方向内側にインバータユニット 6 0 を設ける構成としたが、これに代えて、固定子 5 0 の径方向内側にインバータユニット 6 0 を設けない構成としてもよい。この場合、固定子 5 0 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 6 0 とは異なる部品を配することが可能である。

【0368】

・上記構成の回転電機 1 0 において、ハウジング 3 0 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 4 0 、固定子 5 0 等が保持される構成であってもよい。

【0369】

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。

【符号の説明】

【0370】

4 0 0 … 回転電機、 4 1 0 … 回転子、 4 1 2 … 磁石ユニット、 4 2 0 … 固定子、 4 2 1 … 固定子巻線、 4 2 3 … 導線、 4 2 5 … コイルサイド、 4 2 6 … コイルエンド。

10

20

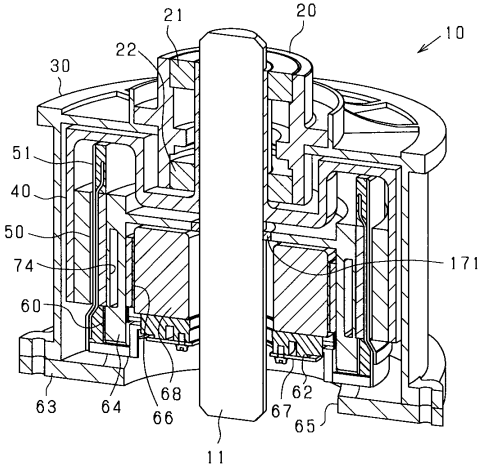
30

40

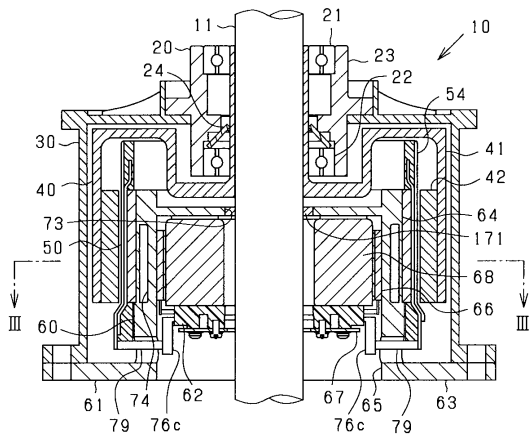
50

【図面】

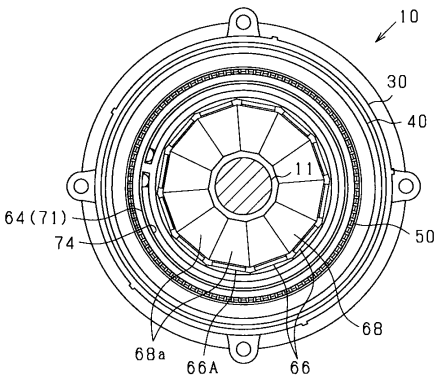
【図 1】



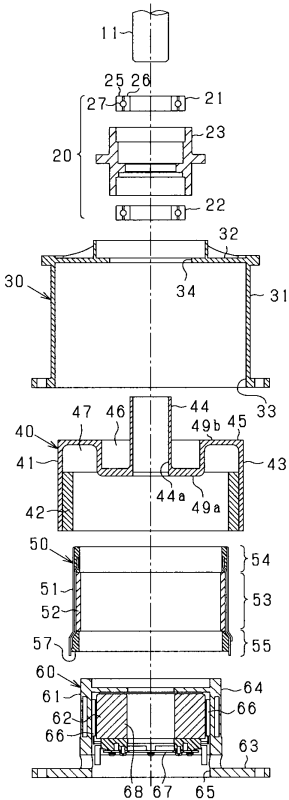
【図 2】



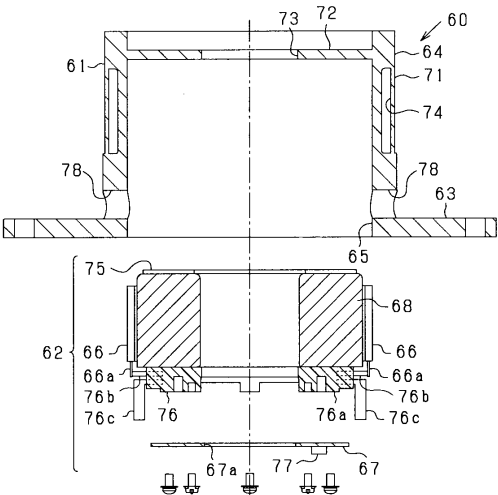
【図 3】



【図 5】



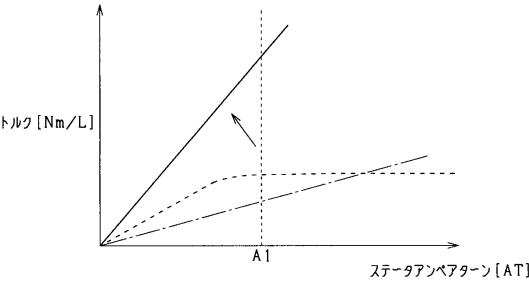
【図 6】



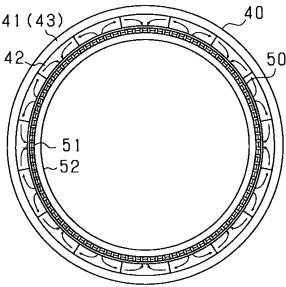
10

20

【図 7】



【図 8】

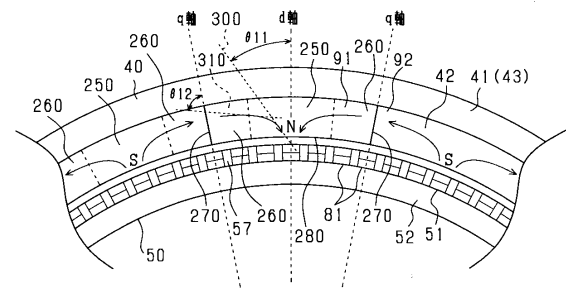


30

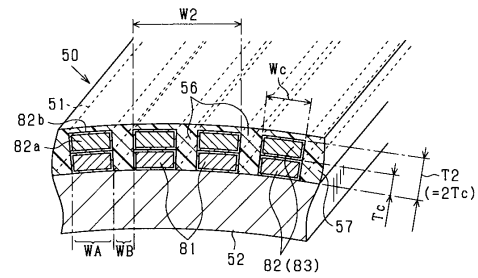
40

50

【図 9】

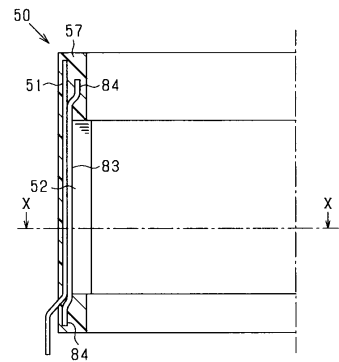


【図 10】

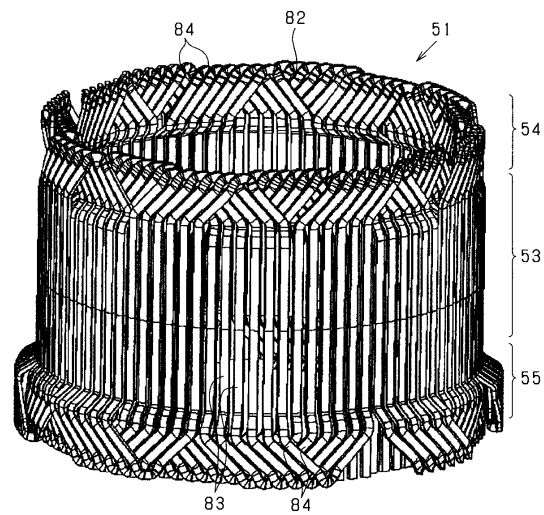


10

【図 11】



【図 12】



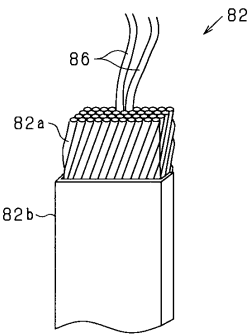
20

30

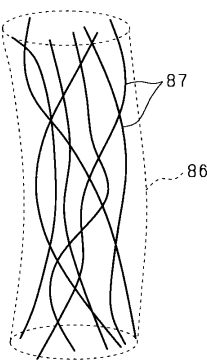
40

50

【図 1 3】

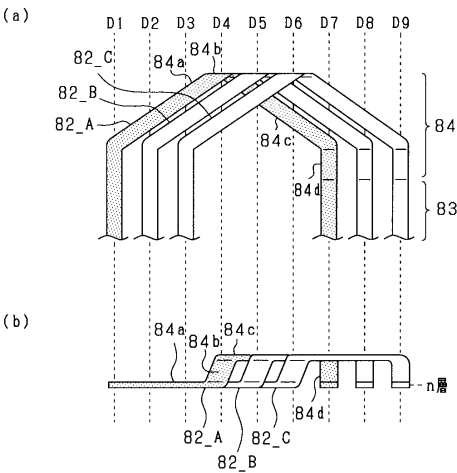


【図 1 4】

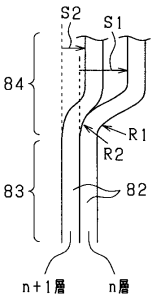


10

【図 1 5】



【図 1 6】



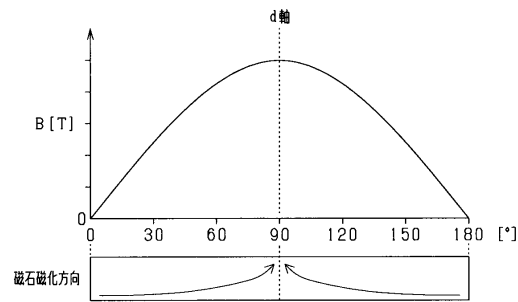
20

30

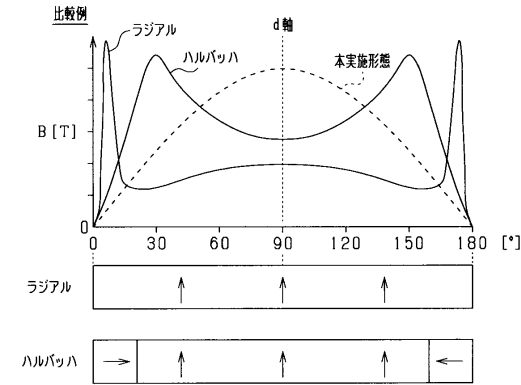
40

50

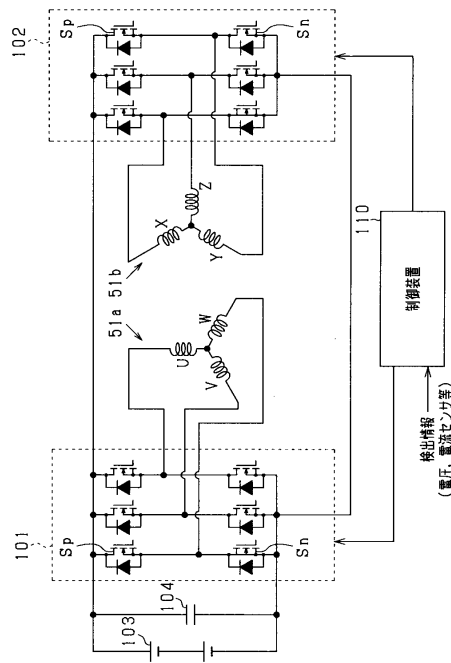
【図 17】



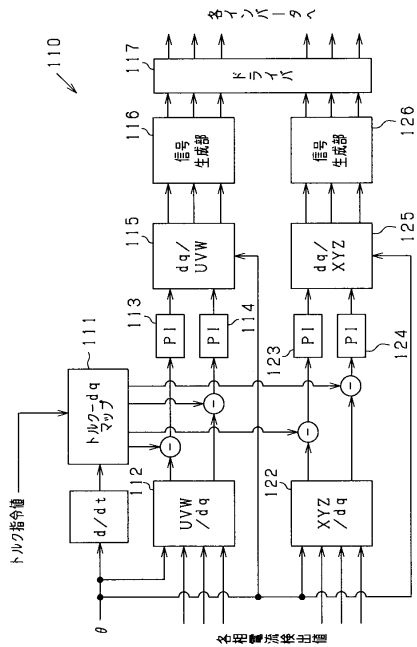
【図 18】



【図 19】



【図 20】



10

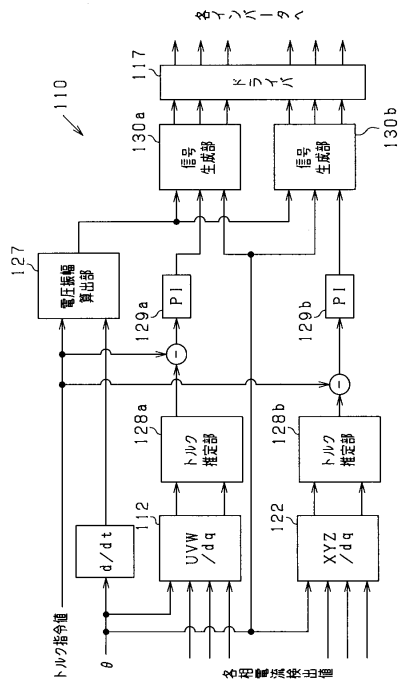
20

30

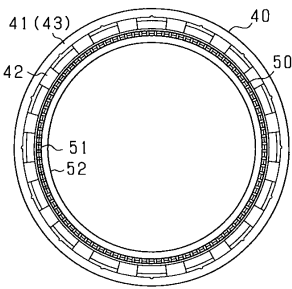
40

50

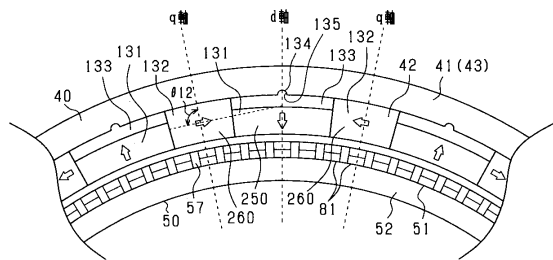
【図 2 1】



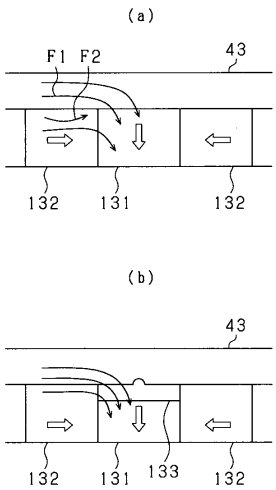
【図 2 2】



【図 2 3】



【図 2 4】



10

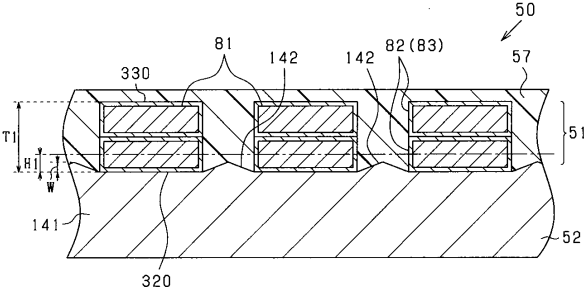
20

30

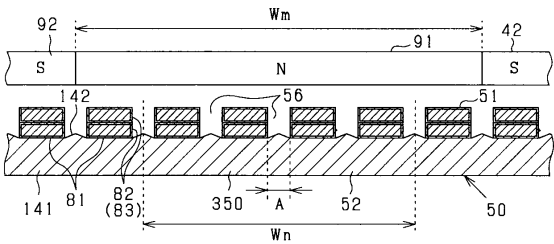
40

50

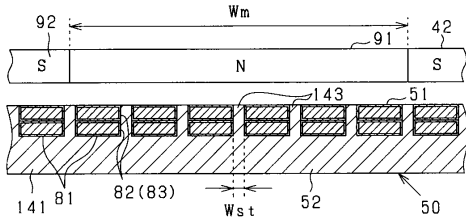
【図 2 5】



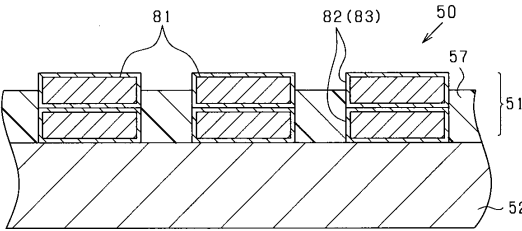
【図 2 6】



【図 2 7】



【図 2 8】



10

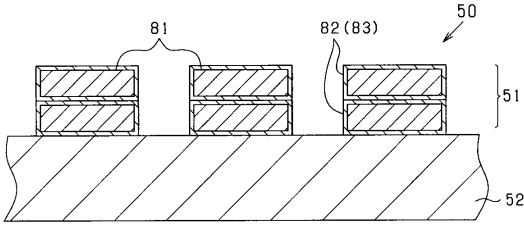
20

30

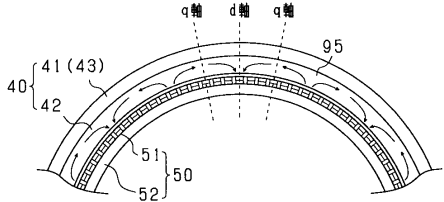
40

50

【図 29】



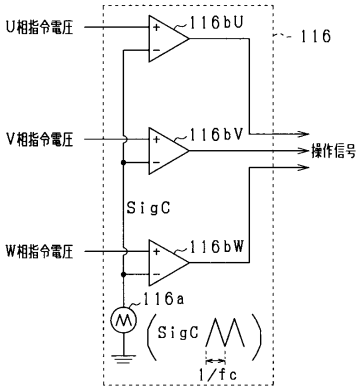
【図 30】



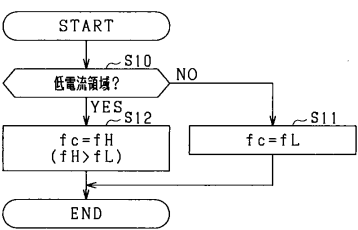
10

20

【図 31】



【図 32】

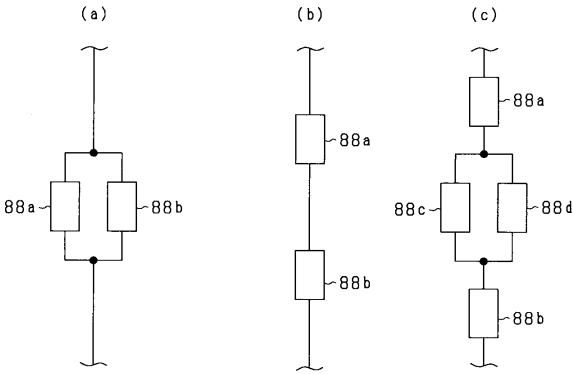


30

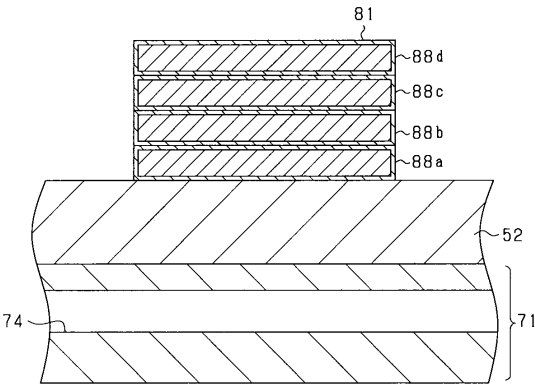
40

50

【図 3 3】



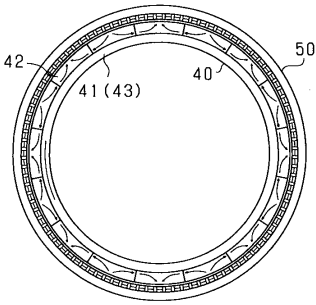
【図 3 4】



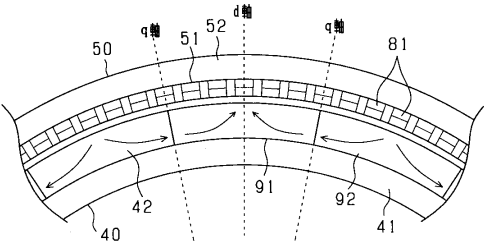
10

20

【図 3 5】



【図 3 6】

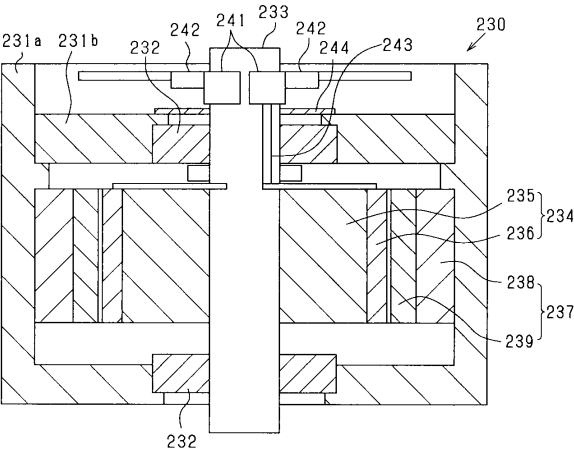


30

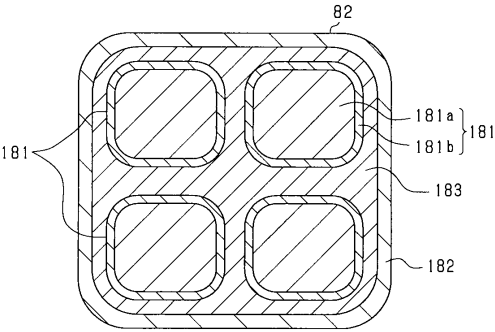
40

50

【図 4 1】

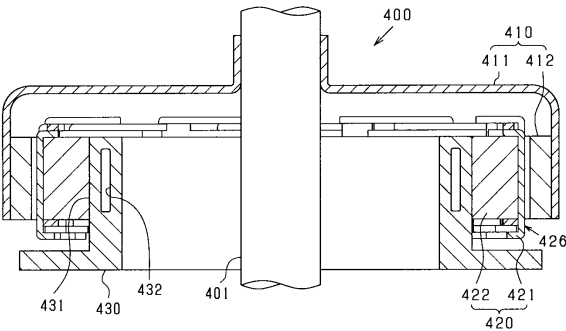


【図 4 2】

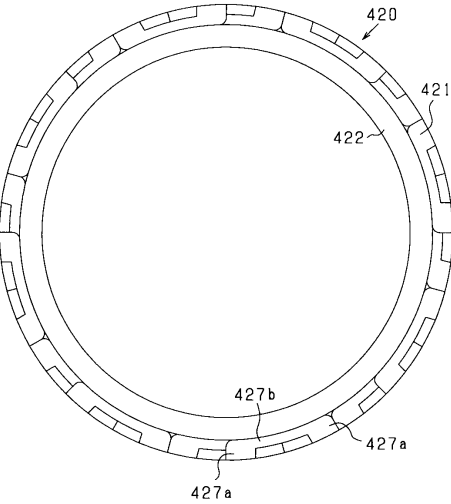


10

【図 4 3】



【図 4 4】



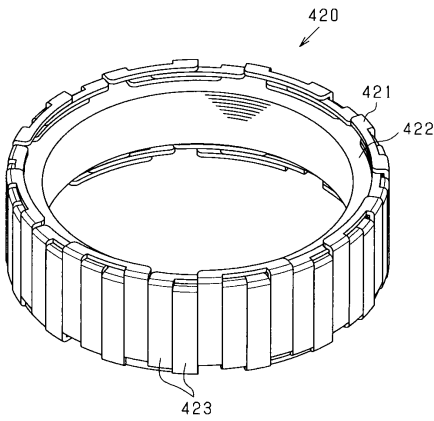
20

30

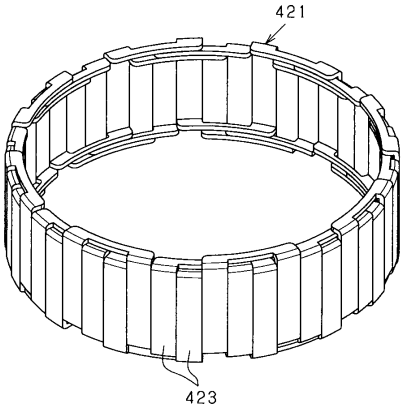
40

50

【図 4 5】



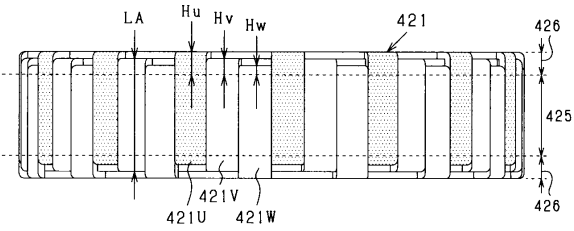
【図 4 6】



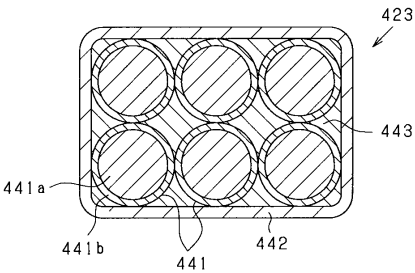
10

20

【図 4 7】



【図 4 8】

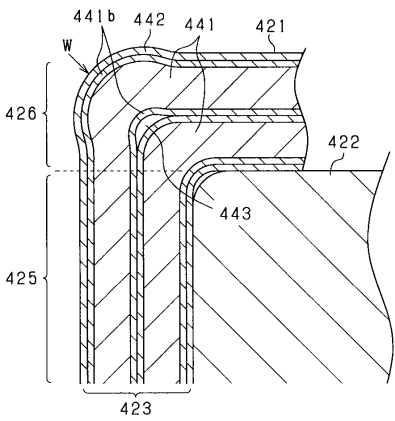


30

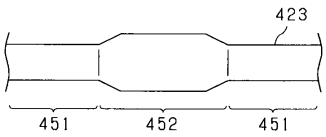
40

50

【図 49】

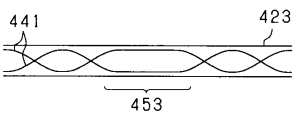


【図 50】

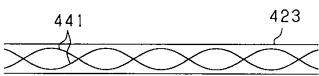


10

【図 51】

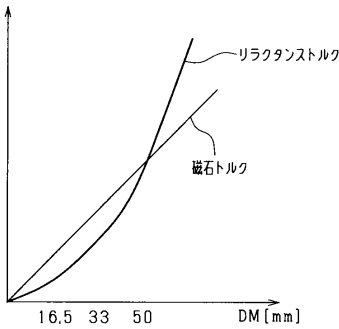


【図 52】

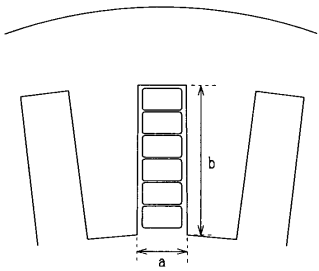


20

【図 53】



【図 54】



30

40

50

フロントページの続き

会社デンソー内

審査官 稲葉 礼子

- (56)参考文献 特開2012-253922 (JP, A)
特開2014-117012 (JP, A)
特開2007-325378 (JP, A)
特開2002-315247 (JP, A)
特開2012-244643 (JP, A)
特開昭59-096605 (JP, A)
特開2013-066335 (JP, A)
特開平08-223840 (JP, A)
特表2012-507251 (JP, A)
特開2008-148375 (JP, A)
特開2018-102118 (JP, A)
国際公開第2018/139245 (WO, A1)
特開2006-325338 (JP, A)
特開2010-041753 (JP, A)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
H02K 3/04
H02K 3/47