

明 細 書

発明の名称： 回転電機

技術分野

[0001] 本発明は、回転電機に関する。

本願は、2022年3月29日に、日本に出願された特願2022-053591号に基づき優先権を主張し、その内容をここに援用する。

背景技術

[0002] 従来から、例えば下記特許文献1に記載の回転電機が知られている。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特開2018-198534号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] この種の埋め込み型永久磁石同期モータ（IPMSM）は、永久磁石の磁束を活用して運転するため、高速運転領域では、磁石による逆起電力の影響により高電圧が必要になる。そこで、進角を高めて弱め界磁運転を用い、磁石磁束を界磁磁束により相殺して電圧を低減することが行われる。

しかしながら、最適進角を超える進角領域でモータが運転された場合、トルクは急激に低下する。

よって、前述のように弱め界磁運転を実施する際、例えば、進角を高めすぎて最適進角を超える領域でモータが運転された場合などに、出力トルクが低下する虞がある。

[0005] 本発明は、前述した事情に鑑みてなされたものであって、電圧に対するトルクを向上させることを目的とする。

課題を解決するための手段

[0006] <1>本発明の一態様に係る回転電機は、環状のステータと、前記ステータ内に配置されたロータと、を備え、前記ロータは、ロータコアと、前記ロ

ータコアに埋め込まれるとともに1組で1つの磁極を構成し、前記ロータコアに、前記ロータコアの周方向に複数組配置された永久磁石と、を備える回転電機であって、前記ロータコアは、各組の前記永久磁石に対して、前記ロータの回転方向の両側に設けられた第1フラックスバリアと、前記第1フラックスバリアに対して、前記ロータコアの径方向の外側に設けられた第1ブリッジと、を備え、前記第1ブリッジは、前記ロータの回転方向の前方に設けられた前方ブリッジと、前記ロータの回転方向の後方に設けられた後方ブリッジと、を含み、前記前方ブリッジの基準位置である前方基準位置を、前記ロータを軸方向から見た平面視において、前記ロータコアの中心軸と、各組の前記永久磁石の前端と、を通過する前方仮想線と前記ロータコアの外周面との交点とし、かつ、前記後方ブリッジの基準位置である後方基準位置を、前記平面視において、前記ロータコアの中心軸と、各組の前記永久磁石の後端と、を通過する後方仮想線と前記ロータコアの外周面との交点としたときに、複数組の前記永久磁石のうち、少なくとも1組の前記永久磁石において、前記後方ブリッジの前端は、前記後方基準位置に対して、前記中心軸を中心とする中心角で θf （ラジアン）分、前方に離れた位置に配置され、前記前方ブリッジの後端は、前記前方基準位置に対して、前記中心軸を中心とする中心角で0（ラジアン）以上 θf （ラジアン）以下、前方に離れた位置に配置されている。

ただし、 θf は、以下の（1）式、（2）式を満たす。

$$0 < \theta f \leq (\theta a / 8) \cdots (1)$$

$$\theta a = 2\pi / (Ns \text{ slot}) \cdots (2)$$

ここで、上記（2）式中の $Ns \text{ slot}$ は、前記ステータの-slot数を意味する。また、一組の永久磁石は、1つ以上の永久磁石を含む。さらに、前方ブリッジの後端や後方ブリッジの前端は、各ブリッジのうち、各組の永久磁石によって発生する磁束の磁気飽和が生じる部分である。言い換えると、前方ブリッジの後端や後方ブリッジの前端は、各ブリッジのうち、磁束がロータからステータに渡り始める部分である。

[0007] <2>上記<1>に係る回転電機では、前記少なくとも1組の前記永久磁石において、前記前方ブリッジの後端は、前記前方基準位置に配置され、前記後方ブリッジの前端は、前記後方基準位置に対して、前記中心軸を中心とする中心角で $\theta_a/12$ （ラジアン）分、前方に離れた位置に配置されている構成を採用してもよい。

[0008] <3>上記<1>または<2>に係る回転電機では、前記永久磁石は、2つで一組をなして1つの磁極を構成し、各組の前記永久磁石は、前方に位置する前方磁石と、後方に位置する後方磁石と、を含むとともに、前記平面視において前記径方向の内側に向けて凸となるV字状に配置され、前記前方ブリッジは、前記前方磁石の前方に設けられ、前記後方ブリッジは、前記後方磁石の後方に設けられ、前記平面視において、前記前方仮想線は、前記中心軸と前記前方磁石の前端とを通過し、前記後方仮想線は、前記中心軸と前記後方磁石の後端とを通過する構成を採用してもよい。

[0009] 本願発明者は、前方ブリッジの後端の周方向の位置や後方ブリッジの前端の周方向の位置、言い換えると、第1ブリッジの開始位置が、最適進角の大きさに影響を与えることを見出した。

そこで本願発明者は、前方ブリッジの後端の周方向の位置や後方ブリッジの前端の周方向の位置を、ステータのティースのピッチに対応する中心角である θ_a （ラジアン）を単位として鋭意検討したところ、前述のように設定することで、高進角での電圧低減効果を活用しつつ、高いトルクを出力できることを見出した。

なお、一組の永久磁石が構成する磁極において生じる磁束がロータコア内で伝達される過程で、第1ブリッジの開始位置において磁気飽和が生じる。すると磁束が、ロータコア内から外部に向かい、ステータのティースに伝達される。そのため、第1ブリッジの開始位置は、磁束がステータに伝達される起点となる。このように第1ブリッジの開始位置が起点となることが、第1ブリッジの開始位置が最適進角の大きさに影響を与えることと関係していると考えられる。

発明の効果

[0010] 本発明によれば、電圧に対するトルクを向上させることができる。

図面の簡単な説明

[0011] [図1]本発明の一実施形態に係る回転電機を示す図であって、一部断面を含む平面図である。

[図2]図1に示す回転電機に含まれるステータおよびロータの拡大平面図である。

[図3]図1に示す回転電機に含まれるロータの拡大平面図である。

[図4]図3に示すI V部の拡大平面図である。

[図5]図3に示すV部の拡大平面図である。

[図6]図1に示す回転電機を説明するための図であって、ロータの前方ブリッジの後端および後方ブリッジの前端がそれぞれの基準位置に位置する状態を示す拡大平面図である。

[図7]図1に示す回転電機を説明するための図であって、ロータの前方ブリッジの後端および後方ブリッジの前端が、図5に示す位置に比べて前方に移動している状態を示す拡大平面図である。

[図8]図1に示す回転電機を説明するための図であって、ロータの前方ブリッジの後端および後方ブリッジの前端が、図6に示す位置に比べて前方に移動している状態を示す拡大平面図である。

[図9]図1に示す回転電機を説明するための図であって、ロータの前方ブリッジの後端および後方ブリッジの前端が、図7に示す位置に比べて前方に移動している状態を示す拡大平面図である。

[図10]図1に示す回転電機を説明するための図であって、ロータの前方ブリッジの後端および後方ブリッジの前端が、図5に示す位置に比べて前方に移動している状態を示す拡大平面図である。

[図11]本発明の一実施形態に係る回転電機において、磁束の流れるイメージを示す図である。

発明を実施するための形態

[0012] 以下、図 1 から図 1 1 を参照し、本発明の一実施形態に係る回転電機を説明する。回転電機は、電動機、具体的には交流電動機、より具体的には同期電動機、より一層具体的には永久磁石界磁型電動機である。この種の電動機は、例えば、電気自動車などに好適に採用される。

[0013] 図 1 および図 2 に示すように、回転電機 1 0 は、ステータ 2 0 と、ロータ 3 0 と、ケース 5 0 と、回転軸 6 0 と、を備える。ステータ 2 0 およびロータ 3 0 は、ケース 5 0 に收容される。ステータ 2 0 は、ケース 5 0 に固定される。回転電機 1 0 は、ロータ 3 0 がステータ 2 0 の内側に位置するインナーロータ型である。

[0014] なお本実施形態では、回転電機 1 0 が、8 極 2 4 スロットの三相交流モータである。しかしながら、例えば極数やスロット数、相数などは適宜変更することができる。

また回転電機 1 0 において、ステータ 2 0 およびロータ 3 0 の軸線は共通軸上にある。以下では、この共通軸を中心軸線 O（ロータ 3 0 の中心軸）という。中心軸線 O 方向（後述するロータコア 3 1 の軸方向）を軸方向といい、中心軸線 O に直交する方向（後述するロータコア 3 1 の径方向）を径方向といい、中心軸線 O 周りに周回する方向（後述するロータコア 3 1 の周方向）を周方向という。

[0015] ステータ 2 0 は、ステータコア 2 1 と、図示しない巻線と、を備える。

ステータコア 2 1 は、筒状（円筒状）のコアバック 2 2（ヨーク）と、複数のティース 2 3 と、を備える。

[0016] コアバック 2 2 は、回転電機 1 0 を軸方向から見た平面視において円環状に形成されている。

複数のティース 2 3 は、コアバック 2 2 から径方向の内側に向けて（径方向に沿ってコアバック 2 2 の中心軸線 O に向けて）突出する。複数のティース 2 3 は、周方向に同等の間隔をあけて配置されている。本実施形態では、中心軸線 O を中心とする中心角 1 5 度おきに 2 4 個のティース 2 3 が設けられている。複数のティース 2 3 は、互いに同等の形状で、かつ同等の大きさ

に形成されている。周方向に隣り合うティース23の間は、スロット24である。

前記巻線は、ティース23に巻き回されている。前記巻線は、集中巻きされていてもよく、分布巻きされていてもよい。

[0017] 図3に示すように、ロータ30は、ステータ20（ステータコア21）に対して径方向の内側に配置されている。ロータ30は、ロータコア31と、複数の永久磁石32と、を備える。

ロータコア31は、ステータ20と同軸に配置される筒状（円筒状）に形成されている。ロータコア31内には、前記回転軸60が配置されている。回転軸60は、ロータコア31と一緒に回転するように、ロータコア31に固定されている。

複数の永久磁石32は、ロータコア31に固定されている。本実施形態では、2つ1組の永久磁石32が1つの磁極33を形成している。複数組の永久磁石32は、周方向に同等の間隔をあけて配置されている。本実施形態では、中心軸線Oを中心とする中心角45度おきに8組（全体では16個）の永久磁石32が設けられている。

[0018] 回転電機10は、埋込磁石型モータである。ロータコア31には、ロータコア31を軸方向に貫通する複数の貫通孔34が形成されている。複数の貫通孔34は、複数の永久磁石32に対応して設けられている。各永久磁石32は、対応する貫通孔34内に配置された状態でロータコア31に固定されている。各永久磁石32のロータコア31への固定は、例えば永久磁石32の外面と貫通孔34の内面とを接着剤により接着すること等により、実現することができる。

[0019] なお、ステータコア21およびロータコア31としては、積層コアを採用することが可能である。積層コアは、複数の電磁鋼板が積層されることで形成されている。積層された電磁鋼板同士は、例えば、かしめや接着、溶接などにより固定されている。

ステータコア21およびロータコア31を形成する各電磁鋼板は、例えば

、母材となる電磁鋼板を打ち抜き加工すること等により形成される。電磁鋼板としては、公知の電磁鋼板を用いることができる。電磁鋼板の化学組成は特に限定されない。本実施形態では、電磁鋼板として、無方向性電磁鋼板を採用している。無方向性電磁鋼板としては、例えば、J I S C 2552 : 2014の無方向性電磁鋼帯を採用することができる。しかしながら、電磁鋼板として、無方向性電磁鋼板に代えて方向性電磁鋼板を採用することも可能である。方向性電磁鋼板としては、例えば、J I S C 2553 : 2012の方向性電磁鋼帯を採用することができる。

[0020] 電磁鋼板の加工性や、積層コアの鉄損を改善するため、電磁鋼板の両面には、絶縁被膜が設けられている。絶縁被膜を構成する物質としては、例えば、（１）無機化合物、（２）有機樹脂、（３）無機化合物と有機樹脂との混合物、などが適用できる。無機化合物としては、例えば、（１）重クロム酸塩とホウ酸の複合物、（２）リン酸塩とシリカの複合物、などが挙げられる。有機樹脂としては、エポキシ系樹脂、アクリル系樹脂、アクリルスチレン系樹脂、ポリエステル系樹脂、シリコン系樹脂、フッ素系樹脂などが挙げられる。

[0021] 以下、ロータ30の詳細について説明する。

図3に示すように、永久磁石32は、前述したように、ロータコア31に埋め込まれるとともに2つで対をなして1つの磁極33を構成している。永久磁石32は、ロータコア31に、周方向に複数対（図示の例では8対）配置されている。図示の例では、永久磁石32は、直方体状である。永久磁石32は、平面視において矩形状である。

[0022] 一对の永久磁石32は、前記平面視において、径方向の内側に向けて凸となるV字状に配置されている。一对の永久磁石32は、前記平面視において、d軸Aを基準として線対称に配置されている。d軸Aは、前記平面視において、中心軸線Oと、各磁極33の周方向の中央と、を通過する。一对の永久磁石32が配置される貫通孔34も同様に、d軸Aを基準として概ね線対称に配置されている。

[0023] 貫通孔 34 は、前記平面視において、永久磁石 32 よりも q 軸 B 側、および、d 軸 A 側の両側に大きい。q 軸 B は、前記平面視において、中心軸線 O と、周方向に隣り合う 2 つの磁極 33 の間と、を通過する。q 軸 B は、前記平面視において、前記 2 つの磁極 33 の間における周方向の中央を通過する。q 軸 B と d 軸 A とは、磁氣的、電氣的に直交する。貫通孔 34 のうち、永久磁石 32 に対して q 軸 B 側、および、d 軸 A 側それぞれに位置する部分は、フラックスバリア 35、36 となっている。言い換えると、永久磁石 32 の q 軸 B 側、および、d 軸 A 側の両端には、フラックスバリア 35、36 が設けられている。フラックスバリア 35、36 は、ロータコア 31 を軸方向に貫通する磁氣的空隙部である。フラックスバリア 35、36 は、ロータ 30 内で還流する永久磁石 32 からの磁石磁束（以下、還流磁束ともいう）を低減したり、永久磁石 32 からステータ 20 へ向かう磁石磁束の流入経路を変化させたりする。これにより、永久磁石 32 の磁石磁束（以下、単に磁石磁束）がステータ 20 に効果的に伝達されて高いトルクが出力される。フラックスバリア 35、36 は、磁石磁束をステータ 20 に誘導するともいえる。

[0024] ロータ 30 は、フラックスバリア 35、36 として、第 1 フラックスバリア 35 と、第 2 フラックスバリア 36 と、を備えている。第 1 フラックスバリア 35 および第 2 フラックスバリア 36 は、永久磁石 32 を両端から挟む。これにより、磁石磁束がステータ 20 に効果的に伝達され易くなる。

第 1 フラックスバリア 35 は、一つの永久磁石 32 から最も近い q 軸 B 側に位置する。第 1 フラックスバリア 35 は、一对の永久磁石 32 の周方向（回転方向）の両外側に位置する。第 2 フラックスバリア 36 は、一つの永久磁石 32 から最も近い d 軸 A 側に位置する。一对の永久磁石 32 の周方向（回転方向）の中央に位置する。

[0025] 第 1 フラックスバリア 35 は、一つの永久磁石 32 から最も近い q 軸 B 側の端面からロータコア 31 の径方向の外側に広がる。第 1 フラックスバリア 35 は、第 1 空間 37 と、第 2 空間 38 と、を備えている。第 1 空間 37 に

は、一つの永久磁石 3 2 から最も近い q 軸 B 側の端面が露出する。第 1 空間 3 7 は、前記平面視において、一つの永久磁石 3 2 から最も近い q 軸 B 側に延びる。第 1 空間 3 7 は、前記平面視において、q 軸 B 側に凸となる三角形形状である。第 1 空間 3 7 の径方向の空間幅は、一つの永久磁石 3 2 から最も近い q 軸 B 側に離れるに従い小さくなっている。第 2 空間 3 8 は、第 1 空間 3 7 に連通する。第 2 空間 3 8 の少なくとも一部は、第 1 空間 3 7 に対して径方向の外側に位置する。前記平面視において、第 2 空間 3 8 は矩形形状である。前記平面視において、第 2 空間 3 8 の面積は第 1 空間 3 7 の面積よりも狭い。

[0026] 第 1 フラックスバリア 3 5 に対する径方向の外側には、第 1 ブリッジ 3 9 が設けられている。第 1 ブリッジ 3 9 は、ロータコア 3 1 の一部である。第 1 ブリッジ 3 9 は、ロータコア 3 1 のうち、第 1 フラックスバリア 3 5 に対して径方向の外側に位置する部分である。第 1 ブリッジ 3 9 があることで、第 1 ブリッジ 3 9 がない場合に比べて、ロータコア 3 1 に遠心耐力が向上する。第 1 ブリッジ 3 9 は、ロータコア 3 1 における外周に力学的な強度を担保する。第 1 ブリッジ 3 9 の径方向の幅が十分細いと、磁束が第 1 ブリッジ 3 9 を通過することが磁気飽和によって妨げられ、磁石磁束の還流が防がれる。

[0027] 第 1 ブリッジ 3 9 の幅（径方向の大きさ）は、ロータコア 3 1 のうち第 1 ブリッジ 3 9 に対して周方向に隣り合う両部分の幅よりも、局所的に小さくなっている。

なお第 1 ブリッジ 3 9 の長さ（周方向の大きさ）や幅は、回転電機 1 0 の回転速度や形により適切に設計される。例えば、第 1 ブリッジ 3 9 の幅が、ロータコア 3 1 のうち第 1 ブリッジ 3 9 に対して周方向に隣り合う両部分の幅に対して、小さくなっているものの、局所的に小さくなくてもよい。例えば、第 1 ブリッジ 3 9 の幅が、ロータコア 3 1 のうち第 1 ブリッジ 3 9 に対して周方向に隣り合う両部分の幅に対して連続的に小さくなくてもよい。この場合、例えば、ロータコア 3 1 の外周部分において、径方向

の大きさ（幅）が、ロータコア 31 の外径の 1 % 以下となっている部分を、第 1 ブリッジ 39 としてもよい。また、第 1 フラックスバリア 35 の形状や大きさなども、本実施形態に示した態様に限られない。

[0028] 第 2 フラックスバリア 36 は、第 1 空間 37 を備え、一つの永久磁石 32 から最も近い d 軸 A 側の端面が露出する。第 1 空間 37 は、前記平面視において、一つの永久磁石 32 から最も近い d 軸 A 側に延びる。各磁極 33 において対をなす 2 つの第 2 フラックスバリア 36 の間には、第 2 ブリッジ 40 が設けられている。第 2 ブリッジ 40 は、周方向よりも径方向に長い。第 2 ブリッジ 40 は、第 2 ブリッジ 40 において磁束飽和を起こさせ、磁気回路の形成を阻害させる。第 2 ブリッジ 40 は、d 軸 A 上に位置する。

[0029] ここで、以下において回転電機 10 の回転方向（周方向）の前方を、単に前方 F とし、回転方向の後方を、単に後方 R とする。なお、中心軸線 O 回りの両方向に回転可能な回転電機 10 の場合、上記回転方向とは、回転電機 10 が主に回転する回転方向を意味する。また図示の例では、紙面を見たときにおける反時計回りを前方 F とし、時計回りを後方 R とする。

[0030] 一对の永久磁石 32 は、前方磁石 32 f と、後方磁石 32 r と、を含む。前方磁石 32 f は、後方磁石 32 r に対して前方 F 側に位置する。

1 つの磁極 33 に含まれる 2 つの第 1 ブリッジ 39 は、前方ブリッジ 39 f と、後方ブリッジ 39 r と、を含む。前方ブリッジ 39 f は、前方磁石 32 f に対して設けられている。前方ブリッジ 39 f は、前方磁石 32 f に対して前方 F 側（q 軸 B 側）、かつ、径方向の外側に位置する。前方ブリッジ 39 f は、一对の第 1 フラックスバリア 35 のうち、前方 F 側に位置する第 1 フラックスバリア 35 に対する径方向の外側に位置する。後方ブリッジ 39 r は、後方磁石 32 r に対して設けられている。後方ブリッジ 39 r は、後方磁石 32 r に対して後方 R 側（q 軸 B 側）、かつ、径方向の外側に位置する。後方ブリッジ 39 r は、一对の第 1 フラックスバリア 35 のうち、後方 R 側に位置する第 1 フラックスバリア 35 に対する径方向の外側に位置する。

[0031] 前方ブリッジ39fに対する基準位置を前方基準位置P_fとし、後方ブリッジ39rに対する基準位置を後方基準位置P_rとして、それぞれ以下のように定義する。前方基準位置P_fは、前記平面視において、中心軸線Oと、前方磁石32fの前方F側の周方向前端と、を通過する前方仮想線L₁とロータコア31の外周面との交点とする。後方基準位置P_rは、前記平面視において、中心軸線Oと、後方磁石32rの後方R側の周方向後端と、を通過する後方仮想線L₂とロータコア31の外周面との交点とする。

[0032] そして本実施形態では、図3および図4に示すように、最も前方F側に位置する後方ブリッジ39rの前端39r1は、後方基準位置P_rに対して、中心軸線Oを中心とする中心角で θ_f （ラジアン）分、前方F側に離れた位置に配置されている。最も後方R側に位置する前方ブリッジ39fの後端39f1は、前方基準位置P_fに対して、中心軸線Oを中心とする中心角で0（ラジアン）以上 θ_f （ラジアン）以下、前方F側に離れた位置に配置されている。

ただし、 θ_f は、以下の（1）式、（2）式を満たす。

$$0 < \theta_f \leq (\theta_a / 8) \dots (1)$$

$$\theta_a = 2\pi / (N_{slot}) \dots (2)$$

ここで、上記（2）式中の N_{slot} は、ステータ20の-slot数を意味する。

θ_f は、好ましくは、 $(\theta_a / 16) < \theta_f < (5\theta_a / 48)$ （（3）式）である。

最も後方R側に位置する前方ブリッジ39fの後端39f1は、好ましくは、前方基準位置P_fに対して、中心軸線Oを中心とする中心角で0（ラジアン）以上 $\theta_a / 48$ （ラジアン）以下、前方F側に離れた位置に配置されている。

[0033] さらに本実施形態では、図5に示すように、前方ブリッジ39fの後端39f1は、前方基準位置P_fに配置されている。図4に示すように、後方ブリッジ39rの前端39r1は、後方基準位置P_rに対して、中心軸線Oを

中心とする中心角で $\theta a/12$ （ラジアン）分、前方F側に離れた位置に配置されている。

[0034] ここで、前方ブリッジ39fの後端39f1や後方ブリッジ39rの前端39r1は、各ブリッジ39のうち、各組の永久磁石32によって発生する磁束の磁気飽和が生じる部分である。言い換えると、前方ブリッジ39fの後端39f1や後方ブリッジ39rの前端39r1は、各ブリッジ39のうち、磁束がロータ30からステータ20に渡り始める部分である。前方ブリッジ39fの後端39f1や後方ブリッジ39rの前端39r1は、各ブリッジ39における磁気飽和開始位置である。前方ブリッジ39fにおける磁気飽和開始位置は、後端39f1の磁気飽和開始位置のうちの後方R側の周方向端部位置である。後方ブリッジ39rにおける磁気飽和開始位置は、前端39r1の磁気飽和開始位置のうちの前方F側の周方向端部位置である。磁気飽和開始位置は、前方ブリッジ39f及び後方ブリッジ39rとロータコア31の外周面との距離が最短となる位置である。ブリッジ39の磁気飽和開始位置は、例えば、電磁界解析などにより得られた磁束密度の絶対値について、ロータコアに使用されている磁性材料の飽和磁束密度を超過する位置として求めてもよい。電磁界解析に代えて、実物を使用した実験を採用してもよい。磁気飽和開始位置は、上記したいずれか1つの方法または2つ以上の方法によって特定することができる。

前方ブリッジ39fの後端39f1や後方ブリッジ39rの前端39r1は、第1ブリッジ39において、第1ブリッジ39ではない部分との境界となる。前方ブリッジ39fの後端39f1や後方ブリッジ39rの前端39r1は、ロータコア31のうち、第1フラックスバリア35と、ロータコア31の外周面と、を径方向に最短距離で結ぶ領域として規定される。後方ブリッジ39rの前端39r1及び前方ブリッジ39fの後端39f1は、第1フラックスバリア35と中心軸線Oとを通過する仮想線上の一部の領域である。

図11に、本実施形態に係る回転電機において、磁束の流れるイメージを

示す。図 1 1 中の矢印 A 1, A 2 は、磁束の流れを意味する。矢印 A 1 は、磁束の大まかな流れを示す。矢印 A 2 は、各位置における磁束密度ベクトルを示す。図 1 1 に示すように、前方ブリッジ 3 9 f においては、前方ブリッジ 3 9 f の後端 3 9 f 1 でステータ 2 0 に磁束が渡る。後方ブリッジ 3 9 r においては、後方ブリッジ 3 9 r の前端 3 9 r 1 の位置により磁極 3 3 側に侵入する磁束量が変化する。

[0035] 例えば、ロータコア 3 1 のうち、前方 F 側の第 1 フラックスバリア 3 5 と、ロータコア 3 1 の外周面と、によって径方向に挟まれる部分（以下、第 1 部分という）における後方 R 側の端における幅（径方向の大きさ）が十分狭い場合、前方ブリッジ 3 9 f の後端 3 9 f 1 は、前記後方 R 側の端とすることができる。この場合、第 1 部分が第 1 フラックスバリア 3 5 の全長（周方向の長さ）にわたって前方ブリッジ 3 9 f となる。この場合において、前方ブリッジ 3 9 f における後端 3 9 f 1 よりも前方 F 側において、前方ブリッジ 3 9 f の幅が後端 3 9 f 1 よりも狭くなっているてもよいし、広がっているてもよい。言い換えると、前方ブリッジ 3 9 f の後端 3 9 f 1 が磁気飽和開始位置であれば、前方ブリッジ 3 9 f において後端 3 9 f 1 よりも前方に位置する部分は、後端 3 9 f 1 よりも径方向に大きくても小さくてもよい。

また、ロータコア 3 1 のうち、後方 R 側の第 1 フラックスバリア 3 5 と、ロータコア 3 1 の外周面と、によって径方向に挟まれる部分（以下、第 2 部分という）における前方 F 側の端の幅が十分狭い場合、後方ブリッジ 3 9 r の前端 3 9 r 1 は、前記前方 F 側の端とすることができる。この場合、第 2 部分が第 1 フラックスバリア 3 5 の全長（周方向の長さ）にわたって後方ブリッジ 3 9 r となる。この場合において、後方ブリッジ 3 9 r における前端 3 9 r 1 よりも後方 R 側において、後方ブリッジ 3 9 r の幅が前端 3 9 r 1 よりも狭くなっているてもよいし、広がっているてもよい。

[0036] さらに例えば、第 1 部分の後方 R 側の端の幅が十分狭くない場合、前方ブリッジ 3 9 f の後端 3 9 f 1 は、第 1 部分において前記幅が十分に狭い領域のうち、最も後方 R 側に位置する領域とすることができる。この場合、第 1

部分の一部が前方ブリッジ39fとなり、第1部分における周方向の後方R側の端よりも前方F側に、前方ブリッジ39fの後端39f1が位置する。

また、第2部分の前方F側の端の幅が十分狭くない場合、後方ブリッジ39rの前端39r1は、第2部分において前記幅が十分に狭い領域のうち、最も前方F側に位置する領域とすることができる。この場合、第2部分の一部が前方ブリッジ39fとなり、第2部分における周方向の前方F側の端よりも後方R側に、後方ブリッジ39rの前端39r1が位置する。

[0037] なお、上記いずれの場合においても、第1部分や第2部分の幅が十分に狭いことは、例えば、幅が、ロータコア31の外径の1%以下であることを意味していてもよい。また、第1部分や第2部分の幅が十分に狭いことは、例えば、幅が、0.3mm以下あることを意味していてもよい。また、前方ブリッジ39fの後端39f1や後方ブリッジ39rの前端39r1を特定するため、回転電機10をソフトウェア上で再現し、電磁場解析を実施してもよい。

[0038] ここで、前方ブリッジ39fの後端39f1と前方基準位置Pfとについての中心角は、前方ブリッジ39fに関する仮想線L1aと、前方仮想線L1と、についての、中心軸線Oを中心とする中心角である。前記仮想線L1aとは、前方ブリッジ39fの後端39f1と、中心軸線Oと、を通過する仮想線である。なお、前方ブリッジ39fの後端39f1と前方基準位置Pfとについての中心角が0（ラジアン）であること、言い換えると、前方ブリッジ39fの後端39f1が、前方基準位置Pfに配置されていることは、前述の仮想線L1aと前方仮想線L1とが一致していることを意味する。なお、前方仮想線L1と仮想線L1aとのなす角を θ_s とすると、 $0 \leq \theta_s \leq \theta_f$ となり、本実施形態では、 $\theta_s = 0$ である。

[0039] また、後方ブリッジ39rの前端39r1と後方基準位置Prとについての中心角は、後方ブリッジ39rに関する仮想線L2aと、後方仮想線L2と、についての、中心軸線Oを中心とする中心角である。前記仮想線L2aとは、後方ブリッジ39rの前端39r1と、中心軸線Oと、を通過する仮

想線である。なお、後方仮想線 L_2 と仮想線 L_{2a} とのなす角を θ_t とすると、 $0 < \theta_t \leq (\theta_a / 8)$ となり、本実施形態では、 $\theta_t = (\theta_a / 12)$ である。

[0040] 本願発明者は、前方ブリッジ39fの後端39f1の周方向の位置や後方ブリッジ39rの前端39r1の周方向の位置、言い換えると、第1ブリッジ39の開始位置が、最適進角の大きさに影響を与えることを見出した。

[0041] この知見は、以下の過程を経て得られた。

本願発明者は、ロータコア31の形状最適化の解析を実施した。この解析は、特開2021-114099号公報記載の内容に基づく。本願発明者は、解析を、異なる複数の進角を前提として複数回実施した。各解析の結果となるロータコア31の形状は、前提となった進角に応じて最適な形状であると言える。

[0042] 本願発明者は、各解析の結果を確認したところ、前提となる進角に応じて、第1フラックスバリア35（永久磁石32に対してq軸B側に位置するフラックスバリア35、36）の位置が周方向に移動することを発見した。逆に言うと、第1フラックスバリア35を周方向に移動させると、最適進角が変化することになる。

[0043] そこで本願発明者は、新たに以下に示すような解析を実施した。この解析では、第1ブリッジ39の周方向の位置を、図6から図9に示す位置0から位置3に変化させた上で、各形状における最適進角を求めた。

[0044] なお、位置0は、図6に示すロータ30Aであり、位置1は、図7に示すロータ30Bであり、位置2は、図8に示すロータ30Cであり、位置3は、図9に示すロータ30Dである。位置0では、前方ブリッジ39fの後端39f1は、前方基準位置 P_f に位置し、後方ブリッジ39rの前端39r1は、後方基準位置 P_r に位置する。前方ブリッジ39fの後端39f1の周方向の位置や後方ブリッジ39rの前端39r1の周方向の位置は、前方ブリッジ39fおよび後方ブリッジ39rのいずれについても、位置0から位置3に向かうに連れて0.65度ずつ（本実施形態のような4極対モータ

では電気角 2.5 度に相当)、前方 F 側に位置している。図 6 以下では、仮想線 L 1 a、L 2 a の記載を省略している。

以下の表 1 は、この解析結果を示す。

[0045] [表1]

	位置 0	位置 1	位置 2	位置 3
最適進角	50~52.5°	52.5~55°	55~57.5°	57.5~60°

[0046] 表 1 の通り、前方ブリッジ 39 f の後端 39 f 1 の周方向の位置や後方ブリッジ 39 r の前端 39 r 1 の周方向の位置を前方 F 側に移動させることで最適進角が大きくなることが確認できた。なお、位置 0 から位置 3 に向かうに連れて、最適進角は 0.25 度ずつ大きくなっている。この角度は、前記電気角と一致する。よって、第 1 ブリッジ 39 の位置の移動角が、最適進角の変化と対応していることが確認できた。

[0047] そこで本願発明者は、前方ブリッジ 39 f の後端 39 f 1 の周方向の位置や後方ブリッジ 39 r の前端 39 r 1 の周方向の位置を、ステータ 20 のティース 23 のピッチに対応する中心角である θa (ラジアン) を単位として鋭意検討したところ、前述のように設定することで、高進角での電圧低減効果を活用しつつ、高いトルクを出力できることを見出した。

[0048] この知見は、以下の過程を経て得られた。

本願発明者は、新たな解析を実施した。対象とする回転電機 10 は、図 3、図 6 および図 10 に示すロータ 30、30A、30E を含む回転電機 10 である。この回転電機 10 では、前述したようにスロット数が 24 スロットであるため、 $\theta a = 15$ 度である。この回転電機 10 において、第 1 ブリッジ 39 の位置を 0.625 度ずつ (すなわち、 $(\theta a / 24)$ 度ずつ)、回転前方 F 側に移動させた形状を前提として解析を実施し、トルク／電圧の値を評価した。なお図 3 に示すロータ 30 では、前方ブリッジ 39 f の後端 39 f 1 は、前方基準位置 Pf に位置し、後方ブリッジ 39 r の前端 39 r 1 は、後方基準位置 Pr に対して前方 F 側に 1.25° 移動している。図 10

に示すロータ 30E では、前方ブリッジ 39f の後端 39f1 は、前方基準位置 P_f に対して前方 F 側に 0.625° 移動し、後方ブリッジ 39r の前端 39r1 は、後方基準位置 P_r に対して前方 F 側に 0.625° 移動している。

[0049] 解析条件は表 2 の通りであり、電圧値として最大値を使用した。解析結果は、表 3 の通りである。なお表 3 では、前方ブリッジ 39f、後方ブリッジ 39r とともに、移動角度が 0 度を基準の 100 として、結果を正規化している。

[0050] [表 2]

電流	20A _{peak}
進角	各形状でトルク/電圧が最大となる進角
周波数	50Hz
磁石残留磁束密度	0.4T
ロータ径	27mm

[0051] [表 3]

トルク [Nm]/電圧 [V _{peak}]		回転前方ブリッジ				
		0°	+0.625°	+1.25°	+1.875°	+2.5°
回転後方ブリッジ	0°	100	98.1	97.3	96.5	—
	+0.625°	103.0	100.1	99.4	98.7	—
	+1.25°	105.7	104.6	101.9	100.0	—
	+1.875°	101.3	102.5	102.1	101.2	99.9
	+2.5°	99.8	100.0	99.8	99.7	—

[0052] 表 3 に太枠（ハッチング内）で示すように、後方ブリッジ 39r の移動角度が、0 より大きく 1.875 度（すなわち、($\theta_a/8$) 度）以下で、かつ、前方ブリッジ 39f の移動角度が、後方ブリッジ 39r の移動角度を超えない範囲において、この値が基準よりも大きくなることが確認された。また、後方ブリッジ 39r の移動角度が 1.25 度（すなわち、($\theta_a/12$) 度）で、かつ、前方ブリッジ 39f の移動角度が 0 度である場合、この値

が最大となることが確認された。

なお、移動角度は、シミュレーションモデルで測定した。具体的には、シミュレーションモデル上のブリッジ部に含まれる節点の座標から測定した。

[0053] なお、一对の永久磁石 3 2 が構成する磁極 3 3 において生じる磁束がロータコア 3 1 内で伝達される過程で、第 1 ブリッジ 3 9 の開始位置において磁気飽和が生じる。すると磁束が、ロータコア 3 1 内から外部に向かい、ステータ 2 0 のティース 2 3 に伝達される。そのため、第 1 ブリッジ 3 9 の開始位置は、磁束がステータ 2 0 に伝達される起点となる。このように第 1 ブリッジ 3 9 の開始位置が起点となることが、第 1 ブリッジ 3 9 の開始位置が最適進角の大きさに影響を与えることと関係していると考えられる。

[0054] なお、本発明の技術的範囲は前記実施形態に限定されるものではなく、本発明の趣旨を逸脱しない範囲において種々の変更を加えることが可能である。

[0055] ステータ 2 0 の形状は、前記実施形態で示した形態に限定されるものではない。具体的には、ステータコア 2 1 の外径および内径の寸法、積厚、スロット数、ティース 2 3 の周方向と径方向の寸法比率、ティース 2 3 とコアバック 2 2 との径方向の寸法比率、などは所望の回転電機 1 0 の特性に応じて任意に設計可能である。

[0056] ロータ 3 0 の形状は、前記実施形態で示した形態に限定されるものではない。具体的には、ロータコア 3 1 の外径および内径の寸法、積厚、極数などは所望の回転電機 1 0 の特性に応じて任意に設計可能である。

[0057] 前記実施形態では、ステータコア 2 1 およびロータコア 3 1 がいずれも積層コアであるとしたが、積層コアでなくてもよい。

第 2 フラックスバリア 3 6 がなくてもよい。

[0058] 前記実施形態では、1 つの磁極 3 3 が 2 つの永久磁石 3 2 で構成されている。しかしながら、本発明はこれに限られない。例えば、1 つの磁極 3 3 が、1 つの永久磁石 3 2 や 3 つの永久磁石 3 2、4 つ以上の永久磁石 3 2 によって構成されていてもよい。1 組の永久磁石 3 2 として、1 つ以上の永久磁

石 3 2 を含む他の形態が適宜採用される。

例えば、1組の永久磁石 3 2 が1つの永久磁石 3 2 である場合、この1つの永久磁石 3 2 が、前記平面視において、d 軸 A に直交する方向に長い長方形形状であってもよい。

例えば、1組の永久磁石 3 2 が3つの永久磁石 3 2 である場合であって、3つの永久磁石 3 2 が周方向に並んでいる場合には、以下のような配置であってもよい。この場合、周方向の中央に位置する永久磁石 3 2 が、前記平面視において、d 軸 A に直交する方向に長い長方形形状であってもよい。さらにこの場合、周方向の両側に位置する2つの永久磁石 3 2 が、前記平面視において、d 軸 A 側から q 軸 B 側に向かうに従い、径方向の外側に延びていてもよい。

[0059] その他、本発明の趣旨に逸脱しない範囲で、前記実施形態における構成要素を周知の構成要素に置き換えることは適宜可能であり、また、前記した変形例を適宜組み合わせてもよい。

産業上の利用可能性

[0060] 本発明によれば、電圧に対するトルクを向上させることができる。よって、産業上の利用可能性は大である。

符号の説明

[0061] 1 0 回転電機
2 0 ステータ
2 1 ステータコア
2 2 コアバック
2 3 ティース
2 4 スロット
3 0 ロータ
3 0 A ロータ
3 0 B ロータ
3 0 C ロータ

3 0 D ロータ
3 0 E ロータ
3 1 ロータコア
3 2 永久磁石
3 2 f 前方磁石
3 2 r 後方磁石
3 3 磁極
3 4 貫通孔
3 5 第1フラックスバリア
3 6 第2フラックスバリア
3 7 第1空間
3 8 第2空間
3 9 第1ブリッジ
3 9 f 前方ブリッジ
3 9 f 1 後端
3 9 r 後方ブリッジ
3 9 r 1 前端
4 0 第2ブリッジ
4 5 中心角
5 0 ケース
6 0 回転軸
F 前方
L 1 前方仮想線
L 1 a 仮想線
L 2 後方仮想線
L 2 a 仮想線
O 中心軸線（中心軸）
P f 前方基準位置

P r 後方基準位置

R 後方

請求の範囲

[請求項1]

環状のステータと、

前記ステータ内に配置されたロータと、を備え、

前記ロータは、

ロータコアと、

前記ロータコアに埋め込まれるとともに1組で1つの磁極を構成し、前記ロータコアに、前記ロータコアの周方向に複数組配置された永久磁石と、を備える回転電機であって、

前記ロータコアは、

各組の前記永久磁石に対して、前記ロータの回転方向の両側に設けられた第1フラックスバリアと、

前記第1フラックスバリアに対して、前記ロータコアの径方向の外側に設けられた第1ブリッジと、を備え、

前記第1ブリッジは、前記ロータの回転方向の前方に設けられた前方ブリッジと、前記ロータの回転方向の後方に設けられた後方ブリッジと、を含み、

前記前方ブリッジの基準位置である前方基準位置を、前記ロータを軸方向から見た平面視において、前記ロータコアの中心軸と、各組の前記永久磁石の前端と、を通過する前方仮想線と前記ロータコアの外周面との交点とし、かつ、前記後方ブリッジの基準位置である後方基準位置を、前記平面視において、前記ロータコアの中心軸と、各組の前記永久磁石の後端と、を通過する後方仮想線と前記ロータコアの外周面との交点としたときに、

複数組の前記永久磁石のうち、少なくとも1組の前記永久磁石において、

前記後方ブリッジの前端は、前記後方基準位置に対して、前記中心軸を中心とする中心角で θf （ラジアン）分、前方に離れた位置に配置され、

前記前方ブリッジの後端は、前記前方基準位置に対して、前記中心軸を中心とする中心角で0（ラジアン）以上 θf （ラジアン）以下、前方に離れた位置に配置されている、回転電機。

ただし、 θf は、以下の（1）式、（2）式を満たす。

$$0 < \theta f \leq (\theta a / 8) \cdots (1)$$

$$\theta a = 2\pi / (Ns \text{ l o t}) \cdots (2)$$

ここで、上記（2）式中の $Ns \text{ l o t}$ は、前記ステータのスロット数を意味する。

[請求項2]

前記少なくとも1組の前記永久磁石において、

前記前方ブリッジの後端は、前記前方基準位置に配置され、

前記後方ブリッジの前端は、前記後方基準位置に対して、前記中心軸を中心とする中心角で $\theta a / 12$ （ラジアン）分、前方に離れた位置に配置されている、請求項1に記載の回転電機。

[請求項3]

前記永久磁石は、2つで一組をなして1つの磁極を構成し、

各組の前記永久磁石は、前方に位置する前方磁石と、後方に位置する後方磁石と、を含むとともに、前記平面視において前記径方向の内側に向けて凸となるV字状に配置され、前記前方ブリッジは、前記前方磁石の前方に設けられ、

前記後方ブリッジは、前記後方磁石の後方に設けられ、

前記平面視において、前記前方仮想線は、前記中心軸と前記前方磁石の前端とを通過し、前記後方仮想線は、前記中心軸と前記後方磁石の後端とを通過する、請求項1または2に記載の回転電機。