

明 細 書

発明の名称：

ロータコア、ロータ、回転電機及びロータコアの設計方法

技術分野

[0001] 本発明は、ロータコア、ロータ、回転電機及びロータコアの設計方法に関する。

本願は、2023年4月3日に、日本に出願された特願2023-060099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2020-162379号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] この種の埋込型永久磁石型同期モータ（IPMSM）において、トルク脈動（トルクリプル）を抑制できる技術の実用化が求められている。

[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、トルク脈動を低減す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ロータコアは、埋込磁石型モータに用いられるロータコアであって、前記ロータコアには、磁極を構成する永久磁石が、前記ロータコアの周方向に複数組配置され、前記ロータコアには、前記ロータコアを、前記ロータコアの軸方向に貫通するとともに前記永久磁石が挿入される挿入孔が複数形成され、前記ロータコアには、複数の前記磁極のうちの少なくとも1つの磁極に対応して設けられ、前記ロータコアを前記軸方向

に貫通するフラックスバリアが形成され、前記フラックスバリアは、それぞれの前記磁極に対応して設けられた前方フラックスバリアおよび後方フラックスバリアを含み、前記挿入孔として、それぞれの前記磁極のうち回転前方寄りに配置される前記永久磁石が挿入される第1挿入孔と、それぞれの前記磁極のうち回転後方寄りに配置される前記永久磁石が挿入される第2挿入孔と、を含み、前記前方フラックスバリアは、前記第1挿入孔に対して、前記ロータコアの径方向の外側、かつ、回転前方に設けられるとともに、前記第1挿入孔に接続され、前記後方フラックスバリアは、前記第2挿入孔に対して、前記ロータコアの径方向の外側、かつ、回転後方に設けられるとともに、前記第2挿入孔に接続され、前記ロータコアは、前記ロータコアの外周面と前記前方フラックスバリアとの間に設けられた前方ブリッジと、前記ロータコアの外周面と前記後方フラックスバリアとの間に設けられた後方ブリッジと、を有し、前記後方ブリッジの中心位置 θ_r の、前記後方フラックスバリアの後方基準位置 θ_{sr} に対する相対位置は、前記前方ブリッジの中心位置 θ_f の、前記前方フラックスバリアの前方基準位置 θ_{sf} に対する相対位置よりも回転後方に位置しており、前記前方ブリッジの幅 W_f と、前記後方ブリッジの幅 W_r と、は異なる。

ここで、前方ブリッジの幅 W_f は、前方ブリッジがなす中心角で定義される。後方ブリッジの幅 W_r は、後方ブリッジがなす中心角で定義される。

[0007] <2>上記<1>に係るロータコアでは、前記後方ブリッジの幅 W_r は、前記前方ブリッジの幅 W_f より大きくてもよい。

[0008] <3>本発明の一態様に係るロータは、<1>または<2>に記載のロータコアと、前記ロータコアに埋め込まれるとともに磁極を構成し、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。

[0009] <4>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上記<3>に記載のロータと、を備えている。

[0010] <5>上記<4>に係る回転電機では、前記ロータコアは、前記ロータコ

アの外周面と前記前方フラックスバリアとの間に設けられた前方ブリッジと、前記ロータコアの外周面と前記後方フラックスバリアとの間に設けられた後方ブリッジと、を有し、前記ステータの1スロットあたりの中心角 θ_s を、 $\theta_s = 2\pi / N_{slot} [rad]$ (N_{slot} は、ステータのスロット数を意味する。)としたとき、前記後方ブリッジの中心位置 θ_r が、前記後方フラックスバリアの後方基準位置 θ_{sr} に対して、前記中心角 θ_s を用いて表される第1範囲内に位置し、前記前方ブリッジの中心位置 θ_f が、前記前方フラックスバリアの前方基準位置 θ_{sf} に対して、前記中心角 θ_s を用いて表される第2範囲内に位置し、前記第1範囲および前記第2範囲は、前記前方ブリッジの幅 W_f と、前記後方ブリッジの幅 W_r と、に応じて異なってもよい。

[0011] <6>上記<5>に係る回転電機では、前記前方ブリッジの幅 W_f が $\theta_s / 8 \sim 5\theta_s / 24$ 、前記後方ブリッジの幅 W_r が $7\theta_s / 24 \sim 3\theta_s / 8$ の場合に、前記第1範囲が $-\theta_s / 6 \sim -\theta_s / 8$ 、かつ前記第2範囲が $\theta_s / 24 \sim \theta_s / 24$ 、あるいは、前記第1範囲が $-\theta_s / 8 \sim -\theta_s / 12$ 、かつ前記第2範囲が $-\theta_s / 24 \sim \theta_s / 12$ であってもよい。

[0012] <7>上記<5>に係る回転電機では、前記前方ブリッジの幅 W_f が $\theta_s / 8 \sim 5\theta_s / 24$ 、前記後方ブリッジの幅 W_r が $3\theta_s / 8 \sim 11\theta_s / 24$ の場合に、前記第1範囲が $-\theta_s / 8 \sim -\theta_s / 24$ 、かつ前記第2範囲が $-\theta_s / 24 \sim \theta_s / 12$ であってもよい。

[0013] <8>上記<5>に係る回転電機では、前記前方ブリッジの幅 W_f が $5\theta_s / 24 \sim 7\theta_s / 24$ 、前記後方ブリッジの幅 W_r が $7\theta_s / 24 \sim 3\theta_s / 8$ の場合に、前記第1範囲が $-\theta_s / 6 \sim -\theta_s / 8$ 、かつ前記第2範囲が $-\theta_s / 24 \sim \theta_s / 12$ 、前記第1範囲が $-\theta_s / 8 \sim -\theta_s / 12$ 、かつ前記第2範囲が $0 \sim 5\theta_s / 24$ 、あるいは、前記第1範囲が $-\theta_s / 12 \sim -\theta_s / 24$ 、かつ前記第2範囲が $\theta_s / 24 \sim 5\theta_s / 24$ であってもよい。

[0014] <9>上記<5>に係る回転電機では、前記前方ブリッジの幅 W_f が 5θ

$s/24 \sim 7\theta s/24$ 、前記後方ブリッジの幅 W_r が $3\theta s/8 \sim 11\theta s/24$ の場合に、前記第1範囲が $-\theta s/6 \sim -\theta s/8$ 、かつ前記第2範囲が $-\theta s/12 \sim 0$ 、前記第1範囲が $-\theta s/8 \sim -\theta s/12$ 、かつ前記第2範囲が $-\theta s/12 \sim \theta s/24$ 、あるいは、前記第1範囲が $-\theta s/12 \sim -\theta s/24$ 、かつ前記第2範囲が $-\theta s/24 \sim \theta s/8$ であってもよい。

[0015] <10>本発明の一態様に係るロータコアの設計方法は、<1>から<3>のいずれか1態様に記載のロータコアの設計方法であって、前記磁極における磁束に基づいて、前記前方フラックスバリア及び前記後方フラックスバリアに対して位置および形状をそれぞれ設計する工程を含む。

[0016] <11>上記<10>に係るロータコアの設計方法では、前記工程では、トルク極小時には、前記後方フラックスバリアが、前記後方フラックスバリアに対して最近傍に位置するティース正面の磁束経路を遮断するとともに、前記前方フラックスバリアが、前記前方フラックスバリアに対して最近傍に位置するティースに回転後方から向かう磁石磁束を妨げないようにし、かつ、トルク極大時には、前記後方フラックスバリアが、前記後方フラックスバリアに対して最近傍に位置するティースに回転後方から進入する磁束経路を遮断するとともに、前記前方フラックスバリアが、前記前方フラックスバリアに対して最近傍に位置するティース正面の磁束経路を遮断しないようにして前記ティース正面の磁束経路を広くするように、前記前方フラックスバリア及び前記後方フラックスバリアの位置および形状を設計してもよい。

発明の効果

[0017] 本発明によれば、トルク脈動を低減する。

図面の簡単な説明

[0018] [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]ロータの基準形状に基づいて、前方フラックスバリアの前方基準位置及び後方フラックスバリアの後方基準位置を説明する平面図である。

[図5]ロータコアに設けられた後方ブリッジの中心位置と前方ブリッジの中心位置とを説明する平面図である。

[図6]ロータコアの後方ブリッジ幅と前方ブリッジ幅とを説明する平面図である。

[図7]ロータコアの第1低減パターンを説明する平面図である。

[図8]ロータコアの第2低減パターンを説明する平面図である。

[図9]ロータコアの第3低減パターンを説明する平面図である。

[図10]ロータコアの第4低減パターンを説明する平面図である。

[図11]ロータコアの第5低減パターンを説明する平面図である。

[図12]ロータコアの第6低減パターンを説明する平面図である。

[図13]ロータコアの第7低減パターンを説明する平面図である。

[図14]ロータコアの第8低減パターンを説明する平面図である。

[図15]ロータコアの第9低減パターンを説明する平面図である。

[図16]実施形態の回転電機においてトルク脈動の最適低減が可能なロータを示す平面図である。

[図17]比較例の回転電機において平均トルクを最大化したロータを示す平面図である。

[図18]実施形態の回転電機と比較例の回転電機とによる電気角とトルクとの関係を示すグラフである。

[図19]実施形態の回転電機において比較例の回転電機のトルク波形が極小になる電気角にロータが位置したときの磁束密度ベクトルを示す平面図である。

[図20]比較例の回転電機においてトルク波形が極小になる電気角にロータが位置したときの磁束密度ベクトルを示す平面図である。

[図21]実施形態の回転電機において比較例の回転電機のトルク波形が極大に

なる電気角にロータが位置したときの磁束密度ベクトルを示す平面図である。

[図22]比較例の回転電機においてトルク波形が極大になる電気角にロータが位置したときの磁束密度ベクトルを示す平面図である。

発明を実施するための形態

[0019] 以下、図1から図22を参照し、本発明の一実施形態に係るロータコア、ロータ、回転電機及びロータコアの設計方法を説明する。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。

[0020] 図1および図2に示すように、回転電機10は、ステータ20と、ロータ30と、ケース50と、回転軸60と、を備える。ステータ20およびロータ30は、ケース50に收容される。ステータ20は、ケース50に固定される。回転電機10は、ロータ30がステータ20の内側に位置するインナーロータ型である。

[0021] なお本実施形態では、回転電機10が、8極24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10において、ステータ20およびロータ30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30の中心軸）という。中心軸線O方向（後述するロータコア31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31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31の周方向）を周方向という。

[0022] ステータ20は、ステータコア21と、図示しない巻線と、を備える。

ステータコア21は、筒状（円筒状）のコアバック22（ヨーク）と、複数のティース23と、を備える。

[0023] コアバック22は、回転電機10を軸方向から見た平面視において円環状

(環状)に形成されている。

複数のティース23は、コアバック22から径方向の内側に向けて（径方向に沿ってコアバック22の中心軸線Oに向けて）突出する。複数のティース23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15度おきに24個のティース23が設けられている。複数のティース23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よく、分布巻きされていてよい。

[0024] 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。ロータコア31には複数の磁極33が設けられている。本実施形態では、2つ1組の永久磁石32が1つの磁極33を構成している。複数の磁極33を構成す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。

[0025] 回転電機10は、埋込磁石型モータ（IPMSM）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挿入孔34が形成されている。複数の挿入孔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、対応する挿入孔34内に挿入された状態でロータコア31に固定されている。つまり、挿入孔34は、永久磁石32を設置可能な

空間を形成する。図3に示す実施形態では、永久磁石32は長手方向を有する四角形状であり、挿入孔34も同様な長手方向を有する四角形状となる部分を含む形状となっている。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の外面と挿入孔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。

[0026] 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、JIS 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、JIS C 2553 : 2012の方向性電磁鋼帯を採用することができる。

[0027] 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。

[0028] 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。永久磁石32の位置や大きさ、形状は、全ての磁極33について同等である。各磁極33の平面視における形状は、全ての磁極33について同等である。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。

[0029] 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Ldを基準として線対称に配置されている。d軸Ld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が配置される挿入孔34も同様に、d軸Ldを基準として概ね線対称に配置されている。以下、d軸Ldを「基準線Ld」ということがある。

[0030] 挿入孔34は、前記平面視において、永久磁石32よりもq軸Lq側、および、d軸Ld側の両側に大きい。挿入孔34として、第1挿入孔34fと、第2挿入孔34rと、を含む。第1挿入孔34fは、それぞれの磁極33のうち回転前方のq軸Lq寄り（すなわち、回転前方寄り）に配置される永久磁石32が挿入される。第2挿入孔34rは、それぞれの磁極33のうち回転後方のq軸Lq寄り（すなわち、回転後方寄り）に配置される永久磁石32が挿入される。

[0031] q軸Lq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Lq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Lqとd軸Ldとは、磁氣的、電氣的に直交する。挿入孔34のうち、永久磁石32に対してq軸Lq側、および、d軸Ld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Lq側、および、d軸Ld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および挿入孔34が、ロータコア31の軸方向に貫通しているので、ロータコア31の製造が容易となる。フラックスバリア35、36および挿入孔34は、ロータコア31の軸方向の全長に渡って貫通し、一部も分断されていないことが好ましい。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。

[0032] 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（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。加えて、ロータ30は、複数のブリッジ37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をその長手方向の両端から挟む。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、各永久磁石32に対してq軸Lq側に位置する。第1フラックスバリア35は、一対の永久磁石32の周方向（回転方向）の両側に位置する。第2フラックスバリア36は、各永久磁石32に対してd軸Ld側に位置する。第2フラックスバリア36は、一対の永久磁石32の周方向（回転方向）の中央に位置する。

[0033] 各永久磁石32に対してq軸Lq側に位置する一対の第1フラックスバリア35は、磁極33の回転前方と回転後方とに対応して配置されている。本実施形態では、第1フラックスバリア35を全ての磁極33の回転前方と回転後方とに配置する例について説明するが、第1フラックスバリア35を少なくとも1つの磁極33の回転前方と回転後方とに配置してもよい。

[0034] 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（回転前方）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。

[0035] 第 1 フラックスバリア 35 は、前方フラックスバリア 35 f と、後方フラックスバリア 35 r と、を含む。前方フラックスバリア 35 f は、磁極 33 の前方 F に設けられている。前方フラックスバリア 35 f は、第 1 挿入孔 34 f に対して、ロータコア 31 の径方向の外側、かつ、前方 F に設けられている。前方フラックスバリア 35 f は、第 1 挿入孔 34 f に接続されている。

[0036] 前方フラックスバリア 35 f は、径方向の外側に位置する外周側面 35 f o を有する。外周側面 35 f o は、ロータコア 31 の外周面 31 a に対して径方向の内側に位置する。外周側面 35 f o は、外周面 31 a に沿って形成されている。外周側面 35 f o が外周面 31 a に沿っているとは、外周側面 35 f o が外周面 31 a に対して完全に平行である場合だけでなく、外周側面 35 f o が外周面 31 a に対して実質的に平行である場合も含む。外周側面 35 f o が外周面 31 a に対して実質的に平行である場合には、外周面 31 a が円弧状で、外周側面 35 f o が直線状であり、外周面 31 a と略平行である場合も含む。外周側面 35 f o が外周面 31 a に対して実質的に平行であることは、後述するブリッジ 37 の径方向の長さが、ブリッジ 37 の周方向の全長にわたって実質的に同等であることを意味する。ブリッジ 37 の径方向の長さとは、外周側面 35 f o 上の各点と、外周面 31 a との距離の最小値とする。なお、前方フラックスバリア 35 f の外周縁がロータコア 31 の外周面 31 a に平行または略平行な部分を有さない場合は、本願発明の効果が得られない。

[0037] 後方フラックスバリア 35 r は、磁極 33 の後方 R に設けられている。後方フラックスバリア 35 r は、第 2 挿入孔 34 r に対して、ロータコア 31 の径方向の外側、かつ、後方 R に設けられている。後方フラックスバリア 35 r は、第 2 挿入孔 34 r に接続されている。

[0038] 後方フラックスバリア 35 r は、径方向の外側に位置する外周側面 35 r

oを有する。外周側面35roは、ロータコア31の外周面31aに対して径方向の内側に位置する。外周側面35roは、外周面31aに沿って形成されている。外周側面35roが外周面31aに沿っているとは、外周側面35roが外周面31aに対して完全に平行である場合だけでなく、外周側面35roが外周面31aに対して実質的に平行である場合も含む。外周側面35roが外周面31aに対して実質的に平行である場合には、外周面31aが円弧状で、外周側面35roが直線状であり、外周面31aと略並行である場合も含む。外周側面35roが外周面31aに対して実質的に平行であることは、後述するブリッジ37の径方向の長さが、ブリッジ37の周方向の全長にわたって実質的に同等であることを意味する。ブリッジ37の径方向の長さとは、外周側面35ro上の各点と、外周面31aとの距離の最小値とする。なお、後方フラックスバリア35rの外周縁がロータコア31の外周面31aに平行または略平行な部分を有さない場合は、本願発明の効果が得られない。

[0039] また、ロータ30は複数のブリッジ37を有する。ブリッジ37は、前方ブリッジ37fと、後方ブリッジ37rと、を含む。前方ブリッジ37fは、ロータコア31の外周面31aと前方フラックスバリア35fの外周側面35foとの間に設けられている。前方ブリッジ37fの内周側面37faは、ロータコア31の外周面31aに対して完全に平行、または実質的に平行である。後方ブリッジ37rは、ロータコア31の外周面31aと後方フラックスバリア35rの外周側面35roとの間に設けられている。後方ブリッジ37rの内周側面37raは、ロータコア31の外周面31aに対して完全に平行、または実質的に平行である。フラックスバリアとは、ロータコア内に設けられる非磁性領域であり、磁束を妨げる機能を持つ。ブリッジとは、非磁性領域により分断された磁性体領域を接続する部分を表し、磁性体領域を機械的に支持すると共に、ブリッジが磁気飽和することで、磁束の通過を妨げる機能を持つ。この機能を満たす為に、ブリッジは周囲の磁性体領域と比べて幅が狭くなっており、ブリッジ中の最大磁束密度は飽和磁束密

度を上回る。ブリッジ中の最大磁束密度は、電磁界解析により確かめられる。

ブリッジ37の位置、大きさは、フラックスバリア35の位置、大きさに応じて変化する。例えば、前方ブリッジ37fの幅 W_f は、前方ブリッジがなす中心角で表される。後方ブリッジ37rの幅 W_r は、後方ブリッジがなす中心角で表される。前方ブリッジ37fにおける周方向の中心位置 θ_f （以下、前方ブリッジ37fの中心位置 θ_f ともいう）は、前方フラックスバリア35fの外周側面35foの周方向の中心と、前方基準位置 θ_{sf} との間に成す、中心軸線O回りの角度で表される（図5参照）。後方ブリッジ37rにおける周方向の中心位置 θ_r （以下、後方ブリッジ37rの中心位置 θ_r ともいう）は、後方フラックスバリア35rの外周側面35roの周方向の中心と、後方基準位置 θ_{rr} との間に成す、中心軸線O回りの角度で表される（図5参照）。

[0040] 前方ブリッジ37fの中心位置 θ_f 及び後方ブリッジ37rの中心位置 θ_r は、磁極33の周方向の中央を通り、ロータコア31の径方向に延びる基準線 L_d （d軸）に対して非対称となる位置に配置されている。具体的には、後方ブリッジ37rの中心位置 θ_r は、周方向において前方ブリッジ37fの中心位置 θ_f より基準線 L_d から離れた位置に配置されている。そして、後方ブリッジ37rの中心位置 θ_r の、後方フラックスバリア35rの後方基準位置 θ_{sr} に対する相対位置は、前方ブリッジ37fの中心位置 θ_f の、前方フラックスバリア35fの前方基準位置 θ_{sf} に対する相対位置よりも回転後方に位置している。後方ブリッジ37rの中心位置 θ_r の、後方フラックスバリア35rの後方基準位置 θ_{sr} に対する相対位置は、後方フラックスバリア35rの後方基準位置 θ_{sr} と後方ブリッジ37rの中心位置 θ_r との間に成す、中心軸線O回りの角度である。前方ブリッジ37fの中心位置 θ_f の、前方フラックスバリア35fの前方基準位置 θ_{sf} に対する相対位置は、前方フラックスバリア35fの前方基準位置 θ_{sf} と前方ブリッジ37fの中心位置 θ_f との間に成す、中心軸線O回りの角度である。

また、前方ブリッジ37fの幅 W_f と、後方ブリッジ37rの幅 W_r と、は異なる。具体的には、後方ブリッジ37rの幅 W_r （後方フラックスバリア35rの外周側面35roの成す中心角）は、前方ブリッジ37fの幅 W_f （前方フラックスバリア35fの外周側面35foの成す中心角）より大きい（ $W_r > W_f$ ）。

[0041] 複数のブリッジ37は、磁束がブリッジ37を通過することを磁気飽和によって妨げることができる。なおブリッジ37は、例えば、ロータ30が所定の回転速度以上で回転したときにおいて、磁束がブリッジ37を通過することを磁気飽和によって妨げればよく、前記所定の回転速度未満で回転したときにおいては、磁束がブリッジ37を通過してもよい。ブリッジ37の周方向の長さや径方向の幅（径方向の長さ）は、回転電機10の回転速度や形により適切に設計される。

[0042] 以下、回転電機（IPMSM）10のトルク脈動を低減する前方フラックスバリア35f、後方フラックスバリア35r、前方ブリッジ37f、後方ブリッジ37rの形状、位置について詳しく説明する。

[0043] （フラックスバリアの基準位置）

まず、図4に示すロータ30の基準形状に基づいて、前方フラックスバリア35fの前方基準位置 θ_{sf} 、及び後方フラックスバリア35rの後方基準位置 θ_{sr} について説明する。前方基準位置 θ_{sf} 及び後方基準位置 θ_{sr} は、前方フラックスバリア35f及び後方フラックスバリア35rの形状、位置を決める際に基準とする位置である。

なお図4に示すロータ30の基準形状は、各磁極33における周方向の対象性を前提としたパラメータ探索（特開2021-114099号公報に記載の解析方法）により磁石外周側の前方フラックスバリア35f及び後方フラックスバリア35rの位置、幅を最適化したものである。

[0044] 図4に示すように、前方フラックスバリア35fの前方基準位置 θ_{sf} は、第1挿入孔34fに挿入された永久磁石32において前方Fで、かつ径方向内側の角部（周方向に最も前方Fに位置する角部）32aと中心軸線Oを

結ぶ直線 L_f がロータコア31の外周面31aと交差する位置である。また、後方フラックスバリア35rの後方基準位置 θ_{sr} は、第2挿入孔34rに挿入された永久磁石32において後方Rで、かつ径方向内側の角部（周方向に最も後方Rに位置する角部）32bと中心軸線Oを結ぶ直線 L_r がロータコア31の外周面31aと交差する位置である。

前方基準位置 θ_{sf} 及び後方基準位置 θ_{sr} は、平面視において、基準線 L_d を基準として線対称に配置されている。ただし、前方基準位置 θ_{sf} 及び後方基準位置 θ_{sr} が、前述のように線対称に配置されていなくてもよい。

[0045] （ブリッジの中心位置）

つぎに、前方ブリッジ37fの中心位置 θ_f 及び後方ブリッジ37rの中心位置 θ_r を図5に基づいて説明する。前方ブリッジ37fの中心位置 θ_f 及び後方ブリッジ37rの中心位置 θ_r は、前方基準位置 θ_{sf} 及び後方基準位置 θ_{sr} を基準とする、中心軸線O回りの角度である。なお前述したように、前方ブリッジ37fの中心位置 θ_f は、前方ブリッジ37fにおける周方向の中心である。後方ブリッジ37rの中心位置 θ_r は、後方ブリッジ37rにおける周方向の中心である。

[0046] 図5は、後方ブリッジ37rの中心位置 θ_r と前方ブリッジ37fの中心位置 θ_f とを説明する図である。

図5に示すように、後方ブリッジ37rの中心位置 θ_r は、後方フラックスバリア35rの後方基準位置 θ_{sr} を基準にして周方向に離れた位置を示す。後方基準位置 θ_{sr} を基準にして前方Fに離れた位置を正（+）、後方Rに離れた位置を負（-）で示す。後方ブリッジ37rの中心位置 θ_r は、後方フラックスバリア35rの後方基準位置 θ_{sr} に対して、中心角 θ_s を用いて表される第1範囲内に位置する。

[0047] ここで前記中心角 θ_s は、つぎの式で表される。

$$\theta_s = 2\pi / N_{slot} \text{ [rad]} \quad (N_{slot} \text{ は、ステータ20のスロット数を意味する。})$$

[0048] また、前方ブリッジ37fの中心位置 θ_f は、前方フラックスバリア35fの前方基準位置 θ_{sf} を基準にして周方向に離れた位置を示す。前方基準位置 θ_{sf} を基準にして前方Fに離れた位置を正（+）、後方Rに離れた位置を負（-）で示す。前方ブリッジ37fの中心位置 θ_f は、前方フラックスバリア35fの前方基準位置 θ_{sf} に対して、中心角 θ_s を用いて表される第2範囲内に位置する。

[0049] ついで、前方ブリッジ37f及び後方ブリッジ37rの形状を図6に基づいて説明する。

図6は、後方ブリッジ37rの幅 W_r と前方ブリッジ37fの幅 W_f とを説明する図である。以下、後方ブリッジ37rの幅 W_r を「後方ブリッジ幅 W_r 」ということがある。前方ブリッジ37fの幅 W_f を「前方ブリッジ幅 W_f 」ということがある。

図6に示すように、後方ブリッジ幅 W_r は、後方ブリッジ37rの前方F側の端部と後方R側の端部との間に成す、中心軸線O回りの角度で表される。このとき、後方ブリッジ37rの前方F側の端部、後方R側の端部はいずれも、後方フラックスバリア35rの外周側面35ro上に位置している。後方ブリッジ37rの幅 W_r は、後述するように前記中心角 θ_s を用いて表される。

また、前方ブリッジ幅 W_f は、前方ブリッジ37fの前方F側の端部と後方R側の端部との間に成す、中心軸線O回りの角度で表される。このとき、前方ブリッジ37fの前方F側の端部、後方R側の端部はいずれも、前方フラックスバリア35fの外周側面35fo上に位置している。前方ブリッジ37fの幅 W_f は、後述するように前記中心角 θ_s を用いて表される。

[0050] 上述したように、後方ブリッジ37rの中心位置 θ_r が位置する範囲（以下、第1範囲）、及び前方ブリッジ37fの中心位置 θ_f が位置する範囲（以下、第2範囲）は、前方ブリッジ幅 W_f と、後方ブリッジ幅 W_r と、に応じて異なる。

ロータコア31の後方ブリッジ幅 W_r 、前方ブリッジ幅 W_f 、第1範囲、

及び第2範囲の好適な組み合わせのパターンには、回転電機（IPMSM）10のトルク脈動を低減する第1低減パターンから第9低減パターンがある。

[0051] 回転電機10のトルク脈動を低減するロータコア31の第1低減パターンから第9低減パターンを図7から図15に基づいて説明する。

まず、第1低減パターンを図7に基づいて説明する。図7は、回転電機10のトルク脈動を低減する第1低減パターンを示す。

図7に示すように、第1低減パターンは、前方ブリッジ幅 W_f が $\theta_s/8 \sim 5\theta_s/24$ 、後方ブリッジ幅 W_r が $7\theta_s/24 \sim 3\theta_s/8$ の場合に、後方ブリッジ37rの中心位置 θ_r が位置する第1範囲が $-\theta_s/6 \sim -\theta_s/8$ である。かつ、前方ブリッジ37fの中心位置 θ_f が位置する第2範囲が $-\theta_s/24 \sim \theta_s/24$ である。

[0052] 第1低減パターンによれば、後方ブリッジ幅 W_r は、前方ブリッジ幅 W_f より大きい。よって、後方フラックスバリア35rの周方向の幅は、前方フラックスバリア35fの周方向の幅より大きい。

また、第一範囲の最大値 $-\theta_s/8$ は、第二範囲の最小値 $-\theta_s/24$ よりも小さい。すなわち、後方基準位置 $\theta_s r$ に対する後方フラックスバリア35rの相対位置は、前方基準位置 $\theta_s f$ に対する前方フラックスバリア35fの相対位置より周方向において回転後方に配置されている。

[0053] つぎに、第2低減パターンを図8に基づいて説明する。図8は、回転電機10のトルク脈動を低減する第2低減パターンを示す。

図8に示すように、前方ブリッジ幅 W_f が $\theta_s/8 \sim 5\theta_s/24$ 、後方ブリッジ幅 W_r が $7\theta_s/24 \sim 3\theta_s/8$ の場合に、後方ブリッジ37rの中心位置 θ_r が位置する第1範囲が $-\theta_s/8 \sim -\theta_s/12$ である。かつ、前方ブリッジ37fの中心位置 θ_f が位置する第2範囲が $-\theta_s/24 \sim \theta_s/12$ である。

[0054] 第2低減パターンによれば、第1低減パターンと同様に、後方フラックスバリア35rの周方向の幅は、前方フラックスバリア35fの周方向の幅より

り大きい。また、後方基準位置 θ_{sr} に対する後方フラックスバリア 35 r の相対位置は、前方基準位置 θ_{sf} に対する前方フラックスバリア 35 f の相対位置より周方向において回転後方に配置されている。

[0055] ついで、第3低減パターンを図9に基づいて説明する。図9は、回転電機10のトルク脈動を低減する第3低減パターンを示す。

図9に示すように、前方ブリッジ幅 W_f が $\theta_s/8 \sim 5\theta_s/24$ 、後方ブリッジ幅 W_r が $3\theta_s/8 \sim 11\theta_s/24$ の場合に、後方ブリッジ 37 r の中心位置 θ_r が位置する第1範囲が $-\theta_s/8 \sim -\theta_s/24$ である。かつ、前方ブリッジ 37 f の中心位置 θ_f が位置する第2範囲が $-\theta_s/24 \sim \theta_s/12$ である。

[0056] 第3低減パターンによれば、第1低減パターンと同様に、後方フラックスバリア 35 r の周方向の幅は、前方フラックスバリア 35 f の周方向の幅より大きい。また、後方基準位置 θ_{sr} に対する後方フラックスバリア 35 r の相対位置は、前方基準位置 θ_{sf} に対する前方フラックスバリア 35 f の相対位置より周方向において回転後方に配置されている。

[0057] つづいて、第4低減パターンを図10に基づいて説明する。図10は、回転電機10のトルク脈動を低減する第4低減パターンを示す。

図10に示すように、前方ブリッジ幅 W_f が $5\theta_s/24 \sim 7\theta_s/24$ 、後方ブリッジ幅 W_r が $7\theta_s/24 \sim 3\theta_s/8$ の場合に、後方ブリッジ 37 r の中心位置 θ_r が位置する第1範囲が $-\theta_s/6 \sim -\theta_s/8$ である。かつ、前方ブリッジ 37 f の中心位置 θ_f が位置する第2範囲が $-\theta_s/24 \sim \theta_s/12$ である。

[0058] 第4低減パターンによれば、第1低減パターンと同様に、後方フラックスバリア 35 r の周方向の幅は、前方フラックスバリア 35 f の周方向の幅より大きい。また、後方基準位置 θ_{sr} に対する後方フラックスバリア 35 r の相対位置は、前方基準位置 θ_{sf} に対する前方フラックスバリア 35 f の相対位置より周方向において回転後方に配置されている。

[0059] つぎに、第5低減パターンを図11に基づいて説明する。図11は、回転

電機 10 のトルク脈動を低減する第 5 低減パターンを示す。

図 11 に示すように、前方ブリッジ幅 W_f が $5\theta_s/24 \sim 7\theta_s/24$ 、後方ブリッジ幅 W_r が $7\theta_s/24 \sim 3\theta_s/8$ の場合に、後方ブリッジ 37r の中心位置 θ_r が位置する第 1 範囲が $-\theta_s/8 \sim -\theta_s/12$ である。かつ、前方ブリッジ 37f の中心位置 θ_f が位置する第 2 範囲が $0 \sim 5\theta_s/24$ である。

[0060] 第 5 低減パターンによれば、第 1 低減パターンと同様に、後方フラックスバリア 35r の周方向の幅は、前方フラックスバリア 35f の周方向の幅より大きい。また、後方基準位置 θ_{sr} に対する後方フラックスバリア 35r の相対位置は、前方基準位置 θ_{sf} に対する前方フラックスバリア 35f の相対位置より周方向において回転後方に配置されている。

[0061] ついで、第 6 低減パターンを図 12 に基づいて説明する。図 12 は、回転電機 10 のトルク脈動を低減する第 6 低減パターンを示す。

図 12 に示すように、前方ブリッジ幅 W_f が $5\theta_s/24 \sim 7\theta_s/24$ 、後方ブリッジ幅 W_r が $7\theta_s/24 \sim 3\theta_s/8$ の場合に、後方ブリッジ 37r の中心位置 θ_r が位置する第 1 範囲が $-\theta_s/12 \sim -\theta_s/24$ である。かつ、前方ブリッジ 37f の中心位置 θ_f が位置する第 2 範囲が $\theta_s/24 \sim 5\theta_s/24$ である。

[0062] 第 6 低減パターンによれば、第 1 低減パターンと同様に、後方フラックスバリア 35r の周方向の幅は、前方フラックスバリア 35f の周方向の幅より大きい。また、後方基準位置 θ_{sr} に対する後方フラックスバリア 35r の相対位置は、前方基準位置 θ_{sf} に対する前方フラックスバリア 35f の相対位置より周方向において回転後方に配置されている。

[0063] つづいて、第 7 低減パターンを図 13 に基づいて説明する。図 13 は、回転電機 10 のトルク脈動を低減する第 7 低減パターンを示す。

図 13 に示すように、前方ブリッジ幅 W_f が $5\theta_s/24 \sim 7\theta_s/24$ 、後方ブリッジ幅 W_r が $3\theta_s/8 \sim 11\theta_s/24$ の場合に、後方ブリッジ 37r の中心位置 θ_r が位置する第 1 範囲が $-\theta_s/6 \sim -\theta_s/8$ である。

。かつ、前方ブリッジ37fの中心位置 θf が位置する第2範囲が $-\theta s/12 \sim 0$ である。

[0064] 第7低減パターンによれば、第1低減パターンと同様に、後方フラックスバリア35rの周方向の幅は、前方フラックスバリア35fの周方向の幅より大きい。また、後方基準位置 θsr に対する後方フラックスバリア35rの相対位置は、前方基準位置 θsf に対する前方フラックスバリア35fの相対位置より周方向において回転後方に配置されている。

[0065] つぎに、第8低減パターンを図14に基づいて説明する。図14は、回転電機10のトルク脈動を低減する第8低減パターンを示す。

図14に示すように、前方ブリッジ幅 Wf が $5\theta s/24 \sim 7\theta s/24$ 、後方ブリッジ幅 Wr が $3\theta s/8 \sim 11\theta s/24$ の場合に、後方ブリッジ37rの中心位置 θr が位置する第1範囲が $-\theta s/8 \sim -\theta s/12$ である。かつ、前方ブリッジ37fの中心位置 θf が位置する第2範囲が $-\theta s/12 \sim \theta s/24$ である。

[0066] 第8低減パターンによれば、第1低減パターンと同様に、後方フラックスバリア35rの周方向の幅は、前方フラックスバリア35fの周方向の幅より大きい。また、後方基準位置 θsr に対する後方フラックスバリア35rの相対位置は、前方基準位置 θsf に対する前方フラックスバリア35fの相対位置より周方向において回転後方に配置されている。

[0067] ついで、第9低減パターンを図15に基づいて説明する。図15は、回転電機10のトルク脈動を低減する第9低減パターンを示す。

図15に示すように、前方ブリッジ幅 Wf が $5\theta s/24 \sim 7\theta s/24$ 、後方ブリッジ幅 Wr が $3\theta s/8 \sim 11\theta s/24$ の場合に、後方ブリッジ37rの中心位置 θr が位置する第1範囲が $-\theta s/12 \sim -\theta s/24$ である。かつ、前方ブリッジ37fの中心位置 θf が位置する第2範囲が $-\theta s/24 \sim \theta s/8$ である。

[0068] 第9低減パターンによれば、第1低減パターンと同様に、後方フラックスバリア35rの周方向の幅は、前方フラックスバリア35fの周方向の幅より

り大きい。また、後方基準位置 $\theta_{s\ r}$ に対する後方フラックスバリア 35 r の相対位置は、前方基準位置 $\theta_{s\ f}$ に対する前方フラックスバリア 35 f の相対位置より周方向において回転後方に配置されている。

[0069] 図 7 から図 15 の第 1 低減パターンから第 9 低減パターンで説明したように、回転電機 10 のトルク脈動を低減するために、後方フラックスバリア 35 r の周方向の幅は、前方フラックスバリア 35 f の周方向の幅より大きく形成されている。また、後方基準位置 $\theta_{s\ r}$ に対する後方フラックスバリア 35 r の相対位置は、前方基準位置 $\theta_{s\ f}$ に対する前方フラックスバリア 35 f の相対位置より周方向において回転後方に配置されている。

[0070] ここで、図 7 から図 15 の第 1 低減パターンから第 9 低減パターンは、図 4 に示す基準形状のロータ 30 に設けた前方フラックスバリア 35 f 及び後方フラックスバリア 35 r の位置、幅を最適化したものである。すなわち、第 1 低減パターンから第 9 低減パターンは、トルク脈動 [%] / 平均トルク [Nm] を評価値とし、表 1 に示す対象形状の中で評価値が優位となった形状である。ここで、トルク脈動とは、トルクの極大値と極小値の半値幅が平均トルクに占める割合である。また、平均トルクは、トルクを時間平均した数値である。

表 1 は、基準形状に対する評価値の変化を示す。つまり、「ある形状における前記評価値（トルク脈動 [%] / 平均トルク [Nm]）－基準形状における前記評価値（トルク脈動 [%] / 平均トルク [Nm]）」の値を示す。

表 1 において、優位な値を「良」で示し、劣位な値を「不可」で示す。基準形状に対する評価値の変化が「－」（マイナス）、すなわちトルク脈動が基準形状に対して減少した場合に「良」と示す。「不可」で示す評価値は、基準形状に対する評価値の変化が「＋」（プラス）、すなわちトルク脈動が基準形状に対して増加する場合である。表 1 における周囲の例の値を基に、基準形状に対する評価値の変化がプラスの値となると判断できる場合は、評価値の計算を行わずに「不可」と示した。これらについては、基準形状に対する評価値の変化の値を記載していない。なお、表 1 に示す範囲外において

は全ての評価値が基準形状より劣位となった。

[0071] [表1]

	$-\frac{\theta_z}{12} \leq \theta_f < -\frac{\theta_z}{24}$	$-\frac{\theta_z}{24} \leq \theta_f < 0$	$0 \leq \theta_f < \frac{\theta_z}{24}$	$\frac{\theta_z}{24} \leq \theta_f < \frac{\theta_z}{12}$	$\frac{\theta_z}{12} \leq \theta_f < \frac{\theta_z}{8}$	$\frac{\theta_z}{8} \leq \theta_f < \frac{\theta_z}{6}$	$\frac{\theta_z}{6} \leq \theta_f \leq \frac{5}{24}\theta_z$
$-\frac{\theta_z}{6} \leq \theta_f < -\frac{\theta_z}{8}$	①+3.3% 不可 ②不可 ③+8.1% 不可 ④-25.6% 良	①-33.5% 良 ②不可 ③-34.0% 良 ④-1.7% 良	①-19.3% 良 ②不可 ③-24.0% 良 ④+30.2% 不可	①+8.2% 不可 ②+16.5% 不可 ③-12.7% 良 ④不可	①不可 ②不可 ③+0.8% 不可 ④不可	①不可 ②不可 ③不可 ④不可	①不可 ②不可 ③不可 ④不可
$-\frac{\theta_z}{8} \leq \theta_f < -\frac{\theta_z}{12}$	①不可 ②+8.1% 不可 ③不可 ④-4.3% 良	①-9.5% 良 ②-6.8% 良 ③+8.6% 不可 ④-29.3% 良	①-33.0% 良 ②-25.5% 良 ③-16.2% 良 ④-2.0% 良	①-12.4% 良 ②-31.2% 良 ③-21.8% 良 ④+5.2% 不可	①+8.9% 不可 ②+5.4% 不可 ③-14.1% 不良 ④不可	①不可 ②不可 ③-7.7% 良 ④不可	①不可 ②不可 ③-1.2% 良 ④不可
$-\frac{\theta_z}{12} \leq \theta_f \leq -\frac{\theta_z}{24}$	①不可 ②不可 ③不可 ④+0.5% 不可	①不可 ②-1.0% 良 ③不可 ④-15.9% 良	①+4.7% 不可 ②-18.7% 良 ③+0.6% 不可 ④-18.2% 良	①+12.5 不可 ②-15.4% 良 ③-2.8% 良 ④-15.9% 良	①不可 ②+0.0% 不可 ③-12.8% 良 ④-8.0% 良	①不可 ②不可 ③-8.7% 良 ④+0.0% 不可	①不可 ②不可 ③-2.2% 良 ④不可

[0072] 表1中の [○1]、[○2]、[○3]、[○4] は、前方ブリッジ幅W

f、後方ブリッジ幅 W_r における下記の範囲を示す。なお、[○1]など、○の後に数字を記載している文字列は、表1において○内に数字が記入されていることを意味している。

[○1]：前方ブリッジ幅 W_f が $\theta_s/8 \sim 5\theta_s/24$ 、後方ブリッジ幅 W_r が $7\theta_s/24 \sim 3\theta_s/8$

[○2]：前方ブリッジ幅 W_f が $\theta_s/8 \sim 5\theta_s/24$ 、後方ブリッジ幅 W_r が $3\theta_s/8 \sim 11\theta_s/24$

[○3]：前方ブリッジ幅 W_f が $5\theta_s/24 \sim 7\theta_s/24$ 、後方ブリッジ幅 W_r が $7\theta_s/24 \sim 3\theta_s/8$

[○4]：前方ブリッジ幅 W_f が $5\theta_s/24 \sim 7\theta_s/24$ 、後方ブリッジ幅 W_r が $3\theta_s/8 \sim 11\theta_s/24$

[0073] つぎに、実施形態の回転電機10と比較例の回転電機100とのトルク脈動を比較した例を図16から図18に基づいて説明する。

図16は、実施形態の回転電機10においてトルク脈動の最適低減が可能なロータ30を示す。図17は、比較例の回転電機100において平均トルクを最大化したロータ101を示す。図18は、実施形態の回転電機10と比較例の回転電機110との電気角とトルクとの関係（トルク波形）を示すグラフである。図18は、縦軸にトルク（Nm）を示し、横軸に電気角（°）を示す。なお、これらのロータ30、112の形状は、特開2021-114099号公報に記載の解析方法に基づいて求めた。

[0074] 図18において、グラフG1は実施形態の回転電機10のトルク波形を示す。グラフG2は比較例の回転電機100のトルク波形を示す。グラフG1のトルク波形とグラフG2のトルク波形とを比較することにより、グラフG1のトルク脈動がグラフG2のトルク脈動に比べて非常に小さくなっていることが確認できる。これにより、実施形態の回転電機10のトルク脈動が比較例の回転電機100のトルク脈動に比べて非常に小さくなっていることが確認できる。

[0075] ついで、図16に示す実施形態の回転電機10と図17に示す比較例の回

転電機 100 とにおける磁束密度ベクトルを図 19 から図 22 に基づいて説明する。

まず、図 19、図 20 において、図 18 のグラフ G2 で示す比較例の回転電機 100 のトルク波形が極小になる電気角 $\theta 1$ に実施形態のロータ 30 と比較例のロータ 101 とが位置したときに生じる磁束密度ベクトルについて説明する。以下では、周方向に隣り合う 2 つの磁極 33 について着目する。これらの 2 つの磁極 33 の間には、ティース 23 が配置されている。そして以下では、このティース 23 に対する、前述した 2 つの磁極 33 に発生する磁束の流れについて説明する。

[0076] 図 19 は、実施形態の回転電機 10 においてロータ 30 が電気角 $\theta 1$ に位置したときの磁束密度ベクトルを示す図である。

図 19 に示すように、実施形態の回転電機 10 において、前述の 2 つの磁極 33 のうち、前方 F に位置する磁極 33 (以下、前方磁極 33 f とともいう) における後方フラックスバリア 35 r が、その前方磁極 33 f に含まれる永久磁石 32 から前記ティース 23 の正面 23 a への磁束経路を遮断する。さらに、前述の 2 つの磁極 33 のうち、後方 R に位置する磁極 33 (以下、後方磁極 33 r とともいう) における前方フラックスバリア 35 f が、その後方磁極 33 r に含まれる永久磁石 32 からティース 23 に向かう磁石磁束を妨げない。よって、トルク極小時に前方 F のトルクが増加する傾向となり、前方 F のトルク T1、トルク T2 を適切に確保できる。これにより、実施形態の回転電機 10 は、図 18 のグラフ G1 に示すように、電気角 $\theta 1$ におけるトルクの低下を抑制できる。

[0077] 図 20 は、比較例の回転電機 100 においてロータ 101 が電気角 $\theta 1$ に位置したときの磁束密度ベクトルを示す図である。

図 20 に示すように、比較例の回転電機 100 において、前述の 2 つの磁極 33 のうちの後方磁極 33 r における前方フラックスバリア 103 f が、後方磁極 33 r に含まれる永久磁石 32 からティース 23 に進入する磁束経路を遮断する。よって、ティース 23 に作用する後方 R からのトルク T3 が

大幅に小さくなる。さらに、前述の2つの磁極33のうちの前方磁極33fにおける後方フラックスバリア103rが、実施形態の回転電機10に比べて前方Fに位置しており、ロータ101からティース23の正面23aに進入する磁束経路が広くなり、磁束がティース23の正面23aに径方向に向けて（径方向に実質的に平行に）進入し易くなる。よって、この磁束によって生じるトルクT4の径方向の成分が大きくなり、前方Fに向けた成分が小さくなる。このため、比較例の回転電機100は、図18のグラフG2に示すように、電気角 $\theta 1$ におけるトルクが極小値になる。

[0078] つぎに、図21、図22において、図18のグラフG2で示す比較例の回転電機100のトルク波形が極大になる電気角 $\theta 2$ に実施形態のロータ30と比較例のロータ101とが位置したときに生じる磁束密度ベクトルについて説明する。以下では、周方向に隣り合う2つの磁極33について着目する。これらの2つの磁極33のうち、前方Fの磁極33の後方R寄り、および、後方Rの磁極33の前方F寄りにはそれぞれ、ティース23が配置されている。そして以下では、これらの2つのティース23に対する、前述した2つの磁極33に発生する磁束の流れについて説明する。

[0079] 図21は、実施形態の回転電機10においてロータ30が電気角 $\theta 2$ に位置したときの磁束密度ベクトルを示す図である。

図21に示すように、実施形態の回転電機10において、前述の2つの磁極33のうちの前方磁極33fにおける後方フラックスバリア35rが、前述の2つのティース23のうち、前方Fに位置するティース23（以下、前方ティース23fともいう）に対して、後方Rから進入しようとする磁束経路を遮断する。よって、前方ティース23fに作用する後方RからのトルクT5が大幅に小さくなる。さらに、前述の2つの磁極33のうちの後方磁極33rにおける前方フラックスバリア35fが、前述の2つのティース23のうち、後方Rに位置するティース23（以下、後方ティース23rともいう）の正面23aにロータ30から進入する磁束経路を遮断しない。よって、後方ティース23rの正面23aの磁束経路を広くできる。磁束経路を

くすることにより、後方ティース 23 r の正面 23 a から径方向に向けて（径方向に実質的に平行に）磁束が進入する。この磁束により生じるトルク T6 の径方向の成分が大きくなり、前方 F に向けた成分が小さくなる。これにより、トルク極大時に前方 F のトルクを小さく抑制でき、回転前方のトルクを抑制できる。

このように、トルク極小時に回転前方のトルクを適切に確保し、トルク極大時に回転前方のトルクを抑制することにより、IPMSM のトルク脈動を低減することができる。

[0080] 図 22 は、比較例の回転電機 100 においてロータ 101 が電気角 $\theta 2$ に位置したときの磁束密度ベクトルを示す図である。

図 22 に示すように、比較例の回転電機 100 において、前述の 2 つの磁極 33 のうちの前方磁極 33 f における後方フラックスバリア 103 r が、前方磁極 33 f に含まれる永久磁石 32 から、前述の 2 つのティース 23 のうちの前方ティース 23 f に進入する磁束経路を遮断しない。よって、前方 F のトルク T7 が大きくなる。さらに、前述の 2 つの磁極 33 のうちの後方磁極 33 r における前方フラックスバリア 103 f が、後方磁極 33 r に含まれる永久磁石 32 から、前述の 2 つのティース 23 のうちの後方ティース 23 r に進入する磁束経路を遮断しない。よって、前方 F のトルク T8 が大きくなる。このため、比較例の回転電機 100 は、図 18 のグラフ G2 に示すように、電気角 $\theta 2$ におけるトルクが極大値になる。

[0081] このように、比較例の回転電機 100 は、図 18 のグラフ G2 に示すように、電気角 $\theta 1$ におけるトルクが極小値になり、電気角 $\theta 2$ におけるトルクが極大値になる。この結果、比較例の回転電機 100 によれば、極大トルクと極小トルクとの差が大きくなり、トルク脈動が大きくなる。

[0082] 図 16 から図 22 においては、実施形態のロータコア 31 にブリッジ 37 を設けていない状態、及び比較例のロータコア 102 にブリッジを設けていない状態について説明した。ここで、ロータコア 31 及びロータコア 102 にブリッジを設けて実現可能な形に修正した場合も同様の効果を得ることが

できる。これにより、ロータコア 31 にブリッジ 37 を設けた活用が可能である。

[0083] 以上説明した実施形態のロータコア 31、ロータ 30、回転電機 10 及びロータコア 31 の設計方法によれば、次の効果が得られる。

ここで、本願発明者は、磁極 33 における磁束に基づいて、前方フラックスバリア 35 f 及び後方フラックスバリア 35 r の位置及び形状を設計することにより、IPMSM のトルク脈動を低減することができることを見出した。

[0084] そこで、ロータコア 31 の設計方法において、前方フラックスバリア 35 f 及び後方フラックスバリア 35 r の位置および形状を設計する工程を含むようにした。具体的には、ロータコア 31 の設計方法の工程において、図 19 に示すように、トルク極小時には、後方フラックスバリア 35 r が、後方フラックスバリア 35 r に対して最近傍に位置するティース 23 の正面 23 a（前述の 2 つの磁極 33 の間に位置するティース 23 の正面 23 a）の磁束経路を遮断するようにした。さらに、前方フラックスバリア 35 f が、前方フラックスバリア 35 f に対して最近傍に位置するティース 23 に後方 R から向かう磁石磁束を妨げないようにした。

かつ、図 21 に示すように、トルク極大時には、後方フラックスバリア 35 r が、後方フラックスバリア 35 r に対して最近傍に位置するティース 23（前方ティース 23 f）に後方 R から進入する磁束経路を遮断するとともに、前方フラックスバリア 35 f が、前方フラックスバリア 35 f に対して最近傍に位置するティース 23 の正面 23 a（後方ティース 23 r の正面 23 a）の磁束経路を広くするようにした。

[0085] このロータコア 31 の設計方法の工程において、前方ブリッジ 37 f の中心位置 θ_f 及び後方ブリッジ 37 r の中心位置 θ_r を、磁極 33 の周方向の中央を通り、ロータコア 31 の径方向に延びる基準線 L_d に対して非対称となる位置に配置した。また、前方ブリッジ 37 f の幅 W_f と、後方ブリッジ 37 r の幅 W_r と、を異ならせた。

具体的には、後方ブリッジ37rの中心位置 θ_r の、後方基準位置 θ_{sr} に対する相対位置を、前方ブリッジ37fの中心位置 θ_f の、前方基準位置 θ_{sf} に対する相対位置より回転後方に配置した。さらに、後方ブリッジ37rの幅 W_r を前方ブリッジ37fの幅 W_f より大きくした。

[0086] よって、トルク極小時において、後方フラックスバリア35rがティース23の正面23aの磁束経路を遮断できる。さらに、前方フラックスバリア35fがティース23に後方Rから向かう磁石磁束を妨げないようにできる。これにより、トルク極小時に回転前方のトルクが増加する傾向となり、回転前方のトルクを適切に確保できる。

[0087] 一方、トルク極大時において、後方フラックスバリア35rがティース23に後方Rから進入する磁束経路を遮断できる。さらに、前方フラックスバリア35fがティース23正面23aの磁束経路を遮断しないようにしてティース23の正面23aの磁束経路を広くできる。ティース23の正面23aの磁束経路を広くすることにより、前方Fのトルクを小さく抑制できる。これにより、トルク極大時に前方Fのトルクを抑制できる。

このように、トルク極小時に前方Fのトルクを適切に確保し、トルク極大時に前方Fのトルクを抑制することにより、IPMSMのトルク脈動を低減することができる。

[0088] 図7から図15の第1低減パターンから第9低減パターンにおいて、後方フラックスバリア35rの周方向の幅を、前方フラックスバリア35fの周方向の幅より大きく形成した。また、後方ブリッジ37rの中心位置 θ_r の、後方基準位置 θ_{sr} に対する相対位置を、前方ブリッジ37fの中心位置 θ_f の、前方基準位置 θ_{sf} に対する相対位置より回転後方に配置した。

[0089] よって、トルク極小時において、後方フラックスバリア35rがティース23の正面23aの磁束経路を遮断できる。さらに、前方フラックスバリア35fがティース23に後方Rから向かう磁石磁束を妨げないようにできる。これにより、トルク極小時に回転前方のトルクが増加する傾向となり、回転前方のトルクを適切に確保できる。

[0090] 一方、トルク極大時において、後方フラックスバリア35rがティース23に後方Rから進入する磁束経路を遮断できる。さらに、前方フラックスバリア35fがティース23正面23aの磁束経路を遮断しないようにしてティース23の正面23aの磁束経路を広くできる。ティース23の正面23aの磁束経路を広くすることにより、前方Fのトルクを小さく抑制できる。これにより、トルク極大時に前方Fのトルクを抑制できる。

このように、トルク極小時に前方Fのトルクを適切に確保し、トルク極大時に前方Fのトルクを抑制することにより、IPMSMのトルク脈動を低減することができる。

[0091] 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。

[0092] ステータ20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21の外径および内径の寸法、積厚、スロット数、ティース23の周方向と径方向の寸法比率、ティース23とコアバック22との径方向の寸法比率、などは所望の回転電機10の特性に応じて任意に設計可能である。

[0093] ロータ30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31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10の特性に応じて任意に設計可能である。

[0094] 前記実施形態では、ステータコア21およびロータコア31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36がなくてもよい。

[0095] 前記実施形態では、1つの磁極33が2つの永久磁石32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33が、1つの永久磁石32や3つの永久磁石32、4つ以上の永久磁石32によって構成されていてもよい。1組の永久磁石32として、1つ以上の永久磁石32を含む他の形態が適宜採用される。この場合、1つの永久磁石32が

挿入される挿入孔 3 4 そのものが第 1 挿入孔 3 4 f および第 2 挿入孔 3 4 r を兼ねることとなる。

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 L d に直交する方向に長い長方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 L d に直交する方向に長い長方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 L d 側から q 軸 L q 側に向かうに従い、径方向の外側に延びていてもよい。この場合、3 つ以上の永久磁石 3 2 のうち、最も前方に位置する永久磁石 3 2 が挿入される挿入孔 3 4 が第 1 挿入孔 3 4 f となり、最も後方に位置する永久磁石 3 2 が挿入される挿入孔 3 4 が第 2 挿入孔 3 4 r となる。

[0096] 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

[0097] 本発明によれば、トルク脈動を低減する。よって、産業上の利用可能性は大である。

符号の説明

[0098] 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 3 a 正面
2 3 f 前方ティース

23 r 後方ティース
24 スロット
30 ロータ
31 ロータコア
31 a 外周面
32 永久磁石
32 a 角部
32 b 角部
33 磁極
33 f 前方磁極
33 r 後方磁極
34 挿入孔
34 f 第1挿入孔
34 r 第2挿入孔
35 第1フラックスバリア（フラックスバリア）
35 f 前方フラックスバリア
35 f o 外周側面
35 r 後方フラックスバリア
35 r o 外周側面
36 第2フラックスバリア
37 ブリッジ
37 f 前方ブリッジ
37 r 後方ブリッジ
50 ケース
60 回転軸
100 回転電機
101 ロータ
102 ロータコア

1 0 3 f 前方フラックスバリア

1 0 3 r 後方フラックスバリア

1 1 0 回転電機

1 1 2 ロータ

F 前方

L d d軸（基準線）

L f 直線

L q q軸

L r 直線

O 中心軸線

R 後方

W f 前方ブリッジ幅

W r 後方ブリッジ幅

θ f 中心位置

θ r 中心位置

θ s 中心角

θ s f 前方基準位置

θ s r 後方基準位置

請求の範囲

[請求項1]

埋込磁石型モータに用いられるロータコアであって、

前記ロータコアには、磁極を構成する永久磁石が、前記ロータコアの周方向に複数組配置され、

前記ロータコアには、前記ロータコアを、前記ロータコアの軸方向に貫通するとともに前記永久磁石が挿入される挿入孔が複数形成され、

前記ロータコアには、複数の前記磁極のうちの少なくとも1つの磁極に対応して設けられ、前記ロータコアを前記軸方向に貫通するフラックスバリアが形成され、

前記フラックスバリアは、それぞれの前記磁極に対応して設けられた前方フラックスバリアおよび後方フラックスバリアを含み、

前記挿入孔として、それぞれの前記磁極のうち回転前方寄りに配置される前記永久磁石が挿入される第1挿入孔と、それぞれの前記磁極のうち回転後方寄りに配置される前記永久磁石が挿入される第2挿入孔と、を含み、

前記前方フラックスバリアは、前記第1挿入孔に対して、前記ロータコアの径方向の外側、かつ、回転前方に設けられるとともに、前記第1挿入孔に接続され、

前記後方フラックスバリアは、前記第2挿入孔に対して、前記ロータコアの径方向の外側、かつ、回転後方に設けられるとともに、前記第2挿入孔に接続され、

前記ロータコアは、前記ロータコアの外周面と前記前方フラックスバリアとの間に設けられた前方ブリッジと、前記ロータコアの外周面と前記後方フラックスバリアとの間に設けられた後方ブリッジと、を有し、

前記後方ブリッジの中心位置 θ_r の、前記後方フラックスバリアの後方基準位置 θ_{sr} に対する相対位置は、前記前方ブリッジの中心位

置 θ_f の、前記前方フラックスバリアの前方基準位置 θ_{sf} に対する
相対位置よりも回転後方に位置しており、

前記前方ブリッジの幅 W_f と、前記後方ブリッジの幅 W_r と、は異なる、ロータコア。

[請求項2] 前記後方ブリッジの幅 W_r は、前記前方ブリッジの幅 W_f より大きい、請求項1に記載のロータコア。

[請求項3] 請求項1または2に記載のロータコアと、
前記ロータコアに埋め込まれるとともに磁極を構成し、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、ロータ。

[請求項4] 環状のステータと、
前記ステータ内に配置された請求項3に記載のロータと、を備えている、回転電機。

[請求項5] 前記ステータの1スロットあたりの中心角 θ_s を、
 $\theta_s = 2\pi / N_{slot} \text{ [rad]}$ (N_{slot} は、ステータのスロット数を意味する。)
としたとき、
前記後方ブリッジの中心位置 θ_r が、前記後方フラックスバリアの後方基準位置 θ_{sr} に対して、前記中心角 θ_s を用いて表される第1範囲内に位置し、
前記前方ブリッジの中心位置 θ_f が、前記前方フラックスバリアの前方基準位置 θ_{sf} に対して、前記中心角 θ_s を用いて表される第2範囲内に位置し、
前記第1範囲および前記第2範囲は、前記前方ブリッジの幅 W_f と、前記後方ブリッジの幅 W_r と、に応じて異なる、請求項4に記載の回転電機。

[請求項6] 前記前方ブリッジの幅 W_f が $\theta_s / 8 \sim 5\theta_s / 24$ 、前記後方ブリッジの幅 W_r が $7\theta_s / 24 \sim 3\theta_s / 8$ の場合に、

前記第1範囲が $-\theta s/6 \sim -\theta s/8$ 、かつ前記第2範囲が $-\theta s/24 \sim \theta s/24$ 、

あるいは、前記第1範囲が $-\theta s/8 \sim -\theta s/12$ 、かつ前記第2範囲が $-\theta s/24 \sim \theta s/12$ である、請求項5に記載の回転電機。

[請求項7] 前記前方ブリッジの幅 W_f が $\theta s/8 \sim 5\theta s/24$ 、前記後方ブリッジの幅 W_r が $3\theta s/8 \sim 11\theta s/24$ の場合に、

前記第1範囲が $-\theta s/8 \sim -\theta s/24$ 、かつ前記第2範囲が $-\theta s/24 \sim \theta s/12$ である、請求項5に記載の回転電機。

[請求項8] 前記前方ブリッジの幅 W_f が $5\theta s/24 \sim 7\theta s/24$ 、前記後方ブリッジの幅 W_r が $7\theta s/24 \sim 3\theta s/8$ の場合に、

前記第1範囲が $-\theta s/6 \sim -\theta s/8$ 、かつ前記第2範囲が $-\theta s/24 \sim \theta s/12$ 、

前記第1範囲が $-\theta s/8 \sim -\theta s/12$ 、かつ前記第2範囲が $0 \sim 5\theta s/24$ 、

あるいは、前記第1範囲が $-\theta s/12 \sim -\theta s/24$ 、かつ前記第2範囲が $\theta s/24 \sim 5\theta s/24$ である、請求項5に記載の回転電機。

[請求項9] 前記前方ブリッジの幅 W_f が $5\theta s/24 \sim 7\theta s/24$ 、前記後方ブリッジの幅 W_r が $3\theta s/8 \sim 11\theta s/24$ の場合に、

前記第1範囲が $-\theta s/6 \sim -\theta s/8$ 、かつ前記第2範囲が $-\theta s/12 \sim 0$ 、

前記第1範囲が $-\theta s/8 \sim -\theta s/12$ 、かつ前記第2範囲が $-\theta s/12 \sim \theta s/24$ 、

あるいは、前記第1範囲が $-\theta s/12 \sim -\theta s/24$ 、かつ前記第2範囲が $-\theta s/24 \sim \theta s/8$ である、請求項5に記載の回転電機。

[請求項10] 請求項1または2に記載のロータコアの設計方法であって、

前記磁極における磁束に基づいて、前記前方フラックスバリア及び前記後方フラックスバリアに対して位置および形状をそれぞれ設計する工程を含む、ロータコアの設計方法。

[請求項11]

前記工程では、トルク極小時には、前記後方フラックスバリアが、前記後方フラックスバリアに対して最近傍に位置するティース正面の磁束経路を遮断するとともに、前記前方フラックスバリアが、前記前方フラックスバリアに対して最近傍に位置するティースに回転後方から向かう磁石磁束を妨げないようにし、

かつ、トルク極大時には、前記後方フラックスバリアが、前記後方フラックスバリアに対して最近傍に位置するティースに回転後方から進入する磁束経路を遮断するとともに、前記前方フラックスバリアが、前記前方フラックスバリアに対して最近傍に位置するティース正面の磁束経路を遮断しないようにして前記ティース正面の磁束経路を広くするように、前記前方フラックスバリア及び前記後方フラックスバリアの位置および形状を設計する、請求項10に記載のロータコアの設計方法。