

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2023-060098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：特許第5985358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たフラックスバリアが形成され

、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挿入孔を含み、前記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に設けられ、かつ、前記第1挿入孔における短手方向を向く側面のうち、前記ロータコアの径方向の外側の第1側面に対向する位置に設けられ、かつ、前記第1側面に接続されている。

[0007] <2>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たフラックスバリアが形成され、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挿入孔を含み、前記フラックスバリアは、前記第1挿入孔における短手方向を向く側面のうち、前記ロータコアの径方向の外側の第1側面に対向する位置において前記第1挿入孔に、前記第1挿入孔に挿入される永久磁石から発生する磁束を前記周方向に分割するように近接して設けられている。

[0008] <3>上記<1>または<2>に係るロータコアでは、前記フラックスバリアは、前記径方向の外側に向かうに従って前記ロータコアの周方向に大きくなる部分を有していてもよい。

[0009] <4>上記<1>から<3>のいずれか一態様に係るロータコアでは、前記フラックスバリアは、前記第1挿入孔に挿入される永久磁石から発生する磁束のうち、前記磁極における回転後方寄りから回転前方寄りに向かう磁束を遮断してもよい。

[0010] <5>上記<1>から<4>のいずれか一態様に係るロータコアでは、前記ロータコアのうち、前記フラックスバリアに対して前記径方向の外側に位置する部分には、ブリッジが設けられてもよい。

[0011] <6>本発明の一態様に係るロータは、<1>から<5>のいずれか一態様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、を備えている。

[0012] <7>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<6>に記載のロータと、を備えている。

[0013] <8>上記<7>に係る回転電機では、前記フラックスバリアは、前記ロータの径方向の外側に位置する外周側面において前記ロータの周方向のバリア開口角 θ_w が以下の(1)式、(2)式を満たしてもよい。

(2/5) $\theta_s < \theta_m < (3/4) \theta_s$ の場合に、

$$0 < \theta_w < (22/7) \theta_m - (44/35) \theta_s \cdots (1)$$

(3/4) $\theta_s \leq \theta_m < (9/10) \theta_s$ の場合に、

$$0 < \theta_w < - (22/3) \theta_m + (33/5) \theta_s \cdots (2)$$

$$\theta_s = 2\pi / N_{slot} \cdots (3)$$

ここで、上記(3)式中の N_{slot} は、前記ステータのスロット数を意味する。

θ_m は、前記外周側面における前記周方向の中心位置と前記第1挿入孔から回転前方に延びたフラックスバリアにおいて前記径方向の外側の端部とがなすバリア中心角を意味する。

[0014] <9>本発明の一態様に係るロータコアの設計方法は、<1>から<5>のいずれか一態様に記載のロータコアの設計方法であって、前記磁極における回転前方寄りの磁束に基づいて、前記フラックスバリアの位置および形状を設計する工程を含む。

[0015] <10>上記<9>に係るロータコアの設計方法では、前記工程では、トルク極大時には、前記磁極における回転前方寄りの磁束のうち回転前方のトルクを生み出す磁束を遮断し、かつ、トルク極小時には、前記磁極における回転前方寄りの磁束のうち回転後方のトルクを生み出す磁束を遮断するように前記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

[0016] 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

[0017] [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]本発明の一実施形態に係る回転電機の一部断面を含む図であって、回転電機に含まれるロータの拡大平面図である。

[図5]図3に示すロータの一部を模式化して示す拡大平面図である。

[図6]比較例の回転電機を示す平面図である。

[図7]実施形態の回転電機と比較例の回転電機とによるトルクリプルを電磁界解析により比較した結果を示すグラフである。

[図8]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9]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10]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11]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12]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13]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14]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

[0018] 以下、図1から図14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。

[0019] 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に収容される。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。

[0020] 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。

[0021] 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。

[0022] 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。

[0023] 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。

[0024] 回転電機 10 は、埋込型永久磁石型同期モータ (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 3 2 のロータコア 3 1 への固定は、例えば永久磁石 3 2 の外面と挿入孔 3 4 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。

[0025] なお、ステータコア 2 1 およびロータコア 3 1 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 2 1 およびロータコア 3 1 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 2 5 5 2 : 2 0 1 4 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 2 5 5 3 : 2 0 1 2 の方向性電磁鋼帯を採用することができる。

[0026] 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。

[0027] 以下、ロータ 3 0 の詳細について説明する。

図 3 に示すように、永久磁石 3 2 は、前述したように、ロータコア 3 1 に埋め込まれるとともに 2 つで対をなして 1 つの磁極 3 3 を構成している。永久磁石 3 2 は、ロータコア 3 1 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 3 2 は、直方体状である。永久磁石 3 2 は、平面視において矩形状である。

[0028] 一対の永久磁石 3 2 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。一対の永久磁石 3 2 は、前記平面視において、d 軸 L d を基準として線対称に配置されている。d 軸 L d は、前記平面視において、中心軸線 O と、各磁極 3 3 の周方向の中央と、を通過する。一対の永久磁石 3 2 が配置される挿入孔 3 4 も同様に、d 軸 L d を基準として概ね線対称に配置されている。

[0029] 挿入孔 3 4 は、前記平面視において、永久磁石 3 2 よりも q 軸 L q 側、および、d 軸 L d 側の両側に大きい。q 軸 L q 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 3 3 の間と、を通過する。q 軸 L q は、前記平面視において、前記 2 つの磁極 3 3 の間における周方向の中央を通過する。q 軸 L q と d 軸 L d とは、磁氣的、電氣的に直交する。挿入孔 3 4 のうち、永久磁石 3 2 に対して q 軸 L q 側、および、d 軸 L d 側それぞれに位置する部分は、フラックスバリア 3 5、3 6 となっている。言い換えると、永久磁石 3 2 の q 軸 L q 側、および、d 軸 L d 側の両端には、フラックスバリア 3 5、3 6 が設けられている。フラックスバリア 3 5、3 6 は、ロータコア 3 1 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 3 5、3 6 は、ロータ 3 0 内で還流する永久磁石 3 2 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 3 2 からステータ 2 0 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 3 2 の磁石磁束（以下、単に磁石磁束）がステータ 2 0 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 3 5、3 6 は、磁石磁束をステータ 2 0 に誘導するともいえる。

[0030] ロータ 3 0 は、フラックスバリア 3 5、3 6 として、第 1 フラックスバリア 3 5 と、第 2 フラックスバリア 3 6 と、を備えている。

第 1 フラックスバリア 3 5 および第 2 フラックスバリア 3 6 は、永久磁石 3 2 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 2 0

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、一对の永久磁石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、一对の永久磁石32の周方向（回転方向）の中央に位置する。

[0031] 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。

[0032] 複数の挿入孔34のなかには複数の第1挿入孔34fが含まれている。複数の第1挿入孔34fには、2つ1組の永久磁石32で構成されるそれぞれの磁極33のうち前方F寄りに配置される永久磁石32が挿入される。一对の永久磁石32は、前方磁石32fと、後方磁石32rと、を含む。前方磁石32fは、後方磁石32rに対して前方Fに位置する。前方磁石32fは、第1挿入孔34fに挿入されている。

[0033] ロータ30は、更に、複数の第3フラックスバリア（フラックスバリア）37と、複数のブリッジ38と、を備えている。複数の第3フラックスバリア37は、複数の磁極33それぞれに対応して設けられている。本実施形態では、1つの磁極33に対して1つの第3フラックスバリア37が設けられている。第3フラックスバリア37は、前方磁石32fに対して設けられ、後方磁石32rに対しては設けられていない。第3フラックスバリア37は、前方磁石32fに対してのみ設けられる。複数の第3フラックスバリア37は、ロータコア31を軸方向に貫通する磁気的空隙部である。第3フラックスバリア37は、第1挿入孔34fにおける短手方向を向く側面のうち、径方向の外側の側面（以下、第1側面34f1ともいう）に対向する位置に設けられている。第3フラックスバリア37は、前方磁石32fから発生する磁束を周方向に分割（分断）するように形成されている。第3フラックス

バリア 37 は、第 1 挿入孔 34 f における径方向の外側に接続されている。言い換えると、第 3 フラックスバリア 37 は、第 1 挿入孔 34 f に対して径方向の外側から接続されている。すなわち、第 3 フラックスバリア 37 は、第 1 側面 34 f 1 に接続されている。図示の例では、第 3 フラックスバリア 37 は、平面視において第 1 側面 34 f 1 の一部に接続されている。一方、第 3 フラックスバリア 37 は、軸方向において第 1 側面 34 f 1 の全長にわたって接続されている。ただし、第 3 フラックスバリア 37 は、図 4 に示すように、第 1 挿入孔 34 f に対して、径方向の外側に僅かに離れていてもよい。すなわち、第 3 フラックスバリア 37 は、第 1 挿入孔 34 f における径方向の外側に近接していてもよい。言い換えると、第 3 フラックスバリア 37 は、第 1 挿入孔 34 f に対して径方向の外側から近接していてもよい。第 3 フラックスバリア 37 と第 1 挿入孔 34 f との間隔 d (mm) は、例えば、 0.03 mm 以下である。間隔 d は、第 3 フラックスバリア 37 と第 1 挿入孔 34 f との最短距離である。この場合、第 3 フラックスバリア 37 と第 1 挿入孔 34 f との間に、磁束の流路となり得る部分が残る。しかしながら、この部分の径方向の長さ（面積）が十分に小さければ磁気飽和が生じる。よって、実質的に、前方磁石 32 f から発生する磁束が、第 3 フラックスバリア 37 によって周方向に分割される。例えば、第 3 フラックスバリア 37 は、第 1 挿入孔 34 f に対して、ブリッジ 38 の径方向の長さ（ブリッジ 38 の幅）以下の距離、径方向の外側に離れていてもよい。

本実施形態では、全ての磁極 33 に対応させて第 3 フラックスバリア 37 を設ける例について説明するが、複数の磁極 33 のうちの少なくとも 1 つの磁極 33 に対応させて第 3 フラックスバリア 37 を設けてもよい。例えば、第 3 フラックスバリア 37 が 1 つのみであってもよい。

[0034] 図 5 に示すように、軸方向から見た平面視において、第 3 フラックスバリア 37 のうち、径方向の内側寄りの部位が、径方向の内側（すなわち、第 1 挿入孔 34 f）に向けて先細状に形成されている。第 3 フラックスバリア 37 における径方向の内側の端部である内端部 37 a が第 1 挿入孔 34 f に対

して径方向の外側から接続されている。第3フラックスバリア37は、第1挿入孔34fに挿入された前方磁石32fのうち径方向の外側面に接続されている。第3フラックスバリア37は、径方向の外側に向かうに従ってロータコア31の周方向に大きくなるように形成されている。第3フラックスバリア37は、ロータ30の回転時に生じる磁束（磁石磁束）のうち、磁極33における前方F寄りの磁束を遮断する。

[0035] 第3フラックスバリア37は、径方向の外側に位置する外周側面37bを有する。外周側面37b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37bは、外周面31aに沿って形成されている。外周側面37bが外周面31aに沿っているとは、外周側面37b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37b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37b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38の径方向の長さが、ブリッジ38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。ロータコア31は、外周面31aと外周側面37bとの間にブリッジ38を備えている。すなわち、ブリッジ38は、ロータコア31のうち、複数の第3フラックスバリア37に対して径方向の外側に位置する部分にそれぞれ設けられている。

[0036] 複数のブリッジ38は、磁束がブリッジ38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38は、例えば、ロータ30が所定のトルク以上で動作したときにおいて、磁束がブリッジ38を通過することを磁気飽和によって妨げればよく、前記所定のトルク未満で動作したときにおいては、磁束がブリッジ38を通過してもよい。ブリッジ38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。なお、ブリッジ38の径方向の幅については後で詳しく説明する。

[0037] 本実施形態では、第3フラックスバリア37は、第1挿入孔34fに接続する部分（最も近接する部分）である内端部37aと、内端部37aから径

方向の外側に向かうに従い周方向に拡幅していく部分である拡幅部 37 g と、外周側面 37 b に沿って形成されたブリッジ 38 に接続される接続部 37 h と、有する。

なお内端部 37 a は、点状または線状である。ここで、内端部 37 a が周方向に大きいと、第 3 フラックスバリア 37 において前方磁石 32 f に径方向の外側から対向する部分が大きくなり、前方磁石 32 f から発生する磁束が妨げられて磁束の発生量が少なくなる。そのため、内端部 37 a の周方向の長さは短いほど（例えば、前方磁石 32 f の長辺に対して 5 % 以下であることが）好ましい。

また拡幅部 37 g は、径方向の内側に向けて凸となる三角形状である。ここで拡幅部 37 g は、直線状に拡幅しても、曲線状で拡幅しても良い。

また接続部 37 h は、径方向に延びる矩形状である。ただし、接続部 37 h の形状の限定は特に限られず、外周側面 37 b と外周面 31 a との間にブリッジ 38 が形成される他の形態に変更してもよい。例えば、拡幅部 37 g における径方向の外側の周方向の長さが、外周側面 37 b の周方向の長さと同等である場合、接続部 37 h の周方向の大きさが、径方向の全長にわたって同等であってもよい。さらに例えば、拡幅部 37 g における径方向の外側の周方向の長さが、外周側面 37 b の周方向の長さよりも大きい場合、接続部 37 h の一部または全部の周方向の大きさが、径方向の外側に向かうに従い、周方向に縮幅していてもよい。

[0038] 以下、第 3 フラックスバリア 37 の詳細について説明する。

第 3 フラックスバリア 37 は、バリア中心角 θ_m （ラジアン）、バリア開口角 θ_w （ラジアン）、及びバリア接続位置 X_m により位置と形状とが決められている。

バリア中心角 θ_m は、バリア中心位置 37 c と外側端部 35 a とが中心軸線 O を中心として周方向になす角度を意味する。バリア中心位置 37 c は、第 3 フラックスバリア 37 の外周側面 37 b おける周方向の中心位置を意味する。外側端部 35 a は、第 1 フラックスバリア 35 の前方 F において径方

向の外側の端部を意味する。

[0039] バリア開口角 θ_w は、バリア前端部 37 d とバリア後端部 37 e とが中心軸線 O を中心として周方向になす角度を意味する。バリア前端部 37 d は、第 3 フラックスバリア 37 の外周側面 37 b において前方 F 側の端を意味する。バリア後端部 37 e は、第 3 フラックスバリア 37 の外周側面 37 b において後方 R 側の端を意味する。

スロット中心角 θ_s は、ステータ 20 のスロット 24 (図 1 参照) 1 つあたりの中心角を意味する。

バリア接続位置 X_m は、前方磁石 32 f の外側面における磁石長さ M_w に対する周方向 (長手方向) の位置を意味する。

なお、図 4 に示すように、第 3 フラックスバリア 37 が第 1 挿入孔 34 f に対して僅かに離れている場合、バリア接続位置 X_m は、前方磁石 32 f の外側面上において、第 3 フラックスバリア 37 と第 1 挿入孔 34 f とが最も近接し磁石長さ M_w に対する周方向 (長手方向) の位置を意味する。また、第 3 フラックスバリア 37 と第 1 挿入孔 34 f との間隔 d を測定する位置は、バリア接続位置 X_m である。

なお、これらの位置や長さ、角度は、例えば、対象となるロータ 30 を平面視にて撮影し、撮影した画像から求めることができる。

[0040] 第 3 フラックスバリア 37 は、(1) 式から (4) 式を満たすように位置と形状とが決められている。すなわち、

(2/5) $\theta_s < \theta_m < (3/4) \theta_s$ の場合に、

$$0 < \theta_w < (22/7) \theta_m - (44/35) \theta_s \cdots (1)$$

(3/4) $\theta_s \leq \theta_m < (9/10) \theta_s$ の場合に、

$$0 < \theta_w < - (22/3) \theta_m + (33/5) \theta_s \cdots (2)$$

$$\theta_s = 2\pi / N_{slot} \cdots (3)$$

但し、 N_{slot} は、ステータ 20 のスロット数を意味する。

$$0 \leq X_m \leq M_w \cdots (4)$$

[0041] また、第 3 フラックスバリア 37 の径方向の長さは、ブリッジ 38 におけ

る磁束密度が軟磁性材料の飽和磁束密度より大きくなるように定められる。例えば、ブリッジ38の径方向の幅は0.15mm、ブリッジ中心部の磁束密度は2.45Tである。例えば、ロータコア31の飽和磁束密度を1.95Tとすると、ブリッジ中心部の磁束密度2.45Tは、ロータコア31の飽和磁束密度を超えている。

[0042] ここで、第3フラックスバリア37は、磁石磁束を分割することを目的として設けられる。よって、第3フラックスバリア37の径方向の外側に設けられるブリッジ38にも磁石磁束が通らないように十分狭くする必要がある。

一方、ロータコア31の力学強度の観点から考慮すると、ブリッジ38の強度を確保するために、ブリッジ38における径方向の幅を一定以上に保つ必要がある。そこで、ブリッジ38の幅を磁束密度が飽和磁束密度を超えるようにすれば十分と考えた。ブリッジ38の磁束密度は、例えば回転電機10をモデル化した電磁界解析により求められる。

[0043] つぎに、バリア中心角 θ_m 、バリア開口角 θ_w 、バリア接続位置 X_m を（1）式から（4）式に基づいて設定する理由を図5から図7に基づいて説明する。

図5に示す実施形態の回転電機10は、ロータコア31に第3フラックスバリア37を備えている。図6に示す比較例の回転電機100は、ロータコア101に第3フラックスバリア37を備えていない点で実施形態の回転電機10と異なるだけで、その他の構成は実施形態の回転電機10と同様である。図7は、実施形態の回転電機10と比較例の回転電機100とによるトルクリプルを電磁界解析により比較した結果を示すグラフである。

[0044] 図7は、縦軸に（バリア開口角 θ_w ）／（スロット中心角 θ_s ）（％）を示し、横軸に（バリア中心角 θ_m ）／（スロット中心角 θ_s ）（％）を示す。ここで、トルクリプルが小さい場合でも平均トルクが小さければ用途が制約されることを考慮して、実施形態の回転電機10と比較例の回転電機100とを、評価値である（トルクリプル）／（平均トルク）で比較した。この

評価値が小さいほど、回転電機 10、100 の性能が優れていることを意味する。

グラフ G1 は、実施形態の回転電機 10 の評価値が、比較例の回転電機 100 の評価値と同等になる条件を示す線（等高線）である。グラフ G1 よりも内側に位置する内側領域 E1 において、実施形態の回転電機 10 の評価値が、比較例の回転電機 100 の評価値よりも小さくなっている（優れている）。

グラフ G2 は、後述する（1）式および（2）式で規定される線である。

[0045] なおグラフ G1 は、第 3 フラックスバリア 37 における内端部 37a のバリア接続位置 X_m を前方磁石 32f における磁石長さ M_w の中心位置（すなわち、 $X_m = (1/2) M_w$ ）に配置した場合の電磁界解析の結果である。グラフ G1 を $X_m = (1/2) M_w$ の場合で電磁界解析する理由はつぎの通りである。

すなわち、第 3 フラックスバリア 37 の内端部 37a のバリア接続位置 X_m の移動による影響は限定的で、バリア接続位置 X_m を磁石長さ M_w において 0 ～（磁石最大長さ）の範囲で移動させてもトルク脈動が低減する効果範囲に影響がない。例えば、バリア接続位置 X_m を $0 \leq M_w \leq$ （磁石最大長さ）の範囲で移動させると、トルクに寄与する磁束量が変化する。磁束量の変化に対応して平均トルクが増減するが、平均トルクが増減に伴ってトルクリプルも増減する。このため、評価値への影響が相殺され、トルク脈動の低減についての評価値が大きく変化しない。

[0046] 電磁界解析の結果、グラフ G1 の内側領域 E1 において、回転電機 10 のトルクリプルが回転電機 100 のトルクリプルに比べて小さくなり、トルク脈動が低減した。ここで、グラフ G1 のうち、グラフ G2 の外側の領域 E2 は、回転電機 10 のトルクリプルの低減が比較的小さい。すなわち、回転電機 10 のトルクリプルは、グラフ G2 の内側領域 E3 において回転電機 100 のトルクリプルに比べて適切に小さくなった。これにより、回転電機 10 は、グラフ G2 の内側領域 E3 において回転電機 100 に比べてトルク脈動

が適切に低減する。グラフ G 2 の内側領域 E 3 は、前述した (1) 式で示すバリア中心角 θ_m とバリア開口角 θ_w の範囲、(2) 式で示すバリア中心角 θ_m とバリア開口角 θ_w の範囲に相当する。

[0047] 図 7 のグラフにおいて、横軸の (バリア中心角 θ_m) / (スロット中心角 θ_s) の 40% は、(1) 式の $(2/5) \theta_s$ に相当する位置である。横軸の (バリア中心角 θ_m) / (スロット中心角 θ_s) の 75% は、(1) 式、(2) 式の $(3/4) \theta_s$ に相当する位置である。横軸の (バリア中心角 θ_m) / (スロット中心角 θ_s) の 90% は、(2) 式の $(9/10) \theta_s$ に相当する位置である、

また、図 7 のグラフにおいて、縦軸の (バリア開口角 θ_w) / (スロット中心角 θ_s) が 45.8%、横軸の (バリア中心角 θ_m) / (スロット中心角 θ_s) が 75% のときに評価値が最小となり、トルク脈動が最適に低減した。

この電磁界解析の結果から、第 3 フラックスバリア 37 を (1) 式から (4) 式を満たすように位置と形状とに決めた。

[0048] つぎに、実施形態の回転電機 10 と比較例の回転電機 110 とのトルク脈動を比較した例を図 8 から図 10 に基づいて説明する。

図 8 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 9 は、比較例の回転電機 110 において平均トルクを最大化したロータ 112 を示す。図 10 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 10 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。

[0049] 図 10 において、グラフ G 3 は実施形態の回転電機 10 のトルク波形を示す。グラフ G 4 は比較例の回転電機 110 のトルク波形を示す。グラフ G 3 のトルク波形とグラフ G 4 のトルク波形とを比較することにより、グラフ G 3 のトルク脈動がグラフ G 4 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 110 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。

[0050] ついで、図 8 に示す実施形態の回転電機 10 と図 9 に示す比較例の回転電機 110 とにおける磁束密度ベクトルを図 11 から図 14 に基づいて説明する。

まず、図 11、図 12 において、図 10 のグラフ G4 で示す比較例の回転電機 110 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 112 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。

[0051] 図 11 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 11 に示すように、実施形態の回転電機 10 において、前方磁石 32f のうち後方 R 側の部位 32fr から前方 F 側にくる磁束が、第 3 フラックスバリア 37 で遮断される。周方向に分割された磁束の主な経路は、異なるティース 23 に向かう。よって、この磁束が、前方磁石 32f に対して後方 R 側に位置するティース 23 に向かうことを防止できる。よって、磁束により生じる負のトルクを低減できる。これにより、実施形態の回転電機 10 は、電気角 $\theta 1$ におけるトルクの低下を抑制できる。

[0052] 図 12 は、比較例の回転電機 110 においてロータ 112 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 12 に示すように、比較例の回転電機 110 において、前方磁石 32f の後方 R 側の部位 32fr から前方 F 側にくる磁束が、前方磁石 32f に対して後方 R 側に位置するティース 23 に矢印 A の如く向かう。ティース 23 に向かう磁束は負のトルクを生じる。このため、比較例の回転電機 110 は、電気角 $\theta 1$ におけるトルクが極小値になる。

[0053] つぎに、図 13、図 14 において、図 10 のグラフ G4 で示す比較例の回転電機 110 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 112 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。

図 13 は、実施形態の回転電機 10 においてロータ 30 が電気角 θ_2 に位置したときの磁束密度ベクトルを示す。

図 13 に示すように、実施形態の回転電機 10 において、前方磁石 32f の後方 R 側の部位 32fr から前方 F 側にくる磁束が、第 3 フラックスバリア 37 で遮断される。よって、この磁束が、前方磁石 32f に対して前方 F 側に位置するティース 23 に矢印 B の如く向かうことを防止できる。すなわち、前方磁石 32f の前方 F 側の部位 32ff から前方 F 側にくる磁束のみが、前方磁石 32f に対して前方 F 側に位置するティース 23 に向かうように、第 3 フラックスバリア 37 が機能する。よって、磁束により生じる正のトルクを低減できる。これにより、実施形態の回転電機 10 は、電気角 θ_2 におけるトルクを小さく抑制できる。

[0054] このように、実施形態の回転電機 10 は、図 10 のグラフ G3 に示すように、電気角 θ_1 におけるトルクの低下を抑制し、電気角 θ_2 におけるトルクを小さく抑制できる。この結果、実施形態の回転電機 10 によれば、極大トルクと極小トルクとの差がほとんどないように小さく抑制でき、IPMSM として回転電機 10 のトルク脈動を低減することができる。

[0055] 図 14 は、比較例の回転電機 110 においてロータ 112 が電気角 θ_2 に位置したときの磁束密度ベクトルを示す。

図 14 に示すように、比較例の回転電機 110 のロータコア 31 には、前方磁石 32f からの磁束を上述のように分割するための第 3 フラックスバリアは設けられていない。このため、比較例の回転電機 110 において、前方磁石 32f の磁束の大部分は、前方磁石 32f における前方 F 側の部位 32ff および後方 R 側の部位 32fr の両方から、前方磁石 32f に対して前方 F 側に位置するティース 23 に矢印 C の如く向かう。よって、前方磁石 32f の全面から前方 F 側にくる磁束が正のトルクに寄与する。このため、比較例の回転電機 110 は、電気角 θ_2 におけるトルクが極大値になる。

[0056] このように、比較例の回転電機 110 は、図 10 のグラフ G4 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 110 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。

[0057] 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 における前方 F 寄りの磁束に基づいて、第 3 フラックスバリア 37 の位置およ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。

そこで、ロータコア 31 の設計方法において、第 3 フラックスバリア 37 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、トルク極大時には、磁極 33 における前方 F 寄りの磁束のうち前方 F のトルクを生み出す磁束を第 3 フラックスバリア 37 で遮断するようにした。さらに、トルク極小時には、磁極 33 における前方 F 寄りの磁束のうち後方 R のトルクを生み出す磁束を第 3 フラックスバリア 37 で遮断するようにした。このように、この設計方法では、磁極 33 における前方 F 寄りの磁束に基づいて、第 3 フラックスバリア 37 の位置および形状を設計する。

[0058] このロータコア 31 の設計方法の工程において、磁極 33 のうち前方磁石 32 f を第 1 挿入孔 34 f に挿入し、第 1 挿入孔 34 f に対してロータコア 31 の径方向の外側に第 3 フラックスバリア 37 を設けた。さらに、第 3 フラックスバリア 37 を第 1 挿入孔 34 f に対して径方向の外側から接続させた。よって、前方磁石 32 f から出て前方 F に向かおうとする磁束を第 3 フラックスバリア 37 により前方 F 側と後方 R 側とに分割できる。これにより、トルク極大時には、第 3 フラックスバリア 37 より後方 R 側の磁束（部位 32 f r の磁束）が前方 F に向かうのを遮断することにより前方 F のトルクを生み出す磁束の一部を遮断し、トルク極小時には、第 3 フラックスバリア 37 より前方 F 側の磁束（部位 32 f f の磁束）が後方 R に向かうのを遮断

することにより後方Rへ向くトルクを生み出す磁束の一部を遮断できる。このように、トルク極大時に前方Fのトルクを抑制し、トルク極小時に後方Rのトルクを抑制することにより、IPMSMとして回転電機10のトルク脈動を低減することができる。

[0059] また、第3フラックスバリア37が、径方向の外側に向かうに従ってロータコア31の周方向に大きくなる部分を有する。すなわち、第3フラックスバリア37は、第1挿入孔34f寄りの部位が第1挿入孔34fに向けて先細状に形成され、内端部37aが第1挿入孔34fに対して径方向の外側から接続されている。よって、第3フラックスバリア37の内端部37aが第1挿入孔34fに接続する面積を小さく抑えることができる。これにより、第3フラックスバリア37に過度に遮られることなく、前方磁石32fから磁束を適切に発生させることができる。

[0060] また、第3フラックスバリア37を径方向の外側に向かうに従ってロータコア31の周方向に大きくすることにより、前方磁石32fから出た磁束が第3フラックスバリア37を通過することを防止できる。

このように、前方磁石32fから磁束を適切に発生させることができ、さらに前方磁石32fから出た磁束が前方磁石32fを通過することを防止することにより、トルク脈動を一層適切に低減できる。

[0061] さらに、第1挿入孔34fに挿入された前方磁石32fに第3フラックスバリア37を接続することにより、前方磁石32fから出た磁束が前方磁石32fと第3フラックスバリア37との間を通過することを防止できる。これにより、トルク脈動を一層適切に低減できる。

[0062] 加えて、前方磁石32fから発生する磁束のうち、後方R寄りから前方F寄りに向かう磁束を第3フラックスバリア37で遮断するようにした。よって、トルク極大時に前方Fのトルクを生み出す磁束を遮断して、前方Fのトルクを抑制できる。また、トルク極小時に後方Rのトルクを生み出す磁束を遮断して、後方Rのトルクを抑制できる。これにより、トルク脈動を低減することができる。

- [0063] また、ブリッジ38を通過する磁束密度が飽和磁束を超えるようにすることにより、磁束がブリッジ38を通過することを防止できる。これにより、トルク脈動を一層適切に低減できる。
- [0064] さらに、第3フラックスバリア37は、バリア中心角 θ_m が $(2/5)\theta_s < \theta_m < (3/4)\theta_s$ の範囲の場合、前方磁石32fの前方F側に位置する。この場合に、第3フラックスバリア37のバリア開口角 θ_w を $0 < \theta_w < (22/7)\theta_m - (44/35)\theta_s$ とする。これにより、トルク極大時に前方Fのトルクを生み出す磁束を遮断し、トルク極小時に後方Rのトルクを生み出す磁束を遮断できる。したがって、トルク極大時に前方Fのトルクを抑制し、トルク極小時に後方Rのトルクを抑制することにより、IPMSMとして回転電機10のトルク脈動を低減することができる。
- [0065] また、第3フラックスバリア37は、バリア中心角 θ_m が $(3/4)\theta_s \leq \theta_m < (9/10)\theta_s$ の範囲の場合、前方磁石32fの後方R側に位置する。この場合に、第3フラックスバリア37のバリア開口角 θ_w を $0 < \theta_w < -(22/3)\theta_m + (33/5)\theta_s$ とする。これにより、トルク極大時に前方Fのトルクを生み出す磁束を遮断し、トルク極小時に後方Rのトルクを生み出す磁束を遮断できる。したがって、トルク極大時に前方Fのトルクを抑制し、トルク極小時に後方Rのトルクを抑制することにより、IPMSMとして回転電機10のトルク脈動を低減することができる。
- [0066] 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。
- [0067] 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。
- [0068] 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。

[0069] 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。

第 3 フラックスバリア 37 が、ロータコア 31 を軸方向に貫通していなくてもよい。この場合、第 3 フラックスバリア 37 が、軸方向において第 1 側面 34 f 1 の一部にのみ接続されていてもよい。

[0070] 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。

例えば、1組の永久磁石 32 が1つの永久磁石 32 である場合、この1つの永久磁石 32 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形状であってもよい。この場合、1つの永久磁石 32 が挿入される挿入孔 34 そのものが第 1 挿入孔 34 f となる。

例えば、1組の永久磁石 32 が3つの永久磁石 32 である場合であって、3つの永久磁石 32 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 32 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 32 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 32 のうち、最も前方に位置する永久磁石 32 が挿入される挿入孔 34 そのものが第 1 挿入孔 34 f となる。

[0071] 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

[0072] 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

[0073] 10、100 回転電機
20 ステータ
21 ステータコア
22 コアバック
23 ティース
24 スロット
30、112 ロータ
31 ロータコア
31a 外周面
32 永久磁石
32f 前方磁石
32ff 部位
32fr 部位
32r 後方磁石
33 磁極
34 挿入孔
34f 第1挿入孔
34f1 第1側面
35 第1フラックスバリア（第1挿入孔から回転前方に延びたフラックスバリア）
35a 外側端部
36 第2フラックスバリア
37 第3フラックスバリア（フラックスバリア）

37a 内端部
37b 外周側面
37c バリア中心位置
37d バリア前端部
37e バリア後端部
37g 拡幅部
37h 接続部
38 ブリッジ
50 ケース
60 回転軸
A 矢印
B 矢印
C 矢印
E1 内側領域
E2 領域
E3 内側領域
F 前方
G1 グラフ
G2 グラフ
G3 グラフ
G4 グラフ
Ld d軸
Lq q軸
O 中心軸線
R 後方
Xm バリア接続位置
 θ_m バリア中心角
 θ_s スロット中心角

θ_w バリア開口角

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たフラックスバリアが形成され、

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挿入孔を含み、

前記フラックスバリアは、前記第1挿入孔における短手方向を向く側面のうち、前記ロータコアの径方向の外側の第1側面に対向する位置に設けられ、かつ、前記第1側面に接続されている、ロータコア。

[請求項2]

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たフラックスバリアが形成され、

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挿入孔を含み、

前記フラックスバリアは、前記第1挿入孔における短手方向を向く側面のうち、前記ロータコアの径方向の外側の第1側面に対向する位置において前記第1挿入孔に、前記第1挿入孔に挿入される永久磁石から発生する磁束を前記周方向に分割するように近接して設けられて

いる、ロータコア。

[請求項3] 前記フラックスバリアは、前記径方向の外側に向かうに従って前記ロータコアの周方向に大きくなる部分を有する、

請求項 1 または 2 に記載のロータコア。

[請求項4] 前記フラックスバリアは、前記第 1 挿入孔に挿入される永久磁石から発生する磁束のうち、前記磁極における回転後方寄りから回転前方寄りに向かう磁束を遮断する、

請求項 1 または 2 に記載のロータコア。

[請求項5] 前記ロータコアのうち、前記フラックスバリアに対して前記径方向の外側に位置する部分には、ブリッジが設けられている、請求項 1 または 2 に記載のロータコア。

[請求項6] 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、を備えている、ロータ。

[請求項7] 環状のステータと、

前記ステータ内に配置された請求項 6 に記載のロータと、を備えている、回転電機。

[請求項8] 前記フラックスバリアは、前記ロータの径方向の外側に位置する外周側面において前記ロータの周方向のバリア開口角 θ_w が以下の (1) 式、(2) 式を満たす、請求項 7 に記載の回転電機。

(2/5) $\theta_s < \theta_m < (3/4) \theta_s$ の場合に、

$$0 < \theta_w < (22/7) \theta_m - (44/35) \theta_s \cdots (1)$$

(3/4) $\theta_s \leq \theta_m < (9/10) \theta_s$ の場合に、

$$0 < \theta_w < - (22/3) \theta_m + (33/5) \theta_s \cdots (2)$$

$$\theta_s = 2\pi / N_{slot} \cdots (3)$$

ここで、上記 (3) 式中の N_{slot} は、前記ステータのスロット数を意味する。

θ_m は、前記外周側面における前記周方向の中心位置と前記第1挿入孔から回転前方に延びたフラックスバリアにおいて前記径方向の外側の端部とがなすバリア中心角を意味する。

[請求項9]

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、
前記磁極における回転前方寄りの磁束に基づいて、前記フラックスバリアの位置および形状を設計する工程を含む、ロータコアの設計方法。

[請求項10]

前記工程では、トルク極大時には、前記磁極における回転前方寄りの磁束のうち回転前方のトルクを生み出す磁束を遮断し、かつ、トルク極小時には、前記磁極における回転前方寄りの磁束のうち回転後方のトルクを生み出す磁束を遮断するように前記フラックスバリアの位置および形状を設計する、請求項9に記載のロータコアの設計方法。