

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2020-18122  
(P2020-18122A)

(43) 公開日 令和2年1月30日(2020.1.30)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
<b>HO2K 21/14 (2006.01)</b>	HO2K 21/14 M	5H601
<b>HO2K 1/16 (2006.01)</b>	HO2K 1/16 A	5H621
<b>HO2K 1/22 (2006.01)</b>	HO2K 1/22 A	5H622
<b>HO2K 1/27 (2006.01)</b>	HO2K 1/27 501K	

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2018-140392 (P2018-140392)  
(22) 出願日 平成30年7月26日 (2018. 7. 26)

(71) 出願人 000004260  
株式会社デンソー  
愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地  
(74) 代理人 100093779  
弁理士 服部 雅紀  
(72) 発明者 藤▲崎▼ 勝也  
愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地 株式会  
社デンソー内  
Fターム(参考) 5H601 AA22 CC01 CC13 CC15 DD01  
DD09 DD11 EE27 FF04 FF05  
GA02 GA15 GA32 GB05 GB12  
GB22 GB33 GB49 GC12  
5H621 AA02 BB10 GA16 HH01  
5H622 AA02 CA02 CA07 CA14 CB05  
PP03

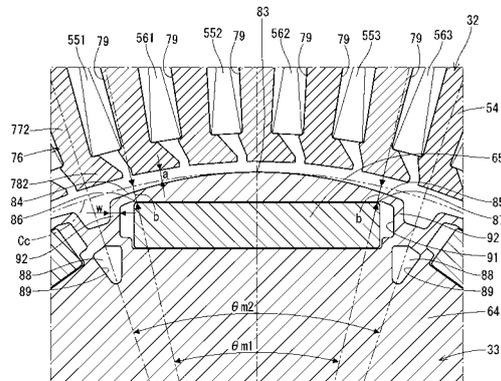
(54) 【発明の名称】 回転電機

(57) 【要約】

【課題】 制御装置の高性能化を必要とすることなくトルクリップルの低減が可能な回転電機を提供する。

【解決手段】 三相巻線55、56は、各組間の位相差e1が電気角で $30 \pm 60 \times n$  [deg]となるように通電される。ティース76の先端部78は、周方向に電気角でe2ずれるように軸方向に分かれた複数のスキュー形成部781、782を有するスキュー構造である。e1 > e2である。ティース76とロータコア64の外接円Ccとの径方向距離をaとし、永久磁石65のうち径方向で最も外側に位置する磁石最外部86、87と外接円Ccとの径方向距離をbとすると、a / b < 1である。

【選択図】 図6



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

径方向に延びる複数のティース(76)を有するステータコア(54)、および、前記複数のティース間に設けられている複数組の多相巻線(55、56)、を有するステータ(32)と、

前記ティースに対向するように設けられているロータコア(64)、および、前記ロータコアに埋め込まれるように設けられている複数の永久磁石(65)、を有するロータ(33)と、

を備え、

$n$ を整数とすると、

前記複数組の多相巻線は、各組間の位相差  $e_1$  が電気角で  $30 \pm 60 \times n$  [deg] となるように通電され、

前記ティースと前記ロータコアの外接円(Cc)との径方向距離を  $a$  とし、前記永久磁石のうち径方向で最も外側に位置する磁石最外部(86、87)と前記外接円との径方向距離を  $b$  とすると、

$a/b < 1$  である回転電機。

10

## 【請求項 2】

径方向に延びる複数のティース(76)を有するステータコア(54)、および、前記複数のティース間に設けられている複数組の多相巻線(55、56)、を有するステータ(32)と、

前記ティースに対向するように設けられているロータコア(64)、および、前記ロータコアに埋め込まれるように設けられている複数の永久磁石(65)、を有するロータ(33)と、

を備え、

前記ティースの先端部(78)は、周方向に電気角で  $e_2$  ずれるように軸方向に分かれた複数のスキュー形成部(781、782)を有するスキュー構造であり、

前記ティースと前記ロータコアの外接円(Cc)との径方向距離を  $a$  とし、前記永久磁石のうち径方向で最も外側に位置する磁石最外部(86、87)と前記外接円との径方向距離を  $b$  とすると、

$a/b < 1$  である回転電機。

20

30

## 【請求項 3】

径方向に延びる複数のティース(76)を有するステータコア(54)、および、前記複数のティース間に設けられている複数組の多相巻線(55、56)、を有するステータ(32)と、

前記ティースに対向するように設けられているロータコア(64)、および、前記ロータコアに埋め込まれるように設けられている複数の永久磁石(65)、を有するロータ(33)と、

を備え、

$n$ を整数とすると、

前記複数組の多相巻線は、各組間の位相差  $e_1$  が電気角で  $30 \pm 60 \times n$  [deg] となるように通電され、

前記ティースの先端部(78)は、周方向に電気角で  $e_2$  ずれるように軸方向に分かれた複数のスキュー形成部(781、782)を有するスキュー構造であり、

$e_1 > e_2$  であり、

前記ティースと前記ロータコアの外接円(Cc)との径方向距離を  $a$  とし、前記永久磁石のうち径方向で最も外側に位置する磁石最外部(86、87)と前記外接円との径方向距離を  $b$  とすると、

$a/b < 1$  である回転電機。

40

## 【請求項 4】

前記ロータの一の磁極に含まれる1つ以上の前記永久磁石のうち、前記磁極の中央部に

50

対し周方向一方において径方向で最も外側に位置する部位を第1磁石最外部(86)とし、前記中央部に対し周方向他方において径方向で最も外側に位置する部位を第2磁石最外部(87)とし、

前記第1磁石最外部から前記第2磁石最外部までの周方向角度を  $m_1$  とし、

一の前記磁極の周方向角度を  $m_2$  とすると、

$m_1 / m_2 = 0.72 \sim 0.79$  である請求項1~3のいずれか一項に記載の回転電機。

【請求項5】

前記ロータコアは複数の鋼板の積層体であり、

前記鋼板の板厚を  $t$  とし、

前記ロータコアの磁石収容孔(91)を取り囲む部分のうち最も細い部位(92)の幅を  $w$  とすると、

$w < a < 2t$  である請求項1~4のいずれか一項に記載の回転電機。

【請求項6】

前記複数のスキュー形成部の軸方向長さの和を  $L_s$  とし、

前記ロータコアの軸方向長さを  $L_r$  とすると、

$L_s < L_r$  であり、

前記複数のスキュー形成部の積層枚数差は2枚以下である請求項1~5のいずれか一項に記載の回転電機。

【請求項7】

前記ロータコアの  $q$  軸上には透磁率を低下させる透磁率低下部(88)が設けられている請求項1~6のいずれか一項に記載の回転電機。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、回転電機に関する。

【背景技術】

【0002】

ロータコアの外周部に永久磁石が埋設された埋込磁石型の回転電機では、ステータとロータとの間のエアギャップ中の磁束に高調波が多く含まれる。その結果、誘起電圧歪波形にも高調波が多く含まれるため、埋込磁石型の回転電機は表面磁石型の回転電機と比べてトルクリップルが大きくなるという特徴がある。

【0003】

トルクリップル低減については、ステータの複数組の多相巻線に多相交流電流を流す回転電機において、各組間の多相巻線に位相差を設けて通電することが知られている。例えば、特許文献1では、二組の三相巻線の位相差を電気角で  $30^\circ$  とすることで、トルクリップルの第6次高調波成分を低減している。

【0004】

また、特許文献2では、適切に調整された5次高調波電流を三相巻線に流れる基本波電流に重畳させることにより、トルクリップルを低減させつつ電流ピークを低減させている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】特開2010-268597号公報

【特許文献2】特許第5672278号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

埋込磁石型の回転電機では、回転電機自体の誘起電圧に歪みが発生しやすい。また、ピ

10

20

30

40

50

ーク低減制御のように発熱を抑えるために意図的に高調波電流が基本波電流に重畳される場合もある。これらはいずれもトルクリップルの要因となる場合がある。

【0007】

特許文献1の技術は、トルクリップルの第6次高調波成分を低減することができるが、第12次高調波成分を低減することはできない。そのため改善の余地がある。

【0008】

特許文献2の技術は、表面磁石型の回転電機に対して効果を発揮する。つまり、埋込磁石型の回転電機のようにリラクタンストルクがある回転電機においては必ずしも有効であるとは限らない。また、高調波電流を適切に制御するには、制御周波数が十分に高くなければならない。回転電機が高速運転している場合、その速度に応じて高速な演算が必要となるからである。

10

【0009】

本発明は、上述の点に鑑みてなされたものであり、トルクリップルの低減が可能な回転電機を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0010】

本発明の回転電機は、ステータ(32)およびロータ(32)を備える。ステータは、径方向に延びる複数のティースを有するステータコア(54)、および、複数のティース間に設けられている複数組の多相巻線(55、56)を有する。ロータは、ティースに対向するように設けられているロータコア(64)、および、ロータコアに埋め込まれるように設けられている複数の永久磁石(65)を有する。

20

【0011】

本発明には第1～第3の態様がある。ここで、 $n$ を整数とする。本発明の第1および第3の態様では、複数組の多相巻線は、各組間の位相差  $e_1$  が電気角で  $30 \pm 60 \times n$  [deg] となるように通電される。また、本発明の第2および第3の態様では、ティースの先端部(78)は、周方向に電気角で  $e_2$  ずれるように軸方向に分かれた複数のスキュー形成部(781、782)を有するスキュー構造である。また、本発明の第3の態様では、 $e_1 > e_2$  である。

【0012】

また、本発明の第1～第3の態様では、ティースと外接円(Cc)との径方向距離を  $a$  とし、永久磁石のうち径方向で最も外側に位置する磁石最外部(86、87)と外接円との径方向距離を  $b$  とすると、 $a/b < 1$  である。

30

【0013】

このように  $a/b < 1$  とすることで、ロータの磁束の  $q$  軸成分が小さくなる。また、ロータによって発生する誘起電圧歪みが小さくなる。結果として、6次高調波電流が有る場合でもリラクタンストルクの影響が小さくなるため、トルクリップルの第12次高調波成分の発生を抑制することができる。また、回転電機の構造により第12次高調波成分を小さくすることができ、制御装置には依存しない。

【図面の簡単な説明】

【0014】

40

【図1】一実施形態によるモータが適用された駆動装置の断面図である。

【図2】図1のII-II線断面図である。

【図3】図1のモータの三相巻線の配置を示す模式図である。

【図4】図1のステータおよびロータのIV-IV線断面図である。

【図5】図4のV部拡大図である。

【図6】図1のステータおよびロータのVI-VI線断面の一部拡大図であって、図5に対応する図である。

【図7】図5のVII部拡大図である。

【図8】図7の1つのティースを矢印VIIII方向から見たときの模式図である。

【図9】ロータ各部寸法比とトルクリップルとの関係を、6次高調波電流の有無ごとに示

50

す図である。

【図 10】磁極に占める磁石開口角の割合とトルクリップルとの関係を、6次高調波電流の有無ごとに示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0015】

[一実施形態]

以下、一実施形態を図面に基づき説明する。本実施形態による「回転電機」としてのモータは、車両の電動パワーステアリングシステムの駆動装置に適用されている。

【0016】

(駆動装置)

10

先ず、駆動装置 25 について説明する。図 1、図 2 に示すように、駆動装置 25 は、モータ 23 を構成するハウジング 31、ステータ 32 およびロータ 33 と、ECU 22 を構成するカバー 34、ヒートシンク 35、基板 36 および各種の電子部品 37 ~ 49 とを備えている。

【0017】

ハウジング 31 は、筒ケース 51 と、筒ケース 51 の一端に位置するフロントフレームエンド 52 と、筒ケース 51 の他端に位置するリアフレームエンド 53 とを有している。

【0018】

ステータ 32 は、ハウジング 31 に固定されているステータコア 54 と、ステータコア 54 に組み付けられている二組の三相巻線 55、56 とを有している。三相巻線 55、56 を構成する各相巻線は、リード線 57 を介して基板 36 に接続されている。

20

【0019】

ロータ 33 は、軸受 61、62 を介してハウジング 31 により回転可能に支持されているモータ軸 63 と、モータ軸 63 に嵌合して固定されているロータコア 64 と、ロータコア 64 に埋め込まれるように設けられている複数の永久磁石 65 とを有している。ロータ 33 は埋込磁石型である。

【0020】

カバー 34 は、リアフレームエンド 53 に固定されているカップ状のカバー本体部 66 と、ECU 22 を外部に接続するための端子 67 を内包するコネクタ部 68 とを有している。

30

【0021】

ヒートシンク 35 はカバー本体部 66 の内側に固定されている。基板 36 は、ヒートシンク 35 のうちリアフレームエンド 53 に対向する箇所固定されている。基板 36 には、複数のスイッチング素子 37、38、回転角センサ 39、41、カスタム IC 42、43、マイコン 44、45、コンデンサ 46、47、および、インダクタ 48、49 等が実装されている。なお、ヒートシンク 35 はリアフレームエンド 53 に固定されてもよい。また、リアフレームエンド 53 がヒートシンクを兼ねてもよい。

【0022】

スイッチング素子 37、38 は、三相巻線 55、56 にそれぞれ対応する駆動回路 71、72 (図 3 参照) を構成している。回転角センサ 39、41 は、モータ軸 63 の先端に設けられた磁石 73 と対向するように配置されている。カスタム IC 42、43 は、スイッチング素子 37、38 に対して駆動信号を出力する。マイコン 44、45 は、ロータ 33 の回転角等に基づき、三相巻線 55、56 への供給電力に関する指令値を演算する。コンデンサ 46、47 は、電源から入力された電力を平滑化し、また、スイッチング素子 37、38 のスイッチング動作等に起因するノイズの流出を防止する。インダクタ 48、49 は、コンデンサ 46、47 と共にフィルタ回路を構成する。

40

【0023】

このように構成された駆動装置 25 は、回転角センサ 39、41 の検出値等に基づき三相巻線 55、56 を通電して回転磁界を発生させて、ロータ 33 を回転させる。なお、駆動装置 25 は、ECU 22 とモータ 23 とが一体に設けられた機電一体式であるが、EC

50

Uとモータとがハーネスで接続される機電別体式であってもよい。

【0024】

(モータ)

次に、モータ23についてさらに詳しく説明する。モータ23のように埋込磁石型の回転電機では、ステータ32とロータ33との間のエアギャップ中の磁束に高調波が多く含まれる。その結果、誘起電圧歪波形にも高調波が多く含まれる。また、ピーク低減制御のように発熱を抑えるために意図的に高調波電流が基本波電流に重畳される場合もある。これらはいずれもトルクリップルの要因となる。

【0025】

モータ23の三相巻線の各系統のトルク $T_i$ は次式(1)で表される。式(1)において、 $\Phi_a$ は鎖交磁束、 $i_d$ はd軸電流、 $i_q$ はq軸電流、 $L_d$ はd軸インダクタンス、 $L_q$ はq軸インダクタンスである。

10

$$T_i = \Phi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \quad \dots (1)$$

【0026】

電流 $i_d$ 、 $i_q$ は、6m次高調波電流が有る場合、次式(2)、(3)で表される。mは整数である。

$$i_d = \sum_{m=0} i_{6md} = \sum_{m=0} I_{6md} \sin(6m \quad ) \quad \dots (2)$$

$$i_q = \sum_{m=0} i_{6mq} = \sum_{m=0} I_{6mq} \sin(6m \quad ) \quad \dots (3)$$

【0027】

式(1)に式(2)、(3)を適用し、影響が小さい第18次高調波成分以降を省き、第12次高調波成分までに着目すると次式(4)が導かれる。

20

$$T_i = \Phi_a (i_{0q} + i_{6q} + i_{12q}) + 2(L_d - L_q)(i_{0d} i_{0q} + i_{0d} i_{6q} + i_{0d} i_{12q} + i_{6d} i_{0q} + i_{6d} i_{6q} + i_{12d} i_{0q}) \quad \dots (4)$$

【0028】

1系統目のトルク $T_1$ と2系統目のトルク $T_2$ との和で表されるトルクTにおいて、トルクリップルを低減するには、式(4)の第6次高調波成分および第12次高調波成分を小さくすることが求められる。以降、そのための構成について説明する。

【0029】

(位相差通電)

30

図3に示すように、三相巻線55、56は、電気的特性が同等であり、共通のステータコア54に互いに電気角で $e_1$ ずらして配置されている。これに応じて、三相巻線55、56には、振幅が等しく且つ各組間の位相が電気角で $e_1$ ずれた三相交流電流が通電される。

【0030】

本実施形態では、三相巻線55、56は、各組間の位相差 $e_1$ が電気角で $30 [deg]$ となるように通電される。なお、位相差 $e_1$ は $30 [deg]$ に限らず、 $30 \pm 60 \times n [deg]$ であればよい。上記nは整数である。

【0031】

上述のように2組の三相巻線55、56において振幅が等しく且つ位相差 $30^\circ$ で通電した場合、1系統目の6次高調波電流 $i_{1\_6d}$ 、 $i_{1\_6q}$ を式(5)、(6)とすると、それらと2系統目の6次高調波電流 $i_{2\_6d}$ 、 $i_{2\_6q}$ との関係は式(7)、(8)のように表される。

40

$$i_{1\_6d} = I_{6d} \sin(6 \quad ) \quad \dots (5)$$

$$i_{1\_6q} = I_{6q} \cos(6 \quad ) \quad \dots (6)$$

$$i_{2\_6d} = I_{6d} \sin\{6(\quad +30)\} = -I_{6d} \sin(6 \quad ) = -i_{1\_6d} \quad \dots (7)$$

$$i_{2\_6q} = I_{6q} \cos\{6(\quad +30)\} = -I_{6q} \cos(6 \quad ) = -i_{1\_6q} \quad \dots (8)$$

【0032】

したがって、トルクTにおいて、鎖交磁束 $\Phi_a$ に関する6次高調波電流の項、および、インダクタンス $(L_d - L_q)$ に関する6次高調波電流と基本波電流との積の項がキャンセル

50

ルされ、式(9)が導かれる。つまり、位相差 $30^\circ$ の通電によりトルクリップルの第6次高調波成分をキャンセルすることができる。

$$\begin{aligned}
 T &= T_1 + T_2 \\
 &= a ( i_{1_0q} + i_{2_0q} + i_{1_{12q}} + i_{2_{12q}} ) \\
 &\quad + (L_d - L_q) ( i_{1_0d} i_{1_0q} + i_{1_0d} i_{1_{12q}} + i_{1_{6d}} i_{1_{6q}} + i_{1_{12d}} i_{1_0q} ) \\
 &\quad + (L_d - L_q) ( i_{2_0d} i_{2_0q} + i_{2_0d} i_{2_{12q}} + i_{2_{6d}} i_{2_{6q}} + i_{2_{12d}} i_{2_0q} ) \quad \dots
 \end{aligned}$$

・(9)

【0033】

(スキュー構造)

図1に示すように、ステータコア54は、互いに軸方向に組み合わされた2つのコア部541、542から構成されている。

10

【0034】

図1、図4、図5に示すように、第1コア部541は、環状のバックヨーク部751と、バックヨーク部751から径方向内側に突き出す複数のティース部761とを有している。ティース部761は、径方向へ延びている第1延伸部771と、第1延伸部771の先端、すなわち第1延伸部771に対してロータ33側に設けられている第1スキュー形成部781とを有している。図4では、煩雑になることを避けるために、ステータコア54、ロータコア64および永久磁石65のハッチングを省略している。

【0035】

図1、図4、図6に示すように、第2コア部542は、環状のバックヨーク部752と、バックヨーク部752から径方向内側に突き出す複数のティース部762とを有している。ティース部762は、径方向へ延びている第2延伸部772と、第2延伸部772の先端、すなわち第2延伸部772に対してロータ33側に設けられている第2スキュー形成部782とを有している。

20

【0036】

図4に示すように、バックヨーク部751、752は、ステータコア54のバックヨーク75を構成している。ティース部761、762は、ステータコア54のティース76を構成している。

【0037】

軸方向から見たとき、第1延伸部771の形状は第2延伸部772の形状と同じである。また、第1延伸部771の周方向位置と第2延伸部772の周方向位置とは同じである。第1延伸部771および第2延伸部772は、ティース76の延伸部77を構成している。各延伸部77間には、ステータコア54の軸方向の一端から他端まで真っ直ぐ延びるスロット79が形成されている。

30

【0038】

各スロット79には三相巻線55、56が設けられている。三相巻線55は、U相巻線551、V相巻線552、およびW相巻線553から構成されている(図3参照)。三相巻線56は、U相巻線561、V相巻線562、およびW相巻線563から構成されている(図3参照)。各スロット79は等角度間隔に形成されており、そのピッチは位相差 $e1$ と同じである。三相巻線55と三相巻線56とは、互いに角度 $e1$ ずらしてステータコア54に巻装されている。

40

【0039】

図5に示すように、第1スキュー形成部781および第2スキュー形成部782は、ティース76の先端部78を構成している。第1スキュー形成部781は、延伸部77に対して周方向一方側に突き出すように形成されている。第2スキュー形成部782は、延伸部77に対して周方向他方側に突き出すように形成されている。

【0040】

図7に示すように、第1スキュー形成部781は、ロータ33(図5参照)に対向する面であるティース先端面81を有している。ティース先端面81の周方向中央位置P1は、延伸部77の周方向中心を示す第1仮想面C1に対して $s$ ずれている。第1仮想面C

50

1 に対する周方向中央位置 P 1 のスキュー角度は  $s$  である。図 7 では、煩雑になることを避けるために、延伸部 77 および先端部 78 のハッチングを省略している。

【0041】

第 2 スキュー形成部 782 は、ロータ 33 (図 5 参照) に対向する面であるティース先端面 82 を有している。ティース先端面 82 の周方向中央位置 P 2 は、第 1 仮想面 C 1 に対して  $s$  ずれている。第 1 仮想面 C 1 に対する周方向中央位置 P 2 のスキュー角度は  $s$  である。

【0042】

図 7、図 8 に示すように、先端部 78 は、周方向に電気角で  $e_2$  ずれるように軸方向に分かれた複数のスキュー形成部 781、782 を有するスキュー構造である。つまり、第 1 スキュー形成部 781 および第 2 スキュー形成部 782 は、軸方向へ並びつつも周方向位置が互いにずれており、2 段スキューを形成している。図 8 に示すように、スキュー形成部 781、782 は、径方向内側から見て点対称な形状となるように配置されている。対称点は、第 1 仮想面 C 1 と、先端部 78 の軸方向中央を示す第 2 仮想面 C 2 とが交差する箇所である。

10

【0043】

ティース先端面 81、82 の周方向中央位置 P 1、P 2 は、周方向に電気角で  $e_2$  ずれている。そして、次式 (10) の関係を満たしている。本実施形態では、 $e_1$  は電気角で  $30^\circ$  である。また、 $e_2$  は電気角で  $15^\circ$  であり、 $s$  の 2 倍である。

$$e_1 > e_2 \cdots (10)$$

20

【0044】

上述のようにステータコア 54 を 2 つのコア部 541、542 から構成し、各コア部のティース先端のスキュー形成部 781、782 を  $15^\circ$  ずらして配置した場合、1 系統目の 12 次高調波電流  $i_{1-12d}$ 、 $i_{1-12q}$  を式 (11)、(12) とすると、それらと 2 系統目の 12 次高調波電流  $i_{2-12d}$ 、 $i_{2-12q}$  との関係は式 (13)、(14) のように表される。

$$i_{1-12d} = I_{12d} \sin(12\theta) \cdots (11)$$

$$i_{1-12q} = I_{12q} \cos(12\theta) \cdots (12)$$

$$i_{2-12d} = I_{12d} \sin\{12(\theta + 15^\circ)\} = -I_{12d} \sin(12\theta) = -i_{1-12d} \cdots (13)$$

$$i_{2-12q} = I_{12q} \cos\{12(\theta + 15^\circ)\} = -I_{12q} \cos(12\theta) = -i_{1-12q} \cdots (14)$$

30

【0045】

したがって、式 (9) のトルク T において、鎖交磁束  $\Phi_a$  に関する 12 次高調波電流の項、および、インダクタンス差 ( $L_d - L_q$ ) に関する 12 次高調波電流と基本波電流との積の項がキャンセルされ、式 (15) が導かれる。つまり、 $15^\circ$  のスキュー構造により、12 次高調波電流に起因する第 12 次高調波成分をキャンセルすることができる。

$$T = \Phi_a (i_{1-0q} + i_{2-0q}) + (L_d - L_q) (i_{1-0d} i_{1-0q} + i_{1-6d} i_{1-6q}) + (L_d - L_q) (i_{2-0d} i_{2-0q} + i_{2-6d} i_{2-6q}) \cdots (15)$$

【0046】

ここで、式 (15) を見ると、位相差通電およびスキュー構造によっても、d 軸の 6 次高調波電流と q 軸の 6 次高調波電流との積の項が残る。この項は、トルクリップルの第 12 次高調波成分としてトルク T に影響を及ぼす。このような 6 次高調波電流に起因する第 12 次高調波成分は、以下の構成により低減することができる。

40

【0047】

(エアギャップと永久磁石)

図 6 に示すように、ロータ 33 の磁極のうち、周方向の中央部 83 がロータ 33 の外接円 Cc に接する。また、ロータ 33 の磁極のうち、中央部 83 に対して周方向の両側部 84、85 が外接円 Cc から径方向内側に離れている。本実施形態では、ロータ 33 の磁極の外周面は、ステータ 32 側に凸となる凸曲面である。この凸曲面の横断面形状は、1 つ以上の円弧を連続的に接続した形状となっている。

50

## 【0048】

ここで、ステータ32と外接円Ccとの径方向距離をaとする。すなわち、aはステータ32とロータ33とのエアギャップである。また、永久磁石65のうち径方向で最も外側に位置する磁石最外部86、87と外接円Ccとの径方向距離をbとする。ロータコア64および永久磁石65は、次式(16)の関係を満たすように設けられている。

$$a/b < 1 \quad \dots (16)$$

## 【0049】

一般に、d軸磁束(すなわちロータ33の磁束のd軸成分)は透磁率の低い永久磁石65を透過するため、d軸インダクタンス $L_d$ は比較的小さくなる。永久磁石65の磁気抵抗の寄与が大きいためロータコア64の磁気飽和の影響を受けにくい。これに対して、q軸磁束(すなわちロータ33の磁束のq軸成分)はロータコア64を通るため、d軸に比べて透過率が大きくなり、q軸インダクタンス $L_q$ は比較的大きくなる。したがって、式(16)の関係を満たす場合、q軸磁束が小さくなり、d軸インダクタンス $L_d$ をq軸インダクタンス $L_q$ に近づけることができる。つまり、d軸インダクタンス $L_d$ とq軸インダクタンス $L_q$ との差を小さくすることができる。これにより、式(15)のインダクタンス差( $L_d - L_q$ )の項が小さくなり、6次高調波電流が有る場合でもトルクリップルを低減できる。図9に示すように、式(16)の関係を満たす場合、6次高調波電流の有無にかかわらずトルクリップルが低減されていることが分かる。

## 【0050】

(磁石開口角)

本実施形態では、一の磁極には1つの永久磁石65が含まれる。第1磁石最外部86は、永久磁石65のうち、中央部83に対し周方向一方において径方向で最も外側に位置する部位である。第2磁石最外部87は、永久磁石65のうち、中央部83に対し周方向他方において径方向で最も外側に位置する部位である。

## 【0051】

ここで、第1磁石最外部86から第2磁石最外部87までの周方向角度を $m_1$ とする。言い換えれば、 $m_1$ は、一の磁極における磁氣的なd軸開口角(すなわち磁石開口角)である。また、一の磁極の周方向角度を $m_2$ とする。言い換えれば、 $m_2$ は、周方向で隣り合う一对のq軸間角度である。ロータコア64および永久磁石65は、次式(17)の関係を満たすように設けられている。

$$m_1 / m_2 = 0.72 \sim 0.79 \quad \dots (17)$$

## 【0052】

図10に示すように、式(17)の関係を満たす場合、6次高調波電流の有無にかかわらずトルクリップルが低減されていることが分かる。

## 【0053】

(透磁率低下部)

ロータコア64のq軸上には、透磁率を低下させる透磁率低下部88が設けられている。本実施形態では、透磁率低下部88は、軸方向に空いた通孔89内の空気である。このように透磁率低下部88を設けることでq軸磁束が小さくなり、前述のように6次高調波電流が有る場合でもトルクリップルを低減できる。

## 【0054】

(積層体)

図1および図8では、コア部541、542は一部材であるかのように図示されているが、これは図が煩雑になることを避けるためである。実際には、コア部541、542は、例えば電磁鋼板もしくはSPCC等の冷間圧延鋼板が積層されてなる積層体である。これら2種のコア部541、542を構成するプレートを順次積層することで積層体が構成される。図7、図8に示すように第1スキュー形成部781と第2スキュー形成部782は、延伸部77の第1仮想面C1に対して左右対称な形状である。したがって、第1コア部541を構成するプレートを裏返せば、第2コア部542を構成するプレートとして用いることができる。すなわち、第1コア部541を構成するプレートと第2コア部542

10

20

30

40

50

を構成するプレートは同じものを用いることができる。

【0055】

(ブリッジ部)

図6に示すように、永久磁石65は、ロータコア64の磁石収容孔91に設けられている。磁石収容孔91の周方向両側には、永久磁石65に対する径方向内側の部位と径方向外側の部位とを接続するブリッジ部92が設けられている。ロータコア64の磁石収容孔91を取り囲む部分のうち最も細い部位は、ブリッジ部92である。鋼板の板厚を $t$ とし、ブリッジ部92の幅を $w$ とすると、次式(18)の関係が満たされている。

$$w < a < 2t \quad \dots (18)$$

【0056】

径方向距離 $a$ を小さくすることで、エアギャップ中の磁気抵抗が低減される。これにより高トルク化を達成できる。また、ブリッジ部92の幅 $w$ を小さくすることで、短絡磁束の経路の磁気抵抗が高められる。これにより、ブリッジ部92を経路とする磁束の短絡が減り、ステータ32により多くの磁束が鎖交し、高トルク化を達成できる。

【0057】

(スキュー形成部の軸方向長さ)

図1に示すように、スキュー形成部781、782の積層枚数差は2枚以下である。本実施形態では、スキュー形成部781、782の軸方向長さの比は「50:50」である。つまり、第1スキュー形成部781の軸方向長さ $L_a$ は、第2スキュー形成部782の軸方向長さ $L_b$ と同じである。また、スキュー形成部781、782の軸方向長さの和を $L_s (= L_a + L_b)$ とし、ロータコア64の軸方向長さを $L_r$ とすると、次式(19)の関係が満たされている。また、永久磁石65の軸方向長さを $L_{mg}$ とすると、次式(20)の関係が満たされている。

$$L_s < L_r \quad \dots (19)$$

$$L_s < L_{mg} \quad \dots (20)$$

【0058】

一般に、ロータコア64は軸方向に組付け誤差が生じる。本実施形態のようにスキュー構造のステータ32を持つモータ23では、上記組付け誤差によりトルクリップルキャンセル効果に偏りが生じ、問題となる。これに対して、式(19)、(20)の関係を満たすことで、組付け誤差が生じてもスキュー形成部781、782のそれぞれがロータ33と対向する面積を等しくすることができる。そのため、トルクリップルキャンセル効果を維持できる。

【0059】

(効果)

以上説明したように、本実施形態では、三相巻線55、56は、各組間の位相差 $e_1$ が電気角で $30 \pm 60 \times n$  [deg]となるように通電される。ティース76の先端部78は、周方向に電気角で $e_2$ ずれるように軸方向に分かれた複数のスキュー形成部781、782を有するスキュー構造である。また、前記式(10)および式(16)の関係を満たす。

【0060】

式(16)のように $a/b < 1$ とすることで、ロータ33の磁束の $q$ 軸成分が小さくなる。また、ロータ33によって発生する誘起電圧歪みが小さくなる。結果として、6次高調波電流が有る場合でもリラクタンストルクの影響が小さくなるため、位相差通電およびスキュー構造でキャンセルしきれなかった第12次高調波成分の発生を抑制することができる。また、モータ23の構造により第12次高調波成分を小さくすることができ、制御装置には依存しない。そのため、モータ23によれば、制御装置の高性能化を必要とすることなくトルクリップルの低減が可能である。

【0061】

また、本実施形態では、前記式(17)の関係を満たす。これにより、6次高調波電流の有無にかかわらずトルクリップルを低減することができる。

10

20

30

40

50

## 【0062】

また、本実施形態では、前記式(18)の関係を満たす。径方向距離 $a$ を小さくすることで、エアギャップ中の磁気抵抗が低減される。これにより高トルク化を達成できる。また、ブリッジ部92の幅 $w$ を小さくすることで、短絡磁束の経路の磁気抵抗が高められる。これにより、ブリッジ部92を経路とする磁束の短絡が減り、ステータ32により多くの磁束が鎖交し、高トルク化を達成できる。

## 【0063】

また、本実施形態では、スキュー形成部781、782の積層枚数差は2枚以下である。また、前記式(19)の関係を満たす。これにより、組付け誤差が生じてもスキュー形成部781、782のそれぞれがロータ33と対向する面積を等しくすることができる。そのため、トルクリップルキャンセル効果を維持できる。

10

## 【0064】

また、本実施形態では、ロータコア64の $q$ 軸上には、透磁率を低下させる透磁率低下部88が設けられている。このように透磁率低下部88を設けることで $q$ 軸磁束が小さくなり、前述のように6次高調波電流が有る場合でもトルクリップルを低減できる。

## 【0065】

## [他の実施形態]

前述の実施形態では、(A)複数組の多相巻線の各組間の位相差 $e_1$ が電気角で $30 \pm 60 \times n$  [deg]であり、(B)ティースの先端部が電気角で $e_2$ ずれるスキュー構造であって、 $e_1 > e_2$ であり、(C) $a/b < 1$ であった。これに対して、他の実施形態では、(A)および(C)を備える回転電機、または、(B)および(C)を備える回転電機であってもよい。

20

## 【0066】

他の実施形態では、ロータコアの一の磁極には2つ以上の永久磁石が含まれていてもよい。また、他の実施形態では、ロータコアの磁極の外周面は、曲面と平面との組合せから構成されてもよい。また、他の実施形態では、透磁率低下部は、通孔内の空気に限らず、例えば、通孔内の樹脂等の非磁性部材、または、磁性部材がレーザ等で変質させられたものなどであってもよい。

## 【0067】

他の実施形態では、モータは、電動パワーステアリングシステムに限らず、他のシステムや装置に適用されてもよい。また、他の実施形態では、回転電機は、モータに限らず、発電機またはモータジェネレータに用いられてもよい。

30

## 【0068】

本発明は、上述した実施形態に限定されるものではなく、発明の趣旨を逸脱しない範囲で種々の形態で実施可能である。

## 【符号の説明】

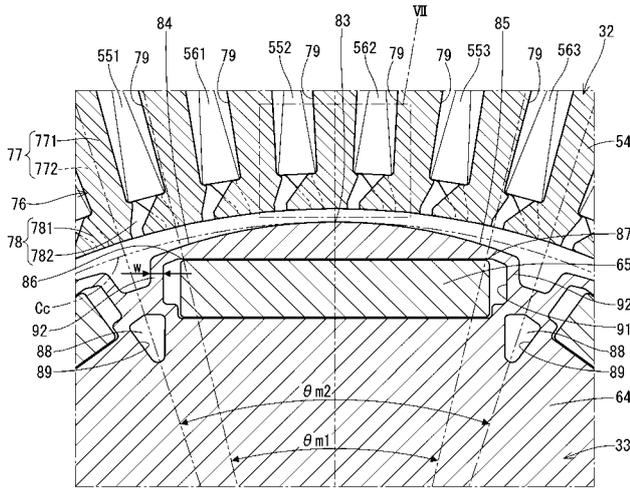
## 【0069】

- 32 : ステータ
- 33 : ロータ
- 54 : ステータコア
- 55、56 : 三相巻線
- 64 : ロータコア
- 65 : 永久磁石
- 76 : ティース
- 78 : 先端部
- 781、782 : スキュー形成部

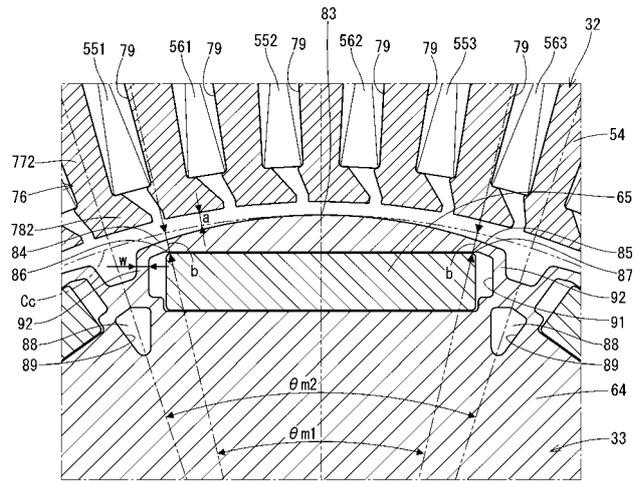
40



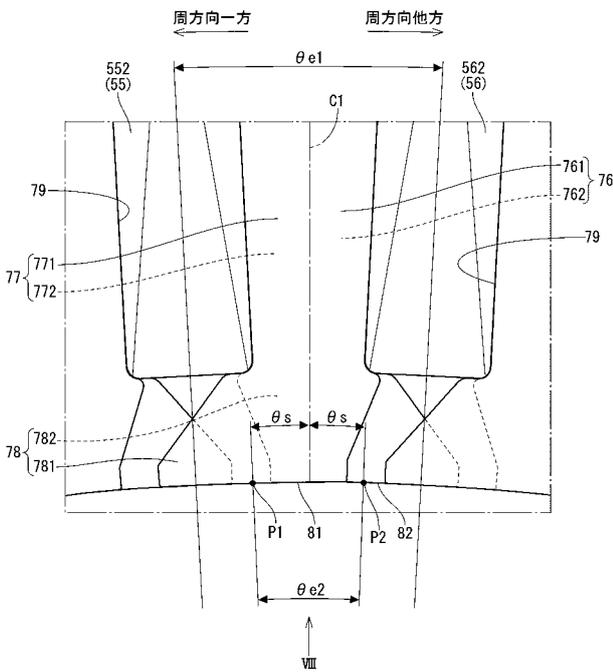
【 図 5 】



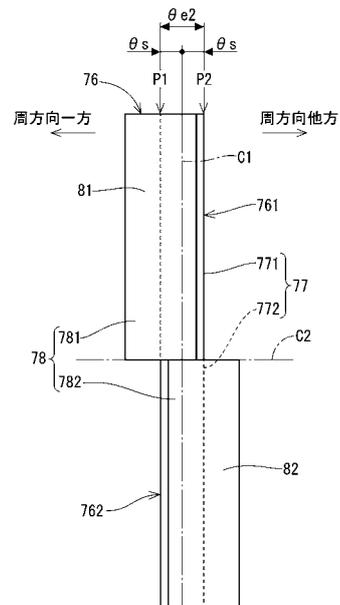
【 図 6 】



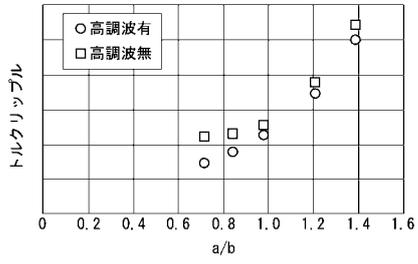
【 図 7 】



【 図 8 】



【 図 9 】



【 図 10 】

