

(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2011-24385
(P2011-24385A)

(43) 公開日 平成23年2月3日(2011.2.3)

(51) Int.Cl.	F 1	テーマコード (参考)
HO2K 21/14 (2006.01)	HO2K 21/14 M	5H607
HO2K 7/09 (2006.01)	HO2K 7/09	5H621

審査請求 未請求 請求項の数 4 O L (全 15 頁)

(21) 出願番号 特願2009-169456 (P2009-169456)
(22) 出願日 平成21年7月17日 (2009.7.17)

(71) 出願人 803000115
学校法人東京理科大学
東京都新宿区神楽坂一丁目3番地
(74) 代理人 100105201
弁理士 椎名 正利
(72) 発明者 大島 政英
東京都新宿区神楽坂1-3 学校法人東京
理科大学内
(72) 発明者 河野 達也
長野県伊那市東春近4097
Fターム(参考) 5H607 BB07 BB14 GG17
5H621 BB01 GA20 HH01 PP02

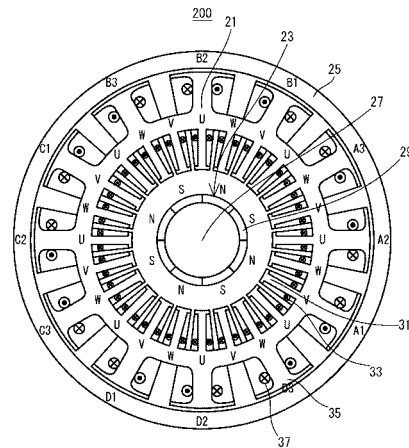
(54) 【発明の名称】 二重回転子構造磁気支持モータ及び該二重回転子構造磁気支持モータを搭載したターンテーブル

(57) 【要約】

【課題】 支持力の低振動化を図った二重回転子構造磁気支持モータ及び該二重回転子構造磁気支持モータを搭載したターンテーブルを提供する。

【解決手段】 二重回転子構造とは固定子21を挟み内側に内側回転子23、外側に外側回転子25の2つの回転子を持つ構造である。外側回転子25は鉄心のみで構成され、固定子21の外側は12スロット構造であり、歯35には磁気支持巻線37が捲回されており、例えば巻線A1, A2, A3は直列接続されている。各磁気支持巻線37には直流電流を流し、発生する磁気支持磁束によって外側回転子25を吸引し、磁気支持力を発生させる役割を担っている。巻線A1, A2, A3はx軸負方向に電磁力を、また巻線C1, C2, C3はx軸正方向の力をそれぞれ発生する。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

固定子の外周側（若しくは内周側）に配設された複数の支持巻線を有する磁気支持力発生手段と、

該磁気支持力発生手段により磁気支持される第 1 の回転子と、

前記支持巻線と同じ平面内で、かつ該支持巻線の前記固定子を隔てた内周側（若しくは外周側）に配設された電動機巻線を有する電動機トルク発生手段と、

該電動機トルク発生手段により回転駆動される第 2 の回転子とを備えたことを特徴とする二重回転子構造磁気支持モータ。

【請求項 2】

前記第 1 の回転子には永久磁石が配設されず、前記磁気支持力発生手段により生じた磁力により吸引されることを特徴とする請求項 1 記載の二重回転子構造磁気支持モータ。

【請求項 3】

前記磁気支持力発生手段は、一方向を構成する複数の支持巻線の内、中央に位置する巻線のターン数が外側に位置する巻線のターン数より大きくされたことを特徴とする請求項 1 又は請求項 2 記載の二重回転子構造磁気支持モータ。

【請求項 4】

請求項 1 ～ 3 に記載の二重回転子構造磁気支持モータを搭載したターンテーブル。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は二重回転子構造磁気支持モータ及び該二重回転子構造磁気支持モータを搭載したターンテーブルに係わり、特に支持力の低振動化を図った二重回転子構造磁気支持モータ及び該二重回転子構造磁気支持モータを搭載したターンテーブルに関する。

【背景技術】

【0002】

ブラシレス DC モータは産業、情報機器類の数多くのドライブ装置として用いられている。ブラシレス DC モータとは、DC モータにおけるブラシと整流子を、永久磁石を用いた電氣的な機構に置き換え、接触を無くしたものである。しかし、軸受部分が存在するため完全な非接触ではない。そのため、軸受のメンテナンスフリー、長寿命、高剛性が要求されている。

【0003】

そこで、かかる要求を満たすためベアリングレスドライブ技術を導入したベアリングレスブラシレス DC モータが開発されている。

ベアリングレスドライブとは、従来の機械的接触面をもつベアリングの代わりに磁気力で回転軸を支持する磁気軸受を用い、さらに電動機の機構と一体化したドライブ装置である。

【0004】

ベアリングレスブラシレス DC モータは、例えば特許文献 1 に開示されている。図 15 に一般的なベアリングレスブラシレス DC モータの構成図を示す。

ベアリングレスブラシレス DC モータ 100 の回転子 10 は、鉄心 3 に対しその内側に永久磁石 5 が貼り付けて構成されている。

【0005】

図 15 中の N、S は鉄心 3 に面する側の永久磁石 5 の極性を表している。固定子鉄心 7 の固定子歯 9 に巻かれた巻線の内、外側の U、V、W で表記された巻線は三相電動機巻線 11 である。また、この三相電動機巻線 11 の内側には磁気支持巻線 13 が巻回されている。そして、このように構成されたベアリングレスブラシレス DC モータは機械的軸受がなく上記ブラシレス DC モータの要求を満たす可能性がある。

【先行技術文献】

【特許文献】

10

20

30

40

50

【 0 0 0 6 】

【特許文献 1】特開 2 0 0 7 - 3 0 6 7 8 5 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 0 7 】

しかしながら、アプリケーションにより低トルクリプル・低支持力振動という要求がある場合、1つの回転子で電動機動作と磁気支持動作を行うベアリングレスブラシレス DC モータはある程度以下の低リプルを望めなかった。

【 0 0 0 8 】

例えば小さいベアリングレスブラシレス DC モータを用いて大きなトルクを得ようとする場合、ギャップを狭くする必要があるが、ギャップを小さくすると逆にリプルが増大してしまうおそれがあった。一方、リプルを抑えるためにギャップを大きくすると所望のトルクが得られなくなるおそれがあった。

【 0 0 0 9 】

本発明はこのような従来の課題に鑑みてなされたもので、支持力の低振動化を図った二重回転子構造磁気支持モータ及び該二重回転子構造磁気支持モータを搭載したターンテーブルを提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 1 0 】

このため本発明（請求項 1）の二重回転子構造磁気支持モータは、固定子の外周側（若しくは内周側）に配設された複数の支持巻線を有する磁気支持力発生手段と、該磁気支持力発生手段により磁気支持される第 1 の回転子と、前記支持巻線と同じ平面内で、かつ該支持巻線の前記固定子を隔てた内周側（若しくは外周側）に配設された電動機巻線を有する電動機トルク発生手段と、該電動機トルク発生手段により回転駆動される第 2 の回転子とを備えて構成した。

【 0 0 1 1 】

二重回転子構造磁気支持モータは電動機機構と磁気支持機構が物理的に分かれているため、電動機側に対して低トルクリプル化を、磁気支持側に対して低支持力振動化をそれぞれ講じることができる。

また、本発明（請求項 2）の二重回転子構造磁気支持モータは、前記第 1 の回転子には永久磁石が配設されず、前記磁気支持力発生手段により生じた磁力により吸引されることを特徴とする。

【 0 0 1 2 】

第 1 の回転子に永久磁石が配設されていると、永久磁石の起磁力分布にむらがあるため、均一にできず、また、ギャップに空間高調波が発生して、支持力の脈動を生じてしまう。そこで、本発明の二重回転子構造磁気支持モータでは、磁気支持側の第 1 の回転子に永久磁石を使用しないことで支持力の脈動を軽減する。

【 0 0 1 3 】

更に、本発明（請求項 3）の二重回転子構造磁気支持モータは、前記磁気支持力発生手段は、一方向を構成する複数の支持巻線の内、中央に位置する巻線のターン数が外側に位置する巻線のターン数より大きくされたことを特徴とする。

【 0 0 1 4 】

一方向を構成する複数の支持巻線は 3 本、4 本、5 本等であってもよい。3 本の場合には真ん中の支持巻線のターン数を大きくする。4 本の場合には、内側 2 本の支持巻線のターン数を大きくする。5 本の場合には、真ん中の 1 本についてターン数を大きくしてもよいし、その両隣の支持巻線についてもターン数を大きくするようにしてもよい。

【 0 0 1 5 】

ターン数を大きくした支持巻線は起磁力が大きいために、隣接の他方向を構成する支持巻線から生ずる漏れ磁束を減少させる構造にできる。このため、半径方向の非干渉化を実現できる。

10

20

30

40

50

一方向を構成する複数の支持巻線の内、外側の支持巻線のターン数は、真ん中若しくは内側の支持巻線のターン数に対し、1.5倍～2倍程度の比を有すれば十分である。

【0016】

更に、本発明（請求項4）のターンテーブルは、請求項1～3に記載の二重回転子構造磁気支持モータを搭載したことを特徴とする。

【発明の効果】

【0017】

以上説明したように本発明によれば、固定子の内周側と外周側とに電動機機構と磁気支持機構が物理的に分かれているため、電動機側に対して低トルクリプル化を、磁気支持側に対して低支持力振動化をそれぞれ講じることができる。

10

【図面の簡単な説明】

【0018】

【図1】本発明である二重回転子構造磁気支持ブラシレスDCモータの実施形態の構成図

【図2】磁気支持力の発生原理図

【図3】電動機電流の波形の一例

【図4】本実施形態の二重回転子構造磁気支持ブラシレスDCモータの制御システムのブロック構成図

【図5】干渉原因を示す図（巻線パターン1）

【図6】干渉原因を示す図（巻線パターン2）

【図7】干渉補償後の磁気支持力の発生を示す図（巻線パターン1）

20

【図8】干渉補償後の磁気支持力の発生を示す図（巻線パターン2）

【図9】解析モデルの寸法を示す図

【図10】歯1本構造の磁束密度分布

【図11】歯2本構造の磁束密度分布

【図12】歯3本構造の磁束密度分布

【図13】ベアリングレスブラシレスDCモータの寸法を示す図

【図14】二重回転子構造磁気支持ブラシレスDCモータをターンテーブルに適用した例

【図15】ベアリングレスブラシレスDCモータの構成図

【発明を実施するための形態】

【0019】

30

以下、本発明の実施形態について説明する。本発明である二重回転子構造磁気支持ブラシレスDCモータの実施形態の構成図を図1に示す。二重回転子構造とは図1のように固定子21を挟み内側に内側回転子23、外側に外側回転子25の2つの回転子を持つ構造である。

【0020】

二重回転子構造磁気支持ブラシレスDCモータ200を構成する2つの回転子のうち内側回転子23は鉄心27の表面に永久磁石29が周状に貼り付けられ、8極構造である。固定子21の回転軸側は24スロット構造で、歯31に巻かれた巻線U、V、Wは電動機巻線33であり三相对称正弦波電流を流す。

【0021】

40

永久磁石界磁磁束と電動機巻線U、V、Wを励磁して発生する電動機磁束によってトルクを発生させる役割を担っている。また巻線は電流を正方向に流したときに45°毎に磁束が逆方向に発生するように巻かれている。

【0022】

なお、本実施形態では、電動機側での低トルクリプル化を図るため、永久磁石29と電動機巻線U、V、W間には図9で後述するように相応のギャップを設定している。

【0023】

一方、外側回転子25は鉄心のみで構成され、固定子21の外側は12スロット構造であり、歯35に巻かれた巻線A1、A2、A3、B1、B2、B3、C1、C2、C3、D1、D2、D3は磁気支持巻線37であり、巻線A1、A2、A3は直列接続されてい

50

る。同様に巻線 B 1 , B 2 , B 3 と巻線 C 1 , C 2 , C 3 と巻線 D 1 , D 2 , D 3 はそれぞれ直列接続されている。

【 0 0 2 4 】

各磁気支持巻線 3 7 には直流電流を流し、発生する磁気支持磁束によって外側回転子 2 5 を吸引し、磁気支持力を発生させる役割を担っている。巻線は電流を正方向に流したときに 3 0 ° 毎に磁束が逆方向に発生するように巻かれている。巻線 A 1 , A 2 , A 3 は x 軸負方向に電磁力を、また巻線 C 1 , C 2 , C 3 は x 軸正方向の力を、巻線 B 1 , B 2 , B 3 は y 軸負方向の力を、巻線 D 1 , D 2 , D 3 は y 軸正方向の力をそれぞれ発生する。

【 0 0 2 5 】

なお、本実施形態では磁気支持巻線 3 7 を固定子 2 1 の外側に配設し、電動機巻線 U , V , W を固定子 2 1 の内側に配設すると説明したが、これとは逆に固定子 2 1 の外側に電動機巻線 U , V , W を配設し、固定子 2 1 の内側に磁気支持巻線 3 7 を配設するようにしてもよい。

10

【 0 0 2 6 】

次に、磁気支持力の発生原理について説明する。

図 2 に磁気支持力の発生原理図を示す。磁気支持力は磁気支持巻線 A 1 , A 2 , A 3 と巻線 B 1 , B 2 , B 3 と巻線 C 1 , C 2 , C 3 と巻線 D 1 , D 2 , D 3 の起磁力により外側回転子 2 5 を吸引することによって発生させる。ここでは例として x 軸正方向へ磁気支持力を発生させる場合について説明する。

【 0 0 2 7 】

x 軸正方向へ磁気支持力を発生させる場合、磁気支持巻線 C 1 , C 2 , C 3 を励磁する。巻線 C 1 , C 2 , C 3 に正方向の励磁電流を流すことにより磁束 c_1 , c_2 , c_3 が図示の方向にそれぞれ発生し、外側回転子 2 5 を吸引する電磁力 F_{c1} , F_{c2} , F_{c3} が発生する。発生した電磁力 F_{c1} , F_{c2} , F_{c3} は磁束 c_1 , c_2 , c_3 の向きに関係なく全て外側回転子 2 5 が固定子 2 1 に吸引する方向へ発生する。

20

【 0 0 2 8 】

よって電磁力 F_{c1} は - 3 0 ° 方向へ、 F_{c2} は 0 ° 方向へ、 F_{c3} は + 3 0 ° 方向へそれぞれ発生し、これらの合力によって x 軸正方向への磁気支持力 F_x を発生する。

【 0 0 2 9 】

ここで x 軸負方向へ磁気支持力を発生させる場合、磁気支持巻線 A 1 , A 2 , A 3 を励磁することにより上述した原理と同様に磁気支持力を発生する。また、y 軸正方向へ磁気支持力を発生させるとき磁気支持巻線 D 1 , D 2 , D 3 を励磁し、y 軸負方向へ磁気支持力を発生させるとき磁気支持巻線 B 1 , B 2 , B 3 を励磁することにより磁気支持力を発生する。x 軸、y 軸方向への磁気支持力をベクトルの的に合成し任意の方向への磁気支持力を発生させる。

30

【 0 0 3 0 】

図 1 5 に示すペアリングレスブラシレス DC モータ 1 0 0 は回転子 1 0 の永久磁石 5 の界磁磁束と磁気支持磁束の強めあい弱めあいによって磁気支持力を発生させている。その磁気支持力を発生する際、固定子 7 の巻線起磁力分布やスロット開口部、回転子 1 0 の永久磁石起磁力分布によってギャップに空間高調波が発生して、支持力の脈動を生じてしまう。

40

【 0 0 3 1 】

そこで、本実施形態の二重回転子構造磁気支持ブラシレス DC モータ 2 0 0 では、磁気支持側の外側回転子 2 5 に永久磁石を使用しないことで上述した原因で発生する支持力の脈動を軽減している。

【 0 0 3 2 】

次に、本実施形態である二重回転子構造磁気支持ブラシレス DC モータ 2 0 0 の制御方法について説明する。

【 0 0 3 3 】

本実施形態の二重回転子構造磁気支持ブラシレス DC モータ 2 0 0 のトルク発生の原理

50

は従来の永久磁石同期モータと同様であり、電動機巻線 3 3 を励磁して発生する電動機磁束と、内側回転子 2 3 に貼り付けられた永久磁石 2 9 の界磁磁束の相互作用によってトルクを発生する。

【0034】

電動機電流の周波数は 8 極モータなので機械角周波数の 4 倍になり、電動機電流は U, V, W の三相对称正弦波電流で制御される。図 3 に電動機電流の波形の一例を示す。ここで、電流の定格値は巻線の直径を 0.6 mm とし、電流密度を 8.5 A/mm² として 2.4 A とする。

【0035】

磁気支持力の発生原理は上述したように、外側回転子 2 5 を固定子 2 1 の外側 1 2 スロットの歯 3 5 に巻かれた巻線 A 1, A 2, A 3, B 1, B 2, B 3, C 1, C 2, C 3, D 1, D 2, D 3 の起磁力によって吸引することで発生する。

【0036】

磁気支持力は外側回転子 2 5 が偏心したとき中心に戻そうとする方向に発生させたいので、外側回転子 2 5 の x 軸、y 軸方向の変位に対し逆方向の磁気支持力を発生する巻線を選択し、磁気支持電流を指令する。また 1 巻線で 1 方向に力の発生を担っているため磁気支持電流は直流で制御する。

【0037】

図 4 に本実施形態の二重回転子構造磁気支持ブラシレス DC モータの制御システムのブロック構成図を示す。制御システムは電動機制御系と磁気支持制御系から成る。以下、それぞれの制御系における制御信号について説明する。

電動機制御系において電流制御器 5 1 では、エンコーダ 5 3 により検出してきた回転角度と電流の指令値 i_m^* から、U, V, W の各相の正弦波電流 i_U, i_V, i_W を生成し、電動機制御を行う。

【0038】

磁気支持制御系における制御信号の流れは以下の通りである。はじめにギャップセンサ 5 5、5 6 により外側回転子 2 5 の x 軸、y 軸上の位置 (x, y) を検出し、誤差器 5 7、5 8 で位置の指令値 (x^*, y^*) との誤差 (x, y) を求め、PID 制御 5 9、6 0 により位置の誤差 (x, y) を増幅して電流指令値 i_x^*, i_y^* を決定する。

【0039】

磁気支持力は変位、すなわち位置の誤差に対して逆方向へ発生させるため、誤差の値が負ならば電流指令値 i_x^*, i_y^* は正、また、誤差の値が正ならば i_x^*, i_y^* は負となるようにする。

【0040】

ここで決定した電流指令値 i_x^*, i_y^* から巻線選択部 6 1、6 2 では、次のように磁気支持巻線ごとの電流指令値を生成する。すなわち x が正ならば磁気支持巻線 A 1, A 2, A 3 の電流指令値 i_A^* を $i_A^* = |i_x^*|$ として、巻線 C 1, C 2, C 3 の電流指令値 i_C^* は 0 とする。一方、 x が負ならば磁気支持巻線 C 1, C 2, C 3 の電流指令値 i_C^* を $i_C^* = |i_x^*|$ として、巻線 A 1, A 2, A 3 の電流指令値 i_A^* は 0 とする。

【0041】

同様に y が正ならば磁気支持巻線 B 1, B 2, B 3 の電流指令値 i_B^* を $i_B^* = |i_y^*|$ として、巻線 D 1, D 2, D 3 の電流指令値 i_D^* は 0 とする。一方、 y が負ならば磁気支持巻線 D 1, D 2, D 3 の電流指令値 i_D^* を $i_D^* = |i_y^*|$ として、巻線 B 1, B 2, B 3 の電流指令値 i_B^* は 0 とする。

【0042】

このように決定した磁気支持電流の指令値 $i_A^*, i_B^*, i_C^*, i_D^*$ と磁気支持電流の検出値 i_A, i_B, i_C, i_D を比較し電流制御器 6 3、6 4、6 5、6 6 において電流追従制御を行う。

【0043】

次に、磁気支持力の干渉現象について説明する。外側回転子 2 5 を軸支持するために磁

10

20

30

40

50

気支持力はあらゆる半径方向へ発生させる必要がある。しかし、x 軸方向のみ、または y 軸方向のみに磁気支持力を発生する場合に比べて、x 軸方向と y 軸方向に同時に磁気支持力を発生、すなわち磁気支持力に x, y 成分を含む場合は磁気支持力が増減してしまうことがある。この現象を磁気支持力の干渉と呼ぶ。

【0044】

二重回転子構造磁気支持ブラシレス DC モータ 200 における磁気支持力の干渉の原因は、磁気支持巻線 37 の巻く方向によって次の 2 つが考えられる。まず、図 5 のような方向に巻線を巻いた場合（巻線パターン 1）である。45° 方向へ磁気支持するとき、x 軸正方向と y 軸正方向に磁気支持力をそれぞれ発生するため、磁気支持巻線 C1, C2, C3 と巻線 D1, D2, D3 を同時に励磁する。

10

【0045】

磁気支持巻線 C1, C2, C3 を励磁することによって x 軸正方向への磁気支持力 F_x を発生し、巻線 D1, D2, D3 を励磁することによって y 軸正方向への磁気支持力 F_y を発生する。さらに x 軸方向と y 軸方向への磁気支持力をベクトル的に合成し、45° 方向へ支持力を発生している。ここで、45° 方向へ発生する磁気支持力のうち、図 5 には磁束 c_1, c_2, c_3 によって発生する力 $F_{c_1}, F_{c_2}, F_{c_3}$ のみを記した。

【0046】

図 5 のような方向に巻線を巻いた場合、磁気支持巻線 C1, C2, C3 と巻線 D1, D2, D3 を同時に励磁すると、図のように巻線 C3 が巻かれた歯と巻線 D1 が巻かれた歯を通る漏れ磁束が発生する。

20

【0047】

この漏れ磁束により磁束 c_3 が増加し、巻線 C3 が巻かれた歯の磁束密度が高くなり、電磁力 F_{c_3} が増加する。その結果、磁束 c_1, c_2, c_3 によって発生する電磁力 $F_{c_1}, F_{c_2}, F_{c_3}$ の合力 F_x は x 軸正方向へ磁気支持力を発生するように指令しているのにも関わらず、僅かに y 軸方向成分が発生してしまう。

【0048】

次に図 6 のような方向に巻線を巻いた場合（巻線パターン 2）である。先程と同様に 45° 方向へ磁気支持するとき、磁気支持巻線 C1, C2, C3 と巻線 D1, D2, D3 を同時に励磁する。ここで、45° 方向へ発生する磁気支持力のうち、図 5 と同様に図 6 には磁束 c_1, c_2, c_3 によって発生する力 $F_{c_1}, F_{c_2}, F_{c_3}$ のみを記した。

30

【0049】

このとき巻線 C3 による磁束 c_3 と巻線 D1 による磁束 d_1 が同じ方向に発生するため互いに反発し図 5 のような漏れ磁束は発生しないが、図 6 のように巻線 C2 が巻かれた歯と巻線 C3 が巻かれた歯を通る磁路と、巻線 D1 が巻かれた歯と巻線 D2 が巻かれた歯を通る磁路がそれぞれ形成される。

【0050】

これらの磁路により磁束 c_2, c_3 が増加し、巻線 C2 が巻かれた歯と巻線 C3 が巻かれた歯の磁束密度が高くなり、電磁力 F_{c_2}, F_{c_3} が増加する。その結果、磁束 c_1, c_2, c_3 によって発生する電磁力 $F_{c_1}, F_{c_2}, F_{c_3}$ の合力 F_x は x 軸正方向へ磁気支持力を発生するように指令しているのにも関わらず、僅かに y 軸方向成分が発生してしまう。

40

【0051】

ここに、どの程度干渉しているかを評価するため、干渉の割合を数 1 で定義した。

【0052】

【数 1】

$$\text{干渉の割合} = \frac{F_x(I_y = \text{定格})}{F_x(I_y = 0)} \times 100[\%]$$

【0053】

ここに、 F_x は x 軸方向磁気支持力であり、 I_y は y 軸方向磁気支持電流である。数 1 において、分母の $F_x(I_y = 0)$ は y 軸方向へ力を発生する巻線 B1, B2, B3 と巻線 D1, D2, D3 の電流が 0 の場合の x 軸方向の磁気支持力であり、分子の $F_x(I_y$

50

= 定格) は y 軸方向へ力を発生する巻線 B_1, B_2, B_3 と巻線 D_1, D_2, D_3 に定格電流が流れている場合の x 軸方向の磁気支持力である。

【0054】

干渉が生じたとき、前述した原因で x 軸方向の磁気支持力 F_x に差が発生するため、数 1 において分母と分子に差が発生し、干渉の割合は 100% から離れた値となる。よって干渉の割合は 100% に近いほど干渉が少ないと言える。

このように x, y 方向の磁気支持力に干渉が生じると回転子の振れ回りは大きく不安定になる。したがって、数 1 で定義した干渉の割合が 100% に近いモータ設計が必要である。

【0055】

次に、磁気支持巻線と支持力の非干渉化について説明する。

即ち、磁気支持巻線の巻数の変更による磁気支持力の干渉補償を提案し、電磁界解析によって非干渉化に最適な巻数を明らかにする。

【0056】

磁気支持力の干渉の発生原因は上述したように、磁気支持巻線を巻く方向によって図 5 の巻線パターン 1 と、図 6 の巻線パターン 2 のように 2 つの場合が考えられる。いずれの場合も、巻線 C_1, C_2, C_3 と巻線 D_1, D_2, D_3 を同時に励磁したとき、となり合う巻線 C_3 と D_1 によって発生するそれぞれの磁束が強めあう、もしくは弱めあうことによって干渉が発生すると考えられる。

【0057】

よって干渉が生じないためには、 x 軸正方向へ磁気支持力を発生する巻線 C_1, C_2, C_3 がそれぞれ巻かれた歯を通る磁路と、 y 軸正方向へ磁気支持力を発生する巻線 D_1, D_2, D_3 がそれぞれ巻かれた歯を通る磁路が、独立して形成されるような設計が必要である。

【0058】

そこで巻数の変更による磁気支持力の干渉補償を提案する。図 7 に干渉補償後の磁気支持力の発生をそれぞれ示す。巻数の変更は以下のように行う。

【0059】

x 軸正方向へ磁気支持力を発生する 3 つ巻線 C_1, C_2, C_3 のうち、 x 軸方向に起磁力を発生する巻線 C_2 の巻数に対して、その両端の巻線 C_1, C_3 の巻数を少なくする。また、 y 軸正方向に起磁力を発生する巻線 D_1, D_2, D_3 についても同様に巻線 D_2 に対して両端の巻線 D_1, D_3 の巻数を少なくする。

【0060】

図 5 の巻数が全て等しい場合は巻線 C_3 により発生した磁束 C_3 が巻線 D_1 が巻かれた歯にも通り、漏れ磁束が発生していた。しかし、図 7 のように巻数を変更し、減少すると C_3 は巻線 C_2 の起磁力が巻線 D_1 の起磁力より大きいため、巻線 C_2 の起磁力の磁極に引かれ、巻線 D_1 の歯の方にはいかず、巻線 C_2 の歯を通る。

【0061】

ここで支持力の x 軸方向成分に着目すると、図 5 では漏れ磁束より $F_{C_3} > F_{C_1}$ となり、合成した力 F_x には y 軸方向成分を含んでしまう。しかし、図 7 では $F_{C_3} = F_{C_1}$ になり、合成した力 F_x は正しく x 軸正方向に発生する。すなわち、図 5 に示した磁路の漏れ磁束が発生しないため x, y 軸方向の支持力の非干渉化が実現できると思われる。

【0062】

一方、図 6 の巻数が全て等しい場合は巻線 C_3 により発生した磁束 C_3 と巻線 D_1 により発生した磁束 D_1 が反発して 1 半径方向へ磁気支持力を発生する磁束密度分布がアンバランスになっていた。

【0063】

しかし、図 8 のように巻数を変更し、減少すると巻線 C_3 の起磁力と巻線 D_1 の起磁力が減少するため C_3 と D_1 は反発しにくくなる。ここで支持力の x 軸方向成分に着目すると、図 6 では磁束の反発により $F_{C_3} > F_{C_1}$ となり、合成した力 F_x には y 軸方向成分を含

10

20

30

40

50

んでしまう。

【0064】

しかし、図8では $F_{C3} = F_{C1}$ になり、合成した力 F_x は正しく x 軸正方向に発生する。すなわち、磁束密度分布が均一になることにより x 、 y 軸方向の支持力の非干渉化が実現できると思われる。

【0065】

以上のように巻線パターン1、2両者において、巻線を変更し、減少すると磁気支持力の非干渉化が見込まれる。同様の干渉補償をその他の巻線A1、A2、A3、巻線B1、B2、B3についても同様に巻線を変更して、直交二軸の半径方向の非干渉化が実現できると思われる。

【0066】

次に、一方向を構成する磁気支持巻線が巻かれた歯の本数とトルク、磁気支持力の関係について考察した。

【0067】

磁気支持巻線が巻かれた歯の本数を変更した3モデル、このうち歯2本と歯3本モデルではそれぞれ巻線の巻き方を変えて2パターンずつ、合計5モデルについて電磁界解析を行った。

【0068】

図9には、本実施形態である一方向を構成する磁気支持巻線が歯の3本に対し巻かれた歯3本モデル（巻線A1、A2、A3、巻線B1、B2、B3、巻線C1、C2、C3、巻線D1、D2、D3のように一方向を構成する磁気支持巻線がそれぞれ3本）の寸法を示す。また表1、表2にこの歯3本モデルの材料と巻線の巻数をそれぞれ示す。

【0069】

【表1】

解析モデルの材料

使用箇所	製造元/品名	材料
固定子鉄心 回転子鉄心	JFE_スチール/50JNA350	等方性電磁鋼板
磁石	日立金属/NEOMAX-38H	Nd-Fe-B（着磁：極異方性）

【0070】

【表2】

巻線の巻数

役割	巻線	巻数
トルクの発生	U, V, W	54
	A1, B1, C1, D1	60
磁気支持力の発生	A2, B2, C2, D2	121
	A3, B3, C3, D3	60

【0071】

表2に示すように、一方向を構成する巻線巻線（例えばA1、A2、A3）の中央に位置する巻線（A2）についてはそのターン数を外側に配置される巻線（A1、A3）のほぼ倍に設定をしている。しかしながら、本設定は一例を示すもので、外側の巻線のターン数に比べ、1.5倍～2倍であればよい。

【0072】

表3に5モデルのトルク、トルクリプル、磁気支持力、支持力振動の解析結果と干渉の

割合をまとめて記した。

【 0 0 7 3 】

【 表 3 】

歯の本数	トルク [Nm]	トルク リップル [%]	支持力 [N]	支持力 振動 [%]	干渉 [%]	最大磁束 密度 [T]
1本	0.24	5.8	141	4.65	120	1.85
2本 (巻線パターン1)	0.25	0.74	124	0.89	104	1.64
2本 (巻線パターン2)	0.25	0.74	124	0.89	86	1.64
3本 (巻線パターン1)	0.25	0.46	98	0.12	100	1.46
3本 (巻線パターン2)	0.25	0.46	98	0.12	100	1.46

10

【 0 0 7 4 】

20

表 3 よりまずトルクは 5 モデル全てでほぼ同じ値であり、磁気支持力は歯 1 本モデルが最も大きく、歯 3 本モデルが最も小さい。なお 1 半径方向当たりの支持巻線起磁力は 5 モデル全て同じである。

【 0 0 7 5 】

しかし、歯 1 本モデルは x 軸正方向に磁気支持力を発生するとき、x 軸方向へのみ力を発生するのに対し、歯 2 本モデルは 2 方向への力を合成し、歯 3 本モデルは図 7、図 8 に示したように、3 方向への力を合成して x 軸方向への力を発生するため、支持力が小さくなったと考えられる。

【 0 0 7 6 】

また、トルクリプルと支持力振動ともに歯 3 本モデルが最も小さい。これは図 10、図 11 にそれぞれ示した歯 1 本モデルおよび歯 2 本モデルの磁束密度分布より、漏れ磁束が発生しているのに対し、図 12 に示した歯 3 本モデルの磁束密度分布より、歯 3 本モデルは固定子鉄心や固定子ヨークに磁気飽和が生じにくいいため、トルクリプルと支持力振動が小さいと考えられる。また、歯 3 本モデルは漏れ磁束が発生しないので干渉の割合も最も小さい。

30

【 0 0 7 7 】

最後に最大磁束密度は歯 1 本モデルが最も大きく、歯 3 本モデルが最も小さい。1 半径方向当たりの起磁力は 5 モデル全て同じであるが、1 本の歯に巻かれた巻線の巻数は歯 1 本モデルが最も多く、歯 3 本モデルが最も少ないため、最大磁束密度に違いが表れたと考えられる。

40

【 0 0 7 8 】

以上の電磁界解析の結果から歯 3 本モデル、すなわち本実施形態の非干渉化を実現したモデルが歯 1 本、歯 2 本モデルに比べてトルクリプル・支持力振動が小さく、かつ干渉が少ないと言える。

【 0 0 7 9 】

次に、電磁界解析によってアウターロータ構造ベアリングレスブラシレス DC モータ 100 のトルク、トルクリプル、磁気支持力、支持力振動、最大磁束密度を求め、本実施形態の二重回転子構造磁気支持ブラシレス DC モータ 200 との比較を行う。

図 13 にアウターロータ構造ベアリングレスブラシレス DC モータ 100 の巻線配置と寸法を、表 4 に巻線の巻数をそれぞれ示す。

50

【 0 0 8 0 】

【 表 4 】

役割	巻線	巻数
トルクの発生	U, V, W	7
磁気支持力の発生	a1, b1, c1, d1, e1, f1, a2, b2, c2, d2, e2, f2	73

【 0 0 8 1 】

10

寸法や巻数はトルクリプルや支持力振動を比較するため、二重回転子構造磁気支持ブラシレスDCモータ200と同じトルク、磁気支持力が発生するように決定した。また、各部の材料は表1と同様である。電動機巻線11には二重回転子構造磁気支持ブラシレスDCモータ200と同様に三相对称正弦波電流を流し、磁気支持巻線13には正弦波の磁気支持電流を流す。磁気支持力はx軸正方向へ指令して解析を行う。

【 0 0 8 2 】

以降に電磁界解析の結果を示す。表5にアウターロータ構造ベアリングレスブラシレスDCモータと二重回転子構造磁気支持ブラシレスDCモータの解析結果を示す。

【 0 0 8 3 】

【 表 5 】

20

	トルク [Nm]	トルクリプル [%]	支持力 [N]	支持力振動 [%]	最大磁束密度 [T]
ベアリングレス ブラシレスDCモータ	0.27	17.27	111	3.14	1.47
デュアルロータ 構造磁気支持 ブラシレスDCモータ	0.25	0.46	98	0.12	1.46

30

【 0 0 8 4 】

二重回転子構造磁気支持ブラシレスDCモータ200の解析結果は、前述した非干渉化を実現したモデルの解析結果である。表5より、トルクおよび磁気支持力は両者でほぼ同じ値であることが分かる。次にトルクリプルは二重回転子構造磁気支持ブラシレスDCモータ200が0.46%であるのに対し、アウターロータ構造ベアリングレスブラシレスDCモータ100は17.27%と大きな値であることが分かる。

【 0 0 8 5 】

これは二重回転子構造磁気支持ブラシレスDCモータ200の内側のギャップが8.5mmであるのに対し、アウターロータ構造ベアリングレスブラシレスDCモータ100のギャップが2mmと狭くなっているため、トルクリプルに違いが表れたと考えられる。

40

【 0 0 8 6 】

また、支持力振動は二重回転子構造磁気支持ブラシレスDCモータ200が0.12%であるのに対し、アウターロータ構造ベアリングレスブラシレスDCモータ100は3.14%と大きくなっている。

【 0 0 8 7 】

ベアリングレスブラシレスDCモータ100は磁束の強めあい弱めあいによって磁気支持力を発生させている。その磁気支持力を発生する際、固定子9の巻線起磁力分布やスロット開口部、回転子10の永久磁石起磁力分布によってギャップに空間高調波が発生して、支持力の脈動を生じてしまう。

50

【 0 0 8 8 】

以上の結果から二重回転子構造磁気支持ブラシレスDCモータ200はアウターロータ構造ベアリングレスブラシレスDCモータ100と比べて低トルクリプル・低支持力振動という点で優れていることが分かる。

【 0 0 8 9 】

次に、本実施形態である二重回転子構造磁気支持ブラシレスDCモータ200をターンテーブルに適用した例を示す。図14に全体の構成図を示す。図14において、ターンテーブル300は、直結方式のターンテーブルなのでモータ回転軸101とプラッター103を直結している。

【 0 0 9 0 】

プラッターとはレコード盤105を乗せて回転する部分である。固定子21の外側の歯35に巻かれた磁気支持巻線37は外側回転子25を吸引することで磁気支持力を発生する。

【 0 0 9 1 】

磁気支持力の発生はギャップセンサ55、56により回転子25の位置を検出し、中心からのずれに比例した力を発生して中心に軸支持する。なお、ギャップセンサ55、56はx、y軸のそれぞれの方向に取り付けられ、磁気支持力は2軸で制御される。

【 0 0 9 2 】

このとき磁気支持力はx、y軸方向、すなわちラジアル方向のみに発生するため、z軸方向、すなわちアキシャル方向の軸支持は軸受により機械的に行う。軸受にはピボット軸受107を用いているが、アキシャル方向の磁気軸受が配設されるようにされてもよい。

【 符号の説明 】

【 0 0 9 3 】

- 21 固定子
- 23 内側回転子
- 25 外側回転子
- 27 鉄心
- 29 永久磁石
- 31、35 歯
- 33 電動機巻線
- 37 磁気支持巻線
- 51 電流制御器
- 53 エンコーダ
- 55、56 ギャップセンサ
- 57、58 誤差器
- 59、60 PID制御
- 61、62 巻線選択部
- 63、64、65、66 電流制御器
- 101 モータ回転軸
- 103 プラッター
- 105 レコード盤
- 107 ピボット軸受
- 200 二重回転子構造磁気支持ブラシレスDCモータ
- 300 ターンテーブル
- A1、A2、A3、B1、B2、B3、C1、C2、C3、D1、D2、D3 磁気支持巻線

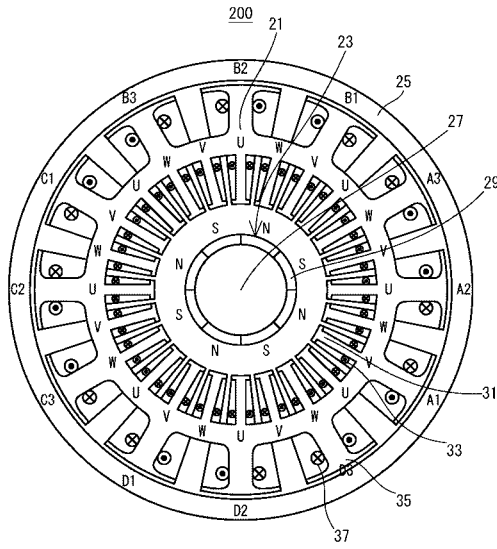
10

20

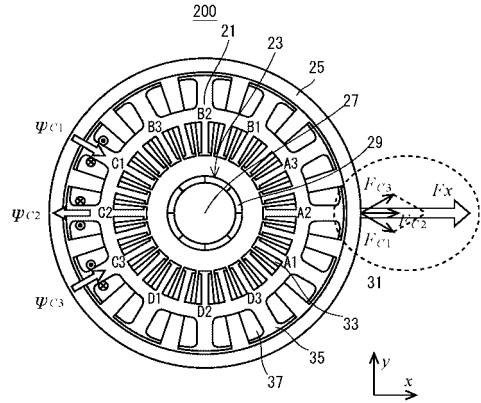
30

40

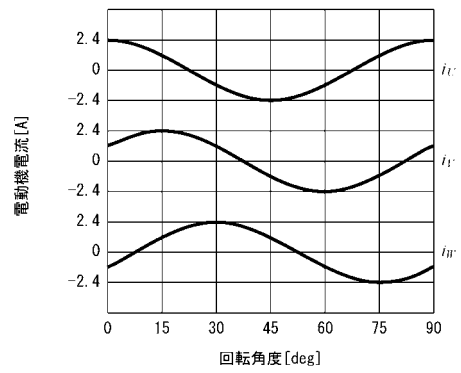
【図1】



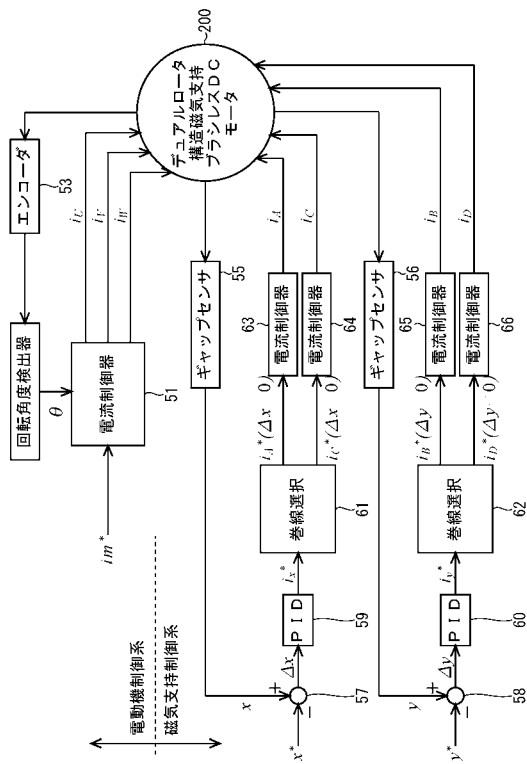
【図2】



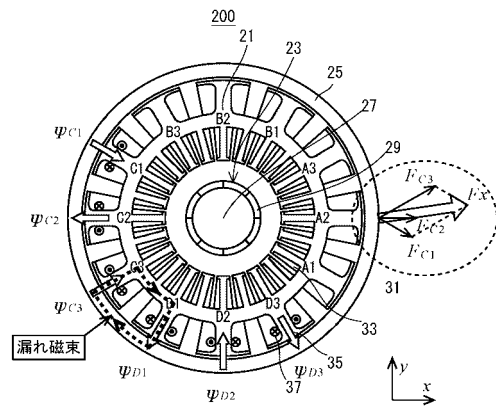
【図3】



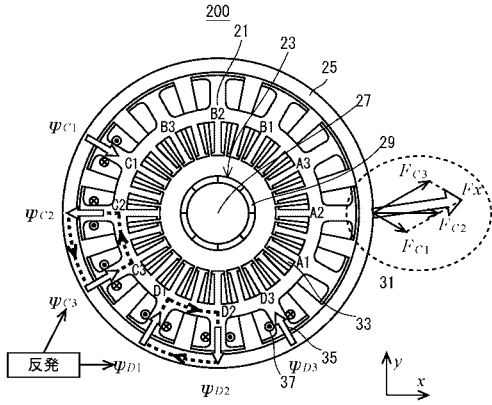
【図4】



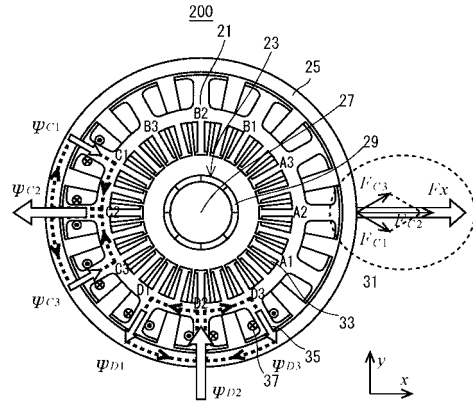
【図5】



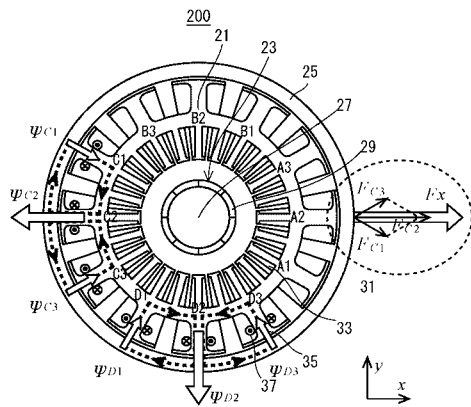
【 図 6 】



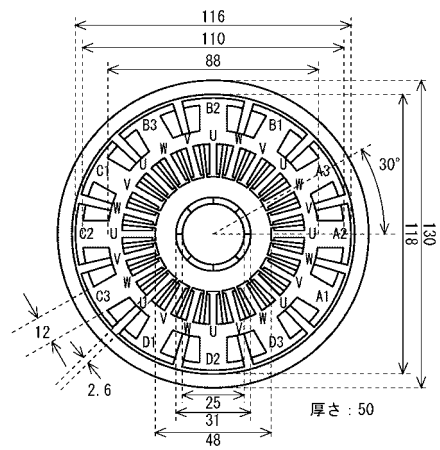
【 図 7 】



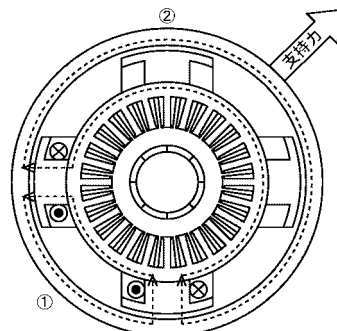
【 図 8 】



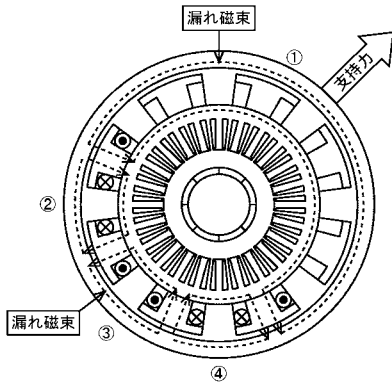
【 図 9 】



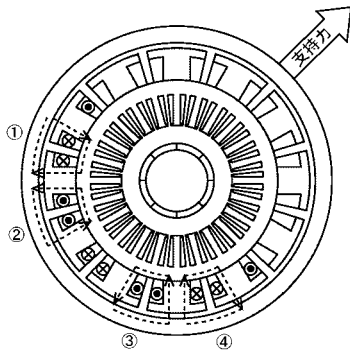
【 図 10 】



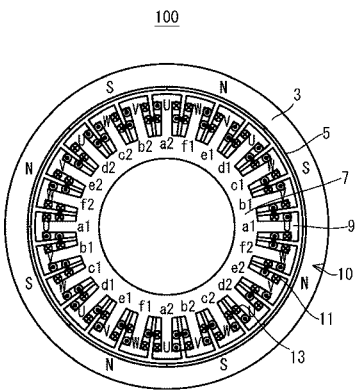
【 図 1 1 】



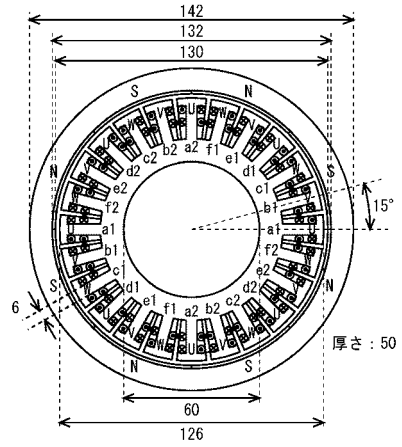
【 図 1 2 】



【 図 1 5 】



【 図 1 3 】



【 図 1 4 】

