

平成 21 年 5 月 19 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007 年度 ～ 2008 年度
 課題番号：19760201
 研究課題名 (和文) 高速回転・高出力運転が可能な順突極永久磁石型ベアリングレスモータの開発
 研究課題名 (英文) Development of a Normal Saliency PM type Bearingless Motor actualizing High-speed and High-power Operation
 研究代表者
 竹本 真紹 (TAKEMOTO MASATSUGU)
 北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授
 研究者番号：80313336

研究成果の概要：永久磁石型ベアリングレスモータ (PM 型 BelM) の研究・開発が国内外で盛んに行われており、さまざまな回転子構造を持つ PM 型 BelM が提案されている。しかし、従来から提案されている PM 型 BelM は、軸支持力を有効に発生できないという問題があった。そこで、研究代表者は、新たに提案している正の突極性を持つ順突極永久磁石型ベアリングレスモータ (順突極 PM 型 BelM) の試作機とそのドライブシステムを実際に製作し、従来型に比べて優れた特性を備えていることを明らかにすると同時に、高速回転・高出力運転を実現した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,000,000	0	2,000,000
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	300,000	3,300,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気機器工学, 制御工学, ベアリングレスモータ, 永久磁石同期電動機

1. 研究開始当初の背景

ベアリングレスモータは、一つの固定子に電動機巻線と軸支持巻線の 2 種類の巻線を備えることで、電動機と磁気軸受の機能を一体化したモータである。ベアリングレスモータ単体でトルクの発生と回転子主軸の非接触支持を同時に実現できる。従って、高速化、高出力化、メンテナンスフリー化といった磁気軸受の利点に加えて、電動機と磁気軸受を併用した場合よりもコストダウン、小型化、軸長の短縮による危険速度

の向上、すなわち、さらなる高速化などが期待される。このように、ベアリングレスモータは、近年高まっている電動機の高速度化、高出力化、メンテナンスフリー化といった要求を、磁気軸受を用いた場合よりも低コストで実現できる非常に付加価値の高いモータである。

現在、誘導機型やシンクロナスリラクタンスタ型など様々な種類のベアリングレスモータが研究されているが、その中でも、高効率、高出力といった特長を持つ永久磁石型ベア

リングレスモータが特に注目を浴びている。これまでに、スイス工科大学 (ETH) や立命館大学などの研究グループ、そして、Levitronix 社や (株) 荏原製作所などの企業に所属する国内外の研究者によって、さまざまな回転子構造を持つ永久磁石型ベアリングレスモータが開発されている。例えば、(1) 回転子の円周に永久磁石を貼り付けた表面貼付型 (SPM 型)、(2) SPM の極間に突極を形成した Inset 型、(3) 永久磁石を回転子内部に埋め込んだ埋込永久磁石型 (IPM 型) などである。しかし、これらの従来から提案されている永久磁石型ベアリングレスモータは、回転子主軸を磁気支持するのに必要な軸支持力の発生原理上、必ず軸支持磁束が磁気抵抗の大きな永久磁石を貫く。そのため、軸支持巻線の起磁力に対して有効に軸支持磁束を発生できず、軸支持力も有効に発生できないという問題があった。

この問題点について、IPM 型の永久磁石型ベアリングレスモータを例に説明する。図 1 は、IPM 型が無負荷時に x 軸正方向に軸支持力 F_x を発生させる場合の軸支持力発生原理を示す。一般的に永久磁石型ベアリングレスモータでは、永久磁石によって発生する赤線で示す界磁磁束 Ψ_{mag} を軸支持力の発生にバイアス磁束として利用する。軸支持巻線 N_{s2d} に電流 i_{s2d} を図の向きに流すと、破線で示す二極の軸支持磁束 Ψ_{s2d} が発生する。この軸支持磁束 Ψ_{s2d} と界磁磁束 Ψ_{mag} により x 軸正側では互いに磁束は強め合い、 x 軸負側では磁束は弱め合っている。この磁束の強弱により、 x 軸正方向に軸支持力 F_x が発生する。しかし、図に示すように、軸支持磁束 Ψ_{s2d} は磁気抵抗の大きな永久磁石を貫くため、軸支持巻線の起磁力に対し、軸支持磁束を有効に発生できない。よって、軸支持力を有効に発生できないといった問題点がある。

さらに、従来型の永久磁石型ベアリングレスモータには、下記のような問題点もある。SPM 型に比べてトルク特性の良い Inset 型や IPM 型のような逆突極性を持つ永久磁石型ベアリングレスモータでは、トルク磁束の磁路上に永久磁石やフラックスバリア

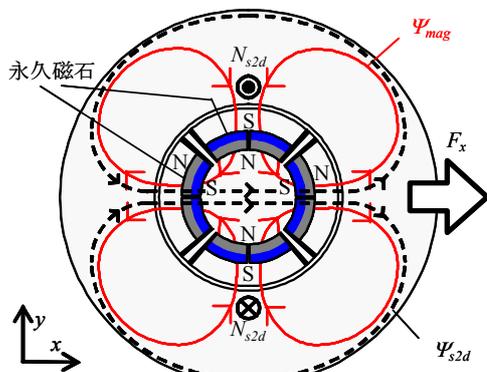


図1 IPM型の軸支持力発生原理

用の空隙がなく、大きなトルク磁束が発生する。そのため、良好なトルク特性を持つ反面、大きなトルク磁束により磁気飽和が生じ易い。その結果、トルク磁束による磁気飽和の影響を受け、軸支持磁束の低下、つまり、軸支持力の低下を招く。

加えて、逆突極性を持つ永久磁石型ベアリングレスモータは、一般的な逆突極性を持つ永久磁石同期モータと同様に、永久磁石による界磁磁束を弱めるように負の励磁電流を流す電流位相制御(弱め界磁運転)を行うことでトルクを増加できる。しかし、界磁磁束を弱めることで、界磁磁束を利用して発生する軸支持力は逆に低下する。一方、界磁磁束を強めるような正の励磁電流を流すと、軸支持力は増加するが逆にトルクは減少する。従って、励磁電流に対しトルクと軸支持力はトレードオフの関係となっており、電流位相制御を活用することは難しい。

2. 研究の目的

そこで、研究代表者は、これらの問題点を解決するために正の突極性を持つ順突極永久磁石型ベアリングレスモータを新たに発明した。そして、財団法人理工学振興会を通じて特許を 2003 年 5 月に出願し、2006 年 9 月に特許として成立した。

本モータは、軸支持磁束の磁路上に永久磁石を配置しないことによって、軸支持磁束を有効に発生できるため、軸支持力を有効に発生できる。図 2 に本モータの回転子構造と回転子座標上の巻線配置を示す。本モータは、1 つの固定子内に 4 極電動機巻線と 2 極軸支持巻線の 2 種類の固定子巻線を持つ。4 極電動機巻線の d 軸巻線を N_{m4d} 、 q 軸巻線を N_{m4q} 、2 極軸支持巻線の d 軸巻線を N_{s2d} 、 q 軸巻線を N_{s2q} とする。回転子構造は、8 個の永久磁石を一般的なシンクロナスリラクタンスモータの凹部にそれぞれ 2 個ずつ図に示す向きに配置した構造である。永久磁石によって発生する界磁磁束 Ψ_{mag} は、赤線で示すように隣り合う 2 個の永久磁石を通るかたちで閉磁路を形成し、モータ全体として 4 極磁界を形成する。従って、一般的な永久磁石同期モータとは異なり、 $L_{m4d} > L_{m4q}$ という正の突極性を持つ。

無負荷時における x 軸正方向の軸支持力 F_x の発生原理を図 3 に示す。軸支持巻線 N_{s2d} に電流 i_{s2d} を流すと破線で示す軸支持磁束 Ψ_{s2d} が回転子突極 1, 2 を通る 2 極の磁路形状で発生する。軸支持磁束の磁路上に永久磁石が無いため、軸支持磁束を有効に発生できる。そして、本モータでは、界磁磁束 Ψ_{mag} は隣り合う永久磁石で閉磁路を形成し、回転子突極部を通らないため、軸支持力発生バイアス磁束として磁束 Ψ_{mag} を利用することはできない。そこで、 d 軸電動機巻線 N_{m4d} に正の励磁

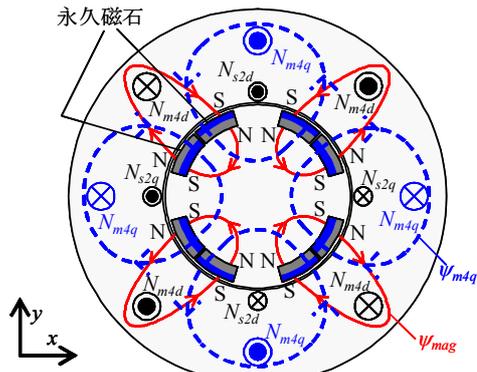


図2 順突極永久磁石型ベアリングレスモータの回転子構造と巻線配置

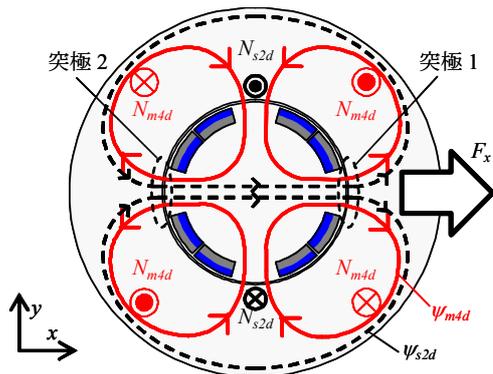


図3 順突極永久磁石型ベアリングレスモータの軸支持力発生原理

電流 i_{m4d} を流し、図3の赤線で示す磁束 Ψ_{m4d} をバイアス磁束として発生させる。この結果、磁束 Ψ_{m4d} と磁束 Ψ_{s2d} により、回転子には x 軸正方向の軸支持力 F_x が発生する。従って、本モータは、軸支持磁束の磁路上に磁気抵抗の大きな永久磁石を配置しない回転子構造であるため、軸支持巻線の起磁力に対し、軸支持磁束を有効に発生でき、その結果、軸支持力を有効に発生できる。

さらに、 q 軸電動機巻線 N_{m4q} によって発生する図2の青色の破線で示すトルク磁束 Ψ_{m4q} の磁路上に、図に示すように、永久磁石を配置することで、トルク磁束による磁気飽和を低減し、軸支持力の低下を防ぐことができる。加えて、正の突極性を持つため、正の励磁電流を流すことによりトルクと軸支持力を共に向上でき、電流位相制御を有効に活用できるといった特長も持つ。以上のように、新たに発明したモータは、従来型の問題点を解決できる回転子構造となっている。

現在までに、有限要素法非線形磁界解析を用いた磁場解析により、本モータは上記の特長を持ち、有効であることを示した。さらに、従来型と解析結果を比較することで、従来型に比べ良好なトルク・軸支持力特性を備えていることを明らかにした。しかし、実機による確認は未だされていない。そこで、本研究の目的は、第一に、発明した正の突極性を持

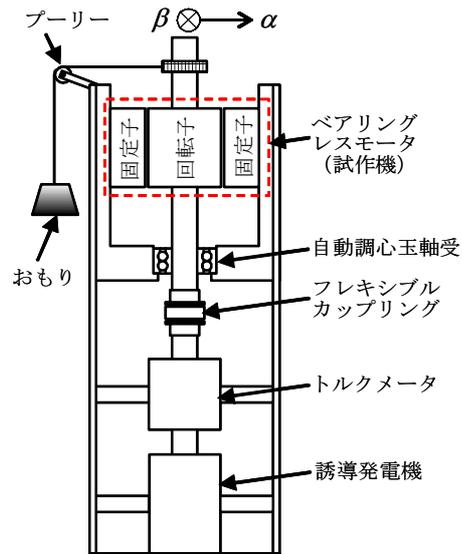


図4 負荷試験装置

つ順突極永久磁石型ベアリングレスモータの試作機を製作し、トルク・軸支持力特性を測定することで、上記の特長を実機においても実証する。第二に、実用化を推し進めるために欠かすことのできない高速回転・高出力運転時において安定な軸支持を実現できるドライブシステムを開発することである。

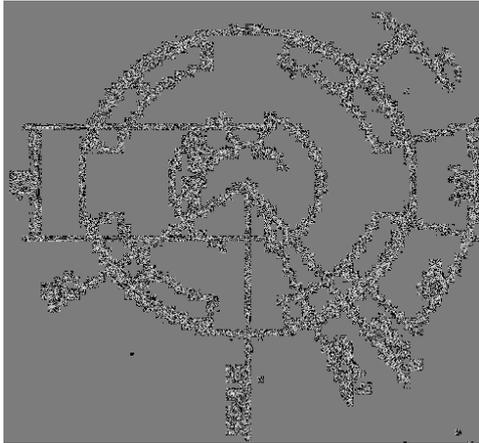
3. 研究の方法

(A) 試作機的设计&製作

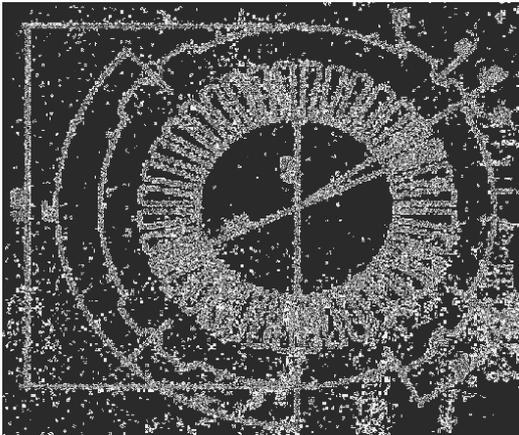
新たに発明した「正の突極性を持つ順突極永久磁石型ベアリングレスモータ」の試作機を設計・製作する。高速回転において回転子に加わる遠心力荷重を考慮するために有限要素法による構造解析を行いつつ、磁界解析を行うことで、最適な回転子・固定子の形状を設計する。

(B) 高速負荷試験が可能な実験システムの開発

10,000 r/minでの実験が可能な高速・高出力用の負荷試験装置を開発する。図4に、製作する負荷試験装置の概略図を示す。この実験システムは、一般的な負荷試験装置とは異なり、重力の影響を受けないようにするために縦置きとする。回転子主軸下端は自動調心玉軸受によって機械的に支持されているが、上端は機械的な支持機構を持っておらず、回転子主軸のみで自立することはできない。そこで、安定な回転軸支持運転を実現するには、試作した順突極永久磁石型ベアリングレスモータを用いて、回転子半径方向の軸支持制御を行う必要がある。また、回転子主軸下端は、フレキシブルカップリングを介してトルクメータと誘導機に接続されており、負荷試験を行うことができる。また、回転子主軸上端からプーリーを介しておもりをつけることで、半径方向に自由に荷重がかけられるよ



(a)回転子形状



(b)回転子形状

図5 実際に設計・製作した固定子・回転子の形状

うにする。

(C) トルク・軸支持力特性の測定

製作する試作機を組み込んだ負荷試験装置を用いて、発明した「正の突極性を持つ順突極永久磁石型ベアリングレスモータ」のトルク・軸支持力特性を測定し、下記の特長を持つことを実機においても実証する。
 (1) 軸支持磁束が磁気抵抗の大きい永久磁石を貫かない回転子構造により、軸支持力を有効に発生できる。
 (2) トルク磁束の磁路上に永久磁石を配置することで、トルク磁束による磁気飽和を低減し、トルク電流の増加による軸支持力の低下を引き起こさない。
 (3) 正の励磁電流を流すことによって、トルクと軸支持力を共に向上させることができ、電流位相制御を積極的に活用できる。
 (4) 従来型の永久磁石型ベアリングレスモータと比べて、良好なトルク・軸支持力特性を持つ。

(D) 安定な軸支持運転が可能なドライブシステムの開発

上記 (C) で明らかにした試作機のトル



図6 製作した負荷試験装置

ク・軸支持力特性に基づいて、高速回転・高出力運転に対応可能な電動機速度制御系と軸支持制御系の2つからなるコントロールシステムを構築する。さらに、デジタルコントローラに同期するインバータドライブも製作し、高速回転・高出力運転時に安定な軸支持運転を実現できる高性能ドライブシステムを開発し、検証実験を行う。

4. 研究成果

(A) 「試作機的设计&製作」に関する成果

高速回転において回転子に加わる遠心力荷重を考慮するために有限要素法による構造解析を行いつつ、磁界解析を行うことで、提案する「正の突極性を持つ順突極永久磁石型ベアリングレスモータ」の最適な回転子・固定子の形状を設計し、そして、実際に製作した。図5に設計・製作した回転子・固定子の形状を示す。

(B) 「高速負荷試験が可能な実験システムの開発」に関する成果

10,000 r/minでの実験が可能な高速・高出力用の負荷試験装置を開発した。図6に、製作した負荷試験装置を示す。

(C) 「トルク・軸支持力特性の測定」の成果

製作した試作機を組み込んだ負荷試験装置を用いて、提案する「正の突極性を持つ順突極永久磁石型ベアリングレスモータ」のトルク・軸支持力特性を測定した結果を以下に示す。

励磁電流 i_{m4d} に対するトルク・軸支持力の電流位相制御特性の測定結果を図7に示す。正の励磁電流 i_{m4d} を流す強め界磁運転を行うことで、トルクと軸支持力を共に向上させることが確認できる。本試作機では、励磁電流 $i_{m4d} = 4.0 \text{ A}$ の時、トルク T は最大値 1.67 Nm となり、その時の軸支持力係数 $K_{m4d}(i_{m4d})$ は

26.2 N/A であり、軸支持力 205 N (回転子自重の 28.3 倍) に相当する。

ここで回転子形状の違いがトルク・軸支持力特性へ及ぼす影響を評価するために、提案する順突極永久磁石型ベアリングレスモータ (以下、PPM 型 BelM と略記) と従来型の IPM 型 BelM について解析を行った。2 つの解析モデルは、固定子を共通とし、回転子の外径、磁石総量・表面積を共に等しくしたものである。図 7 に測定結果と一緒に、2D-FEM による解析結果も一緒に記載した。IPM 型 BelM は、弱め界磁運転となる励磁電流 i_{m4d} が負の領域において、トルク T は最大となる。しかし、軸支持力係数 $K_{m4d}(i_{m4d})$ は減少し、マイナスとなるため軸支持が不能となる。また、正の励磁電流を流すことによって軸支持力係数 $K_{m4d}(i_{m4d})$ を増加できるが、トルク T は逆に低下する。よって、逆突極性を持つ PM 型 BelM では励磁電流に対し、トルクと軸支持力はトレードオフの関係となるため、電流位相制御を有効に活用できない。一方、提案する PPM 型 BelM は解析結果と試作機による測定結果共に、正の励磁電流を流す強め界磁運転領域において、トルク T と軸支持力係数 $K_{m4d}(i_{m4d})$ を共に向上することができ、電流位相制御を有効に活用できることがわかる。

また、提案する PPM 型 BelM の解析結果によると、励磁電流 i_{m4d} が 4.0 A の時にトルク T は 1.75 Nm で最大、その時の軸支持力係数 $K_{m4d}(i_{m4d})$ は 29.6 N/A となっている。そして、試作機の測定結果においても、励磁電流 $i_{m4d} = 4.0$ A の時、最大トルクで 1.67 Nm となり、その時の軸支持力係数 $K_{m4d}(i_{m4d})$ は 26.2 N/A であり、よく一致している。励磁電流 i_{m4d} が 4.0 A 以外のデータを比較してみても、解析結果と測定結果は、同様の傾向を示しており、測定結果・解析結果共に信頼の置けるデータである。従って、同条件下で解析を行った従来型の IPM 型と提案する PPM 型の測定結果を比較検討することは、回転子形状の違いによるトルク・軸支持力特性への影響を評価する上で重要である。解析結果より、IPM 型は、弱め界磁運転によって、トルク T は増加できるが、軸支持力係数 $K_{m4d}(i_{m4d})$ は負の値となるため、軸支持できない。従って、電流位相制御を行わず、励磁電流 $i_{m4d} = 0$ A 一定で制御せざるを得ない。この時、トルクは 1.89 Nm、軸支持力係数は 4.0 N/A である。よって、提案する PPM 型の測定結果と IPM 型の解析結果を比較すると、PPM 型のトルク T は、トルク特性に優れた IPM 型に対して、88.4%と同程度発生できるのに対して、軸支持力係数 $K_{m4d}(i_{m4d})$ は 565%と大幅に増加できる。また、IPM 型で PPM 型と同程度の軸支持力を発生しようと強め界磁運転を行うと、トルク T はほぼゼロとなる。以上の結果より、提案する PPM 型 BelM は、(3) 正の励磁電流を流すこ

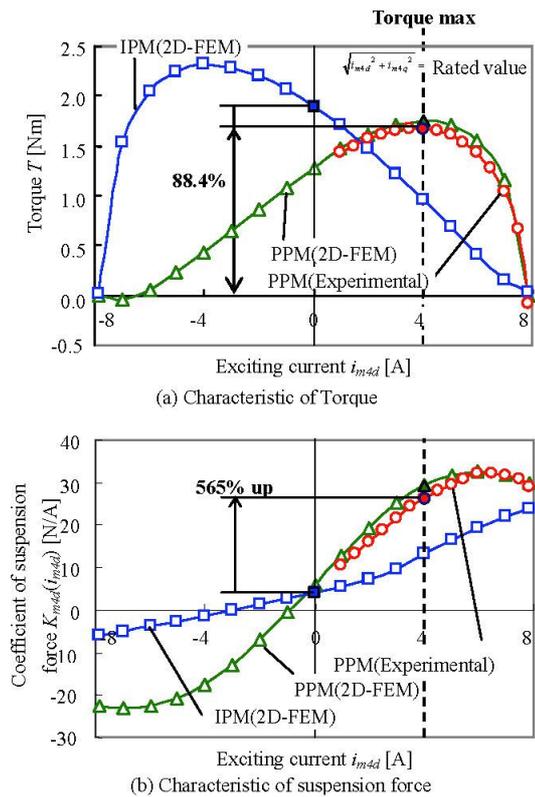


図7 IPM型BelMとPPM型BelMの特性比較

とによって、トルクと軸支持力を共に向上でき、電流位相制御を積極的に活用できる、(4) 従来型の PM 型 BelM と比べて、良好なトルク・軸支持力特性を持つことがわかる。

そして、本資料ではスペースの関係上、これ以上の実験結果の提示は見送るが、(1) 軸支持磁束が磁気抵抗の大きい永久磁石を貫かない回転子構造により、軸支持力を有効に発生できる。(2) トルク磁束の磁路上に永久磁石を配置することで、トルク磁束による磁気飽和を低減し、トルク電流の増加による軸支持力の低下を引き起こさない。といった特性を新たに提案する PPM 型 BelM が備えていることも実験により実証した。その詳細は、以下に示す発表論文の箇所に記載した文献に示されているので、参考にされたい。

(D) 「安定な軸支持運転が可能なドライブシステムの開発」の成果

上記 (C) で明らかにした試作機のトルク・軸支持力特性に基づいて、高速回転・高出力運転に対応可能なドライブシステムを開発した。そして、開発したドライブシステムを用いて、軸支持実験を行った結果を図8に示す。モータを横置きにした場合の回転子主軸や負荷装置の自重を想定して、回転子重量の3倍の半径方向荷重 21.8 N がかかるように、おもりを β_3 負方向につるした状態で、軸支持実験を行った。まず、軸支持制御を開始すると、回転子主軸は、おもりをつるした β_3 負方向から制御中心に移動し、安定に静

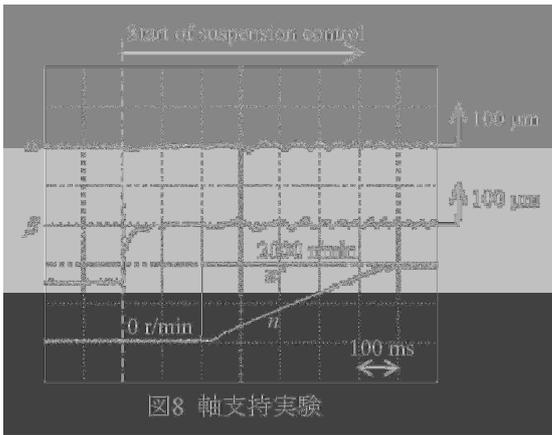


図8 軸支持実験

止軸支持されている。さらに、制御開始から200 ms過ぎた後、0 r/minから2000 r/minへステップ加速を行っている。最大トルクを発生しているステップ加速時においても、制御中心より±20 μmの範囲において、回転軸支持運転を実現できている。よって、安定な軸支持運転を実現できる高性能ドライブシステムを開発できたことがわかる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- (1) 長田 智之, 竜野 敬大, 田中 康寛, 竹本 真紹, 千葉 明, 深尾 正:「フラックスバリア型回転子構造を持つ順突極永久磁石型ベアリングレスモータのタッチダウンからの静止浮上特性の検討」、平成 21 年電気学会全国大会講演論文集 vol. 5、No. 5-196、pp. 292-293、2009 年、査読無
- (2) 竜野 敬大, 長田 智之, 竹本 真紹, 田中 康寛, 千葉 明, 深尾 正:「フラックスバリア型回転子構造を持つ順突極永久磁石型ベアリングレスモータの検討」、電気学会 電力技術・電力系統技術・半導体電力変換合同研究会、PE-09-21 & PSE-09-29 & SPC-09-63、pp. 1-6、2009、査読無
- (3) 竜野 敬大, 長田 智之, 田中 康寛, 竹本 真紹, 千葉 明, 深尾 正:「フラックスバリアを持つ順突極永久磁石型ベアリングレスモータのトルクと軸支持力 ～IPM型ベアリングレスモータとの比較～」、平成 20 年電気学会産業応用部門大会ヤングエンジニアポスターコンペティション講演論文集、Y-124、pp. [Y-124]、2008 年、査読無
- (4) 竜野 敬大, 草柳 博一, 竹本 真紹, 田中 康寛, 千葉 明, 深尾 正:「フラックスバリアを持つ順突極永久磁石型ベアリングレスモータの提案」、平成 20 年電気学会全国大会講演論文集 vol. 5、No. 5-198、pp. 296-297、2008 年、査読無

- (5) H. Kusayanagi, M. Takemoto, Y. Tanaka, A. Chiba, and T. Fukao, “Basic Characteristics of a Permanent-magnet type Bearingless Motor with Positive Salient Pole,” in *Conference Record of the International Conference on Electrical Machines and Systems 2007 (ICEMS2007)*, Seoul, Korea, October 2007, SMP-30, pp. 1698-1703. 査読有
- (6) 草柳 博一, 竜野 敬大, 竹本 真紹, 田中 康寛, 千葉 明, 深尾 正:「順突極永久磁石型ベアリングレスモータの線間電圧に関する考察」、平成 19 年電気学会産業応用部門大会ヤングエンジニアポスターコンペティション講演論文集、Y-100、pp. [Y-100]、2007 年、査読無

[学会発表] (計0件)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹本 真紹 (TAKEMOTO MASATSUGU)
北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号: 80313336

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし