整流コイルを用いたベアリングレスモータのロータ浮上

立花 邦彦*1, 岡 宏一*2

Levitation of the Rotor of Bearingless Motor with Rectified Circuit Coil

Kunihiko TACHIBANA^{*1} and Koichi OKA^{*2}

^{*1} Kochi University of Technology Miyanoguchi 185, Tosayamada-cho, Kami, Kochi, 782-8502 Japan

This paper represents a spider coil winding system of contact-less power transfer for transmitting electric power required for rotor levitation. This proposed system substitutes permanent magnets by rare earth with rotation control. In the previous studies, the problem encountered with limitations of dimensions while winding a coil around stator or rotor. This proposed spider coil winding method offers better solution by increasing number of turns 70% greater than that of flat spiral coil when the diameter of winding material is same. On the other hand, the proposed method with increased number of coil turns helps to transmit more electric power. In case of spider coil winding system, the rotor levitation force was found 7 times higher than conventional coil winding system. This new system also helps to stabilize the levitation of rotor by providing required magnetic force. The validity of this proposed spider coil winding system.

Key Words : Levitation, Brearingless Motor, Spider Coil Winding, Rectified Circuit Coil, Energy Transfer

1. 緒 言

ベアリングレスモータとして、いくつかの方式が提案されている^{(1) (2) (3)}. これらの機構には、回転子に銅線や アルミニウムを用いた誘導型のものも提案されているが、多くの方式においては、回転子を回転させるだけでな く、浮上も同時に行わせるために、定常的な強い磁力が必要となることから、一般的に希土類を用いた永久磁石 が回転子に使用されている.

著者らは、従来とは異なる方法として、永久磁石を用いない、ベアリングレスモータに関しての研究を行っている.すでに、整流コイルを用いた回転子を浮上させたことを前提として、回転子の回転制御方法に関する提案をしている⁽⁴⁾.しかし、回転子を浮上させるための電力供給に関しては、これまで検討を行っていない.

本論文では、回転子の磁力発生用コイルとは別の電力供給用コイルにより、回転子側での浮上および回転に必要な磁力を発生させるための電力伝送方式を提案する.今回提案する方式では、回転子の磁力発生用コイルを電力受電用コイルとして使用しない.このため、磁力発生用コイルを電力受電コイルとして共用した場合に生じる、逆起磁力により受け取る電力が減少することがない.回転子の発生する磁力を、固定子側と連動して制御することも、回転子側だけで制御することが可能となることから、浮上及び回転制御が容易になることが考えられる.

本論文では、まず、提案する回転子コイルへの電力供給方法の基本構成について述べる. つぎに、これまでに 著者らが提案した方法⁽⁴⁾での問題点と解決方法を明らかにする. 提案する方法により実際に回転子を浮上可能で あることを実証するために使用した実験装置の概要と、この実験装置を使用して行った実験結果について述べる.

^{*} 原稿受付 2012年7月17日

^{*1} 高知工科大学 大学院 (〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノロ 185)

^{*2} 正員, 高知工科大学

E-mail: 156006p@gs.kochi-tech.ac.jp

2. 電力伝送専用コイル

回転子に永久磁石を使用しないことから、回転子が十分な回転力と浮上力を得るためには、回転子に強い磁力 を持たせることが必要である.今回提案する装置では、回転子コイルの磁力発生用電力を、外部から供給しなけ ればならない.このため、電力伝送専用コイルを用いることにより、非接触で回転子に電力を供給することを提 案する.

原理はトランスと同じ電磁誘導を用い、積極的なLC共振は用いない.今回提案するコイルは、スパイダー巻きと呼ばれるもので、コイルの外側直径を同じにした場合、平巻きコイルよりもコイルの巻き数を多くすることが可能となる.図1に示すように、回転子にコイルを巻く場合、一つの歯にコイルを多く巻こうとすると、隣接するコイル同士が干渉する.一方、提案する方法では回転子の歯に電力伝送用コイルを巻かないため、コイルの巻き数を任意に設定できる.

図2に電力伝送の基本構成を、図3に提案する電力伝送専用コイルの試作例を示す.送電側コイル(1次側コ イル)、受電側コイル(2次側コイル)、および全波整流器で構成されており、トランスを用いた一般的な AC/DC 変換器と同じである.提案する方法では、全波整流となることから、これまで提案していた半波整流を用いた方 式よりも、回転子のコイルに供給できる電力量が増加する.

Rotor





Figure 3 Spider Coil Winding

3. 従来型ペアリングレスモータ

3・1 構成および原理

これまでに著者らが提案したべアリングレスモータ(従来型と呼ぶ)の構成と回転原理について説明を行う. 構成を図4に,試作した実験装置の写真を図5に示す.実験装置では,回転子はベアリング軸により支持されて おり,浮上はしていない.この方法の特徴は,回転子コイルに磁力発生用の電力を直接供給し,それを整流する ことにより,単一方向の磁束を得ることである.回転制御は2相励磁,1-2相励磁,およびマイクロステップ 励磁のいずれかの方法により行うことが可能である.従来型での回転原理の説明を図6に示す.



Figure 4 Construction of Bearingless Motor



Figure 5 Prototype Bearingless Motor

図6(a)に示すように、固定子側に交流の励磁電流を与えると、回転子コイルには誘導電流が流れるが、整流ダ イオードにより電流の向きが一方向となるため、回転子コイルにより発生する磁束の向きが固定される. 図中の 矢印で示すように磁束が流れるため、その位置で固定されることになる. 次に、図6(b)に示すように、固定子側 に与える電流を変化させる. 磁束の流れは、図に示した位置で平衡することから、回転子はこの位置になるまで 回転することになる. このように、固定子に与える電流を変化させることにより、回転子を回転させる.



Figure 6 Rotation Principle

3・2 実験結果と問題点

図6に示したように磁束が流れ、回転子には同じ強さを持つN極とS極とが現れる、と考えていた.しかし、 実験を行うと、回転子には対向磁極の影響により、異なる強さのN極とS極が観測された.各極の強さの違いは、 約0.75:1であった.従って、回転子と固定子間の吸引力が、対角同士では同じ値であるものの、90度ずれた対角 で比較すると異なる値となる.回転軸を支持している状態で、回転させることに関しては、この違いが問題とな ることはないと考えられる.しかし、浮上させるためには、力が均一ではないことから、安定した浮上状態を得 ることが難しいと考えられる.

さらに、回転子と固定子間の吸引力の値は、浮上に必要な値を満足していない.この実験装置では、浮上に必要な力の約50%しか得ることができていない.回転子と固定子に巻くことが可能なコイルの巻き数は、コイルに 使用する電線の線径とコアの寸法により制限されるため、自由に増やすことができない.また、固定子側コイル に流している電流は、コイルに使用している電線の許容電流値としている.従って、コイルの巻き数を増やす、 コイルに流す電流を増やす、という方法により磁力を増やすことができない.

3·3 解決方法

前項で述べたように問題点は2つある.まず,極によって力の大きさが異なっていることを解決するためには, 回転子の極ごとの起磁力を制御することはできないため,固定子側で磁束量を制御することになる.しかし,逆 起磁力により減少する分を補うために,回転子に対向する固定子側の起磁力を大きくすると,その影響を受けて 回転子との間での吸引力が変化してしまう.制御系を簡素化するためには,回転子のN極とS極とが同じ起磁力 を発生することが必要となる.そこで,従来型で行っている回転子への電力伝達方法を変更する.従来型の回転 子コイルでは磁力を発生させるだけとし,電力受給のためのコイルを別途準備する.この方法であれば,回転子 コイルに供給される電流が均一となることから,発生する磁力は極が異なっても同じとなる.また,コイル電流 や巻き数の制限から,回転子の浮上に必要な力を得ることが出来ない問題に対しても,提案する電力伝送のコイ ルは,回転子に巻かないため巻き数の制限を受けないとともに,コイルに使用する電線の線径を大きくすること が可能であるため,回転子の浮上に必要な電力の伝送が可能になると考える.

提案するベアリングレスモータの構造を図7に示す.図7は構成部品やその配置の概念を示しており,固定子 や回転子の歯の形状や数などは、今後のシミュレーションや詳細検討により変更の可能性がある.



Top View

Center Line Section View

Figure 7 Flat Type Bearingless Motor Structure

4. 実験装置

4·1 構成

提案するベアリングレスモータの実験装置の製作に先立ち,既に製作している従来型の実験装置と,提案する 電力伝送専用コイルとを組み合わせて実験を行った.図8に実験装置の写真を示す.

従来型の実験装置は、固定子、回転子ともに無方向性電磁鋼板を積層したものを鉄心としている.固定子側に 巻いている励磁用(電力伝送用)コイル、回転制御用コイルともに、直径 0.5mm の PEW 線を 100 回巻いている. 回転子側には、直径 0.35mm の PEW 線を 300 回巻いている.電力伝送専用のコイルは送受電ともに、リッツ線(直 径 0.3mm, 7 本撚りの PEW 線)を用いて、中心直径 50mm のアクリルコアにスパイダー巻きで 45 回巻いている. 実験時の電源、および測定器の接続を図9に示す.



(a) Conventional Type





Figure 8 Experimental Device



4・2 従来型での実験

固定子側の回転子への電力伝送用コイル全てに励磁電流を与え,固定子1極のみに回転制御電流を与え,回転 子に加わる力を測定した.励磁電流は,10KHz,1Aとし,制御電流は2Aとした.

4・3 提案型での実験

(1) 電力伝送コイルの伝送効率

コイル間間隙を一定とし受電側(回転子側)抵抗値を変化した場合,抵抗値を一定とし距離を変化 した場合の2通りについて,送電側(1次側)および受電側(2次側)それぞれの電圧,電流を測定 した.

(2) コイル構成の違いによる伝送効率の違い

スパイダー巻きコイルと平巻きコイルで,負荷抵抗を3Ω一定とし,送電側および受電側の電圧, 電流を測定した.次に,スパイダー巻きコイルで,送電側コイルを1段および2段とし,送電側, 受電側それぞれの電圧,電流を測定した.負荷抵抗は10Ω一定とし,2次側の電流が440mAとなる ように,送電側の電流を調整した.

(3) 負荷抵抗による違い

電力伝送コイルの送電側に、10KHz, 3Aを与え、受電側負荷抵抗を3Ω, 5Ωとしたときの、2次側 電圧および電流を測定した.

(4) 力の測定

電力伝送コイルの送電側に、10KHz、1Aを与え、固定子1極のみに制御電流2Aを与えた. 固定子と回転子の間隙を1mmとし、回転子に加わる力をロードセルにより測定した.

5. 実験結果

5・1 従来型コイルでの発生力

回転子と固定子間に発生する力は、固定子が N 極のとき約 0.11N, S 極のとき約 0.08N であった.回転子の質量は約 0.08Kg であり、浮上させるためには約 0.78N の力が必要である.測定した力を 4 極分足し合わせても、0.38N であることから、回転子を浮上させるだけの力が発生していない.従来型ベアリングレスモータの実験装置では回転制御方法のみに着目し、これまで実験を進めてきたため、浮上力不足の発見がいままで遅れた.

5・2 提案型コイル

(1) 電力伝送コイルの伝送効率

表1にコイル間距離を一定として負荷抵抗を変化させた場合の測定結果を、表2に負荷抵抗を一定と してコイル間距離を変化させた場合の測定結果を示す. 空芯コイルであり、積極的なLC共鳴を使用し ていないことから、伝送効率は20%以下であり、効率的な電力伝送が行えていない.しかし、図7で示 した新しい実験装置で想定しているコイル間隙4mmにおいて使用可能であると考える.

Resistance [Ω]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20
TX Power[mW]	1656	1859	1935	1762	1831	1907	1980	1959	1957	2043	2642
RX Power [mW]	102	165	217	267	302	326	346	346	349	360	354
RX Current [mA]	273	251	237	228	220	208	199	196	197	189	135
Efficiency [%]	6.2	8.9	11.2	15.2	16.5	17.1	17.5	17.7	17.8	17.6	13.4

 Table 1
 Transmission Efficiency (Constant Gap : 1mm)

Table 2 Transmission Efficiency (Constant Resistance : 10Ω)

Gap [mm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TX Power[mW]	2043	2768	2872	2989	3126	3174	3312	3449	3545	3610
RX Power [mW]	360	342	329	314	292	284	263	243	228	215
RX Current [mA]	190	129	128	125	120	119	115	110	107	104
Efficiency [%]	17.6	12.4	11.5	10.5	9.3	8.9	8.0	7.0	6.4	6.4

(2) コイル構成の違いによる伝送効率の違い

表3に、スパイダー巻きコイルと、平巻きコイルでの伝送効率の比較を示す.コイルの巻き数は、コ イルの内径および最大外径を同じにしたため、スパイダー巻きが45回、平巻きが26回であった.平 巻きコイルでは、コイルを多く巻くことができないため、スパイダー巻きに比べ1/2以下の伝送効率 となっている.

表4に、送電側(1次側)コイルを1段および2段とした場合の測定結果を示す.表4に示すように LC 共鳴を用いた伝送を積極的に行わない場合、送電電力を増やすため、送電側コイルを2段、3段と重 ねることでコイルの巻き数を増やすことが考えられたが、コイルに使用する電線での抵抗損失が増加す ることにより、伝送効率が1段だけのときよりも低下する結果となっている.

Coil Type	Spider	Flat

Table 3Coil type Comparison

Con Type	spider	Flat
TX Power[W]	69.16	20.14
RX Power [mW]	5116	633
TX Current [A]	4.0	4.0
Efficiency [%]	7.4	3.1

Table 4 Effect of Stack (Constant Gap : 4mm)

Stack	1	2
TX Power[mW]	4146	4600
RX Power [mW]	730	724
RX Current [mA]	440	440
Efficiency [%]	17.6	15.7

(3) 負荷抵抗による違い

表5にコイル間隙4mmで、負荷抵抗を3 Ω 、および5 Ω とした場合の測定結果を示す.図7で示した新しい実験装置での回転子のコイル抵抗は4 Ω から5 Ω 程度になると推定している.また、回転子の浮上に必要な電流は0.5A程度と推定していることから、十分な電流を得ることが可能であると考える.

Resistance [Ω]	3	5
TX Power [W]	39.6	40.1
RX Power [W]	2.93	3.57
RX Current [mA]	890	852
Efficiency [%]	7.4	8.9

Table 5 Effect of Resistance (Constant Gap : 4mm)

5・3 提案型コイルでの発生力

回転子に加わる力を測定した結果を表6に示す.吸引力,反発力ともに,ほぼ同じ値となっている.また,発生した力は,従来型に比べ1極当たり約7倍大きくなっている.参考までに,固定子側の励磁用コイルと制御用コイルを直列接続し,制御用コイルを200回巻きとした場合の測定を行った.回転子に加わった力は表6に示した値の約2倍であった.これらのことから,回転子の構造を従来提案していたものから変更し,回転子の質量が想定値より増加しても,質量増加分を十分に補うことができるだけの磁力を得ることが可能であると考える.

Case No.	1	2	3	Average
N pole [N]	0.828	0.845	0.852	0.842
S pole [N]	0.824	0.852	0.860	0.845

Table 6Rotor Levitation Force

6. 結 語

本論文では、回転子に永久磁石を使用しないベアリングレスモータの、回転子の磁力発生用コイルとは別に、 回転子に対しエネルギーを給電するための専用コイルを使用することを提案した.これまで著者らが提案した方 法での問題点を明らかにして解決策を提示し、さらに、実験により提案した方法が有効であることを確認した. 浮上制御の実験を行えていないが、回転子に発生する磁力が均一になることから、これまでのものよりも制御が 簡単になると考える.

今後は、新たに提案したコイルを用いた実験装置をモデル化し、各種のシミュレーションを行い、その結果を 反映させた実験装置を製作し、浮上制御および回転制御の実験を行う予定である.また、電力伝送に積極的な LC 共振を用いることにより、伝送効率が飛躍的に向上することが推測されることから、電力伝送の高効率化も併せ て行う予定である.

文 献

- (1) 鉄道総合技術研究所"誘導反発吸引原理を利用した回転電機",特許公開 2007-228656.
- (2) 竹本真紹,千葉明,赤木泰文,深尾正"ベアリングレススイッチトリラクタンスモータのトルクと支持力", 電気学会論文集D編, Vol.124, No.6(2004), pp.556-565
- (3) 加藤達也,千葉明,深尾正 "かご形回転子を持つ誘導機型ベアリングレスモータの電磁支持力", 電気学会論文集D編, Vol.125, No.5(2005), pp.429-501
- (4) 佐伯真司,岡宏一,楠川量啓"整流コイルを用いたべアリングレスモータのロータ形状の改善", 日本設計工学会四国支部平成 21 年度発表講演会講演論文集(2010), pp.7-10