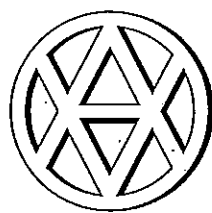


平成15年電気学会全国大会

講演論文集

2003 NATIONAL CONVENTION RECORD I.E.E. JAPAN



[5]

電気機器

定価 6,000円

(本体 5,715円 + 税)

平成15年3月17日発行

5-S19-2

ベアリングレスモータの試作例と応用機器

市川 修* (職業能力開発総合大学校), 千葉 明 (東京理科大学)

岡 宏一 (高知工科大学), 岡田 養二 (茨城大学)

Applications and test machines of bearingless motors.

Osamu Ichikawa (Polytechnic University), Akira Chiba (Tokyo University of Science),

Koichi Oka (Kochi University of Technology), Yohji Okada (Ibaraki University)

1. まえがき

電動機と磁気軸受を一体化したベアリングレスモータは、日本・スイス・オーストリアの大学・企業を中心に、近年活発な研究開発が行われている。2002年8月に開催された磁気軸受の国際会議(The Eighth International Symposium on Magnetic Bearings)では、ベアリングレスモータに関する論文発表が全体の約1/4を占めており、世界的に関心が高まっていることが窺われる⁽¹⁾。国内では2001年10月に電気学会ベアリングレスドライブ協同研究委員会が発足し、2002年に開催されたベアリングレスドライブのシンポジウム⁽²⁻⁷⁾において、初めて系統立てた解説が行われた。

本稿では、ベアリングレスモータの応用が進むと思われる分野を示し、文献⁽⁷⁾で紹介されたベアリングレスモータ応用機器を含め、いくつかを紹介する。さらに、これまでに試作された種々のベアリングレスモータのうち代表的なものについて、支持に用いる電磁力、トルク、寸法を調査し、今後の比較の方法を提案する。

2. ベアリングレスモータの原理と構造

〈2・1〉ベアリングレスモータの動作原理 ベアリングレスモータは、電動機と空隙磁束分布を積極的に偏らせることにより、電動機本来のトルクと別に、回転子を磁気支持する力を発生する。図1に一例として、円筒型回転子を持つベアリングレスモータの断面図を示す。固定子に4極の電動機巻線と2極の支持巻線を施し、4極の電動機磁束 Ψ_e に図1に示す2極の支持磁束 Ψ_s を重ね合わせると、磁束が強め合う方向に支持力 F_s を発生する。電動機磁束は回転子の回転やトルク負荷に応じて変化するが、2極の磁束の大きさと方向を適切に調節すれば、任意の大きさと方向の支持力が発生可能である。

種々の電動機がベアリングレスモータに応用可能であり、一般には、 n 極の電動機巻線と $n \pm 2$ 極の支持巻線の組み合わせ等で、ベアリングレスモータを実現することができる⁽²⁾。

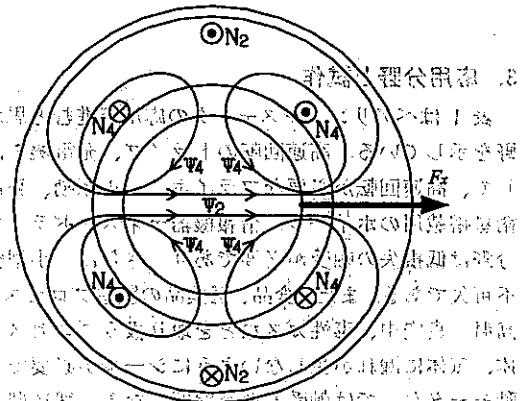


図1 ベアリングレスモータの断面
Fig. 1. Cross section of a bearingless motor.

〈2・2〉ベアリングレスモータの構造 回転機は主として回転子の円周に空隙を持つラジアルギャップ構造と、回転軸方向に空隙を持つアキシアルギャップ構造とに分けられるが、これまでに製作されたベアリングレスモータは、前者の構造の物が多い。ラジアルギャップ構造のベアリングレスモータでは、空隙磁束密度分布を不平衡にすれば、1ユニットで回転子に働く半径方向の2自由度の力を制御できる。これにより、回転子の支持・軸のたわみや軸振動の抑制などが可能である。完全非接触で軸を支持する場合、通常は少なくとも半径方向4自由度を能動制御する。ベアリングレスモータをタングラムに2ユニット接続する構成、ベアリングレスモータと従来型の磁気軸受を組み合わせた構成、2組の回転子・固定子鉄心から成るホモポーラ形ベアリングレスモータを単独で用いる構成などが提案されている。装置のさらなる小型化・簡略化を実現するものとして、扁平な回転子を用いたスライスマータが提案されている。回転子の軸方向の厚さに対し直径を十分大きくすると、半径方向の2自由度を能動制御するだけで、他の自由度は全て安定になる。回転子位置の厳密な制御が必要でない用途に適している。

表1 ベアリングレスモータの応用
Table 1. Applications of bearingless motors.

- High speed drives and generators.
- Flywheel drive and generators, satellite reaction wheel, momentum wheels.
- Food process, pharmacy process, harsh environments as low temperature, high temperature, vacuum, poisonous gas atmospheres.
- Swinging motor.
- Medical equipments, implantable blood pump.
- Information storage drives.

3. 応用分野と試作

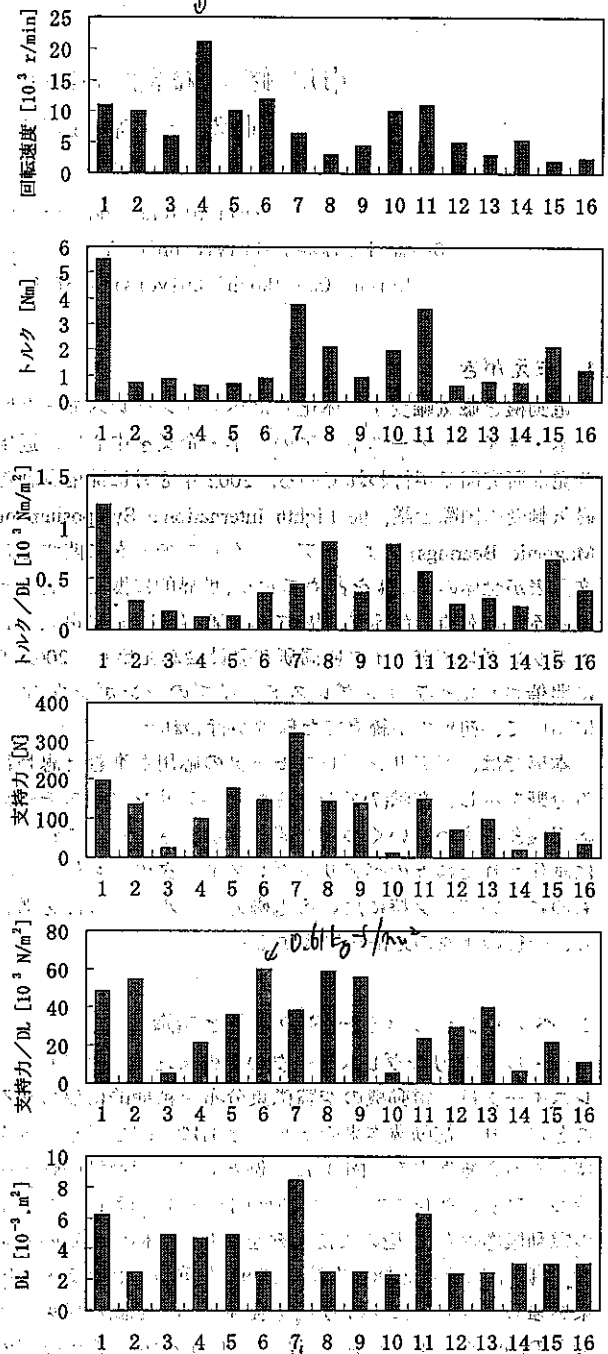
表1はベアリングレスモータの応用が進むと思われる分野を示している。高速回転のドライブ、発電機をはじめとして、高速回転が必要なフライホイール駆動、発電、人工衛星搭載用のホイール、情報機器ディスクドライブなどの分野は低損失の軸受が必要であり、さらに、小型軽量化が不可欠である。また、食品、医薬品の製造プロセス、低温、高温、真空中、毒性ガスなどを取り扱うプロセスでは、液体、気体に漏れが生じないようにシールが必要である。揺動モータなどでは軸受寿命が問題になる。埋込型心臓補助ポンプでは、小型、軽量で血液が固まらないシールが望まれている。

以上の用途は、磁気軸受とモータを磁気的に一体化したベアリングレスモータの小型軽量化の特長が生かせる応用分野である。磁気力により支持すれば、支持部分から気体、液体が漏れることがない。また、支持に潤滑油が不要になり、プロセスへの油の混入を防止できる。さらに、摩擦損失を低減して軸受損失を抑えることができる。

4. 基礎研究的な試作機と特性

これまでに種々のベアリングレスモータが提案されているが、さらに電磁力・トルクの特性などを改善する新しい回転子・固定子構成が提案されつつある。しかし、試作機によって回転子・固定子の寸法、モータと支持用の巻線の巻数、電流密度などがまちまちであり、互いに特性を比較することは容易ではない。以下、比較の一例を示す。

図2は16台の試作機について、電動機と支持の特性をまとめたものである。ここで挙げた以外にも多くの優れた試作機が製作されているが、モータの詳細な仕様・特性が入手可能な試作機についてのみ比較を行った。回転速度・トルク・支持力は、ベアリングレスモータの各種試験結果の最高値である。これらの値は負荷機械の都合で値が小さい場合もあり、試作機の限界値を表しているとは限らない。DLは回転子の直径と長さの積、すなわち投影断面積である。



1~4: 誘導機、5: シンクロナスリラクタンس機、6: スイッチトリラクタンس機、7: ホモポーラ機、8: コンシクエントポール機、9: BPM機、10: インセットPM機、11~13: SPM機、14~16: PM機

図2 試作機の各種特性
Fig. 2. Characteristics of test machines.

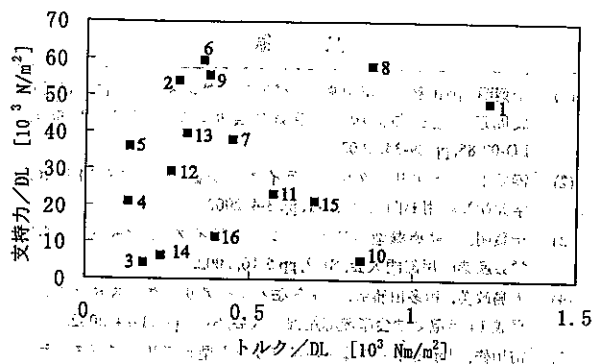


図3 回転子の面積あたりのトルクと支持力
Fig. 3. Torque and suspension force divided by rotor size.

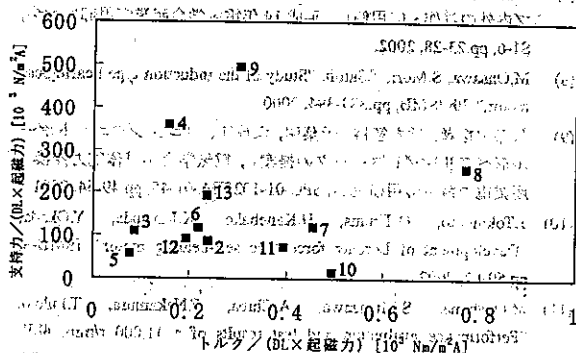


図4 面積・起磁力あたりのトルクと支持力
Fig. 4. Torque and suspension force divided by rotor size and MMF.

大きさの異なる試作機の特性を比較するために、トルク・支持力をそれぞれDLで割った値を示している。

図3はトルクと支持力の平面に、図2で示した回転子の投影断面積あたりのトルクと支持力を描いたものである。図中の番号は図2と対応する。1の誘導機⁽⁶⁾、8のコンシクエントポール機⁽⁹⁾は、トルクと支持力ともに大きな値を記録している。トルクが大きい8, 10, 15, 11は永久磁石を用いたモータ^(10,11)である。また、支持力が大きいのは、6のスイッチトリラクタンス機⁽¹²⁾、8のコンシクエントポール機、9のBPM機、2, 1の誘導機など、突極の磁束密度を高くできるモータと円筒型の回転子を持つモータが多い。

図4は、図3のトルクを電動機巻線の起磁力で、支持力を支持巻線の起磁力で、それぞれ割ったものである。各巻線の起磁力は、導体の全断面積と電流密度の積を用いている。図4では計算に必要なデータが得られなかった試作機1, 14, 15, 16を省略している。比較的厚い永久磁石や界磁巻線で大きな励磁磁束を発生する8のコンシクエントポール機、10のインセンティブPM機、7のボモラ機⁽¹³⁾が、電動機巻線起磁力あたりのトルクが大きい。比較的ギャップが狭く、電動機励磁磁束が大きい9のBPM機⁽¹⁴⁾と4の誘導機は、支持巻線起磁力あたりの支持力が大きい。

表2 ベアリングレスモータを組み込んだポンプの性能
Table 2. Performances of bearingless pumps.

	Speed [1/min]	Output power [W]	Flow [l/min]	Head [mH ₂ O]
Canned pump ⁽⁹⁾	5 000		180	24
Canned pump ⁽²²⁾	3 000	30 000	2 520	78
Compact pump ^(17,20)	8 000	300	50	25
Compact pump ^(17,20)	5 000	50	18	8
Blood pump ⁽¹⁹⁾	2 400		9.7	4.3
Bioreactor ⁽¹⁹⁾	300	16		

(注) 回転速度等のデータはそれぞれの最高値であり、同時に実現できるとは限らない。

5. 応用機器と性能

〈5・1〉ポンプ これまでに提案されているベアリングレスモータの主な用途はポンプであり、ベアリングレスモータを組み込んだ各種ポンプの実証試験機や製品が製作されている。表2に各種ポンプの性能を示す。

これらのベアリングレスモータはいずれも回転子を完全非接触で支持しており、回転子と固定子の間の隔壁によって流体が完全にシールされている。さらに、血液ポンプと微生物培養器では、シールや機械的な軸受部で生じていた微生物の死滅・赤血球の破壊という問題を解決している。

軸出力が大きいギヤードポンプ以外は、回転子が扁平なスライスマータを採用しているものが多い。これにより、装置全体の簡略化が図られている。

図5は2002年に国内販売がスタートしたベアリングレスモータを搭載したポンプである^(17,20)。それぞれ50W, 300Wのポンプであり、プラスチックで構成された上の部分がポンプであり、ポンプケースの中でケースに収められた羽根車と永久磁石を搭載したロータが回転する。下の金属部分が固定子である。

図6はベアリングレスモータを搭載した佐原総合研究所で試作されたキャンドポンプである⁽⁸⁾。右端に構成されたポンプで液体をくみ上げる。ポンプの左側には2つのユニットのベアリングレスモータと、スラスト磁気軸受が構成されている。従来用いられていたセラミックス系のすべり軸受は、数年で交換する必要があった⁽²¹⁾。これに比較して寿命が長く信頼性が高い特長がある。また、30kWのキャンドポンプもテストされている⁽²²⁾。

〈5・2〉データ記録装置 ハードディスク等の情報記録ディスクを駆動するドライブモータとして、ベアリングレスモータを使用する試みがなされている⁽²³⁾。図7は三協精機製作所で試作された10 000r/minのドライブモータである。ベアリングレスモータによって高速で回転する円盤を非接触で支持する。