

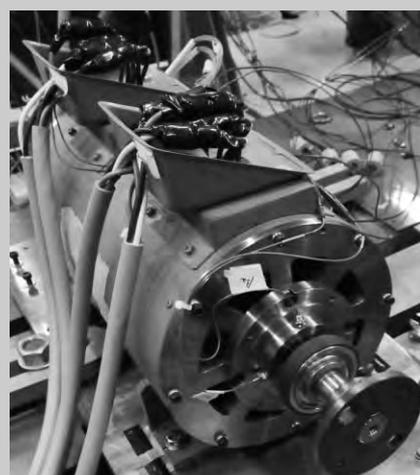
ワイドギャップ構造ベアリングレスモータの特性測定

📌 ベアリングレスモータ，磁気浮上，振動抑制，効率

* 大井一伸 Kazunobu Oi * 松橋大器 Daiki Matsuhashi ** 野村昌克 Masakatsu Nomura

概 要

ベアリングレスモータは文字通りベアリングの無いモータであり，磁気によりモータ軸を浮上させる。一般的な磁気軸受け同様，モータ軸は非接触であり，摩擦が無く潤滑剤が不要で，メンテナンスが容易であるといった特長がある。更にベアリングレス独自の特長として，モータの鉄心全面で磁気浮上作用を発生させているため，回転子と固定子間の空隙を広くとることができる（ワイドギャップ）。当社では，ワイドギャップ構造モータの実用化を目指すべく，試作を行い軸支持の特性や効率について検証を行った。その結果，安定した軸支持運転を実現でき，軸支持に必要な電力が少なく，効率に大きな影響を与えないことを実証した。



試作機

1. ま え が き

ベアリングレスモータ⁽¹⁾⁽²⁾は，一般的な磁気軸受けと異なり，モータに磁気浮上機能（回転子を浮上させる機能）を内蔵したものである。固定子にモータ回転用の電動機巻線と磁気浮上用の軸支持巻線を施した構成のため，モータ両端にあった磁気軸受け装置のスペースだけモータを小形化できる。更に固定子と回転子に対向する広いギャップ面を利用するため，軸支持に必要な磁束密度を低くでき，ギャップ長を広くしても十分な軸支持力を得られるという長所がある。

しかし，これまでの研究では数百W容量モータの検討が中心であり，産業用途への応用を考えると，数kW機に適用した場合の軸支持性能や安定性，効率などの特性検証が必要となる。

そこで，当社は定格5.5kW，最高回転速度

8000min⁻¹の試作機を製作し特性検証を行った。本稿では，この試作機により測定した特性結果と安定した軸支持を実現するための振動抑制制御を紹介する。

2. ベアリングレスモータ試作機

2.1 構造

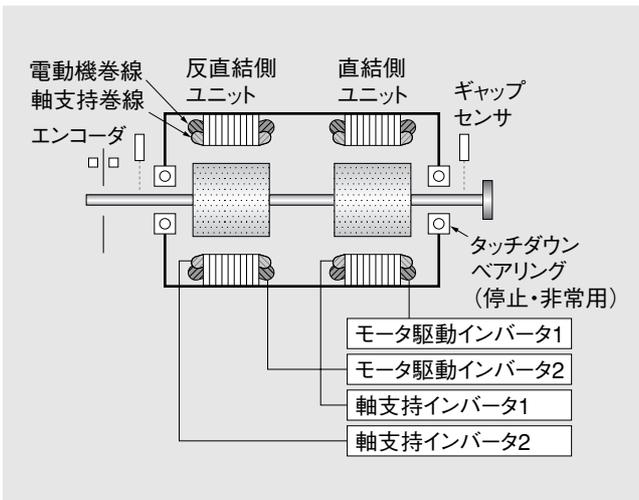
第1表に試作したベアリングレスモータの主な仕様を示す。固定子は2極36スロットであり，同一スロット内に2極の電動機巻線と4極の軸支持巻線の2種類の巻線を挿入している。モータのギャップ面全体を軸支持力発生に共用しているため，軸支持に寄与する磁束密度は低くてもよく，ギャップ長を広くとることができる。そこで，この特長を生かした応用例を想定して，ギャップ長を3.6mmと広くとり⁽³⁾⁽⁴⁾，浮上力については回転子自重の約3倍である300Nに設定した。

*システム技術研究所 **研究開発本部

第1表 試作機の主な仕様

試作ベアリングレスモータの特長は、固定子と回転子間のギャップ長が3.6mmと広いことである。このギャップ長でも軸支持力300Nを出力できる。

定格容量	5.5kW
最高回転速度	8000min ⁻¹
スロット数	36スロット
電動機巻線	2極-分布巻
軸支持巻線	4極-同心巻
ステータ外径	φ220mm
ギャップ長	3.6mm
軸支持力	300N

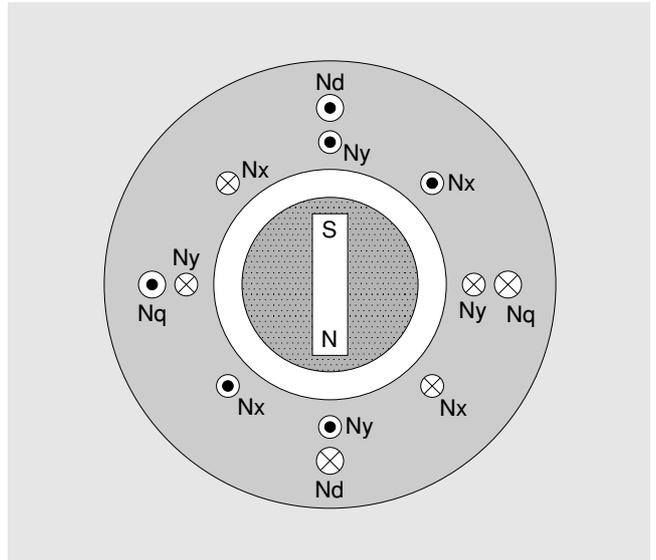


第1図 試作ベアリングレスモータの構成
本モータは内部に2個の固定子を内蔵し、それぞれの巻線を個別に制御し2点でモータ軸を支える。

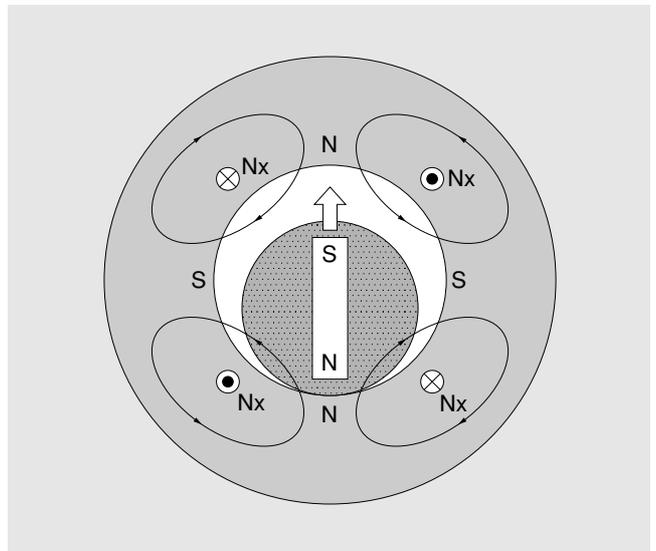
第1図に試作機の構成を模式的に示す。本モータは軸の傾きを制御するため、固定子を軸長方向に2分割し個別に巻線を施しており、それぞれ独立に制御する2点支持構造としている。固定子1つに対して、トルクを発生するための電動機巻線とモータ軸を浮上させるための軸支持巻線を個別のインバータで通電する。すなわち、本モータは合計4台のインバータで駆動する。

センサに関しては、モータの両端に軸位置検出用のギャップセンサを、また片側の軸端に回転角の検出用としてロータリーエンコーダを取り付けた。運転停止時や停電などの非常時には機械的に支持できるように、ギャップ長0.5mmのタッチダウンベアリングを付加した。

スラスト方向の制御については、今回は機械軸受けの負荷機と直結し、またモータ単体でも固定子と回転子間の吸引力により軸位置が拘束されるため、制御無しでもフレームやタッチダウンベアリ



第2図 試作ベアリングレスモータの概略断面図
固定子には電動機巻線Nd, Nqと軸支持巻線Nx, Nyが配置される。



第3図 ベアリングレスモータの浮上原理
この状態でモータ軸を浮上させるには、巻線Nxに電流を流す。これにより磁界が発生し、回転子鉄心に上向きの浮上力が発生する。

ングとは接触しないことから制御機構を省略した。

2.2 浮上原理

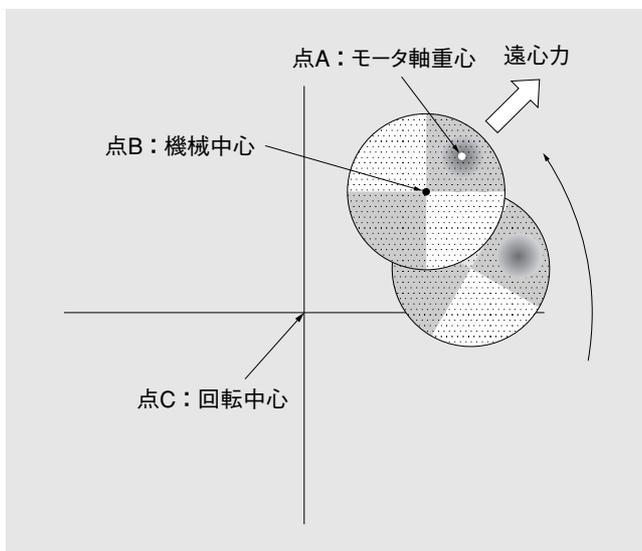
ベアリングレスモータでは、軸支持巻線に電流を流すことで磁界を発生させ、回転子鉄心に加わる吸引・反発力を利用して軸支持を行う。第2図に本モータの固定子と回転子の断面図を示す。固定子には電動機巻線Nd, Nqと軸支持巻線Nx, Nyの2種類の巻線が配置され、回転子には2極の永久磁石が埋め込まれている。

回転子が浮上前で、固定子と接触している状態から軸支持を開始する例を説明する。第3図に示すように、回転子内部にある2極永久磁石の上部が

S極の場合を考える。この時、軸支持巻線 N_x に電流を流すと、磁界により固定子上部と下部にN極、固定子左右にS極の4極の磁極が形成される。回転子上部ではN極とS極による吸引力、下部ではN極同士の反発力が生じるため、回転子には上向きの力が働き浮上させることができる。実際にはモータが回転し、回転子の向きや位置が常に変化する。そのため、エンコーダで検出した回転子の回転角に応じて軸支持巻線に流す電流を制御⁹⁾している。また、ギャップセンサによるフィードバック制御を行い、モータ軸を一定位置に拘束している。

2.3 振動抑制制御

磁気軸受け方式には、磁気による軸支持力が機械軸受けと比較して小さく剛性が低いこと、軸支持制御系に検出や電流制御などの遅延があることから、振動が増加しやすいという問題がある。第4図に振動の発生原理を示す。図は回転子も含めたモータ軸重心(点A)と機械中心(点B)が異なり、軸がアンバランスであることを示している。このような軸を機械中心(点B)基準で回転させようとすると、遠心力により機械中心(点B)は回転中心(点C)から引き離され、大きな振動が発生してしまう。モータ軸アンバランスは負荷との接続でも生じるため、ある程度のアンバランスを許容する必要がある。そのため今回はモータ単体でバランスを取り、エンコーダと負荷接続のアンバランスを修正せず試験した。



第4図 軸振動の発生原理

モータ軸重心(点A)と機械中心(点B)が異なる場合、回転により遠心力が発生し、モータ軸は回転中心(点C)から引き離され大きな振動が発生する。

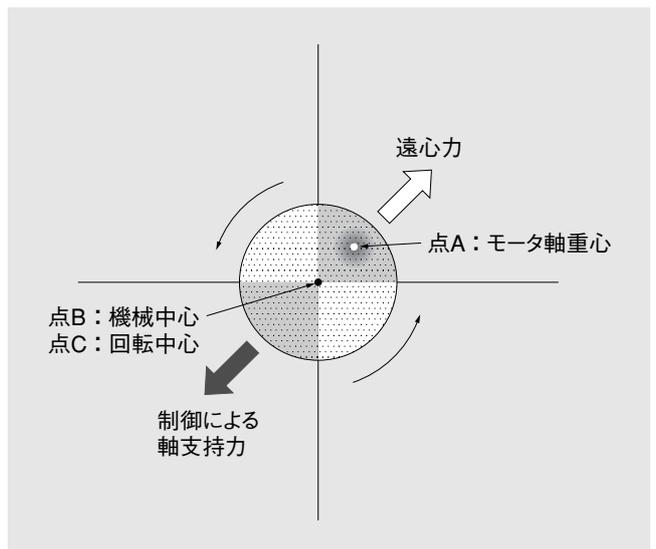
軸振動対策として以下2種類の振動抑制制御があり、それぞれ試験を行った。

(1) 方式1: 軸を機械中心で回転させる制御

(第5図)

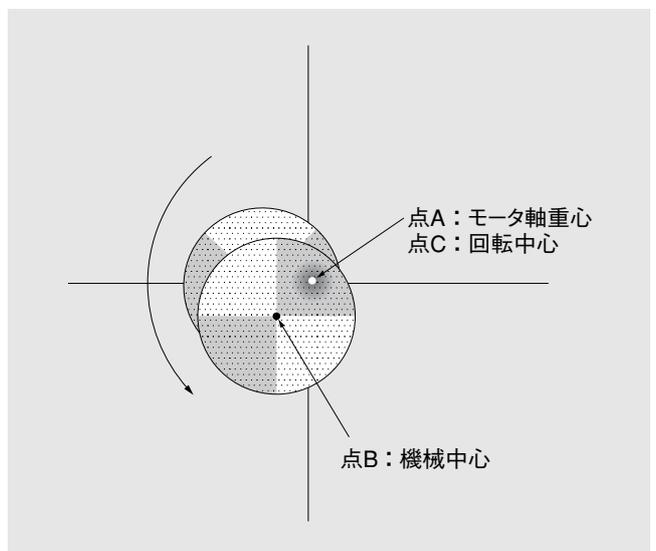
(2) 方式2: 軸を重心で回転させる制御(第6図)

方式1では、アンバランスのあるモータ軸に対し、制御により遠心力と同じ大きさで逆向きの軸支持力を加え遠心力を打ち消す。これによりモータ軸を回転の中心に引き戻し、機械中心(点B)と回転中心(点C)を一致させる。方式1ではモータフレームがこの制御力の反作用を受けるため、



第5図 方式1: 軸を機械中心で回転させる制御

制御によりモータ軸に遠心力と同じ大きさで逆向きの軸支持力を加え、遠心力を打ち消すことで、モータ軸の機械中心(点B)と回転中心(点C)が一致する。



第6図 方式2: 軸を重心で回転させる制御

この制御法ではモータ軸重心(点A)と回転中心(点C)を一致させる。原理的に遠心力が発生せず、反作用も受けないためモータフレームが振動しにくくなる。

モータを強く固定する必要がある。この剛性が不足するとモータ自体が振動してしまう。

方式2は、モータ軸重心（点A）と回転中心（点C）を一致させ、ギャップセンサの変位を許容することで遠心力自体を発生させない制御法である。方式1とは異なりギャップ長を積極的に活用することで、軸振動は残留するがモータフレームに振動が伝わりにくい特性を得る。

3. 振動抑制制御の特性とモータ効率測定結果

試作ベアリングレスモータについて、各振動抑制制御のモータ回転速度に対する軸振動の特性と軸支持電力を測定し、制御法の比較を行った。更に負荷試験を行い、結果から効率マップを作成した。

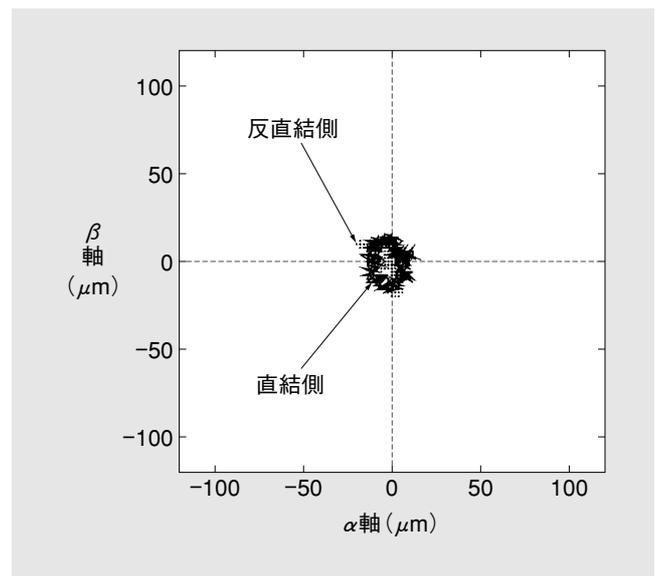
3.1 振動抑制制御の軸変位特性

最初にベアリングレスモータ単体で振動測定を行ったところ、共振によるものと考えられる軸変位増加現象が発生し、 5000min^{-1} で軸変位が最大となった。第7図はその時のモータ軸振動のリサージュ図形であり、軸変位は最大 $110\mu\text{m}$ に達することが分かる。これは、一般的な機械軸受けモータの軸変位 $10\mu\text{m}$ に比べかなり大きな値である。第7図では特に反直結側の振動が大きい。これはモータ軸の反直結側に取り付けたエンコーダによるアンバランスの影響と考えられる。しかし、多軸に多

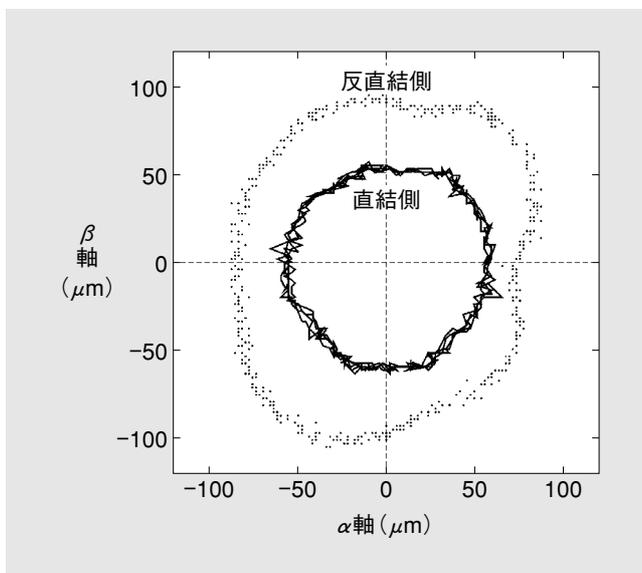
少のアンバランスがあっても軸振動はタッチダウンベアリングのギャップ長 0.5mm に比べて十分小さく、接触することのない軸支持を実現している。

第8図に振動抑制制御として方式1を適用した結果を示す。軸変位は最大 $20\mu\text{m}$ となり、アンバランスの影響の大きい反直結側において振動抑制制御無しと比較して18%にまで低減した。これは機械軸受けの軸変位に対してまだ大きい値であるが、振動は周期的であるため、学習制御などの適用で改善できると考えられる。

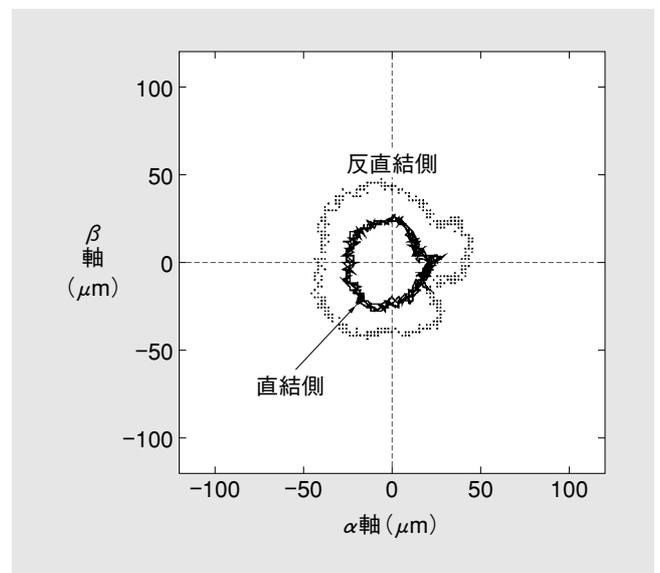
第9図に振動抑制制御の方式2を適用した時の



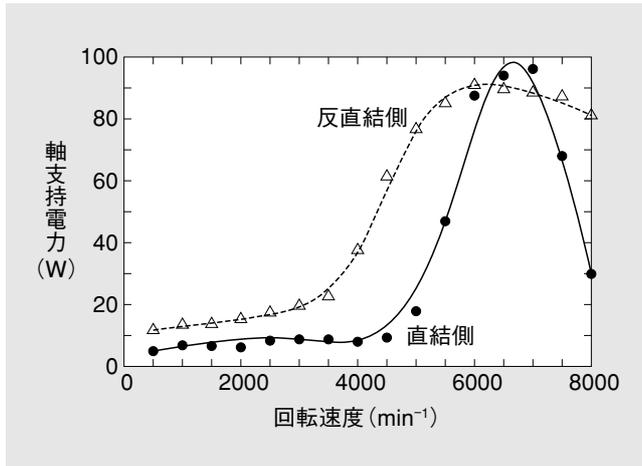
第8図 モータ軸振動のリサージュ波形（方式1）
方式1の制御法を適用するとモータ軸の振動は小さくなり、軸変位の半径は $20\mu\text{m}$ 以内に抑制できる。



第7図 モータ軸振動のリサージュ波形（制御無し）
制御無しではモータ軸の振動が大きくなり、軸変位の半径が最大 $110\mu\text{m}$ に達した。



第9図 モータ軸振動のリサージュ波形（方式2）
方式2ではモータ軸の振動が残り、軸変位半径は最大 $40\mu\text{m}$ となる。



第10図 軸支持電力の測定結果（制御無し）
軸支持電力は回転速度7000min⁻¹でピークとなる。電力は合計で最大185W（定格の3.4%）であった。

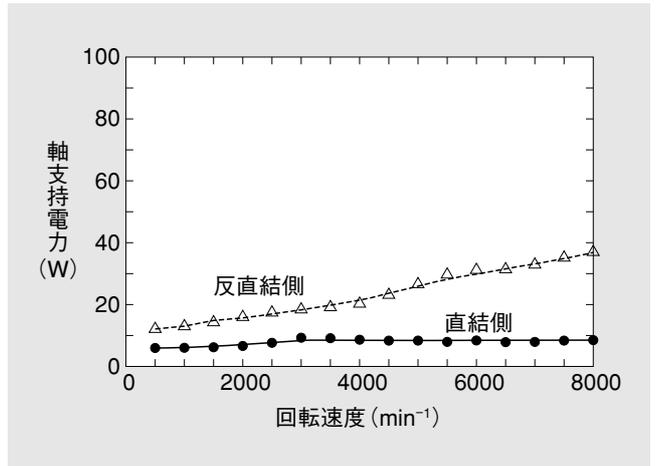
軸振動の様子を示す。軸変位は最大40 μ mで、振動抑制制御無しに比べて軸変位を36%までしか低減していない。しかし、触感ではあるがモータフレームの振動は小さくなっていることを確認した。モータフレーム振動のフィードバック制御まで展開すれば、更なるフレーム振動抑制実現の可能性がある。

3.2 軸支持電力

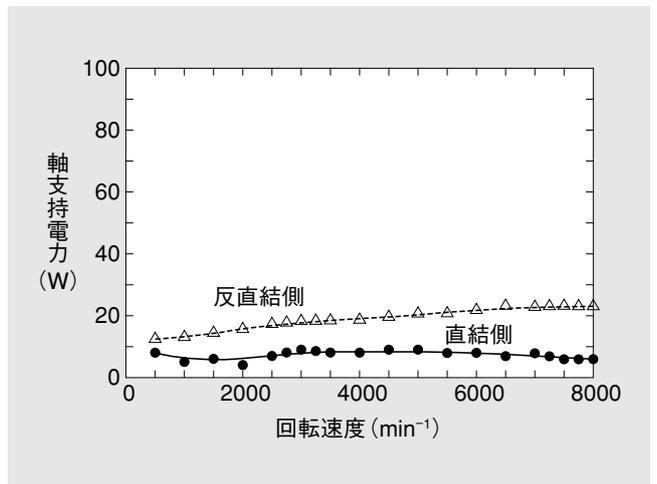
軸支持電力も重要な要素であるため、2つの軸支持巻線に個別のパワーメータをモータ入力部に接続し、モータ単体条件で振動抑制制御方式や回転速度を変化させた時の軸支持電力を測定した。

第10図に振動抑制制御を適用しない時の軸支持電力を示す。軸変位が最大となった回転速度は5000min⁻¹であるが、遠心力は回転速度の2乗に比例するため、軸支持電力のピークは高速側の7000min⁻¹に生じており、この回転速度での軸支持電力合計は185W（モータ定格の3.4%相当）に達した。モータ軸を定位置に拘束するだけでは仕事をしないため、理想的には軸支持に必要な有効電力は零である。すなわち、この軸支持電力185Wの大半は銅損や鉄損である。

第11図に方式1の振動抑制制御を適用した場合を示す。軸支持電力は最大45Wであり、モータ定格の0.8%まで低減した。方式1では軸変位が低減するため、モータ軸の回転中心と重心間の距離も減少し、遠心力も比例して減少する。そのため軸支持巻線に流れる電流実効値も減少し、銅損・鉄損が減少したと考えられる。



第11図 軸支持電力の測定結果（方式1）
軸支持電力は回転速度増加と共に少しずつ増加する。しかし、最大でも45W（定格の0.8%）まで電力を抑制できる。



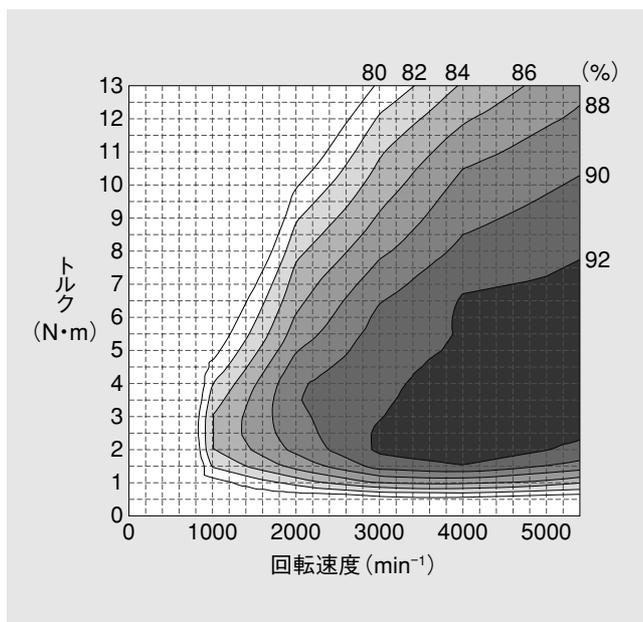
第12図 軸支持電力の測定結果（方式2）
軸支持電力は回転速度に対してほぼ一定になる。電力合計は最大23W（定格の0.4%）であり、方式1の制御法よりも小さくなる。

第12図に方式2の制御を適用した時の結果を示す。軸支持電力は最大23W（定格の0.4%）と更に小さく抑えることができた。方式2では遠心力が発生しないよう制御するため、軸支持電力は更に減少し、またすべての回転速度でほぼ一定となる。

3.3 効率

軸支持電力を含む4つの巻線すべての入力電力と、トルクメータによるトルク測定とエンコーダによる回転速度から軸出力を算出し、モータの総合効率を求めた。

第13図に横軸を回転速度、縦軸を負荷トルクとした効率マップを示す。ここでは使用した負荷機の制限により回転速度の上限を5400min⁻¹としている。振動抑制制御としてモータ軸変位の低減効果が高い方式1を適用し、定格トルク9.5N・mに対し



第13図 試作ベアリングレスモータの効率マップ
軸支持電力も含めた総合効率である。トルク9.5N・m、回転速度5400min⁻¹の定格条件で90.8%となり、当社標準PMモータと比較して同程度である。

て13N・mの負荷トルクまで測定した。定格条件の効率として90.8%の値が得られており、当社製の同定格標準PMモータ（90.0%）と比較して遜色の無い効率であることから、ベアリングレス化による大きな効率低下は生じないことが確認できた。また最大効率は93.9%となった。方式2の振動抑制制御を適用すれば、更に0.4%程度の効率向上を見込める。

4. む す び

今回、5.5kWベアリングレスモータ試作機の製作と特性の検証を行った。その結果、3.6mmのワイドギャップ構造で十分な軸支持力と安定した軸支持運転を実現した。また2種類の振動抑制制御を開発し、軸振動を110μmから20μmまで低減できることを確認した。この振動は周期性があるため、学習制御などを適用すれば更に抑制できると考えている。これらの振動抑制制御は軸支持電力の低減にも効果があることを確認した。効率も、機械構成が異なるため単純な比較はできないが、一般的なPMモータと同程度であることから、ベアリングレス化による効率低下は微小と考えられる。

今後は更なる高速回転の対応や振動抑制制御の学習機能追加などの開発に注力し、応用技術開発を進める所存である。

最後に、本研究は東工大名誉教授 深尾先生と北海道大学 竹本先生にご指導いただいた。ここに感謝の意を表する次第である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《参考文献》

- (1) 深尾正：「ベアリングレスドライブー総論ー」, 平成14年電気学会産業応用部門大会論文集, S1-1, 2002, pp.3~4
- (2) 佐藤忠・金箱秀樹・岡田養二・千葉明：「ベアリングレスドライブ内外の試作・応用例」, 平成14年電気学会産業応用部門大会論文集, S1-6, 2002, pp.23~28
- (3) 鷗山通夫・竹本真紹・千葉明・赤木泰文・深尾正：「2極電動機・4極位置制御構造を持つ極間磁石付永久磁石型ベアリングレスモータの有効性」, 第14回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 1A05, 2002, pp.49~54
- (4) 竹本真紹・鷗山通夫・千葉明・赤木泰文・深尾正：「2極電動機・4極位置制御構造を持つ埋込永久磁石型ベアリングレスモータの試作」, 第15回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 6A09, 2003, pp.629~634

《執筆者紹介》



大井一伸 Kazunobu Oi
電力変換装置の研究開発に従事



松橋大器 Daiki Matsuhashi
電気機器解析技術の研究開発に従事



野村昌克 Masakatsu Nomura
電力変換・FAなどの研究開発に従事