

小型ブラシレスモータの高速・センサレス駆動システム(2)

Ultra-high speed and sensor-less drive system for small brushless-motor (2)

恩田 一*
Hajime ONDA

Abstract: Ultra-high speed and sensor-less drive system for small brushless-motor is described. Two types of motor rotors are experimented for more than 300,000 rpm rotational speed. SPM rotor is broken at nearly 200,000 rpm and IPM rotor achieved 300,000 rpm rotational speed. The cooling system is very important for this experiment. Here, forced air cooling system is used and not enough for normal operation over 300,000 rpm rotational speed. Yet, it is verified that the sensor-less drive system is very useful for this application.

Key word; brushless-motor, sensor-less drive, high speed

1. はじめに

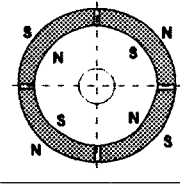
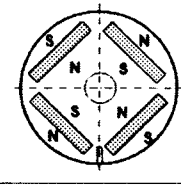
ブラシレスモータは直流モータ(ブラシ付き)の優秀な制御性能を有しながら、直流モータの弱点であるブラシ・整流子に起因する低信頼性・低保守性の欠点を除去した理想的なモータで、色々な用途に多数利用されてきている。しかし、巻線の極性切り換えのためにロータの磁極位置を検出する必要があり、半導体式のホールセンサ等をモータ内や回転軸回りに設置する必要がある。ホールセンサは半導体で熱や振動に弱い電子部品であり、モータが高速で回転する環境に取り付けるのは信頼性上の懸念がある。また、このセンサ信号を得るためには、電源線を含めて最低5本の信号線が必要で、これが不要になれば、ドライバーからモータへの電線は太くて丈夫な3相の電力線3本のみとなり、配線の簡略化・信頼性の向上に結びつく。工作機のような加工機においては、加工時に切削液等のクーラントを使用したり、高温・高湿の環境下で使用されることが多くセンサレス方式が大変有効である。

本報告は、数百ワット程度の小型ブラシレスモータを小型・高速回転の加工機用主軸スピンドルとして応用すべく、目標 30,000 rpm の高速回転で、上記ホールセンサ等の磁極位置センサを使用しないセンサレス駆動方法を研究したものである。前報¹⁾では、表面磁石型(SPM)モータで 20,000 rpm まで回転させることができたが、ロータの磁石が熱と遠心力で剥がれて破損し、目標とする 30,000 rpm は達成できなかった。ここでは、ロータを内部磁石型に改良し、モータ本体の放熱性能を向上させて、目標の 30,000rpm を達成したことを報告する。

2. 表面磁石型(SPM)ロータと埋込磁石型(IPM)ロータ

ブラシレスモータ本体は永久磁石型同期電動機であり、ロータは永久磁石と鉄心より構成されている。ロータの永

久磁石構造には表面磁石型(SPM)と埋込磁石型(IPM)がある。図1にそれぞれのロータ構造と特徴を示す。

	SPM (SPMSM)	IPM (IPMSM)
	表面磁石型同期モータ Surface Permanent Magnet Synchronous Motor	埋込磁石型同期モータ Interior Permanent Magnet Synchronous Motor
ロータ構造		
面転力	磁石トルク	磁石トルク+リラクタンストルク
制動性能	◎	○
トルク応答性	◎	○
出力	△	◎
効率	○	◎

注) ◎△の比較は(大山知博:PMモータの特性比較と構造設計, 機械設計, 2007vol. 31 No. 11)を引用した。

図1 SPMモータとIPMモータの比較

SPMロータはロータコア表面に永久磁石を張り付けた構造で、回転角度方向に磁氣的に等方なため、コギングトルクが少ない利点がある。しかし、永久磁石はコア表面に接着材で接着してあるため、モータ内部が高温になると接着剤の強度が低下し、回転の遠心力により剥がれて破壊しやすい構造である。

一方、IPMロータはロータコア内部に永久磁石を埋め込んだ構造で、回転角度方向には磁氣的異方性があるためコギングトルクが大きい。磁氣的異方性によるリラクタンストルクも利用できるため、出力は大きくとれる。磁石の強度はコア内に埋め込まれているので、遠心力には大変強く、高速回転型に適した構造である。

近年、電気自動車等への応用では、コギングトルクには目をつぶり、出力の大きさに注目して、IPMロータ型ブラシレスモータ利用が多く、工作機においても同様である。

2011年3月3日受理

* 理工学部 電気電子工学科

実際に使用したロータの写真を図2に示す。ロータの直径はφ26、長さL23である。

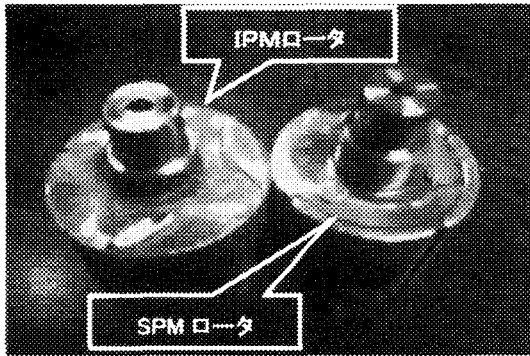


図2 SPMロータとIPMロータ

また、使用したモータの全体写真を図3に示す。

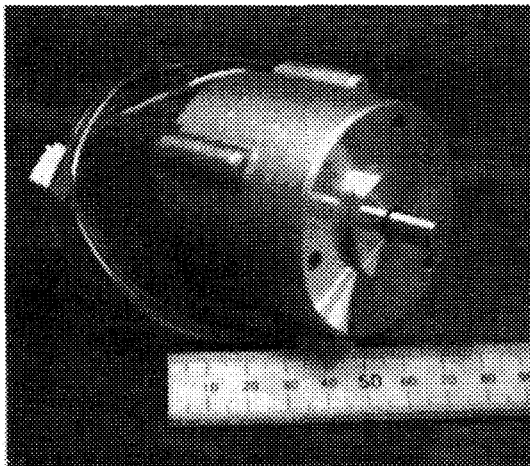


図3 モータ全体写真

3. 放熱性能向上

供試モータは図3で判るように密閉型で冷却はステータハウジングからの放熱のみである。一方、モータの発熱はステータの内周およびロータからの発熱が多く、モータ内部を冷却することが重要である。ここでは、軸方向に冷却用エアを流す強制空冷方式で冷却した。冷却構造図を図4に示す。

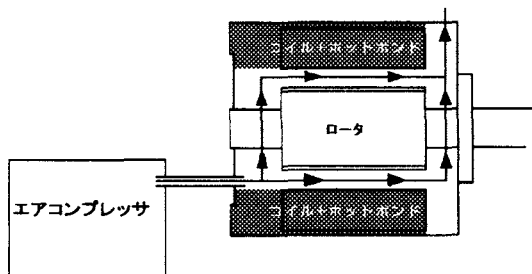


図4 モータ冷却構造

超小型エアコンプレッサからのエアはモータのステー

タとロータの隙間(エアギャップ)を通して流れるように構成した。そのため、ステータ部のコイル隙間を接着剤(ホットボンド)で埋め、空気流がエアギャップに集中して流れるよう工夫した。空気流量はおよそ20 l/minである。エア源のコンプレッサは超小型の携帯用タイヤ空気圧用のものを利用した。これでもかなりの騒音を発生するので、遮音用にコンテナBOX内に入れた。

4. 実験装置の構成

実験用駆動システムの構成を図5に示す。センサレス駆動のため、モータへの配線は3相電力線3本のみで、センサレス信号発生のための磁極検出用配線は、図5の破線内の電子回路基板内になる。

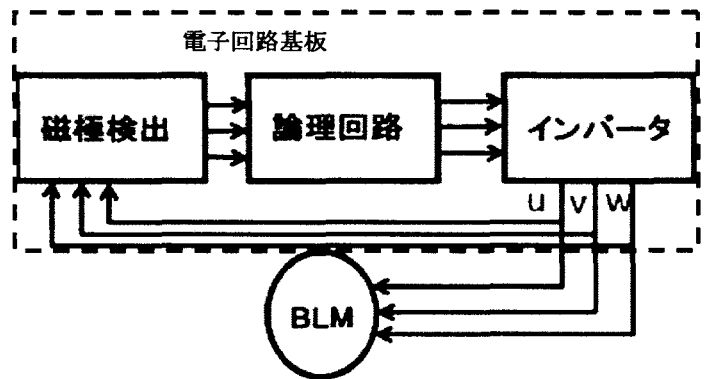


図5 センサレス駆動システム構成

インバータ回路部分を図6に示す。高速回転させるには電源電圧も上げる必要があるため、駆動用トランジスタ(パワーMOSFET)を高耐圧化し(60V)、電流容量も増やした(60A)。図6のホールセンサ入力信号の箇所に磁極位置検出回路からのセンサレス信号を入力する構成である。パワーMOSFETもかなり発熱するため、大きめの放熱フィンを取り付け、外部ファンによる空冷を行った。

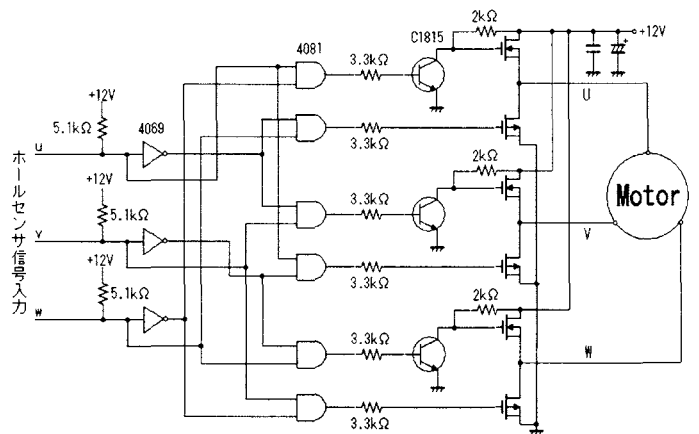


図6 インバータ回路図

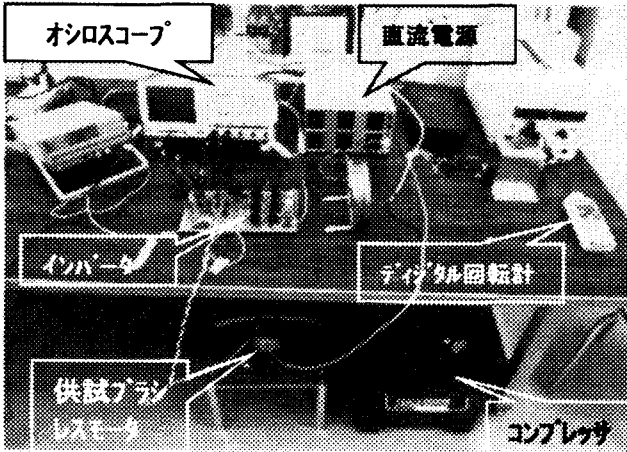


図7 実験装置構成

実験装置全体の構成写真を図7に示す。高速回転による危険性回避のため、供試モータは鉄架台に取り付け、机の下に設置した。モータの回転数測定は図7中にある光学式デジタル回転計で行い、モータの逆起電力波形の周期をオシロスコープで読み取って再確認した。

5. 実験結果

5.1 SPM モータ実験

SPM ロータ型ブラシレスモータでの高速回転実験結果のグラフを図8に示す。横軸はモータ回転数、縦軸はモータ誘起電圧と直流電源の電流値である。電流値は入力電力の目安である。最高回転数は20,000 rpm弱で、ロータが接触して回転停止となった。16,000 rpm程度から直流電流が急上昇しているのは、ロータの回転抵抗が増大したため、軸受部分の抵抗増大やロータが何らかの形で接触し始めたものと思われる。この最高回転数20,000 rpm弱という結果は前報で示した昨年度の結果と同様であった。前報では冷却が、今回よりも悪かったため、磁石の接着が剥がれて破損に至ったが、今回は破損までは行かなかった。実験後、分解してロータを抜き出してみると、ロータ補強

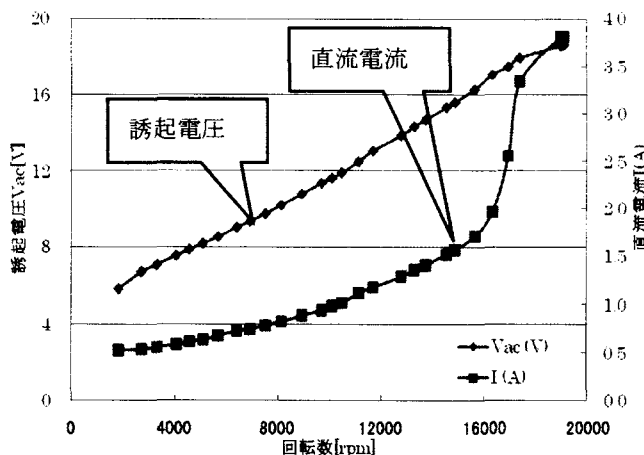


図8 SPM モータ実験結果

用の被覆材の一部が剥がれていることが確認された。磁石自体は破損していなかった。

5.2 IPM モータ実験

IPM ロータ型ブラシレスモータでの高速回転実験結果のグラフを図9に示す。回転数は30,000 rpmまで達成できた。回転数上限は電源電圧の上限で、機械的な接触や破損等は発生していないが、本実験では、これ以上電圧は上げられなかった。回転数24,000 rpm程度から、SPMの場合と同様に直流電流が増大し始め、回転抵抗が増大していることが判る。また、この電流値が最高回転数で下がり始めており、検討を要する点である。

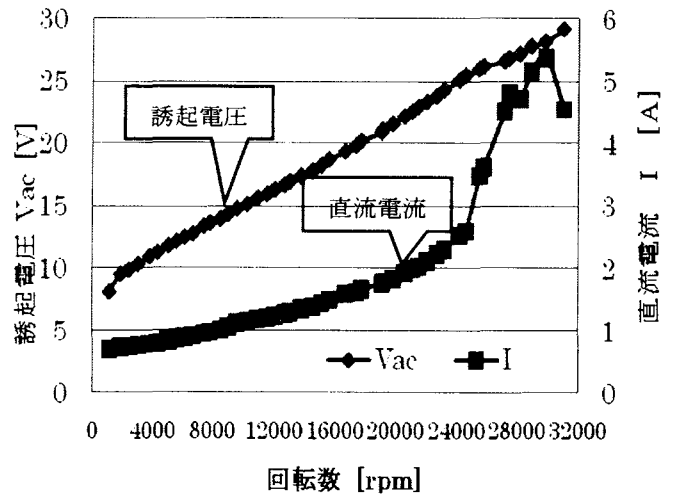


図9 IPM モータ実験結果

5.3 実験後のモータ内部の確認

IPM モータでの高速回転実験後にモータを分解して内部を調査した。実験直後はモータハウジングが高温状態で触れず、5分ほど冷却した後、分解した。その様子を図10に示す。分解直後に赤外線温度計で温度測定した結果、ロータ(軸受)部温度は82℃であった。巻き線を固定していた接着剤が溶けて流れ出ていたが、ロータや軸受の傷等は観察されなかった。軸受はグリース潤滑式の小型ボールベアリングである。実験中の内部ロータ付近の温度は相当高かったものと思われる。

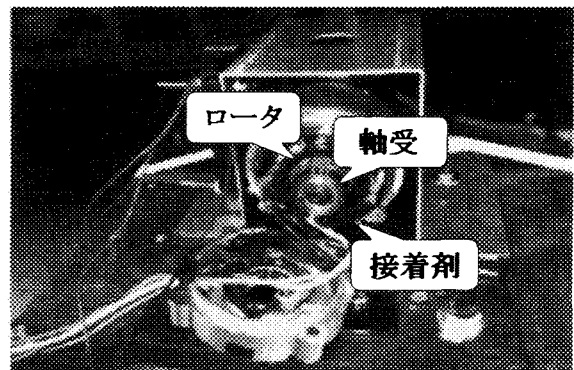


図10 IPM モータ実験後分解写真

5. 考察と今後の課題

ブラシレスモータのセンサレス駆動が理論どおり完成し、初期の目標であった最高回転数 30,000 rpm が達成できた。電気的な駆動系についてはパワーMOSFET の冷却向上が望まれるが、ホールセンサ式に懸念されるセンサ関連不具合等は全くない。この結果、このような用途にはセンサレス駆動方式がよく適していることが実証された。

今後の課題としてはモータ関連で下記があげられる。

- (1) 負荷状態での実験
- (2) 冷却性能の改善
- (3) 高速回転時電力増大の原因究明と対策
- (4) さらなる高速化

(1) 負荷状態での実験

今回の実験は無負荷状態で行われた。実際の負荷状態での実験が必要である。そのためには、(2)の冷却の改善が必須である。ただ、工作機等での高速回転加工では、加工抵抗が回転数と共に低下する特性があって、切削に必要な動力はそれ程大きくなく、ほとんどの動力がロータを高速回転させるための無負荷損（風損、摩擦損等）に消費されるため、負荷電力はそれ程大きくないと思われる。

(2) 冷却性能の改善

現状でも冷却は不十分であり、より強力な冷却方法が必要である。対策としては①現状の内部強制空冷の空気流量の増大 ②ステータハウジングにウオータージャケットを付けて液冷（水冷）する。②の液冷は相当効果があると思われるが、真に冷却すべきはロータ部分のため、①と②の両方を併用することが有効と思われる。工作機等では加工用にクーラントを使うことが多いので、それを流用することで、②は比較的容易に実現できるものと思われる。

(3) 高速回転時電力増大の原因究明と対策

本文中でも触れたが、高速回転になると急激に入力電流（即ち入力電力）が増大している。想定される原因としては ①高速回転と温度上昇に伴う軸受隙間や軸受潤滑など、軸受に関連する事項 ②ロータ自体の温度上昇や遠心力による膨張が考えられる。

①については、本軸受はグリース潤滑で通常DN値（D；軸受内径mm，N；回転数rpm）で100万程度可能である。ここで使用している軸受は型番608で、内径φ8のため、温度上昇の問題が無ければ数万rpm程度は十分可能と思われる。軸受以外からの温度上昇により軸受隙間が小さくなって回転トルクが増大している可能性がある。

②については、ロータの温度による膨張の他に、アンバランスによる振れ回りも懸念される。ロータ単体のバランスが必要と思われる。また、モータ発生トルクを大きくするためにロータとステータの隙間を小さく設計して

いるが、振れ周り量との関係から最適な隙間の設定が必要である。現状で隙間が不十分であるならば、ステータ内径を研磨して隙間を広げることが必要である。この際、ロータの回転バランスと共に、ステータ内径の同心度にも注意が必要である。

(4) さらなる高速化

工作機は主軸回転数を上げるほど加工能力が向上するため、さらなる高速化が望まれる。上記(1)～(3)の課題をクリアし、さらにインバータの電圧と出力を増大して対応することになる。

本研究は榎本工業株式会社との共同研究として行われた。また、実験等は卒業研究として卒研生の尾崎翔君、福世高大君により行われた。関係各位に感謝致します。

参考文献

- 1) 恩田 一；“小型ブラシレスモータの高速・センサレス駆動システム”，静岡理工科大学紀要第18巻，P41（2010）。
- 2) 見城尚志，永盛重信著；“新・ブラシレスモータ”，総合電子出版，P79（2000）
- 3) トランジスタ技術 Special No.73；“ブラシレスモータのサーボ回路技術”CQ出版，P38（2001）
- 4) 荻野弘司著；“ブラシレスモータの使い方”オーム社（1995）
- 5) 市川真士他；“拡張誘起電圧モデルに基づく凸極型永久磁石同期モータのセンサレス制御”電学誌D，P1089，Vol.122，No.12（2002）
- 6) 山中建二他；“センサレス制御永久磁石同期電動機の実験特性”平成18年電気学会産業応用部門全国大会講演論文集，P I-407（2006）