

フライホイール向け永久磁石同期電動機の 低損失化構造に関する一考察

田中 賢太*, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

A Consideration on Loss Reduction of the Outer Rotor Type PMSM for Flywheel
Kenta Tanaka, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

1. はじめに

近年、エネルギー貯蔵装置としてフライホイール(以降FW)が注目されている。FWは周囲温度による寿命の劣化がなく、メンテナンス性に優れるという特徴をもつ⁽¹⁾。しかしながら、エネルギーを貯蔵するためにモータの回転状態を維持する必要があるため、待機状態においてモータ損失が発生する。また、FWは現在エネルギー貯蔵デバイスとして主流の化学バッテリーと比較してエネルギー密度が低いという欠点がある。本論文では、FWの低損失化によるエネルギー貯蔵効率向上及びエネルギー密度向上に向け、アウトロータ型の永久磁石形同期電動機(以降PMSM)を製作した。さらに、モータ回転子鉄心を抑える支持材の材質を変更した場合のFW待機時の損失を実験と解析により評価し、ロータ支持材及びモータベンチの構造が損失に与える影響を比較する。

2. モータの設計

図1に試作モータの構造、表1に試作モータの主な仕様を示す。FWの構造としてインナーロータ型とアウトロータ型がある。アウトロータ型はインナーロータ型と比較して大きな慣性モーメントを容易に設計できる。さらに、アウトロータ型ではモータの回転子とFWの慣性体が一体構造となっているため、インナーロータ型のFWと比較して高エネルギー密度化が容易である。したがって、本研究では電氣的損失の低減と高エネルギー密度化を達成するためにアウトロータ型のPMSMを採用する。

次にモータ設計の概要を示す。モータの出力電力はステータとロータのギャップ間磁束に比例する。そこで、磁気装荷法により所望の出力を実現するギャップ間磁束を設計する。ギャップ間の磁束 ϕ は1極あたりの電力 S と基準装荷 ϕ_0 から(1)式で表される。しかし、所望のギャップ間磁束を実現するためのロータ及び磁石の形状を机上計算により求めることは困難であるため、本研究では電磁界解析を用いて仕様を満足するロータ形状を決定する。本設計では、(1)式により算出したギャップ間磁束を満足するロータ形状及び磁石の形状を決定し、所望の仕様を満たすモータを設計する。ここで、 γ は磁気装荷定数、 f は回転周波数である。

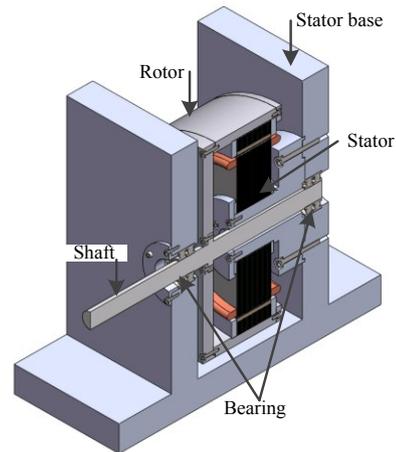


Fig. 1. Configuration of the prototype motor.

Table 1. Specification of the prototype motor.

Diameter of the stator	270 mm
Diameter of the rotor	330 mm
Thickness of the iron core	65 mm
Core material	35JN440
Magnet	N43TS

$$\phi = \left(\frac{S}{f \times 10^{-2}} \right)^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} \times \phi_0 \dots\dots\dots(1)$$

3. 特性評価

<3.1>フリーラン試験による損失算出

試作モータの損失評価はフリーラン試験により行う。これは、FWが回転している状態から電氣的にモータとインバータを切り離し、回転速度の減少割合からFW待機状態の損失を算出する手法である⁽²⁾。FWに貯蔵されるエネルギーは慣性モーメント J と回転角速度 ω を用いて(2)式で計算される。

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 \dots\dots\dots(2)$$

フリーラン試験では、(2)式より算出した貯蔵エネルギーを機械損失と磁石の磁束による損失で熱に変換することにより、回転速度に対するFW待機状態の損失を算出できる。

図2にフリーラン試験より算出した損失解析結果を示す。本試験では、ロータ鉄心を抑える支持材に鋼材 SS400 とアルミ材 A2017 を使用した場合の損失を算出した。実験結果より、回転速度に対する損失は非磁性体のアルミ材を用いたほうが大きいことがわかる。

<3.2>電磁界解析による評価

支持材変更による損失増加の要因を電磁界解析により検証する。本論文では電磁界解析ソフト JMAG Designer(株式会社 JSOL 製)を用いて損失解析を行う。

図3に損失解析に用いるモータモデルを示す。本解析では簡単化のために1/2モデルを使用する。また、解析精度向上のため、モータのみでなくステータベースを考慮した解析を行う。

図4にロータ支持材にアルミ材 A2017 を用いた場合のジュール損失密度の解析結果を示す。これより、ロータ支持材に非磁性体を用いた場合はロータで発生する磁束がステータベースに鎖交し、ロータの回転に伴い磁束密度が変化することにより渦電流損が発生することがわかる。特に、試作モータのように慣性モーメントの向上に有効な扁平形状のモータは漏れ磁束が発生し易いため、漏れ磁束の影響が大きい。

図5に支持材の材質に対するステータベースの損失解析結果を示す。解析条件は、回転速度 1500r/min、ステータベースの材質は SS400 である。解析結果より、ロータ支持材の材質が A2017 材の場合、SS400 と比較してステータベースで発生する損失は20倍程度増加することがわかる。これは、ロータ支持材に磁性体 SS400 を使用する場合は、ロータで発生する磁束がロータ支持材内を循環することでステータベースに漏れる磁束が小さいためである。

モータを FW として扱う場合、ロータ鉄心周辺に金属で構成された慣性体を取り付けることで慣性モーメントの向上を図る。また、FW を密閉容器に格納し、真空引きを行うことで風損の低減を図ることが一般的である。この場合、ロータから漏れた磁束が密閉容器を構成する部材に鎖交することで大きな損失要因となる可能性がある。したがって、ロータ鉄心を支持する部材は磁性体を使用し、ロータから外部へ磁束が漏れない構造とすることが必要である。

4. まとめ

本論文では、FW 向けアウターロータ型 PMSM の構造材に起因する損失について検討を行った。実験及び電磁界解析より、ロータ鉄心の支持材に非磁性体を使用した場合、ロータから漏れる磁束が外部の構造材と鎖交することにより、FW 待機時の損失増加の要因となることを明らかにした。

なお、本研究の一部は NEDO 平成 23 年度課題設定型産業技術開発費助成事業の支援を受けており、関係者各位に感謝の意を表します。

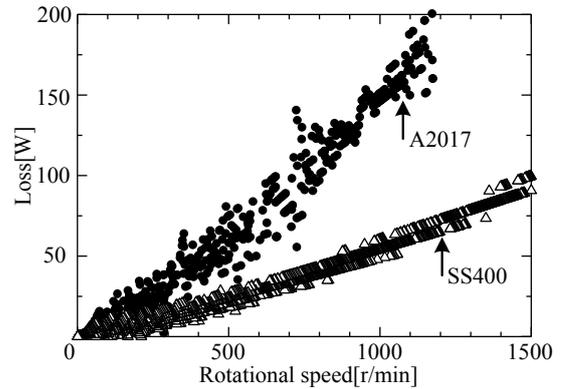


Fig. 2. Experimental results of the free run test.

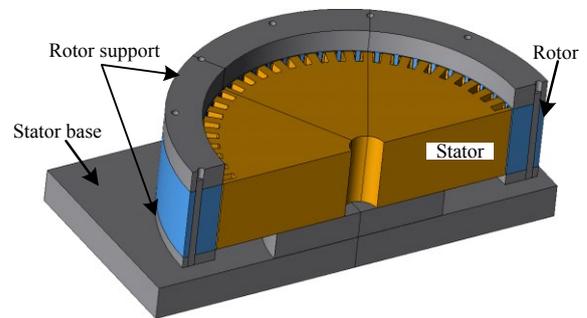


Fig. 3. Analysis model of Iron loss.

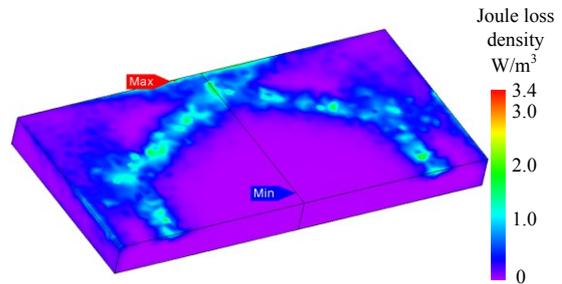


Fig. 4. Analysis results of Joule loss density (Material of rotor support is A2017).

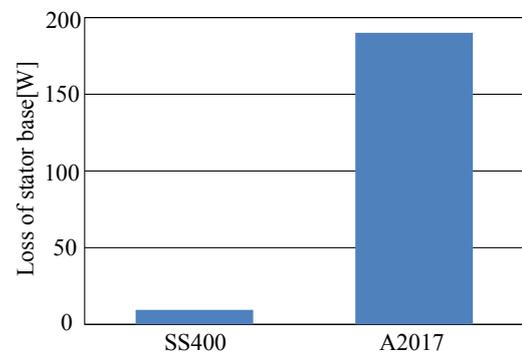


Fig. 5. Comparison of the stator base loss.

文献

- (1) 伊東,石隈他, SPC-13-73,MD-13-15(2013)
- (2) 田中,伊東他, PE-13-033,PSE-13-049,SPC-13-069(2013)