

# 12 V 電源駆動超高速 PM モータの 鉄損と磁石渦電流損に関する検討

和田 哲朗\*, 野口 季彦 (長岡技術科学大学)

Study on Iron Loss and Permanent-Magnet Eddy Current Loss of Ultra High-Speed PM Motor Driven by 12-V Power Supply  
Tetsuro Wada, and Toshihiko Noguchi (Nagaoka University of Technology)

## 1. はじめに

筆者らは車載用過給機の電動化を目指して 12 V 直流電源で駆動される超高速 PM モータの開発を推進してきた<sup>(1),(2)</sup>。本稿では、鉄心材料や駆動電流波形が固定子鉄心損失と回転子磁石渦電流損に及ぼす影響を検討したので報告する。

## 2. 超高速モータの仕様

本稿で検討する超高速モータの断面図を図 1 に示す。本モータの定格は回転数 150,000 r/min, 出力 1.5 kW, 瞬時過負荷耐量は 200 % である。このような仕様のもとに設計されたモータパラメータを表 1 に示す。低電圧, 大電流, 高周波による駆動を実現するため, 大きな空隙と巻数 2 の集中巻構造を採用している。

インバータ相あたりの出力電圧は下式で表される。

$$V = R_{FET} I + RI + j\omega LI + E \quad (1)$$

ここで,  $R_{FET}$  はインバータ MOSFET (2 mΩ/相) でのオン抵抗,  $R$  は巻線抵抗,  $L$  は巻線の同期インダクタンス,  $E$  は誘起電圧である。これより, 12 V の直流電源で印加できる最大相電圧 4.9 V<sub>rms</sub> に対して, 1.5 kW 定格出力時で 4.4 V<sub>rms</sub>, 200%過負荷時でも 4.8 V<sub>rms</sub> となるため, 電圧飽和を来たすことなくモータを駆動することができる。

## 3. 電磁界解析に基づく損失分析

### <3・1> 駆動電流波形

一般に, PM モータは電圧形インバータを用いて正弦波電流で駆動される。特に, 超高速 PM モータでは基本波周波数が 2500 Hz と高く, 同期インダクタンスも小さいので, 電流リップルを小さくするために高周波キャリアによる PWM が必要である。このような問題を解決するため, 擬似電流型インバータを用いて 120° 通電波形による駆動 (6 ステップ駆動) も行われる。120° 通電駆動は 60° の分解能で磁極位置を検出するだけでよいため, 専らホール素子を用いた簡便な磁極位置センサが用いられる。

本稿ではこれら二つの駆動電流波形について損失分析を行い, その相違が損失に及ぼす影響を検討する。

### <3・2> 固定子鉄心材料

上記のように基本波周波数が 2500 Hz と高いので, 高周

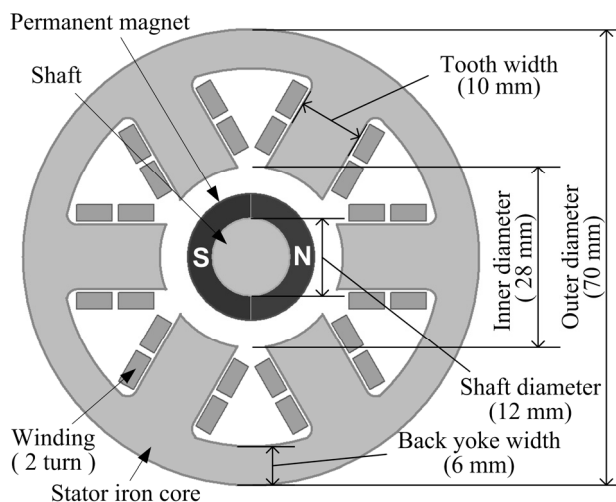


図 1 超高速モータの断面図

Fig. 1. Cross section diagram of ultra high-speed motor.

表 1 超高速モータの電気的パラメータ  
Table 1. Electrical parameters of ultra high-speed motor.

Rated voltage	4.42 V <sub>rms</sub> /phase
Rated current	122 A <sub>rms</sub>
Number of phases	3 phase
Fundamental Frequency	2500 Hz
Synchronous inductance	0.28 μH/phase
Winding resistance	0.2 mΩ/phase

波領域における鉄損抑制に効果的な固定子鉄心材料を検討する。具体的には JFE 製 10JNEX900 (0.1 mm 厚, 6.5 %珪素鋼板) と 10JNHF600 (0.1 mm 厚) の 2 種類を検討対象とする。

### <3・3> 損失分析結果

図 2 に損失解析結果を示す。(a)は理相正弦波駆動の場合, (b)は 120° 通電矩形波駆動の場合で, EX 鉄心と HF 鉄心のそれぞれについて無負荷時, 定格出力時, 200 %過負荷時における固定子鉄損と回転子磁石渦電流損を求めた。

#### ① 固定子鉄損

固定子鉄損は磁束密度の時間的変化によって発生するが, 磁束密度のピーク値と周波数が高いほど大きくなる。無負荷時の固定子鉄損は回転子磁石の回転磁界によるものだけで

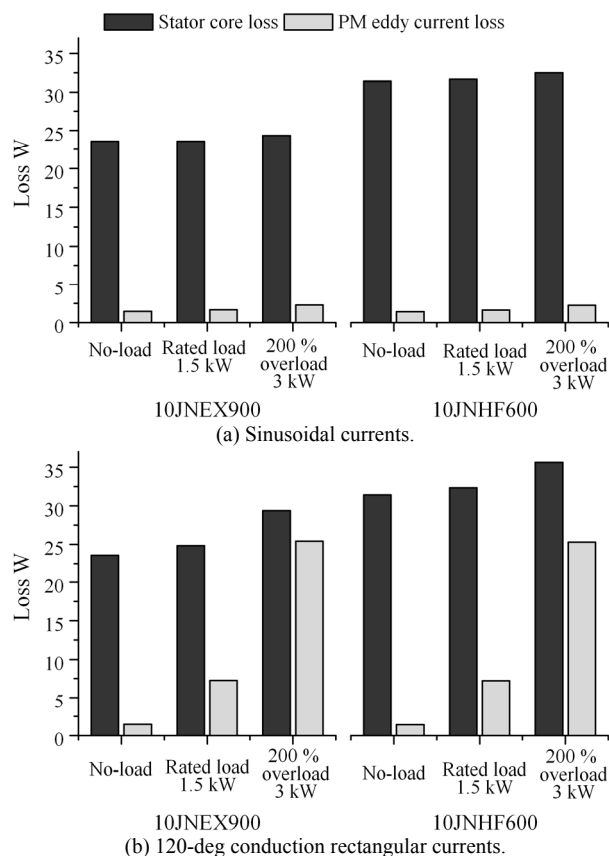


図2 損失解析結果  
Fig. 2. Loss analysis results.

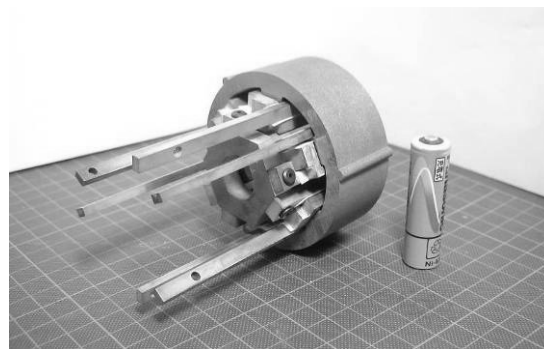
あるため、負荷時と無負荷時の損失差は電機子反作用によって生じた損失である。図 2(a)で負荷に関わらず固定子鉄損にほとんど変化が見られないことから、回転子磁石による磁束が鉄損の主因であることがわかる。一方、図 2(b)では負荷に対する鉄損の増大が見られるが、 $120^\circ$  通電波形に含まれる低次時間高調波成分に起因する損失であると考えられる。

EX 鉄心と HF 鉄心の鉄損を比較すると、駆動電流波形によらず EX 鉄心の方が小さく、 $2500\text{ Hz}$  程度の基本波周波数に対して優位性をもっている。 $120^\circ$  通電波形で駆動した場合の負荷に対する鉄損の増大は相対的に HF 鉄心の方が小さいが、これは HF 鉄心が  $5000\text{ Hz}$  以上の高周波領域で鉄損抑制効果が著しいためである。しかし、鉄損の絶対量としては HF 鉄心が EX 鉄心を凌駕することはない。

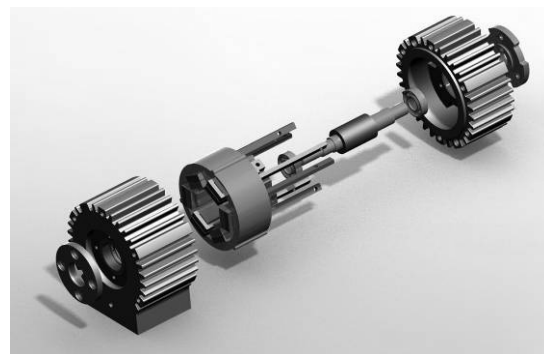
## ②回転子磁石渦電流損

PM モータの回転子磁石渦電流損は集中巻構造に起因する空間高調波（パーミアンス変動）によって生ずる。本超高速 PM モータは同期インダクタンスを低減するため、 $8\text{ mm}$  の大きな空隙（磁石厚と機械的隙隙）を確保しているが、これにより空間高調波を緩和するフィルタ効果も有している。

正弦波駆動の場合、回転子磁石渦電流損の発生要因は空間高調波だけであるため、図 2(a)と(b)の損失差は  $120^\circ$  通電波形の時間高調波に起因すると考えられる。この損失は空



(a) Photograph of stator iron core and windings.



(b) Computer graphics of ultra high-speed motor assembly.

図3 超高速モータのプロトタイプモデル  
Fig. 3. Prototype of ultra high-speed motor.

間高調波に起因するものと比べ極めて大きく、負荷に応じて支配的となる傾向が顕著である

## 4. 試作機の概要

試作した超高速モータの固定子写真を図 3(a)に、モータの全体構成を(b)に示す。固定子巻線は銅パルク材からティースの断面形状と同様に切り出したものを用い、極めて緊密な磁気結合を実現している。また、1ターン目と2ターン目の巻線は銀ロウ付によって短絡し、接合部の抵抗増加を抑制している。

## 5. まとめ

本稿では鉄心材料や駆動電流波形が固定子鉄損と回転子磁石渦電流損に及ぼす影響を電磁界解析を通じて検討した。その結果、以下の結論が得られた。

- ・ HF 鉄心は  $120^\circ$  通電波形が含む時間高調波に起因する鉄損増大の抑制には効果的であるが、固定子鉄損の絶対量では EX 鉄心が優れている。
- ・ 大空隙、集中巻構造の超高速 PM モータでは、空間高調波ではなく駆動電流波形に含まれる時間高調波が回転子磁石渦電流損の主因である。

今後、試作機を用いて実験的に運転特性を確認するとともに、電磁界解析結果との照合を行っていく所存である。

文 献

- (1) 鹿野・和田・野口：「 $12\text{ V}$  電源駆動超高速 PM モータの開発」電気学会全大、5-010 (2008)
- (2) 鹿野・和田・野口：「 $12\text{ V}$  電源駆動超高速 PM モータの効率とパワー密度向上に関する検討」電気学会全大 5-011 (2008)