

12 V 電源駆動超高速 PM モータの開発

鹿野 将* 和田哲朗 野口季彦 (長岡技術科学大学)

Development of Ultra High-Speed Permanent-Magnet Motor Driven by 12-V Power Supply
Masaru Kano*, Tetsuro Wada, and Toshihiko Noguchi (Nagaoka University of Technology)

1. はじめに

筆者らは、車載用スーパーチャージャの電動化を目指して超高速永久磁石 (PM) モータの開発を推進してきた。このモータは低電圧、大電流、高周波駆動となるため、軸受の摩擦損やインバータの導通損も考慮に入れて最適設計を行わなければならない⁽¹⁾。ここでは PM モータのパーミアンス係数に着目して定格 1.5 kW、150000 r/min の超高速モータを設計試作し、無負荷運転およびロータイナーシャを利用した動的トルク特性の実験を行ったので報告する。

2. 超高速モータの要求仕様と最適設計

1500 cc 程度のガソリンエンジンに搭載するスーパーチャージャへの適用を想定し、その場合の設計仕様を表 1 に示す。表 2 は本論文で検討する超高速表面磁石形同期モータ (SPMSM) の電氣的・機械的パラメータをまとめたものである。

SPMSM の駆動特性は永久磁石の B-H 曲線上における動作点を決定するパーミアンス係数 p_u に大きく依存する。SPMSM の場合、 p_u は以下のように近似することができる。

$$p_u \approx \ell_m / \ell_g \quad (1)$$

ここで ℓ_m は磁石厚さ、 ℓ_g は空隙長を示す。基本的に p_u は誘起電圧に比例するため、 p_u を大きくすると銅損は低減されるが、磁石から発生する磁束の変化が大きくなるので鉄損は逆に増加するというトレードオフの関係がある。そこで、表 3 に示したように p_u が異なる 5 形状のモータを想定し電磁界解析に基づく比較検討を行う。

一方、インバータを含めたモータ駆動システムの総合効率を改善するため、インバータ損失も考慮して検討しなければならない。このとき、モータ駆動システムの最大効率条件は以下のように記述することができる。

$$W_i^{st} + W_e^{mag} + W_m = W_c + W_{Ron} \quad (2)$$

ここで W_i^{st} は固定子鉄心の鉄損、 W_e^{mag} は永久磁石内の渦電流損、 W_m は機械損 (ベアリング摩擦損)、 W_c は固定子巻線の銅損、 W_{Ron} はインバータの導通損である。上式左辺の項はモータ駆動電流に依存せず、右辺の項は駆動電流に二乗比例する。インバータには導通損のほかスイッチング損も存在するが、スイッチング損は駆動電流にほぼ一乗比例であるため、(2)の最大効率条件には影響を及ぼさない。本設

表 1 超高速モータの設計仕様

Table 1. Design specification of ultra high-speed motor.

Assumed engine	1500 cc class
Rated output power	1.5 kW
Rated speed	150000 r/min
Rated torque	0.0955 Nm
Overload capacity and duration	200 %, 1 s

表 2 開発したモータの電気・機械パラメータ

Table 2. Electrical and mechanical parameters of developed motor.

Rated voltage	2.96 V/phase
Rated current	195 A
Number of phases	3 phase
Number of poles	2 poles
Stator configuration	Concentrated winding structure
Winding configuration	1 turn, 2 parallels per phase
Number of stator slots	6 slots
Stator outer diameter	92 mm
Stator inner diameter	28 mm
Stator stack length	30 mm
Stator tooth width	10 mm
Electromagnetic steel plates	10JNEX900 (0.1-mm thick, 6.5-% silicone, $\mu_k=23000$, $B_{max}=1.8$ T)
Rotor shaft diameter	12 mm
Permanent magnet	N-42SH Nd-Fe-B (Br=1.28 T, bHc=955 kA/m, $BH_{max}=310$ kJ/m ³)
Bearings	Angular ceramic-ball bearing with grease lubrication

表 3 5 種類のパーミアンス係数による設計条件

Table 3. Design conditions of five permeance coefficients.

Design type	#1	#2	#3	#4	#5
Air gap length ℓ_g (mm)	6	5	4	3	2
Permanent magnet thickness ℓ_m (mm)	2	3	4	5	6
Permeance coefficient	0.33	0.6	1	1.67	3

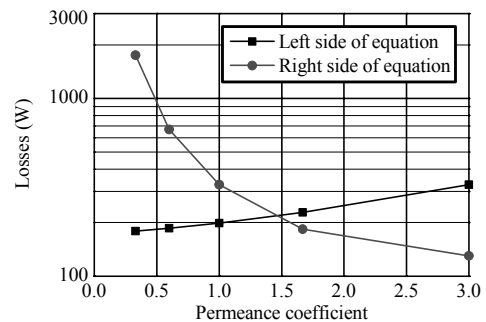


図 1 パーミアンス係数に対する損失特性

Fig. 1. Loss characteristics with respect to permeance coefficient.

計では(2)を満足する p_u の最適値を求め、モータ駆動システムの効率最大化を行う。図1に p_u の変化に対する(2)の右辺に相当する項と左辺に相当する項の解析結果を示す。この図より、 $p_u = 1.5$ が最適値であり、(2)を満たすことから総損失が最小になることがわかる。したがって、 $p_u = 1.5$ に最も近い#4の形状 ($\ell_m = 5$ mm, $\ell_g = 3$ mm) をもつモータを試作することとした。図2は#4形状における定格運転時のモータ損失分離結果(計算値)である。図に示すように、ベアリングの機械損が77.4%と支配的であり、鉄心鉄損と永久磁石の渦電流損は全体の20%に満たない。もし、機械損を除いたとすれば、純電氣的なモータ効率は95%を上回る。

3. 試作した超高速モータと実験結果

図3に試作した超高速PMモータの構造を示す。主要部品としてベアリングカバー、固定子フレーム、コイルスペーサ、ベアリング、回転子、固定子鉄心、ベアリングブラケットで構成される。回転子の軸振動対策のため、2つのベアリング間距離は60mmとしており、定格回転数以下では機械的共振を生じないように設計した。基本的な運転特性を確認するために、擬似電流源形インバータを用いて試作機の試験を行った。このインバータは120度通電の方形波電流を出力するが、無負荷120000 r/minの運転を行った結果、モータ電流はホールセンサ信号に同期した良好な120度通電波形であることを確認した。さらに出力トルクの制御性を確認するために加速試験を行った。一般に、15000 r/minのような超高速運転での機械出力の測定は困難であるため、試作機の出力トルクを速度ステップ応答時の加速度と回転子イナーシャの設計値から推定した。図4は15000 r/minから50000 r/minへの速度ステップ応答の様子であるが、加速時の最大出力トルクは定格値の半分0.05 Nmであると推測される。同図に示されるように、推定された出力トルク波形はリップルが大きいが、その包絡線や速度波形から速度ループのPI制御器が線形にモータを制御していることが窺われる。

4. まとめ

本論文では、定格1.5 kW、15000 r/minの超高速PMモータの開発について述べた。このモータは車載用スーパーチャージャへの適用を想定しているため、低電圧、大電流、高周波運転という制約の下で最適設計を行わなければならない。ここではパーミアンス係数の最適化により、モータ効率の最大化を図った。また、試作機を製作して無負荷120000 r/minでの運転と50000 r/minへの速度ステップ応答試験などを行い、良好な運転特性を確認した。

文献

- (1) 鹿野・野口：「種々の損失を考慮した超高速モータ駆動システムの効率改善に関する一考察」電学新潟支所大会，IV-13 (平18)

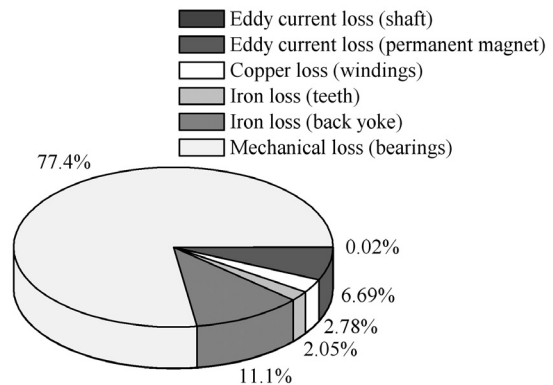


図2 #4形状における損失計算結果
Fig. 2. Numerically calculated losses of design type #4.

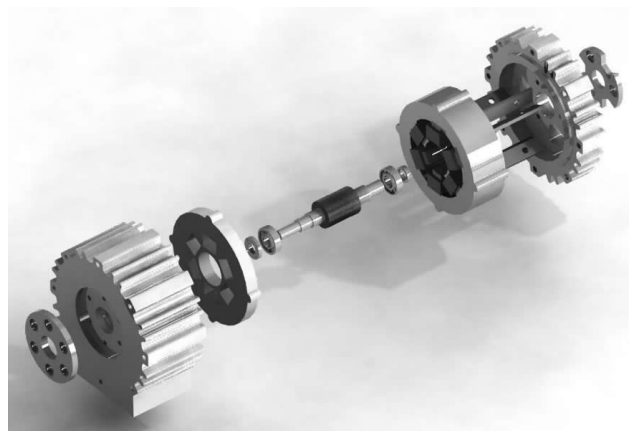


図3 モータ部品の3次元構造図
Fig. 3. Three-dimensional computer graphic of motor assembly.

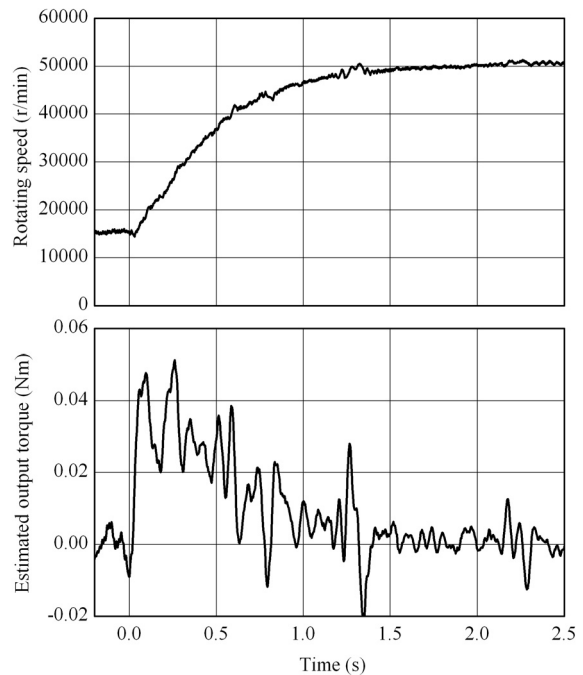


図4 15000-50000 r/min速度応答と推定出力トルク
Fig. 4. Speed step response from 15000 to 50000 r/min and experimentally estimated output torque.