

# 15 kW, 150,000 r/min PM モータの プロポーションに関する検討

藤田康平\*, 野口季彦 (静岡大学)

Study on proportion of 15 kW, 150,000 r/min PM motor  
Kohei Fujita\*, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

## 1. はじめに

近年、パワー密度を高めた高出力モータが盛んに開発されている。高パワー密度化の観点から希土類磁石を用いた永久磁石同期モータ (PMSM) がもっぱら採用されており、社会の隅々にまで普及している。モータの出力を増大するにはトルクと回転速度の増加を図らねばならないが、一般に前者の改善ではモータ体格が大きくなる傾向がある。そこで、さらなる高パワー密度化を達成するためには、モータの超高速 (高周波駆動) 化が有効である。しかし、超高速モータの場合、電圧や電流に加えて機械的制約から様々な問題が存在する。そこで、本稿ではそれらの問題を踏まえつつ、定格 15 kW, 150,000 r/min の PM モータについて 3 種類のプロポーションを検討したので報告する。

## 2. 超高速モータの要求仕様と設計

### <2.1> 要求仕様と解析方法

設計する 15 kW, 150,000 r/min PM モータの要求仕様を表 1 に示す。また、モータプロポーションに関する機械的制約を図 1 に示す。表 1 の要求仕様において、指定された直流バス電圧、定格電流の条件を両立させる設計は理論上不可能である。そこで、これらのうちどちらか一方を守り、かつ、図 1 の許容される範囲でモータをいくつか構築して、その中から 3 種類のモータモデルを採り挙げる。これら 3 モデルの主要諸元を表 2 に示す。また、今回検討する超高速モータではロータ直径が 37.3 mm で周速が音速に達するので、これを上限としてプロポーションを選択した。3 モデルでどのように損失や減磁特性が変化するか調査するため JMAG-Designer 17.0™ を使用して解析を行った。

### <2.2> 基本設計方針

15 kW, 150,000 r/min PM モータの径方向断面を図 2 に示す。検討するモータ全てで表面磁石形同期モータ (SPMSM) を採用した。これは、誘導モータやリラクタンスモータのように励磁電流が必要なく、効率が良いためである。また、ロータ直径やシャフト直径の制約から埋め込み磁石形同期モータ (IPMSM) とすることは困難で、回転子構造が簡単な SPMSM とした。ロータ磁極はインバータの駆動周波数を低減するため 2 極とする。磁石は最大エネルギー積  $BH_{max} = 350 \text{ kJ/m}^3$  のネオジウム磁石を使用している。これによりワイ

ドエアギャップ構造が可能となり、周方向のパーミアンス変動を小さくすると同時に、同期インダクタンスを減らすことができる。また、超高速モータにおいてはパーミアンス係数が小さいほど、損失が小さくなる傾向があるので、パーミアンス係数は 1.1 で統一した。ステータに関しては、漏れ磁束を低減することと、パーミアンス変動を小さくして、ロータの熱減磁などの原因となる磁石渦電流を抑制するため、集中巻 6 ティース 6 スロット構造とする。ステータ巻線には丸線を使用することを想定し、ティース先に厚さ 3 mm のフレットを設けている。

表 1 15 kW, 150,000 r/min PM モータの要求仕様  
Table 1. Design specifications of 15 kW, 150,000 r/min PM motor.

Rated output power	15 kW
Rated speed	150000 r/min
Rated torque	0.955 Nm
DC bus voltage	Less than 259.2 V
Rated current	75 A (Over load 200%)
Maximum current	150 A
Rotor diameter	Less than 37.3 mm

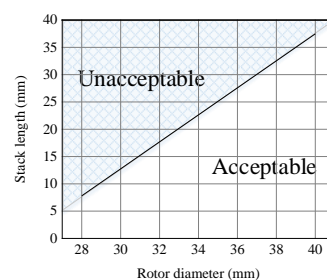


図 1 15 kW, 150,000 r/min PM モータの機械的制約  
Fig. 1. Mechanical constrains of 15 kW, 150,000 r/min PM motor.

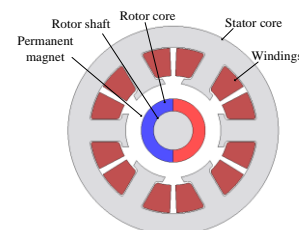


図 2 15 kW, 150,000 r/min PM モータの径方向断面  
Fig. 2. Cross section of 15 kW, 150,000 r/min PM motor.

### 3. 電磁界解析条件と解析結果の比較

検討する 3 モデルの性能を比較する。モータを評価するうえで重要になる性能として損失と減磁特性がある。損失については全損失が低いことが望ましいが、定格運転時にモータ効率が最大となることも重要である。減磁特性に関しては減磁率が低いほど望ましい。このような背景から、本稿では損失、最大効率動作点、減磁特性の観点から解析結果を比較する。損失については、磁石とコイルの温度が 70 °C のときを想定する。一方、モータの最大効率条件は下式で表される。

$$W_i + W_{mag} = W_c \quad (1)$$

ここで、 $W_i$  はステータ鉄心の鉄損、 $W_{mag}$  は永久磁石内の渦電流損、 $W_c$  はステータ巻線の銅損である。この式より鉄損と銅損の比率がほぼ 1:1 になるとき最大効率を得られることがわかる。今回はこの条件に基づき解析結果を比較評価する。減磁特性については、磁石温度 200 °C で  $-d$  軸に最大電流が流れたときを想定し、減磁前と減磁後の 20 °C 無負荷誘起電圧を比較する。総合損失の比較を図 3、鉄損と銅損の比率を図 4、減磁特性の比較を図 5 に示す。解析結果から、損失に関しては #1 が最も優れている。他の 2 モデルより電流が小さいため銅損が少なくなっており、ロータ側面積が #3 と比較して小さいため、総合的な損失が小さくなっていると考えられる。また、定格運転が最大効率動作点に最も近いモデルは #2 である。他のモータと比較して電流が大きくロータ側面積が小さいため、銅機械寄りになっているためである。減磁特性に関しては #3 が最も優れている。他のモータと比較して磁石が厚いので保持力が大きくなっており、かつ、巻数も少ないので逆磁界が小さくなっているためと考えられる。しかし、減磁に関しては、減磁率が最低でも 17.2% となっており、厳しい値となっていることがわかる。

### 4. まとめ

本稿では 15 kW, 150,000 r/min の超高速 PM モータのプロポジションを検討し、3 つのモータモデルに関して損失、最大効率動作点、減磁特性の観点から述べた。解析結果から、3 つのモータモデルはトレードオフの関係をもっており、すべての評価項目を高水準で達成することは非常に困難である。また、その中でも減磁対策が超高速モータにおいて喫緊の検討課題である。今後は、採用するモータを決めステータ構造の詳細設計を進めていく所存であり、実機の完成を目指す。

#### 文献

- (1) 鹿野・和田・野口「12V 電源駆動超高速 PM モータの開発」電学全大, 5-010 (2008)

表 2 超高速モータモデルの主要諸元

Table 2. Major specifications of ultra high-speed motor models.

	#1	#2	#3
DC voltage	358.8 V	258.4 V	243.4 V
Rated current	75 A	107.2 A	107.2 A
Rotor diameter	35.1 mm	34.2 mm	37.2 mm
Stack length	25.2 mm	30.0 mm	30.3 mm
Winding	3 7	29	21
Shaft diameter	21 mm	21 mm	21 mm

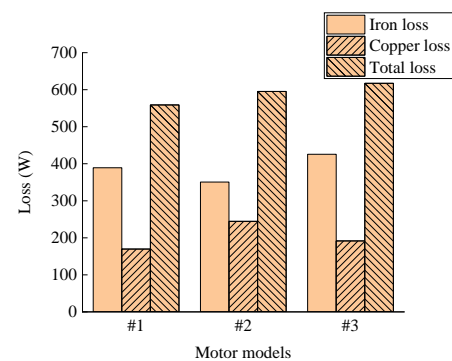


図 3 総合損失の比較

Fig. 3. Comparison of total power losses.

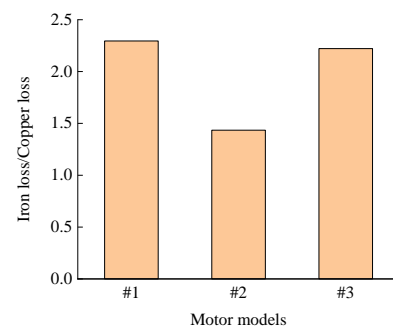


図 4 鉄損と銅損の比率

Fig. 4. Comparison of iron and copper loss ratio.

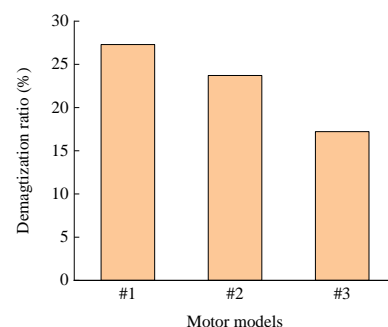


図 5 減磁特性の比較

Fig. 5. Comparison of demagnetization characteristics.