15-kW, 150,000-r/min 超高速 PM モータの

電気機械両立設計

藤田康平* 野口季彦(静岡大学)

Electrical and Mechanical Compatible Design of 15-kW, 150,000-r/min Ultra-High-Speed PM Motor Kohei Fujita*, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

This paper describes an electrical and mechanical compatible design of an ultra-high-speed permanent magnet (PM) motor of which rated output power is 15 kW and rated speed is 150,000 r/min. In the paper, two candidates of the rotor structure have been investigated from the viewpoint of electrical and mechanical compatibility, i.e., a cylindrical hollow PM (standard SPM) rotor and a solid PM rotor with a titanium alloy sleeve. Both of the motors can achieve high efficiency over 96 % and high power density over 55 W/cm3, but the latter has a remarkable anti-demagnetization characteristic less than 1 %. On the other hand, in order to investigate dependency of the shaft material onto the electromagnetic characteristics, three kinds of materials are employed for the shafts and are examined through 3-D electromagnetic analysis. As a result, stainless steel is the best choice for the shaft material and can satisfy the electrical and mechanical compatibility with high torque generation, high efficiency, high power density, high anti-demagnetization characteristic, and so forth.

キーワード:表面磁石形同期モータ,高速モータ,中実磁石,減磁特性 Keywords: Surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM), high-speed motor, solid magnet, demagnetization characteristic

1. はじめに

京都議定書が発表されて以来,環境保全,省エネルギーの 観点から世界各国で家電製品や輸送などに使用される動力 源の電動化に向けた動きが進んでいる。モータはこのよう な電動化の動きの中で重要な役割を担う。そのため,高出 力,高効率化に加え,高パワー密度と自己修復性を両立した モータの設計が望まれている。高パワー密度化と高効率化 の観点から希土類磁石を用いた永久磁石同期モータ (PMSM)が広く採用されており,盛んに開発されている。 モータの出力を大きくするためには,いくつかの電気機械 的制約の下でトルクと回転数の増加が必要である。しかし, 一般的に前者を増加させるとモータの体格が大きくなる傾 向がある。そこで,更なるモータの小型化にはモータの超高 速化(超高周波化)が有効である。

しかし,超高速モータには電気機械的問題が多く存在す る。電気的問題は,高周波駆動することによって増加する磁 石の渦電流損による効率の悪化,熱減磁などである。機械的 問題は軸振動や共振周波数による回転子軸方向長さの制 約,周速や径方向に発生する遠心力の観点からくる回転子 直径の制約など厳しい設計制約である。そのため,高速モー タにおいては,一般的なモータの形状で電気的特性を高水 準に保つことは困難である。以上の問題から,超高速モータ において電気機械両立設計を検討することは重要な課題で ある。

そこで、筆者らは同期インダクタンスを低減するために 極端に大きなエアギャップを特色とする超高速モータの研 究を行ってきた。大きなエアギャップ構造により必要な出 力仕様を達成しつつ、モータ効率においても96%以上を達 成することが可能である。しかし、大きなエアギャップで設 計するモータ構造では、電気機械的特性の犠牲なく回転子 構造が制限される中でも減磁特性を向上する設計が困難で ある^[8]。そこで、本稿では、減磁特性を改善する回転子構造 を検討するとともに、提案するモータとこれまで設計して きたモータの電気的特性を比較した。また、検討した回転子 構造においてシャフトの材質によって電気的特性が変化す る原理と、それを踏まえた適切なシャフト材料を検討した。 以上を踏まえて、15-kW、150,000-r/min 超高速 PM モータに ついて電気機械両立設計を行ったので報告する。

2. 超高速モータの開発目標と基本設計概念

<2.1> 超高速モータの開発目標

15-kW, 150,000-r/min PM モータの開発目標を表1に示す。 設計する超高速モータは 15 kW の定格出力と定格回転数 150,000 r/min の仕様をもっており, 150%の瞬時過負荷耐量 を満足するように設定した。また,回転子の周速が音速を超 えると衝撃波等の危険性があるため,回転子外径を回転子 周速が音速以下となるよう 43.3 mm 以下としている。

Tuble 1. Design specifications of 15 kW, 150,000 l/min 1 W motor.				
Rated output power	Over 15 kW			
Rated speed	150,000 r/min			
Rated torque	Over 1 Nm			
Rated efficiency	Over 95 %			
Maximum power density	Over 50 W/cm ³			
Demagnetization rate	Within 1 %			
DC bus voltage	Lower than 250 V			
Rated current	77 A (over load 150%)			
Maximum current	115 A			
Rotor diameter	Smaller than 43.3 mm			

表1 15-kW, 150,000-r/min PM モータの開発目標 Table 1 Design specifications of 15-kW 150 000-r/min PM motor

表 2 検討する超高速モータの基本設計概要 Table 2. Fundamental design outline of ultra-high-speed PM motor.

Motor type	Surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM)				
Number of phases	3 phases				
Number of poles	2 poles				
Stator configuration	Concentrated winding structure				
Permanent magnet	N43TS Nd-Fe-B ($Br = 1.34$ T, $H_{CB} = 963$ kA/m, $BH_{max} = 350$ kJ/m ³)				
Electromagnetic steel plates	20HX1300 (0.2 mm thick, 0.54 μΩm, $B_{max} = 1.5$ T)				

<2.2> 超高速モータの基本設計概念

表2に検討する超高速モータの設計パラメータを示す。 また,図1に中空磁石形超高速モータの径方向断面図を示 す。検討する超高速モータは表面磁石形同期モータ (SPMSM)を採用する。それは巻線界磁形同期モータや誘導 モータと比較して二次側巻線が存在せず効率が良いためで ある。また,検討する超高速モータでは回転子外径が制限さ れており, 遠心力に対する機械的強度の観点から埋込磁石 形同期モータ(IPMSM)とすることは困難であるため SPMSM を採用する。回転子磁極は電気角周波数を低減する ため2極とする。磁石は最大エネルギー積 BHmax=350 kJ/m³ のネオジム磁石を使用している。そのため、大きなエアギャ 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 くするとともに、同期インダクタンスを減らすことが可能 である。固定子構造は漏れ磁束を低減することと,減磁の原 因となる磁石渦電流損を低減する目的から,集中巻 6 ティ ース 6 スロットの構造とする。固定子巻線は丸線を使用す ることを想定し、ティース先端には厚さ3mmのフィレット を設ける。

3. 中実磁石形超高速モータの原理と構造

<3.1> 中空磁石形モータの減磁特性とパーミアンス係数

減磁特性の改善法として,パーミアンス係数を上げる手 法がある。パーミアンス係数とは図 2 のように磁石の動作 点を決める係数であり,次式で表される。



図 1 中空磁石形超高速 PM モータの径方向断面図 Fig. 1. Cross section of hollow PM motor.



図2 磁石の B-H 曲線と動作点 Fig. 2. B-H characteristic and operating point of permanent magnet.







$$p_{u} = \frac{l_{m}}{a_{m}} \frac{a_{g}}{K_{c} l_{g}} = \frac{l_{m}}{D_{m} - l_{m}} \frac{D_{m} + l_{m}}{K_{c} l_{g}}$$
(1)

ここで, pu:パーミアンス係数, lm:磁石厚さ, am:磁石 平均断面積, lg:エアギャップ長, Kc:カーター係数, ag: エアギャップ平均断面積, Dm:磁石の外径である。中空磁石 形超高速モータでは,大きなエアギャップ構造を採用して いるため lgが大きい。また,超高速モータは軸振動が懸念さ れるため,シャフト径を大きくとり剛性を高める必要があ る。そのため、中空磁石の厚みが小さくなって lm が小さく なり, am が大きくなるのでパーミアンス係数が小さくなる。 この結果,減磁特性が悪化する。

<3.2>中実磁石形モータの構造と解析方法

本稿では大きなエアギャップ構造のままパーミアンス係 数を上げるモータ構造として中実磁石形モータを検討する。

図 3 に中実磁石形超高速モータの径方向断面図を示す。 中実磁石を採用することで *lm* を大きくし, *am* を小さくす ることができるので,エアギャップを大きくしたままパー ミアンス係数を上げることが可能である。

中実磁石形超高速モータの軸方向回転子断面図を図 4 に 示す。超高速モータにおいて SPMSM を採用する場合,遠心 力による磁石の飛散を防ぐため保護管を設ける。検討する 中実磁石形超高速モータでは,保護管に機械的強度が高い チタン合金を使用しており,シャフトと磁石を保護管に圧 入して,保護管で両軸端を連結する構造となっている。また, 中実磁石を使用するとシャフト部分が全て磁石になるため, 電気的ギャップが格段に大きくなり,同期インダクタンス を更に低減することができる。

本稿では,図1に示した中空磁石形モータ#1と図3,図 4に示した中実磁石形モータ#2の電気的特性を比較した。 設計したモータの特性を比較するための電磁界解析ソフト は JMAG-Designer 18.0TMを使用する。

4. 電磁界解析条件と解析結果の比較

比較する中空磁石形超高速モータ#1と中実磁石形超高速 モータ#2の設計パラメータと主要諸元を表3に示す。モー タプロポーションに関しては、両モデルとも扁平な形状で ある。また、両モデルとも磁石磁束をより多く固定子に鎖交 させるために、固定子オーバーハングを2mm設けている。 両モデルとも大きなエアギャップの効果から、モータのイ ンダクタンスを37μHと小さくすることができる。しかし、 #2のモデルは同期インダクタンスが小さくなっているにも 関わらず、#1と同等のインダクタンスであることから漏れ インダクタンスが大きいと考えられる。また、固定子のバッ クヨーク、ティース部分の磁束密度は約1.4Tで揃えている。 検討した2つのモータで95%以上の効率と55W/cm³以上 のパワー密度を達成した。

2 つのモータを評価する上で重要になる評価指標として 減磁特性と損失が挙げられる。減磁特性に関しては減磁率 を1%未満に抑えることが望ましい。損失に関しては全損失

表 3 比較するモータの設計パラメータと主要諸元 Table 3. Design parameters and major specifications of motor models.

<u> </u>	<i>y</i> 1		
Motor model	#1 (hollow PM)	# 2 (solid PM)	
Rotor outer diameter	37.2 mm	39.0 mm	
l_m	8.1 mm	14 mm	
l_g	10.7 mm	5.55 mm	
Permeance coefficient	1.1	3.3	
Number of winding turns	22	22	
Winding space factor	50.8 %	50.8 %	
Current density	4.78 A (rated operation)	4.78 A (rated operation)	
Protection sleeve	Glass fiber (0 Ωm)	Titanium alloy (2.3 μΩm)	
Stator winding resistance	5.5 mΩ	5.3 mΩ	
Stator winding inductance	37 µH	38 µH	
Efficiency at rated operating point	97.4 %	96.9 %	
Maximum power density	57.9 W/cm ³	60.4 W/cm ³	





(a) #1
(b) #2
図62モデルの減磁解析後の磁石磁束密度分布
Fig. 6. Flux density distribution of permanent magnets on demagnetized situation

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。

このような背景から、本稿では減磁特性,損失,最大効率 動作点についての解析結果を比較する。減磁特性について は、磁石温度 200 ℃で-d 軸に最大電流が流れたときを想 定し、減磁前後の20 ℃無負荷誘起電圧を比較する。損失と 効率に関しては、モータの温度が75 ℃のときを想定する。 また、ある回転数でのモータの最大効率運転条件は下式で 表される。

$$W_s + W_r = W_c$$

ここで、W_s は固定子で発生する鉄損、W_r は回転子で発生 する鉄損、W_cは固定子巻線の銅損である。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が得られるこ 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。

(2)

減磁特性の比較結果を図 5 に示す。2 モデルの減磁解析 後の磁石磁東密度分布を図 6 に示す。図 5 から中空磁石形 モータ#1 の減磁率 11.7%と比較して、中実磁石形モータ#2 の減磁率 0.2%は 1/100 以下である。実際に、図 6 から#1 の 磁東密度分布は磁石中央の内側部分が激しく減磁している のに対して、#2 は減磁している様子が見られない。よって 磁石を中空形状から中実形状にすることにより、減磁特性 の大幅な向上が可能であることを確認した。

定格運転時の総合損失の比較と損失の内訳を図7, #2の 定格運転時の鉄損分析結果を図8,保護管に発生する渦電流 損の内訳を図9に示す。図7より, #1の方が#2より全損 失が小さいことがわかる。これは#2の鉄損の大きさに起因 しており,その中でも保護管に使用されているチタン合金 の渦電流損が主要な原因である。

図8より中実磁石形超高速モータ#2において,保護管の 渦電流損は全鉄損の28.7%(117.8W)を占めており,鉄損 増加の主因であることがわかる。これは#2の鉄損の大きさ に起因しており,その中でも保護管に使用されているチタン 合金の渦電流損が主要な原因である。この保護管渦電流損の 原因としては,電機子磁束とティースとスロット開口部にお けるパーミアンス変動に起因するスロットリプルによる空 間高調波が考えられる。

図9から磁石磁束による渦電流損の割合が小さく,電機 子磁束による渦電流損が59%を占めており支配的であるこ とがわかる。本超高速モータは大きなエアギャップ構造を 用いているので,パーミアンス変動による影響が小さい反 面,電機子の漏れ磁束が保護管に鎖交しやすい。しかし, 保護管に使用されているチタン合金は比熱や熱伝導率が小 さいので,磁石の熱減磁に影響する可能性は低いと考えら れる。また,#1の方が#2より鉄損が小さく鉄損と銅損の 比率も1に近いため,前式より定格運転時に最大効率動作 点近傍で運転できると考えられる。

5. 中実磁石形モータのシャフト材料の検討

<5.1> 中実磁石形モータのシャフト材料と電気的特性との関係

図10にシャフト材質による電機子磁束と磁石磁束を示す。 中実磁石形モータでは、シャフトの材質がモータの電気的 特性に大きく寄与する。図10の(a)のようにシャフト材料 の透磁率が磁石の透磁率と比較して大きければ、磁束は磁 気抵抗の小さいシャフトを通過しようとするため、磁石に 鎖交する電機子磁束が減少する。また、シャフトを通じて発







図 8 #2の定格運転時の鉄損分析結果 Fig. 8. Analysis result of iron losses of #2 motor at rated operation.



図 9 保護管に発生する渦電流損の内訳 Fig. 9. Detail of eddy-current losses in protection sleeve.

生する 3 次元磁路を通過する磁石磁束の磁極間短絡量が増加する。その結果,減磁特性は改善するが平均トルクは減少する。(b)のようにシャフト材質の透磁率が小さければ、シャフトと磁石の磁気抵抗の差がなくなるため、磁石に鎖交する電機子磁束が増加する。また、シャフトを通じて発生する 3 次元磁路を通過する磁石磁束の磁極間短絡量が減少する。その結果、減磁特性は悪化するが、トルク特性は向上する。本稿では、透磁率がそれぞれ異なる 3 つのシャフト材料を用意して、それぞれをモータに使用したとき電気的特性がどのように変化するのか電磁界解析で検討する。

<5.2> 電磁界解析条件と解析方法

中実磁石形モータのシャフトに, (a) \$45C, (b) \$U\$304, (c) チタン合金を使用した場合を想定し,減磁特性,トルク 特性,効率特性を3次元電磁界解析において比較評価した。 初期比透磁率については S45C が 1846.2 で透磁率が最も大 きく, チタン合金が空気と同等の1で最も小さい。減磁特性 については, 磁石温度 200 ℃で-d 軸に最大電流が流れた ときを想定し,減磁前後の20 ℃無負荷誘起電圧を比較する。 トルク特性と効率特性に関しては,モータの温度が75 ℃の ときを想定する。

<5.3>解析結果の比較

表4にシャフト材質による電気的特性の変化を示す。

まず,減磁特性について述べる。図11にシャフト材質変 更による電機子磁束分布の様子を示す。(b),(c)を比較す ると,(b)が約1/3倍の減磁率である。それは,(b)の磁石 に鎖交する電機子磁束が減少したためである。しかし,最も 初期透磁率が大きい S45Cを使用した場合の(a)が(b)より 減磁率が大きい。その理由は図11から明らかであるように, シャフトを通過する磁束が磁石上部にも通過しているため, 磁石に大きな反磁界が加わっているためである。

図 12 にシャフト材質変更による界磁磁束分布の様子を示 す。トルク特性は,(b)と(c)を比較すると平均トルクは約 1%の差であるが,(a)と(c)を比較すると約 26%,(a)の平 均トルクが小さい。それは,図 12 から(a)の磁束密度分布 は(b),(c)の場合と比較してシャフトの磁束密度が上昇し ており、シャフトを通した磁石の NS 磁極間の短絡磁束が増 加していることが原因である。

効率特性は、(a) が約1%(b)、(c) と比較して小さい。(a) は(b)、(c) と比較して、全損失が約4%小さいが、トルクは 約26%小さい。効率は出力電力/(出力電力+全損失)よ り出力電力に対する全損失の割合が大きくなっているため、 効率が他と比較して小さい。シャフトを磁束が通過するこ とによる損失は1.2~4.6Wと小さく効率に影響する値では なかった。それは、磁石磁束は直流成分であり、かつ電機子 磁束も大きなエアギャップ構造により高調波成分が抑えら れているためである。これらの結果から、減磁特性が最もよ く、かつ出力と効率の減少量が少ない(b)を採用する。

6. まとめ

本稿では、15-kW、150,000-r/min 超高速モータについて減 磁特性を考慮した回転子構造と電気的特性を向上するため のシャフト材料を検討した。回転子構造については、高効率、 高パワー密度を達成できる 2 つのモータ構造をとりあげ、 中空磁石形超高速モータと中実磁石形超高速モータの 3 次 元電磁界解析による電気的特性比較を行った。中空磁石か ら中実磁石にすることにより減磁特性を大幅に改善するこ とができ、中空磁石形超高速モータと同等の高効率と高パ ワー密度を達成できることを確認した。しかし、漏れインダ クタンスが大きかったり、定格運転時に最大効率点から離 れた動作点で運転するためなおも課題が残存することが明 らかになった。また、損失に関しては、中空磁石形超高速モ



(a) Low permeability
(b) High permeability
図 10 シャフト材質による電機子磁束と磁石磁束
Fig. 10. Armature and field magnetic flux paths depending on shaft materials.



図 11 シャフト材質による電機子磁束分布 Fig. 11. Armature magnetic flux density distribution depending on shaft materials.





Motor models	Shaft materials	Initial relative permeability	Demagnetization rate	Average torque	Total loss	Eddy-current loss (Shaft)	Efficiency
а	S45C	1846.2	0.53 %	1.10 Nm	790.3 W	1.2 W	95.62 %
b	SUS304	2.1	0.16 %	1.48 Nm	816.3 W	2.2 W	96.60 %
с	Titanium alloy	1.0	1.42 %	1.49 Nm	815.5 W	4.6 W	96.64 %

表4 シャフト材質による電気的特性 Table 4. Electrical characteristics depending on shaft materials.

ータと比較して保護管に使用されるチタン合金の渦電流損 が問題となることから全損失が大きくなり、また、保護管に 発生する渦電流損は電機子磁束による影響が大きいことが わかった。

シャフト材料に関しては、シャフトの透磁率によって電 気的特性が変化する原理を考究した後、3 つのシャフト材料 を比較して 3 次元電磁界解析による電気的特性比較を行っ た。解析結果比較から、減磁特性、トルク特性、効率特性全 てにおいて高水準を達成できる SUS304 を使用したモータ を採用することとした。また、ある透磁率までは減磁特性と トルク特性がトレードオフの関係性であるが、透磁率が大 きくなりすぎると磁石の減磁特性を悪化させる要因となる ことが明らかとなった。今後は、全損失の 28.7 %を占める 保護管の渦電流損低減と電機子漏れ磁束の低減といった 諸々の課題解決や解析結果の妥当性について実機による検 証も行っていく所存である。

7. 謝辞

本研究は公益財団法人高橋産業経済研究財団による助成金 援助により遂行されたことを申し添える。

References

- Hirokatsu Katagiri, Hiroyuki Sano, Kazuki Semba, Noriyo Mimura, and Takashi Yamada"Fast Calculation of AC Copper Loss for High Speed Machines by Zooming Method,"IEEJ J. Industry Applications, vol. 6, no. 6, pp. 395-400, 2017.
- [2] Kenta Yamano, Shigeo Morimoto, Masayuki Sanada, and Yukinori Inoue"Design of Surface Permanent Magnet Synchronous Motor Using Design Assist System for PMSM,"IEEJ J. Industry Applications, vol. 6, no. 6, pp. 409-415, 2017.
- [3] K. Sakai, T. Tokumasu, and K. Itou, "Magnetic Field Analysis of a Super-High-Speed Permanent Magnet Motor with a New Rotor," Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics, Vol. 4, no. 3, pp. 40-45, 1996.
- [4] T. Noguchi, Y. Takata, Y. Yamashita, Y. Komatsu, and S. Ibaraki, "220000 r/min, 2-kW PM Motor Drive for Turbocharger," IEEJ Trans. IA, vo. 125, no. 9, pp. 854-851, 2005.
- [5] T. Noguchi, T. Komori, "Eddy-Current Loss Analysis of Copper-Bar Windings of Ultra High-Speed PM Motor," 3rd International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles, Aachen, Germany, (2015-2).
- [6] K. Ogata, and T. Noguchi, "Efficiency Improvement of 3-kW, 150,000-r/min Ultra High-Speed PM Motor Focusing on Conductor Eddy-Current Loss," IEEJ Technical Meeting on Motor drive Rotating Machinery, Automotive Machinery, MD-18-074, RM-18-060, VT-18-015, (2018-9).
- [7] T. Wada, and T. Noguchi, "Optimum Design Focused on Efficiency and Power Density of 15-kW, 150,000-r/min PM Motor Fed by Low-Voltage Power Supply," IEEJ Techinical Meeting on Semiconductor Power Converter and linear drive, SPC-09-174,LD-09-064, (2009-12).
- [8] K. Fujita, and T. Noguchi, "Study on proportion of 15-kW, 150,000r/min PM motor," IEEJ Annual National Conference, 5-031, (2019-3).