

3-kW 150,000-r/min 超高速 PM モータの 導体渦電流損に着目した高効率化

緒方 海希*, 藤田 康平, 野口 季彦, 青山 真大 (静岡大学)

Efficiency Improvement of 3-kW, 150,000-r/min Ultra High-Speed PM Motor
Focusing on Conductor Eddy-Current Loss

Kaiki Ogata*, Kohei Fujita, Toshihiko Noguchi, Masahiro Aoyama (Shizuoka University)

This paper describes a loss analysis of eddy-current generated in the copper-bar windings of a 3-kW, 150,000-r/min PM motor fed by 12-V power supply, which is applicable to an automotive supercharger. The value of the eddy-current loss is relatively large and is not ignorable in the case of the ultra high-speed PM motor which has a low-voltage power supply and a high-speed operation range. It is confirmed that reduction of conductor eddy-current loss leads to improvement of the total efficiency of the motor.

キーワード：超高速モータ, PM モータ, 導体渦電流損, 電磁界解析, 車載用過給機
(ultra high-speed motor, PM motor, conductor eddy-current loss, electromagnetic analysis, automotive supercharger)

1. はじめに

近年, 自動車の燃費規制の強化などに伴い, 低燃費車としてハイブリッド車や電気自動車が注目を集めている。しかし, 日本における電気自動車の普及率は 2016 年時点で自動車全体のわずか 0.1% しかなく, エンジン車やハイブリッド車が主流となっている。そこでなおも, エンジンの性能向上が求められ, さまざまな技術的アプローチがなされている。その一つに, スーパーチャージャが挙げられる。スーパーチャージャはエンジンの出力向上と排気量削減を同時に実現する補機であり, スーパーチャージャを採用することでエンジンの燃焼効率やトルク応答の向上にもつながる。図 1 (a) に従来のスーパーチャージャを示す。これはコンプレッサがベルト・プーリーを介してエンジンのクランクシャフトと機械的に接続され, エンジン動力の一部を利用して圧縮空気をエンジンシリンダーに供給するシステムである。しかし, このシステムでは最大回転数はエンジンの回転数に制限され, 10,000 r/min 程度に抑制されるため, 低効率・低吐出圧力の容積形コンプレッサを使用せざるを得ない。また, コンプレッサはエンジンのクランクシャフトと機械的に接続されているため, ベルト・プーリー部分での機械損の発生や, 高速回転時にはコンプレッサ自身がエンジンの負荷になるという欠点がある。これらの問題を解決するための方法に, スーパーチャージャの電動化

が挙げられる。図 1 (b) に電動スーパーチャージャの構成を示す。これは, コンプレッサの駆動力源をエンジンではな

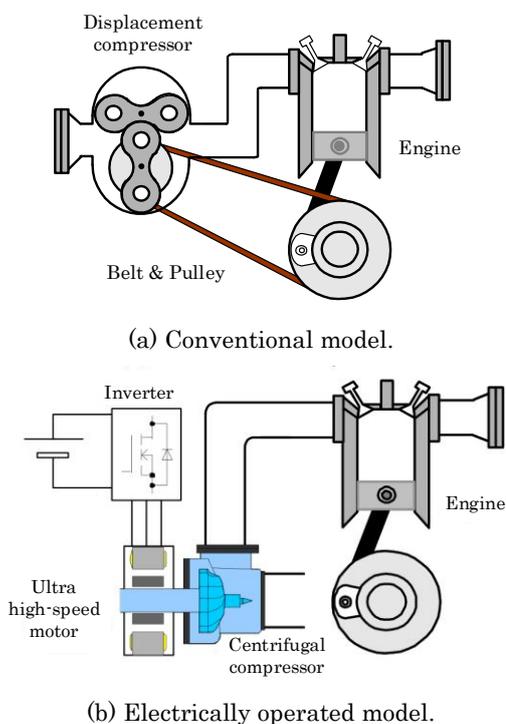


図 1 スーパーチャージャシステム構成図
Fig. 1. System configurations of supercharger.

く超高速モータから得るシステムで、コンプレッサ回転数はエンジンの回転数に制限されない。したがって、このシステムでは高効率・高吐出圧力な遠心形コンプレッサを使用できる。また、エンジンと独立した超高速モータによる過給が行われるため、エンジンレスポンス向上とダウンサイジング効果による燃費改善が期待できる。さらに、エンジンとの機械的接続がないため、接続部での機械損はなくなり、エンジン周辺的设计に自由度をもたせることができる。

本稿では電動スーパーチャージャ用超高速 PM モータの電磁界解析を行うことで巻線に発生する導体渦電流損を評価し、これをステータ構造や巻線仕様の変更により低減することで更なる高効率化を達成できることを確認したので報告する。

2. モータ仕様

〈2・1〉 要求仕様 図2と表1に超高速 PM モータの実機外観と主要諸元を示す。検討するモータは直流 12V 電源の擬似電流形三相インバータによって駆動され、最大出力 3 kW、最高回転数 150,000 r/min という仕様をもつ。また、従来のスーパーチャージャと同程度のエンジンレスポンスを確保するために、過給開始から定格回転数まで 0.5 秒以内の応答が必要であり、これを満たすために少なくとも定格の 2 倍に相当する過負荷耐量をもたなければならない。

高効率かつ高出力密度を達成するため、表面磁石形同期モータ (SPMSM) を採用している。これは、SPMSM が誘導モータやリラクタンスモータと異なり、励磁電流を必要とせず、同じ永久磁石モータである埋込磁石形モータ (IPMSM) に比べ回転子構造が単純なため高速回転に適しているからである。

〈2・2〉 構造設計 図3に検討する超高速モータの径方向断面図を示す。12V という低電圧駆動であるため、同期インダクタンスだけでなく漏れインダクタンスも十分に低減する必要があるため、巻線は集中巻を採用している。さらに、各相の巻線は 2 並列 2 ターンという非常に少ないターン数で構成されている。

回転子は強力な Nd-Fe-B 永久磁石 (ネオジム磁石) とモリブデン合金のシャフトで構成されている。ネオジム磁石を採用することにより、モータ効率の改善だけでなく、少ない磁石量で大きな磁束を得ることができるため、回転子の小形化に貢献し、超高速回転に伴う遠心力を軽減できる。また、 BH_{max} が 310 kJ/m^3 の強力なネオジム磁石を使うことでエアギャップが非常に大きい設計が可能となり、同期インダクタンスを低減できるとともに、集中巻構造であっても正弦波状の誘起電圧を得ることができる。

3. 導体渦電流損の詳細と解析

〈3・1〉 導体渦電流損の発生メカニズム 低電圧駆動の超高速永久磁石モータは、エアギャップを非常に大きく設

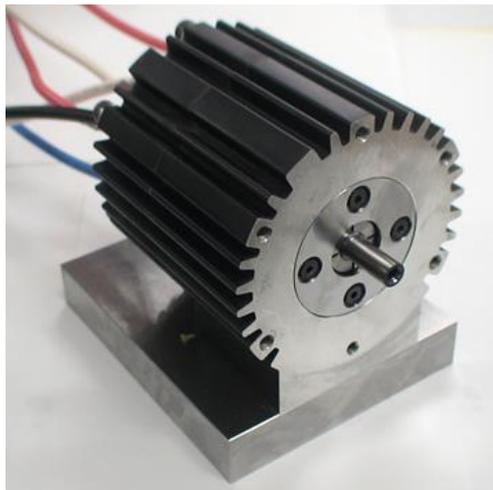


図2 超高速 PM モータ実機外観

Fig. 2. Photograph of ultra high-speed PM motor.

表1 超高速 PM モータの諸元

Table 1. Specifications of the ultra high-speed motor.

Motor type	Surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM)
Number of poles	2
Number of slots	6
Stator outer diameter	66 mm
Stator inner diameter	28 mm
Rotor outer diameter	19.5 mm
Axial length of core	30 mm
Rated output power	1.5 kW
Rated speed	150,000 r/min
Rated torque	0.0955 Nm
Overload capacity	3 kW (200% overload) for 1 s

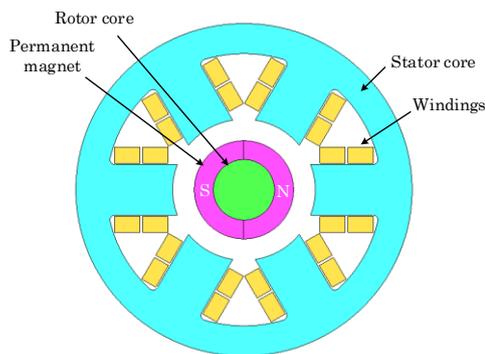


図3 超高速 PM モータ径方向断面図

Fig. 3. Cross section of ultra high-speed PM motor.

計するため、通常のモータと比較して漏れ磁束が多くなる。その結果、スロット内部へ漏れた磁束が巻線導体に鎖交し、導体渦電流が流れる。これにより、導体渦電流損が発生するだけでなく、導体の実効断面積が減少し銅損の上昇にもつながる。導体渦電流損は周波数依存性があり、出力の大小には依存しないため、特に高回転・低出力領域では導体渦電流損が大きな割合を占める。したがって、導体渦電流損を低減することでモータ全体の効率向上が期待される。

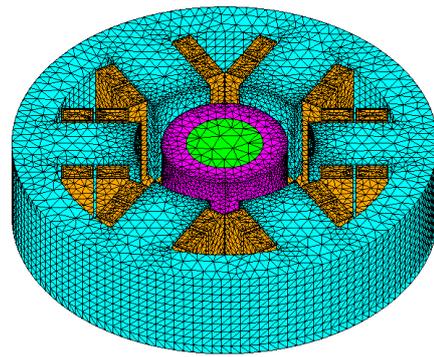
〈3・2〉 導体渦電流損の解析手法 本稿では、株式会社 JSOL の電磁界解析ソフトウェア JMAG-Designer 17.0®を用いて有限要素法により巻線導体に発生する導体渦電流損を評価した。JMAG-Designer 17.0®によって解析を行うためには、巻線導体一つ一つをモデリングし、それぞれに FEM コンダクタ条件を割り当てる必要がある。また、図 4 (a) のように巻線導体に表皮深さメッシュを切る必要がある。図 4 (b) は巻線部分の拡大図である。この図のように、巻線導体に表皮深さのメッシュを切ることによって表皮効果などを考慮した解析を行うことができ、導体渦電流損を評価することができる。

〈3・3〉 導体渦電流損の周波数特性 前節のように設定を行い、導体渦電流損の周波数特性の確認を行う。回転数を 30,000 r/min から 150,000 r/min まで 30,000 r/min 刻みで導体渦電流損の解析を行った結果を図 5 に示す。回転数の増加に伴い導体渦電流損が線形に増加している様子を確認できる。定格回転数である 150,000 r/min では 33.8 W になり、定格 1.5 kW 出力時にはこれにより 2.3 %ほど効率が低下する。この導体渦電流損を低減することで高効率化でき、さらに導体実効断面積が増えることで銅損の低減なども期待できる。以降の導体渦電流損の低減に関する検討はすべて定格回転数である 150,000 r/min での解析によって行う。

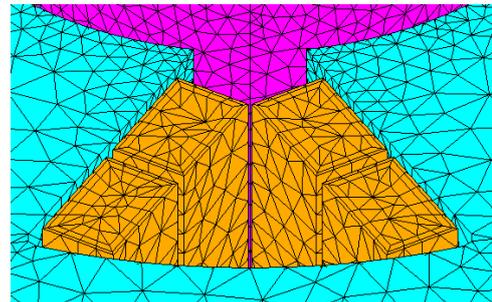
〈3・4〉 導体渦電流損の分布 既に述べたとおり、導体渦電流損は大きなエアギャップによる漏れ磁束が巻線導体と鎖交することで発生する。したがって、導体渦電流損は巻線導体に様に分布するのではなく、スロット開口部近傍の巻線導体側面に集中的に発生する。また、三次元的に見ると径方向への漏れ磁束がコイルエンド部と鎖交し、そこでも集中的に発生する。図 6 に導体渦電流損の分布を示す。スロット開口部近傍の巻線導体側面とコイルエンド部で導体渦電流損が集中的に発生様子を確認できる。この損失を低減することを目的とし、ステータコアや巻線の仕様を変更して高効率化を図る。

4. 導体渦電流損の低減

〈4・1〉 巻線導体側面の導体渦電流損低減 大きなエアギャップをもつ超高速 PM モータの導体渦電流損を低減するためには、エアギャップでの漏れ磁束を減らし、巻線導体に鎖交する磁束を減らす必要がある。前章でも述べたとおりスロット内部に漏れる磁束と、径方向に漏れる磁束を考慮する必要がある。そこで、まずはスロット内部への漏れ磁束を減らし、巻線導体側面の導体渦電流損を低減することができる。従来のモデルは図 3 に示したとおりスロット形状がオープンとなっており、スロット内部に多くの漏れ磁束が侵入する。そこで、スロット形状を図 7 のようにセミクローズドにすることで磁気遮蔽し、巻線側面の導体渦電流損を低減することができる。このような変更を行った結果、150,000 r/min 時の導体渦電流損は 33.8 W から 12.2 W に大幅に低減された。このときの導体渦電流損の分布を図 8 に示す。



(a) Mesh of analysis model.



(b) Enlarged view of conductors.

図 4 超高速 PM モータのメッシュモデル

Fig. 4. Mesh model of ultra high-speed PM motor.

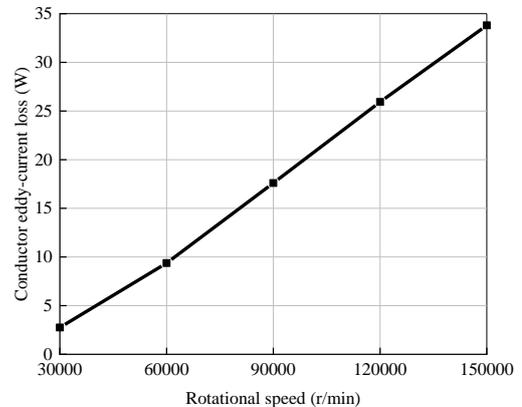


図 5 導体渦電流損の周波数特性

Fig. 5. Frequency characteristic of conductor eddy-current loss.

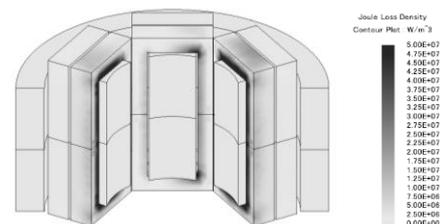


図 6 導体渦電流損の分布

Fig. 6. Distribution of conductor eddy-current loss.

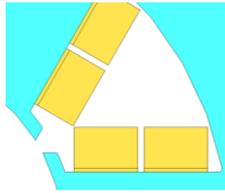


図7 セミクローズドスロット
Fig. 7. Semi closed slot.

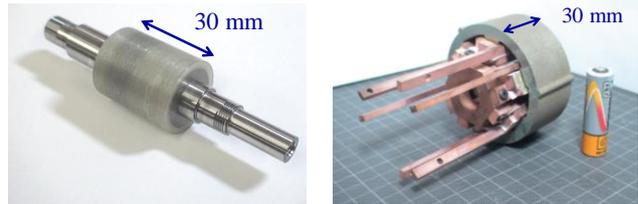


図9 ロータおよびステータ外観
Fig. 9. Photographs of rotor and stator.

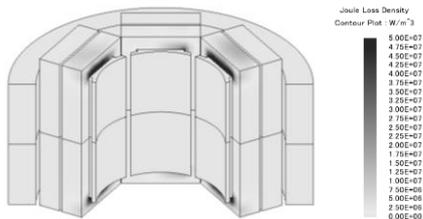


図8 セミクローズドスロットでの導体渦電流損分布
Fig. 8. Distribution of conductor eddy-current loss of semi-closed-slot model.

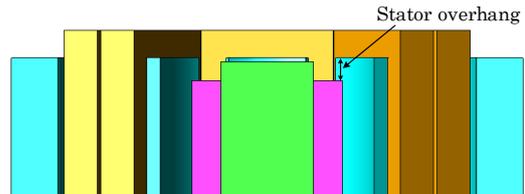


図10 ステータオーバーハング
Fig. 10. Stator overhang.

巻線導体側面の導体渦電流損が低減され、導体渦電流損はコイルエンド部にのみ集中して発生している様子を確認できる。

〈4・2〉 コイルエンド部の導体渦電流損低減 従来の仕様では図9に示すようにロータの磁石長さとしてータコア積厚は同じ30 mmとなっているが、ステータコアの積厚を磁石長さよりわずかに長くし、図10のようにオーバーハングさせる。それにより、径方向への漏れ磁束をステータコアで受け止め、コイルエンド部への磁束鎖交数を減らすことができ導体渦電流損を低減できる。一方、ステータコア積厚の増加に伴って巻線長が長くなるため、巻線抵抗が大きくなり銅損が増加する。そこで、ステータオーバーハングを-2 mmから3 mmまで変化させ、そのときの導体渦電流損と銅損を評価して、効率がどのように変化するかを電磁界解析によって確認する。ここで、負のオーバーハングの値は磁石長さに対してステータコアの積厚が短い状態を表している。図11に回転数150,000 r/min、出力1.5 kW時の解析結果を示す。2つの領域はそれぞれ銅損と導体渦電流損を示している。ステータをオーバーハングさせることで導体渦電流損が低減される一方で銅損が増加している様子を確認できる。しかし、導体渦電流損低減の効果が大きく2つの損失の和は単調に小さくなるのがわかる。ステータオーバーハング3 mmにおける導体渦電流損の値は1.7 Wであり、コイルエンド部のモデリングを排除してコイルエンド部の導体渦電流損を考慮しないモデルでの解析結果で導体渦電流損の値は0.12 Wであったため、3 mmのオーバーハングでコイルエンド部の導体渦電流損をほとんど削減できている。また、図12に、このときの効率カーブを示す。銅損と導体渦電流損の和が最も小さくなったのはステータオーバーハングが3 mmのケースであったが、効率が

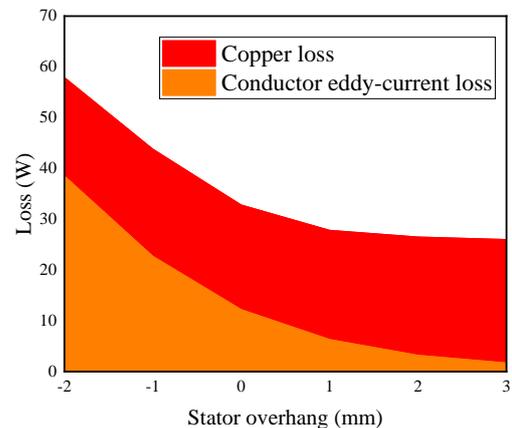


図11 ステータオーバーハングによる損失解析結果
Fig. 11. Loss analysis results of stator overhang.

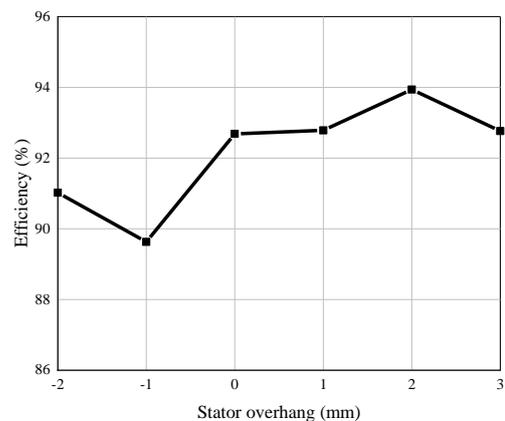


図12 ステータオーバーハングによる効率特性
Fig. 12. Efficiency characteristic with respect to stator overhang.

最大となったのはオーバーハングが 2 mm のケースであった。このような結果の原因は、ステータコア体積増加による鉄損の増加であると考えられる。

〈4・3〉 巻線配置による導体渦電流損低減 上記で述べたとおり、スロット形状をセミクロズドとし、ステータオーバーハングをさせることで導体渦電流損を大幅に低減することが可能である。しかし、本稿で検討する超高速 PM モータは巻線に導体バーを使用しており、組立上の問題からセミクロズドスロット形状を採用することが困難である。そのため、スロット形状変更による巻線導体側面の導体渦電流損低減は現実的でないため、別の手段を講じなければならない。スロット形状を変更せずに巻線導体側面の導体渦電流損を低減するためには、スロット開口部からの漏れ磁束と鎖交しないように巻線の配置や形状、断面積を変更するという方法がある。巻線の断面積を小さくしてスロット奥部に配置したり、アスペクト比を変えることで導体渦電流損を低減することができる。図 13 のように巻線位置、巻線幅および巻線高さを定義し、これらを変えて二次元解析で導体渦電流損の評価を行う。括弧内の値はこれまでの解析で用いた値である。

まず、図 14 のように巻線幅を 3 mm と固定し、巻線位置を変化させて導体渦電流損と銅損の変化を確認する。表 2 に各設計変数の条件とそのときの導体断面積、定格出力時の電流 (160 A) を印加するときの電流密度、各損失と効率の解析結果を示す。巻線位置をスロット開口部から遠ざけることで導体渦電流損を大幅に低減できる。さらに、巻線の断面積は一定であるが銅損も導体渦電流損の低減とともに小さくなるのがわかる。これは導体渦電流が小さくなることで巻線に電流を流し込める面積が増え実効的に巻線抵抗が小さくなったためであると考えられる。

次に、図 15 のように巻線をできるだけスロット奥部に配置するよう巻線位置を調整しながら巻線幅を小さくして導体渦電流損および銅損の変化を確認する。表 2 と同様に各設計変数の条件や解析結果などを表 3 に示す。巻線幅を小さくすることでスロット開口部から遠い位置に巻線を配置することができ、導体渦電流損を低減できる。特に、巻線幅を 5 mm から 4.5 mm にして巻線位置を 1 mm 大きくするだけで導体渦電流損を 10 W と大幅に低減することができる。また、銅損については導体断面積が小さくなって

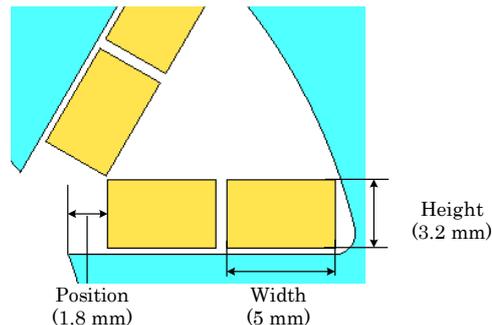


図 13 各設計変数の定義

Fig. 13. Definition of design variables.



図 14 巻線位置を変えた形状

Fig. 14. Analysis model with position modification.



図 15 巻線幅を変えた形状

Fig. 15. Analysis model with width modification.



図 16 アスペクト比を変えた解析形状

Fig. 16. Analysis model with aspect ratio modification.

るにも関わらず導体渦電流損とともに小さくなっている。

最後に、図 16 のように巻線の断面積を一定にしながら巻線幅と巻線高さを変えたときの導体渦電流損と銅損の変化

表 2 巻線位置の変更による各損失と効率の解析結果

Table 2. Analysis results of losses and efficiency with respect to winding position modification.

Position(mm)	Width(mm)	Height(mm)	Cross-sectional area of conductor (mm ²)	Current density at 160A(A/mm ²)	Conductor eddy-current loss(W)	Copper loss (W)	Efficiency (%)
2.0	3.0	3.2	9.6	16.7	12.3	17.0	95.3
2.5					7.3	16.4	95.6
3.0					4.8	15.6	95.9
3.5					3.1	15.3	96.0
4.0					2.1	14.9	96.2
4.5					1.5	14.8	96.2
5.0					1.1	14.8	96.2
5.5					0.8	15.1	96.1

表 3 巻線幅の変更による各損失と効率の解析結果

Table 3. Analysis results of losses and efficiency with respect to winding width modification.

Position(mm)	Width(mm)	Height(mm)	Cross-sectional area of conductor (mm ²)	Current density at 160A(A/mm ²)	Conductor eddy-current loss(W)	Copper loss (W)	Efficiency (%)
1.8	5.0	3.2	16.0	10	15.8	20.8	95.4
2.8	4.5		14.4	11.1	5.8	18.8	95.6
3.8	4.0		12.8	12.5	2.3	17.4	95.8
4.8	3.5		11.2	14.3	1.0	16.4	96.1
5.8	3.0		9.6	16.7	0.5	15.7	96.1

表 4 巻線アスペクト比の変更による各損失と効率の解析結果

Table 4. Analysis results of losses and efficiency with respect to winding aspect ratio modification.

Position(mm)	Width(mm)	Height(mm)	Cross-sectional area of conductor (mm ²)	Current density at 160A(A/mm ²)	Conductor eddy-current loss(W)	Copper loss (W)	Efficiency (%)
1.8	5.0	3.2	16.0	10	15.8	20.8	95.4
2.8	4.5	3.6			6.7	18.8	95.6
3.6	4.0	4.0			3.7	17.6	95.7
4.5	3.6	4.5			2.1	16.6	96.0

を確認する。表 2 と同様に各設計変数の条件や解析結果などを表 4 に示す。導体断面積は一定であるが、アスペクト比を変えることで巻線位置をよりスロット奥に配置することができ、その結果として導体渦電流損を大幅に低減することができる。

以上の解析結果から、図 13 で定義した 3 つの設計変数で導体渦電流損の低減に最も寄与するものは巻線位置であり、巻線をスロット開口部からより遠い位置に配置することで導体渦電流損を低減できることがわかる。さらに、銅損もそれに伴い小さくなり、全体の効率向上を実現できる。

4. まとめ

本稿では、超高速 PM モータの巻線導体に生じる導体渦電流損の解析について述べ、これを低減する手法について検討を行った。低電圧大電流駆動の超高速 PM モータの特徴である大きなエアギャップからの磁束をスロット形状やステータオーバーハングによって遮蔽することで導体渦電流損を大幅に低減できることを示した。また、組立上の問題などからスロット形状の変更ができない場合には巻線のアスペクト比などを変えてスロット開口部から遠い位置に巻線を配置することで導体渦電流損を低減することができる。これにより、より高効率な超高速 PM モータの設計が可能となる。今後は、これらの結果を基にさらに高効率・高出力密度のモータを設計・試作し実機検証を行う予定である。

文 献

- (1) Toshihiko Noguchi, Takehiro Komori : “Eddy-current Loss Analysis of Copper-Bar Windings of Ultra High-Speed PM Motor”, 3rd International Conference on Industrial Technology Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles, Aachen, Germany (2015-2)
- (2) 小森・野口:「超高速 PM モータの導体バー渦電流損に関する基礎検討」, 電気学会全国大会 (2015-3)
- (3) 笠井・下田:「2 極高速 IPM モータの磁石損失評価」, 平成 30 年電気学会全国大会論文集(2018-3)
- (4) 榎園・山崎・森:「高速モータの高効率化に向けた極薄電磁鋼板の活用技術」, 基礎・材料・共通部門マグネティックス研究会(2017-8)