集中巻 IPMSM のホール配置による振動低減

学生員 小林 貴彦* 正員 武田 洋次*
正員 真田 雅之* 正員 森本 茂雄*

Vibration Reduction of IPMSM with Concentrated Winding by Making Holes

Takahiko Kobayashi*, Student Member, Yoji Takeda*, Member, Masayuki Sanada*, Member, Shigeo Morimoto*, Member

The recent trend of an interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) is shifting from distributed winding to concentrated winding for the purpose of downsizing, high efficiency and natural resources saving. The IPMSM with concentrated winding, however, is noisy because of the stator frame deformation by the radial forces. This paper reports flux barriers preventing flux short circuit arranged in the rotor for the purpose of preventing demagnetized, reducing the torque ripple and the cogging torque also reduce the radial force that causes the acoustic noise and the vibration. The improvements of reducing the radial force and the torque ripple at high torque operation by making some holes inside the rotor are examined. The vibration, efficiency by the experiments and the analytical results are evaluated. It is cleared that the vibration of the IPMSM with holes inside the rotor is reduced without decreasing the efficiency.

キーワード：IPMSM，集中巻，ラジアル力，最大トルク制御，振動速度，振動加速度スペクトル

Keywords: interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM), concentrated winding, radial force, high torque operation, vibration velocity, spectrum of vibration acceleration

1. まえがき

高効率なモータとして産業分野で広く用いられている埋込永久磁石同期モータ (IPMSM) の近年の傾向として、さらなる小型・高効率・省資源・巻線作業効率化を目指し、コイルエンドや巻線長が短縮できる集中巻方式が検討され、実用化されてきている⁽¹⁾。しかし、ロータとステータ極間に大きなラジアル力が発生することによりステータ形状が歪み、この歪みに起因する振動・騒音が従来の分布巻 IPMSM と比較して大きいことが問題となっている^{(2)~(4)}。

また、IPMSM は隣接するステータ極で互いに対極となる箇所があり、ステータ極先端部で高い磁束密度が発生することによる局部減磁やコギングトルク・トルクリプルが増大する問題点がある。それらの対策として永久磁石端部に磁束短絡防止バリアを配置する工夫がなされている⁽³⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

本論文では、セグメント状の永久磁石を埋め込んだ 4 極 6 スロット集中巻 IPMSM に関して、2 次元有限要素法による静磁界解析結果を基に、まず、磁束短絡防止バリアが

ラジアル力低減にも有効であることを明らかにする。次に、ラジアル力はステータ極とロータの表面の対向する部分全体に発生することから、ロータの表面近くに円形のホールを配置し、ステータ極とロータ表面との等価的な対向面積を減少させることによるラジアル力低減効果について検討する⁽⁷⁾。また、磁束短絡防止バリアを有するロータについて、従来タイプとホールを配置した提案タイプ、さらに分布巻タイプの供試機を製作し、効率・振動の評価を行い、ロータにホールを配置することの有用性を検証している。

2. 有限要素法によるラジアル力比較方法

2.1 解析モデル 図 1 に本論文の解析対象である IPMSM の集中巻ステータ形状とロータ断面図、表 1 にその仕様を示す。この形状を Type 0 とし、以下 Type 0 を基にホール配置等の加工を施し、比較する。なお、ロータ内部に埋設する永久磁石には、希土類永久磁石を用いている。また、解析における電機子電流は三相正弦波交流とし、最大トルク制御時のトルクが $1.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ になるように、電機子電流値を調整して特性を比較する。

2.2 ラジアル力評価方法 本論文では、2 次元有限要素法を用い、解析ステップ角 (機械角で 1.5°) ごとに、ステータ極両端のスロット中心間 (60° 範囲) に働くラジアル

* 大阪府立大学大学院工学研究科
〒599-8531 大阪府堺市学園町 1-1
College of Engineering, Osaka Prefecture University
1-1, Gakuen-cho, Sakai, Osaka 599-8531

図 1 基準モータ (Type 0) の形状

Fig. 1. Basic motor configuration (Type 0).

表 1 解析モデルの仕様 (Type 0)

Table 1. Specifications of the analytical model.

Number of slots	6	Number of poles	4
Air gap length	0.6mm	Stator outer diameter	105.0mm
Stator yoke width	8.5mm	Rotor outer diameter	54.8mm
Stack length	40.0mm	Shaft outer diameter	16.0mm
Magnet thickness	2.15mm	Magnet width	34.0mm
Magnet coercive force bH_c	770kA/m		

力の総量の時間変化を求め、ラジアル力を評価する。なお、比較条件はほぼ最大トルク制御となる電流位相 $\beta = 15^\circ$ 、トルクは $1.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ に設定する。

3. 磁束短絡防止バリアのラジアル力低減効果

集中巻 IPMSM では、電機子電流により発生する磁極が、隣接するステータ極で互いに対極になる箇所があり、極先端において高い磁束密度となり、ロータ表面に近接した永久磁石の局部減磁が発生しやすくなる。また、コギングトルク、トルクリプル等も大きくなる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。これらを低減するため、図 2 に示すような、磁束短絡防止バリアを永久磁石埋設用穴と連続させて、永久磁石の両端部からロータ極中心方向に伸ばすように配置する工夫がなされている⁽³⁾⁽⁶⁾。

しかし、この磁束短絡防止バリアの配置による、ラジアル力への影響についての報告はされていない。そこで、まずはじめに磁束短絡防止バリアの有無によるラジアル力特性への影響について検討を行う⁽⁷⁾。

図 2 に基準モータ (Type 0) の永久磁石端部に磁束短絡防止バリアを配置したロータ形状 (Type 1 と称する) を、図 3 に u 相ステータ 1 極に働くラジアル力の総量を示す。ただし、図 3 のロータ位置 θ_e とは、u 相ステータ極中心を基準にとった永久磁石の N 極 (d 軸) の電気的進み角であり、時間軸に相当する。

なお、電流位相 $\beta = 15^\circ$ において $1.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ のトルクを発生する電機子電流値は、Type 0 と Type 1 は同一であった。

磁束短絡防止バリアの有無は、同一トルクを発生する電機子電流に対しては影響しないが、ステータ極全体に働くラジアル力は、磁束短絡防止バリアを有する方が小さくなる。これは、磁束短絡防止バリアがロータ表面にあるため、ス

図 2 磁束短絡防止バリアを有するロータ形状

Fig. 2. Structure of rotor with flux barriers preventing flux short circuit (Type 1).

図 3 u 相ステータ 1 極に働くラジアル力の総量

Fig. 3. Total radial force per pole (Type 0, 1) ($\beta = 15^\circ$, $1.5 \text{ N}\cdot\text{m}$).

テータとロータの等価的な対向面積が減少するからである。

したがって、磁束短絡防止バリアは、本来の目的である減磁防止やトルクリプルやコギングトルク低減の目的以外にも、ラジアル力低減にも効果があることが分かる。

4. ホール配置によるラジアル力低減効果

磁束短絡防止バリアによるラジアル力低減効果が明らかとなったことから、本論文では、Type 1 に直径 2mm の円形のホールをロータの表面近くに配置した形状について、ラジアル力低減効果の検討を行う⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

図 4 にホールを設けたロータ形状、表 2 に解析を行ったモータ形状とホールの配置の関係を示す。図 4 のホール内の記号は、表 2 のホール記号に対応している。また、表 3 に極座標で表したホール中心の位置を示す。なお、ロータ中心を $(r, \theta) = (0, 0)$ とし、図 4 の点線上を $\theta = 0^\circ$ 、実線上を $\theta = 90^\circ$ として極座標を定めている。

ホール位置の決定方法は、まず、ホール数の最も少ない 8 個のタイプについて、ホール配置箇所の若干異なる数通りのタイプについて解析を行い、これらのタイプの中から、ラジアル力低減効果の大きいタイプ、または、ラジアル力がほぼ同一ならば、トルクリプルが最も小さいタイプを選び出し、このタイプにさらにホールを 8 個追加して上記の手順を繰り返し、最終的にホール数 32 個のタイプまで最

図 4 ホールを設けたロータ形状
Fig. 4. Structure of rotor with holes.

表 2 ホールの配置

Table 2. Arrangement of holes.

Rotor type	Hole sign	Total number of holes
Type 2	a	8
Type 3	a · b	16
Type 4	a · b · c	24
Type 5	a · b · c · d	32

表 3 ホールの中心位置 (極座標表示)

Table 3. Center of holes (Polar coordinate notation).

Hole sign	Center of holes (r [mm], θ [°])
a	$(25.9, 45 \pm 26 + 90n)$
b	$(25.9, 45 \pm 18 + 90n)$
c	$(25.9, 45 \pm 11 + 90n)$
d	$(25.9, 45 \pm 4 + 90n)$

($n = 0, 1, 2, 3$)

表 4 トルクリップ率 ($\beta = 15^\circ$, $1.5 \text{ N}\cdot\text{m}$)

Table 4. Torque ripple.

Rotor type	Torque ripple [%]
Type 1	30.5
Type 2	27.3
Type 3	26.2
Type 4	16.1
Type 5	20.1

適化を行った。

表 4 に $\beta = 15^\circ$ (最大トルク制御時), $1.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ の時のトルクリプル率 (瞬時最大トルクから瞬時最小トルクの差を平均トルクで除して, 百分率で表記), 図 5 に $\beta = 15^\circ$ におけるトルクが $1.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ になる電機子電流比, 図 6 にその条件下における u 相ステータ 1 極に働くラジアル力の総量と変化割合を示す。なお, 最大トルクとなる電流位相 β は各形状ともほぼ $\beta = 15^\circ$ であった。

図 6 の結果より, ホール数に比例して極全体に働くラジアル力が低減されていることが分かる。また, ホールを配置することによってラジアル力の変化割合も減少している。

図 5 同一最大トルクを発生する電機子電流

Fig. 5. Armature current at the same maximum torque ($\beta = 15^\circ$, $1.5 \text{ N}\cdot\text{m}$).

(a) Total radial force.

(b) Variation of radial force.

図 6 u 相ステータ 1 極に働くラジアル力

Fig. 6. Radial force per pole ($\beta = 15^\circ$, $1.5 \text{ N}\cdot\text{m}$).

これらの低減効果は, ステータ・ロータの両極の等価的な対向面積の減少以外に, 磁気抵抗が上昇することによるエアギャップ部磁束量の減少による要因も考えられる。この磁束量の減少のために, 図 5 に示すように, いずれも同一トルクを発生するのに必要な電機子電流は若干増加する。また, 表 4 に示すように, ホールの配置によってトルクリプルも低減される。これは, トルクリプルが磁石端部とステータ極の位置関係の変化による磁気抵抗の不連続性に起

因することから、ホールの配置によって磁気抵抗の変化を和らげる効果によるものであると考えられる⁽⁹⁾。

ラジアル力の点では Type 5 が最も優れているが、トルクリプルの改善や電機子電流の点も含めて考慮すると、Type 4 が良好であると考えられる。

5. 供試機による検証結果

5.1 測定システム ホールを設けることによる振動低減効果と電機子電流が増加することによる効率に対する影響を検証するため、Type 1 と Type 4 の供試機を製作し測定を行った。さらに、24 スロット分布巻と Type 1 のロータを組み合わせたタイプ (Type D と称する) も製作し比較する。図 7 に実験システムを示す。ステータ極中心部に加速度検出器を取り付け、振動加速度スペクトルを FFT で測定する。放射音のパワーレベルは、振動速度の 2 乗に比例することから、振動の評価は、周波数で積分した振動速度スペクトルを、10 Hz ~ 4 kHz の範囲の振動速度のオーバーオール値 u_{oa} を算出することによって行う⁽¹⁰⁾。また、測定条件は供試機においてもほぼ $\beta = 15^\circ$ で最大トルクが得られたことから、電流位相 $\beta = 15^\circ$ 、トルク 1.5 N·m (最大トルク制御時) に固定する。なお、駆動装置には、IPMSM の駆動に一般的に用いられている三相正弦波電流制御型電圧型 PWM インバータを使用している⁽⁶⁾。

5.2 効率特性 図 8 に、 $\beta = 15^\circ$ で 1.5 N·m のトルクを発生する電機子電流の比較を、解析値と併せて示す (Type 1 の解析値を基準とする)。また、図 9 に回転速度に対する効率特性 (測定値)、図 10 に低速時 (600 min^{-1}) と高速時 (3600 min^{-1}) のモータ損失測定結果を示す。銅損は供試機の電機子巻線抵抗を測定することにより求まるが、鉄損と機械損を正確に分離することは困難なため、銅

損と鉄損・機械損を含むそれ以外の損失の 2 種類に分類して示す。

図 8 に示すように、解析値と供試機による測定結果がほぼ同一となっていることから解析の妥当性が示されている。また、ホールを配置することの効率への影響は、 600 min^{-1} 、 1200 min^{-1} で約 1% 弱の効率低下が見られるものの、 1800 min^{-1} 以上の高速域では Type 4 は Type 1 とほぼ同等の効率を得られており、電機子電流増加、すなわち銅損増加による効率への影響は高速域ではほとんどないことが分かる。

また、分布巻タイプ (Type D) は集中巻タイプと比較して約 1 ~ 3% 程度効率が低くなっている。

Type 4 の低速域や Type D の効率低下の原因は、図 10 の損失分析からも明らかのように、銅損による影響が大きい。 600 min^{-1} において、銅損以外の損失は各タイプともほとんど差がなく、また全損失に対する割合も小さいが、銅損に関しては、明らかに各タイプに差が見られ、全損失に対する割合も 80% 以上と大きいことから、銅損の差が効率の差となっていると言える。 3600 min^{-1} においては、銅損の割合が全損失の 1/4 程度となり、銅損の効率に対する影響が小さくなることから、ほぼ Type 1 と同等の効率を得

図 8 同一最大トルクを発生する電機子電流

Fig. 8. Armature current at the same maximum torque (Based on the Type 1 analysis value).

図 9 効率特性 (測定値)

Fig. 9. Efficiency characteristics (Measured).

(a) Measurement equipment.

(b) Block diagram of experimental system.

図 7 実験システム

Fig. 7. Experimental system.

図 10 損失分析 (測定値)
Fig. 10. Loss analysis (Measured).

られている。

以上から、ホール配置による電機子電流増加の効率に対する影響は、小さいことが明らかとなった。また、効率の低下が見られる低速域でも分布巻タイプより効率が高いことも示された。

5・3 振動速度比較 図 11 に回転速度に対する振動速度のオーバーオール値、図 12 に 3600 min⁻¹ 時の Type 1 と Type 4 の振動加速度スペクトルを示す。なお、ラジアル力の変動の周期は、図 6 に示すように電気角半周期 (機械的回転の 1/4 周期) に対し 1 周期となっている。すなわち、ラジアル力の変動の基本波周波数は 3600 min⁻¹ においては、図 12 中に ○ 印で示すように、回転周波数 60 Hz の 4 倍の 240 Hz となる。

図 11 に示すように、振動速度のオーバーオール値は分布巻モータのレベルまで低減されないが、ホールを配置することによりかなり改善されている。特に、3000 min⁻¹ 以上の振動低減効果大きい。

振動速度のオーバーオール値は回転速度に比例して高くなる。ホールの配置により、ラジアル力の変動の基本波成分も約 9% 低減されているが、特に図 12(b) の点線で囲まれた部分のラジアル力の変動基本波周波数 (240 Hz) 以上 1 kHz 以下の成分の低減効果大きい。中でも、図 12 の □ 印で囲まれているラジアル力の変動基本波成分の 2 次高調波成分の低減効果が大きく、約 84% も低減されている。これらの成分の低減が振動速度のオーバーオール値の低減に寄与している。特に、振動速度は振動加速度を周波数で

図 11 振動速度特性

Fig. 11. Vibration velocity characteristics.

図 12 振動加速度スペクトル

Fig. 12. Spectrum of vibration acceleration.

積分するため、低周波数成分の振動速度のオーバーオール値に対する影響が大きくなる。1 kHz 以上の周波数成分は、Type 1 と Type 4 で大差なく、1.68 kHz (7 次) や 3.12 kHz (13 次) の様なスペクトルの大きい成分も存在するが、この範囲の成分は振動速度に変換した際に、かなり小さい値となるため、ほとんど振動速度のオーバーオール値に寄与しない。

6. あとがき

磁束短絡防止バリアを配置することが、従来の局部減磁防止やコギングトルク低減だけではなく、ラジアル力低減にも有効であることを示した。また、ロータ表面にホールを配置することで、さらなるラジアル力低減とトルクリプル低減が可能であることを解析結果により明らかにした。

供試機による測定結果から、ホール配置により振動が低減されることを確認し、特に、ラジアル力の変動の基本波周波数の 2 次成分の低減効果が大いことが明らかになった。この測定結果より、ラジアル力低減が振動低減に有効であることが実証され、本研究の妥当性を示した。ホールを有しないタイプと同一のトルクを発生させるためには若干の電機子電流の増加が必要となり、低速域では約 1% 弱の効率の低下が見られるものの、 1800 min^{-1} 以上では、ホールのない集中巻タイプとほぼ同等のモータ効率が得られている。さらに、分布巻タイプと比較すれば、全速度領域で高効率となることが明らかとなった。

(平成 15 年 3 月 19 日受付、平成 15 年 8 月 18 日再受付)

文 献

- (1) H. Murakami, Y. Honda, S. Morimoto, and Y. Takeda: "A Study of Rotor Design for IPMSM with Concentrated Winding Considering the Iron Loss", *T. IEE Japan*, Vol.121-D, No.5, pp.597-603 (2001-5) (in Japanese)
村上 浩・本田幸夫・森本茂雄・武田洋次:「鉄損を考慮した集中巻 IPMSM の回転子構造に関する一考察」, 電学論 D, **121**, 5, pp.597-603 (2001-5)
- (2) Y. Asano, Y. Honda, Y. Takeda, and S. Morimoto: "Reduction of Vibration on Concentrated Winding Permanent Magnet Synchronous Motors with Considering Radial Stress", *T. IEE Japan*, Vol.121-D, No.11, pp.1185-1191 (2001-11) (in Japanese)
浅野能成・本田幸夫・武田洋次・森本茂雄:「集中巻永久磁石同期モータのラジアル応力に着目した振動低減」, 電学論 D, **121**, 11, pp.1185-1191 (2001-11)
- (3) Y. Asano, Y. Honda, H. Murakami, Y. Takeda, and S. Morimoto: "Novel Noise Improvement Technique for a PMSM with Concentrated Winding", *Proc. PCC-Osaka 2002*, Vol.2, pp.460-465 (2002-4)
- (4) T. Kobayashi, L. Ma, M. Sanada, S. Morimoto, and Y. Takeda: "Improvement of Radial Force and Torque Ripple for IPMSM with Concentrated Winding", *The papers of Technical Meeting on Rotating Machinery, IEE Japan*, RM-02-46 (2002-6) (in Japanese)
小林貴彦・馬 雷・真田雅之・森本茂雄・武田洋次:「集中巻 IPMSM のラジアル力とトルクリブルの低減法」, 電気学会回転機研資, RM-02-46 (2002-6)
- (5) Y. Asano: "Consideration Results of Demagnetization for Concentrated Winding Motor", *Proc. JIASC 2000*, Vol.1, pp.531-534 (2000-8) (in Japanese)
浅野能成:「集中巻ブラシレスモータの減磁検討」, 平 12 電気学会産業応用部門大会, 1, pp.531-534 (2000-8)
- (6) 武田洋次・松井信行・森本茂雄・本田幸夫: 埋込磁石同期モータの設計と制御, オーム社, pp.94-106 (2001-10)
- (7) T. Kobayashi, M. Sanada, S. Morimoto, and Y. Takeda: "Performance Improvement of IPMSM with Concentrated Winding Using Rare-earth Magnets", *The Papers of Technical Meeting on Semiconductor Power Converter, IEE Japan*, SPC-03-4 (2003-2) (in Japanese)
小林貴彦・真田雅之・森本茂雄・武田洋次:「希土類磁石を用いた集中巻 IPMSM の空隙配置による特性改善」, 電気学会半導体電力変換研資, SPC-03-4 (2003-2)
- (8) T. Kobayashi, L. Ma, M. Sanada, S. Morimoto, and Y. Takeda: "Effect of Holes inside the Rotor of IPMSM with Concentrated Winding on Radial Force Characteristics", *Proc. JIASC 2002*, Vol.1, pp.571-574 (2002-8) (in Japanese)
小林貴彦・馬 雷・真田雅之・森本茂雄・武田洋次:「集中巻 IPMSM のロータ内部に設けた空隙がラジアル力特性に及ぼす影響」, 平 14 電気学会産業応用部門大会, 1, pp.571-574 (2002-8)
- (9) K. Hiramoto, M. Sanada, S. Morimoto, and Y. Takeda: "Torque ripple reduction of IPMSM using asymmetric flux

barriers", *The Papers of Technical Meeting on Semiconductor Power Converter, IEE Japan*, SPC-03-2 (2003-2) (in Japanese)

平本健二・真田雅之・森本茂雄・武田洋次:「フラックスバリアの非対称性を利用した IPMSM のトルクリブル低減法」, 電気学会半導体電力変換研資, SPC-03-2 (2003-2)

- (10) K. Nakata, K. Hiramoto, M. Sanada, S. Morimoto, and Y. Takeda: "Noise Reduction for Switched Reluctance Motor with a hole", *Proc. PCC-Osaka 2002*, Vol.3, pp.971-976, (2002-4)

小林 貴彦 (学生員) 1978 年 8 月 22 日生。2001 年 3 月大阪府立大学工学部卒業。同年 4 月大阪府立大学大学院修士課程入学。在学中は主として、集中巻 IPMSM の高性能化、低振動化に関する研究に従事。2003 年 4 月より三菱電機株式会社に勤務。

武田 洋次 (正員) 1943 年 11 月 10 日生。1968 年 3 月大阪府立大学大学院修士課程修了。同年 4 月同大学助手、1993 年 4 月同教授、現在に至る。工学博士。主として、電動機可変速制御システム、リニアアクチュエータの研究に従事。IEEE, 電気情報通信学会, 計測自動制御学会, システム制御情報学会, パワーエレクトロニクス研究会会員。

真田 雅之 (正員) 1966 年 6 月 1 日生。1994 年 3 月大阪府立大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年 4 月同大学助手、1997 年 7 月同講師、現在に至る。工学博士。この間、主としてリニアモータ、電磁界解析の研究に従事。IEEE, 日本 AEM 学会, パワーエレクトロニクス研究会会員。

森本 茂雄 (正員) 1959 年 6 月 28 日生。1984 年 3 月大阪府立大学大学院修士課程修了。1988 年 7 月大阪府立大学助手、1994 年 4 月同助教授、現在に至る。工学博士。主としてモータドライブシステム, モーションコントロールの教育と研究に従事。IEEE, 計測自動制御学会, システム制御情報学会, パワーエレクトロニクス研究会会員。