

アキシアルギャップ型 SR モータの解析精度向上に関する検討

相澤拓毅, 中村健二
(東北大学)

Improvement of Calculation Accuracy of Axial-Flux-type SR Motor

Hiroki Aizawa, Kenji Nakamura
(Tohoku University)

1. はじめに

これまで筆者らは、スイッチトリラクタンス (SR) モータの性能向上と、インホイールダイレクトドライブ方式の電気自動車 (EV) への適用について検討を進めてきた⁽¹⁾。その結果、インホイールモータのように扁平な構造の場合、径方向に空隙を有する一般的なラジアルギャップ型よりも、軸方向に空隙を有するアキシアルギャップ型の方がトルク発生面が広く、トルク密度が高くなることを明らかにした⁽²⁾。また、市販の小型 EV に搭載されている永久磁石モータと、ほぼ同等の性能を有するアキシアルギャップ型 SR モータ (AFSRM) を試作し、走行試験を行うことで、その有用性を示した⁽³⁾。

一方、試作した AFSRM のトルクは、3次元有限要素法 (3D-FEM) による計算値を下回っていたことから、原因の解明と改良が必須であることも明らかになった。本稿では、AFSRM のさらなるトルク向上を目指し、トルクの誤差要因について分析を行ったので報告する。

2. トルクの誤差要因の分析

Fig. 1 に、試作した AFSRM の諸元を示す。本モータは、Fig. 2 に示すようにケースに格納され、EV の後輪 2 つのホイール内部に搭載される。この図から、金属製のハウジングや鉄心固定用のホルダなどが、モータに近接配置されていることがわかる。本稿では、AFSRM からの漏れ磁束が、これらの金属に鎖交することで生じる渦電流がトルク低下の要因と考え、モータのみではなく、ハウジングやホルダなども解析対象に含めて、3D-FEM で分析を行った。また、AFSRM の固定子、回転子とともに、積層鋼板であることから、これも考慮した。

Fig. 3 に、トルク特性の比較を示す。この図より、ハウジング等の渦電流や鋼板の積層を考慮することで、計算値は実測値と良好に一致することがわかる。

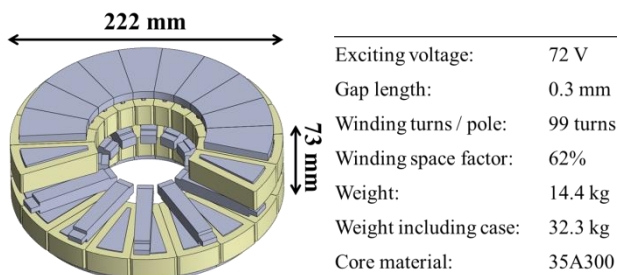


Fig. 1 Specifications of a prototype AFSRM.

Fig. 4 はハウジングの渦電流分布の計算結果である。この図より、無視できないほどの渦電流がハウジングに流れていることがわかる。今後は、この渦電流を低減し、さらなる性能向上を目指す予定である。

参考文献

- (1) H. Goto, Y. Suzuki, K. Nakamura, T. Watanabe, H. J. Guo, O. Ichinokura, *Journal of MMM*, **290-291**, 1338 (2005).
- (2) Y. Ono, K. Nakamura, O. Ichinokura, *J. Mag. Soc. Japan*, **35**, 106 (2011).
- (3) K. Takase, H. Goto, O. Ichinokura, *ICEMS 2016*, 16650659 (2016).

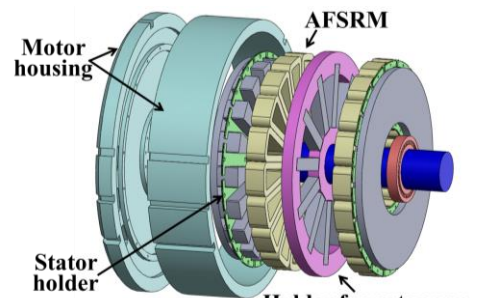


Fig. 2 Configuration of the motor assembly.

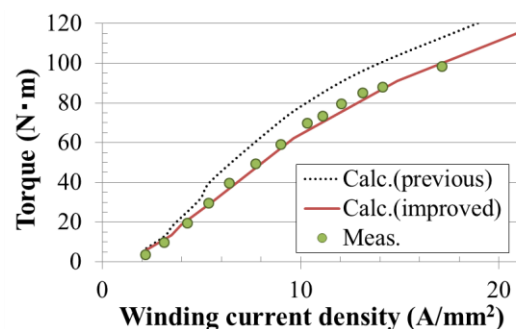


Fig. 3 Comparison of torque characteristics of AFSRM.

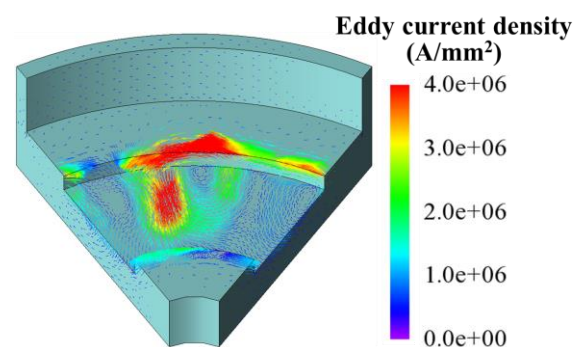


Fig. 4 Eddy current distribution of the motor housing.

インセット型高速 PM モータの試作試験

内山 裕太郎, 中村 健二, 一ノ倉 理, *後藤 博樹, **郭 海蛟
(東北大学, *宇都宮大学, **東北学院大学)

Prototype Test of High-Speed Inset PM Motor

Y. Uchiyama, K. Nakamura, O. Ichinokura, *H. Goto, **H. J. Guo
(Tohoku University, *Utsunomiya University, **Tohoku Gakuin University)

はじめに

近年、パワーエレクトロニクス回路の小型高出力化に伴い、損失密度の増大と、それに伴う局所的な発熱が顕在化している。このような回路の冷却手段としては、ファンによる強制風冷が一般的であるが、従来、これらのファンに用いられるモータはコストが最優先であったため、効率は決して高く無い。一方で、冷却ファン用モータは常時駆動し続けることから、その効率改善はシステム全体の省エネルギー化に寄与するところが少なくない。

先に筆者らは、冷却ファン用モータの高効率化について、回転子構造の観点から検討を行い、2層の埋込磁石構造とすることで、従来機の効率を大きく上回ることを実証した¹⁾。

本稿では、さらなる効率改善を目的として、インセット型永久磁石 (PM) モータの試作試験を行ったので報告する。

インセット型 PM モータの試作試験結果

Fig. 1 に、本稿での検討に用いたインセット型 PM モータの諸元を示す。3相6スロット4極機であり、定格回転数は 12,600 rpm、定格トルクは 200 mN・m である。高速回転に伴う磁石渦電流損を防ぐため、ネオジウムボンド磁石を採用した。ただし、磁石性能という観点から見ると、ボンド磁石は焼結磁石に劣るため、一般的な径方向着磁では無く、極異方性着磁を採用した。また、回転子に鉄心部分を設けたインセット型とすることで、リラクタンストルクを併用することも狙った。Fig. 2 に、試作したインセット型 PM モータの回転子の外観を示す。このモータについて、試作試験を行った。

Fig. 3 に実験システムの外観を示す。Fig. 4(a)に、試作機の電流密度対トルク特性を示す。この図を見ると、定格トルク時の電流密度は約 6.3 A/mm² であることがわかる。次いで、同図(b)は効率特性である。先行機¹⁾の最高効率率は約 88% であったのに対して、新たに試作したインセット型 PM モータは 90% 以上の効率を達成したことが了解される。

参考文献

1) 川村 恭平, 中村 健二, 一ノ倉 理, 後藤 博樹, 郭 海蛟, 「冷却ファン用高速回転モータの高トルク化・高効率化に関する検討」, 日本磁気学会論文特集号, Vol. 3, No. 1, pp. 85-89 (2019)

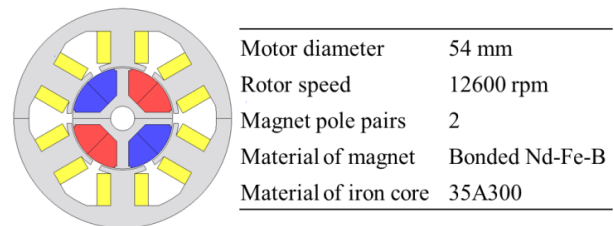


Fig. 1 Specifications of an Inset PM motor.

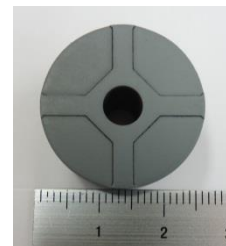


Fig. 2 Rotor core of the prototype Inset PM motor.

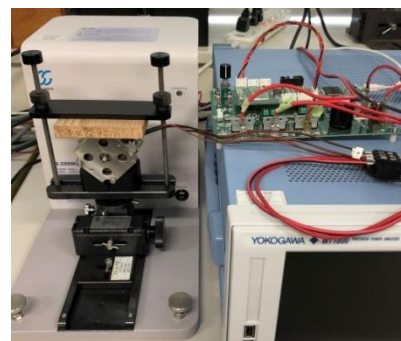
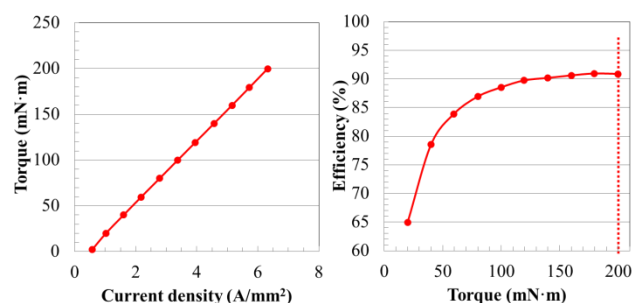


Fig. 3 External view of the experimental setup.



(a) Torque characteristic (b) Efficiency characteristic
Fig. 4 Basic characteristics of the prototype Inset PM motor.

圧粉磁心を適用した電動工具用 SR モータに関する検討

永井 歩美, 中村 健二, 佐藤 重典, 牧野 彰宏
(東北大学)

High-Speed SR Motor made of Soft Magnetic Composite for Electric Power Tools

A. Nagai, K. Nakamura, S. Sato, A. Makino
(Tohoku University)

はじめに

スイッチトリラクタンس (SR) モータは、鉄心と巻線のみで構成される両突極機である。巻線は固定子極のみに集中巻され、回転子には巻線や導体バー、ブラシや整流子などは不要である。そのため、SR モータは構造が単純で堅牢、保守性が良好、安価などの特長を有し、電動工具などの高速回転用途に適する。先に筆者らは、電動工具用の SR モータの解析設計と試作試験を行い、既存の希土類磁石モータと同等以上のトルクを有することを明らかにした¹⁾。

本稿では、さらなる高効率化を目的として、高周波鉄損の小さい圧粉磁心を適用した SR モータの特性について検討を行ったので報告する。

圧粉磁心を用いた SR モータの特性

Fig. 1 に、考察に用いた SR モータの諸元を示す。本 SR モータは先行研究で開発した固定子 12 極、回転子 8 極の 3 相機であり、直径は 45 mm である。

Fig. 2 に、先行機の鉄心材料 (35A300) と本稿で用いた圧粉磁心の B - H 曲線と鉄損曲線を示す。これらの図を見ると、飽和磁束密度は考察に用いた圧粉磁心がケイ素鋼板よりも低い。しかしながら、鉄損は特に高周波側で小さいことがわかる。本稿では、両材料を用いた 12/8 SR モータの特性について、3 次元有限要素法を用いて比較・検討を行った。

Fig. 3 に電流密度に対するトルク特性を、Fig. 4 にトルクに対する効率特性を示す。これらの図を見ると、飽和磁束密度が低いことからトルク特性は低下したが、効率特性は特に低負荷側で改善したことがわかる。

まとめ

以上、高周波鉄損の小さい圧粉磁心を適用した SR モータの特性について比較・検討を行った。今後は圧粉磁心の形状自由度の高さを利用し、固定子鉄心形状に工夫を加えることで、高トルク化と高効率化の両立を図る予定である。なお、本研究の一部は東北大学 AIE 卓越大学院プログラムにより支援された。

参考文献

- 1) K. Nakamura, Y. Kumasaka, O. Ichinokura, *Journal of Physics: Conference Series*, **903**, 012040 (2017).

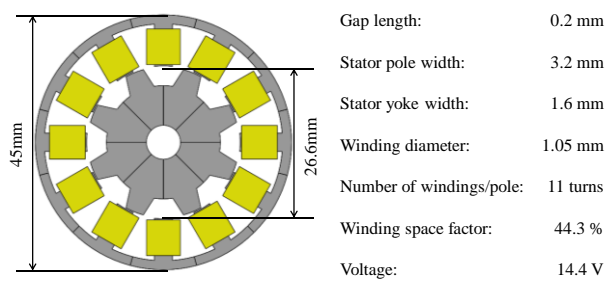
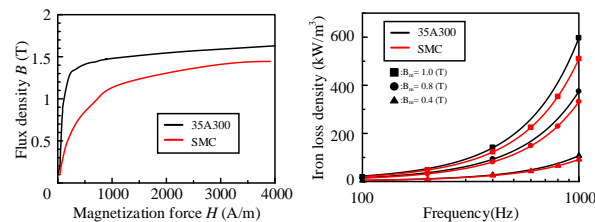


Fig. 1 Specifications of SR motor for comparison.



(a) B - H curves (b) Iron loss characteristics

Fig. 2 Characteristics of core material.

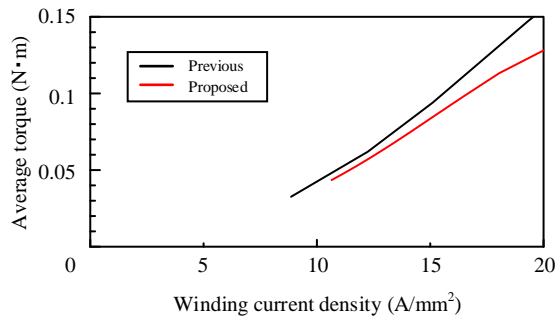


Fig. 3 Comparison of current density versus torque characteristics.

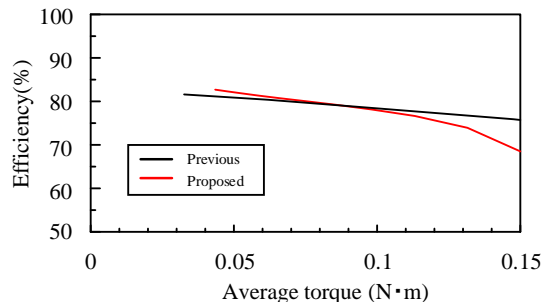


Fig. 4 Comparison of torque versus efficiency characteristics.

磁気ギヤードモータの電流位相角が脱調トルクに及ぼす影響

伊藤 亘輝, 中村 健二
(東北大学)

Influence of Current Phase Angle on Stall torque of Magnetic-Gear Motor

Koki Ito, Kenji Nakamura
(Tohoku University)

はじめに

先に筆者らは、磁気ギヤードモータを試作し、その有用性を実証するとともに、移動支援機器への適用可能性を示した¹⁾。その後の検討において、磁気ギヤードモータは電流位相角により、脱調トルクに変化が生じることが明らかになった。本稿では、電流位相角が磁気ギヤードモータの脱調トルクに及ぼす影響について、3次元有限要素法(3D-FEM)を用いて検討を行ったので報告する。

電流位相角と脱調トルクの関係

Fig. 1に、考察対象とした磁気ギヤードモータの試作機の諸元を示す。モータ部は3相9スロット集中巻の固定子と4極対の内側回転子で構成され、磁気ギヤ部はモータ部と共通の内側回転子と、27極のポールピース、23極対の外側回転子で構成される。

Fig. 2に、各電流位相角に対する脱調トルクの実測値を示す。同図より、電流位相角を進めると脱調トルクが増加し、遅らせると減少することがわかる。ここで、本磁気ギヤは内外回転子の磁石磁束をポールピースで変調することで、ギヤとして動作することから、電流位相角が変調磁束に与える影響について、3D-FEMを用いて検討を行った。なお、解析では外側回転子磁石を空気とし、電機子電流密度 6.5 A/mm^2 で電流位相角を -60° , 0° , 60° とした場合と、電流密度を 0 A/mm^2 とし、磁気ギヤとして動作させた場合の結果を比較した。

Fig. 3に、ポールピースによって変調された磁束密度波形を示す。また、Fig. 4は上記磁束密度波形の各次高調波成分のうち、トルク伝達に寄与する23次成分を比較した結果である。この図を見ると、電流位相角に応じて、23次成分の振幅が増減していることがわかる。すなわち、本磁気ギヤードモータは、電流位相角を進めるとトルクに寄与する磁束成分が増え、最大トルクが向上することが明らかとなった。

本研究の一部は東北大学 AIE 卓越大学院プログラムにより支援された。

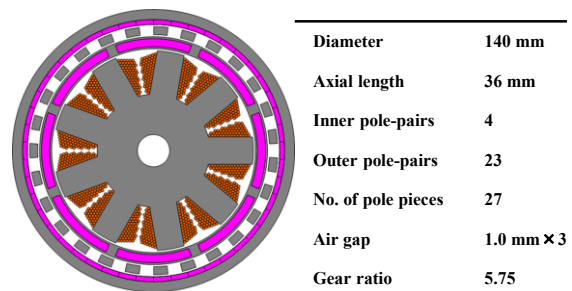


Fig. 1 Specifications of a prototyped magnetic-gear motor.

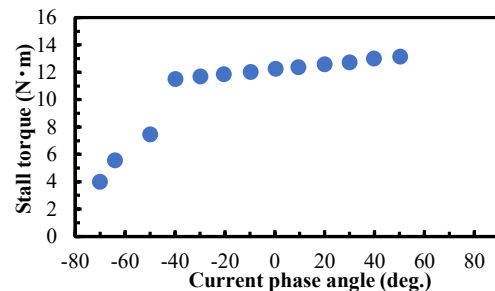


Fig. 2 Current phase angle versus stall torque.

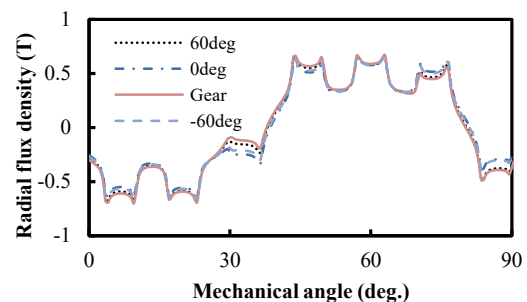


Fig. 3 Radial flux density distribution in air gap between the pole-pieces and the outer rotor.

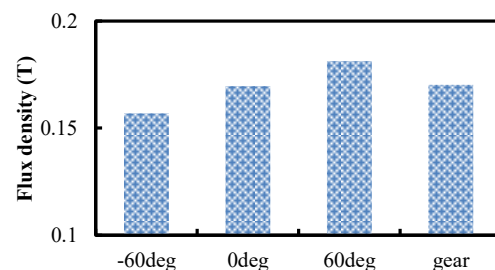


Fig. 4 The 23rd harmonic content of flux density distribution shown in Fig. 3.

参考文献

1) 伊藤, 門松, 中村, 日本磁気学会論文特集号, 3,1, (2019)

アウターロータ型高速PMモータの高効率化に関する検討

櫻井 将, 中村健二
(東北大学)

Efficiency Improvement of Outer Rotor type High-Speed Permanent Magnet Motor

S. Sakurai, K. Nakamura
(Tohoku University)

はじめに

スイッチング電源回路やモータ駆動回路は、常に小型高出力化が求められるが、出力密度の向上に伴い、局所的な損失の増大と、それに伴う発熱の問題が顕在化している。このような回路の冷却には、ファンによる強制風冷が一般的であるが、従来、ファン用のモータはコストが最優先であったため、矩形波駆動方式が採用され、効率も決して高くない。一方で、ファン用モータは常時駆動されることから、その効率改善はシステム全体の省エネルギー化に寄与するところが少なくない。

先に筆者らは、ファン用モータの高効率化に関して、インナーロータ型の永久磁石 (PM) モータの回転子構造に着目し、2層の埋込磁石構造とすることで、従来機の効率を大きく上回ることを実証した¹⁾。

本稿では、ファン用モータとして、より一般的な構成であるアウターロータ型に着目し、その高効率化について検討を行ったので報告する。

アウターロータ型PMモータの高効率化検討

Fig. 1 に、本稿での比較検討に用いたアウターロータ型のPMモータを示す。3相6スロット集中巻の4極機であり、鉄心材料は厚さ0.35 mmの無方向性ケイ素鋼板、磁石材料はネオジウム焼結磁石である。同図(a)は一般的な表面磁石型 (SPM) であるが、ファン用モータのような高速用途では、磁石渦電流損の影響が大きいと予想される。そこで本稿では、同図(b)に示すように、磁石を回転子鉄心内部に浅く埋め込んだ構造 (IPM) について検討を行った。さらに、磁石を周方向に5つずつ分割することで、磁石渦電流損のさらなる抑制を狙った。

Fig. 2 に、3次元有限要素法 (3D-FEM) を用いて算定した、両モータのトルク特性と効率特性を示す。これらの図を見ると、トルクはSPMが優れていることがわかる。これはトルクに寄与する磁石磁束がIPMよりも大きいためである。一方、効率はIPMの方が高いことがわかる。この理由を示したのが、Fig. 3の各損失の比較である。同図中の W_c が銅損、 W_i

が鉄損、 W_e が磁石渦電流損、そして W_{total} が全損失である。これらの図を見ると、銅損 W_c はトルクが優れるSPMの方が小さいが、磁石渦電流損 W_e はSPMに対して、IPMは1/10以下に低減できていることがわかる。これが効率向上の主たる要因である。

以上より、提案するIPM構造の回転子の有用性が明らかになった。今後は実証実験を行う予定である。

参考文献

1) 川村, 中村, 一ノ倉, 後藤, 郭, 日本磁気学会論文特集号, 3, 85 (2019)

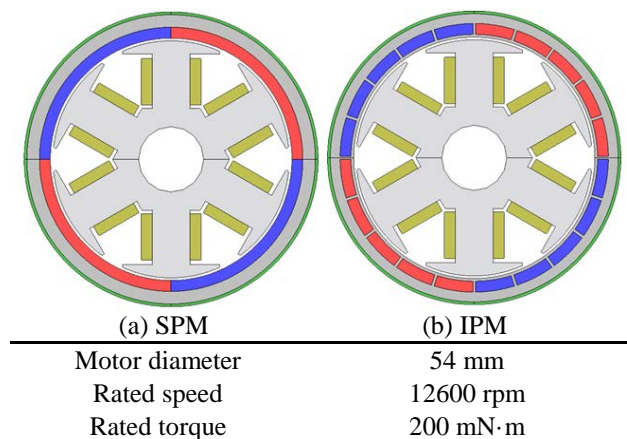


Fig. 1 Outer rotor type SPM and IPM motors.

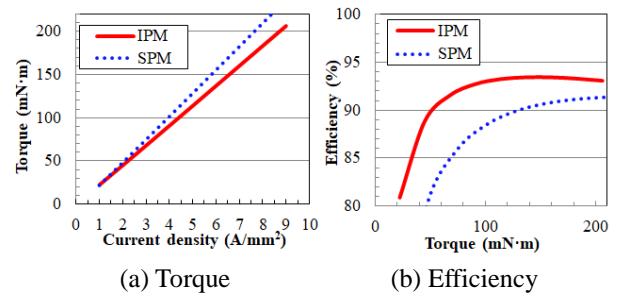


Fig. 2 Comparison of basic characteristics.

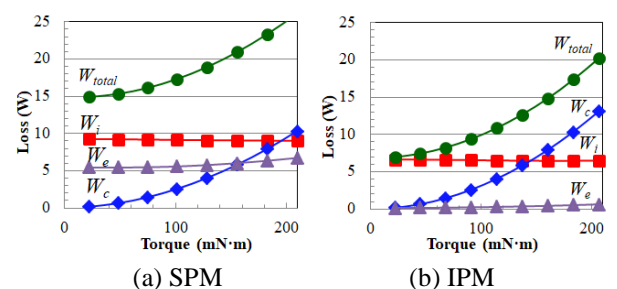


Fig. 3 Comparison of loss characteristics.

アモルファス合金を適用した埋込磁石型磁気ギヤの特性

水穴裕真, 中村健二, *鈴木雄真, *大石悠平, *立谷雄一, *操谷欽吾
(東北大学, *株式会社プロスピ)

Characteristics of Interior Permanent Magnet Magnetic Gear made of Amorphous Alloy

Y. Mizuana, K. Nakamura, Y. Suzuki, Y. Oishi, Y. Tachiya, K. Kuritani
(Tohoku University, *Prospine Co., Ltd.)

はじめに

磁束変調型磁気ギヤは、非接触で増減速可能であるため、機械式ギヤと比べて振動や騒音が小さく、保守性に優れ、また他の磁気ギヤと比べてトルク密度が高い¹⁾。一方、磁束変調に起因して磁石には渦電流が生じることが知られている。

先に筆者らは、磁石渦電流の低減策として、鉄心内部に磁石をスポーク状に埋め込む手法を提案するとともに²⁾、磁気ブリッジの位置や磁石形状を工夫することで、トルクを向上させる手法を提案した³⁾。

本稿では、埋込磁石型 (IPM) 磁気ギヤのさらなる効率向上を目的として、軟磁性材料の中でも鉄損が小さいアモルファス合金に着目し、これを IPM 磁気ギヤの鉄心に用いた場合の特性について、解析と実験の両面から検討を行ったので報告する。

アモルファス合金を用いた IPM 磁気ギヤの特性

Fig. 1 に、IPM 磁気ギヤの諸元を示す。回転子磁石はスポーク状に埋め込まれており、磁気ブリッジはギャップの反対側に設けられている。本稿では、低鉄損材料であるアモルファス合金に着目し、回転子鉄心とポールピースの材料の組み合わせを種々変更して比較を行った。

Fig. 2 に、3次元有限要素法で求めた、外側回転子の最大トルクと鉄損の計算値を示す。なお、この時の高速側の回転数は 300 rpm である。同図(a)を見ると、一般にアモルファス合金の方がケイ素鋼板よりも飽和磁束密度が低いにもかかわらず、鉄心材料にアモルファスを用いることでトルクが向上していることがわかる。また、同図(b)を見ると、ポールピース材をアモルファスにすることで、鉄損を大幅に低減できていることがわかる。

次いで、これら3種類の磁気ギヤを実際に試作し、特性の比較を行った。Fig. 3 に、外側回転子の最大トルクの実測値を示す。この図を見ると、実験においても、ケイ素鋼板からアモルファス合金に変更することでトルクが向上しており、Fig. 2(a)に示した計算結果と同様の傾向を示していることがわかる。

本研究の一部は東北大学 AIE 卓越大学院プログラムにより支援された。

参考文献

- 1) K. Atallah and D. Howe, *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 2844 (2001).
- 2) T. Ikeda, K. Nakamura, and O. Ichinokura, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **33**, 130 (2009).
- 3) Y. Mizuana, K. Nakamura, Y. Suzuki, Y. Oishi, Y. Tachiya, K. Kuritani, *Trans. Magn. Special Issues*, **3**, 74 (2019).

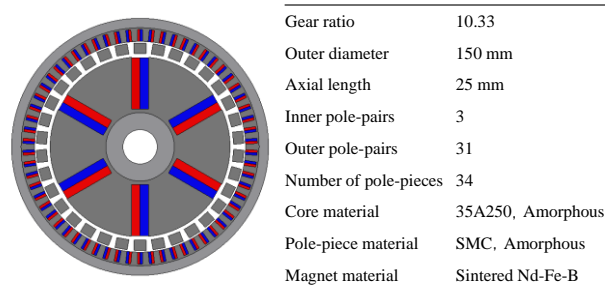


Fig. 1 Specifications of IPM magnetic gear.

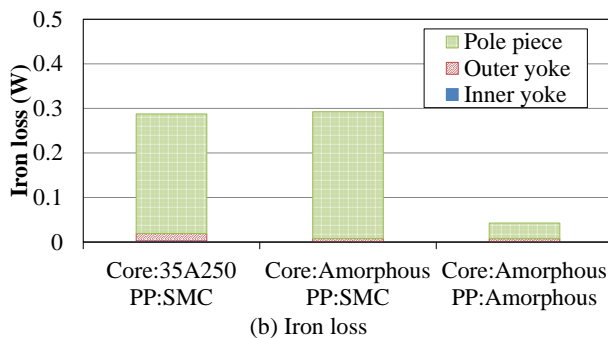
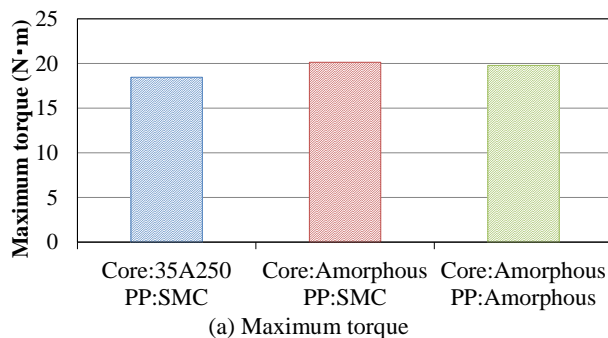


Fig. 2 Comparison of calculated torque and iron losses of the IPM magnetic gears.

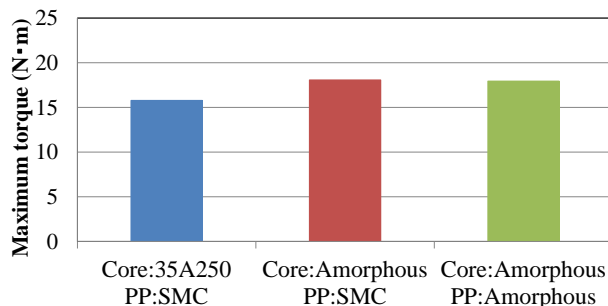


Fig. 3 Comparison of the measured maximum torque of the IPM magnetic gears.

1層毎交互巻高周波アモルファストランスを有する 直流連系用 DC-DC コンバータの特性

大津 諭史, 中村 健二 (東北大学)

Characteristics of DC-DC Converter having High-Frequency Amorphous Transformer with Interleaved-Winding for HVDC Transmission System
S. Otsu, K. Nakamura (Tohoku University)

はじめに

近年、欧州を中心に総容量 100 MW 以上の洋上ウインドファームの導入が進んでおり、その送電方式として、高圧直流送電 (HVDC) が注目されている。筆者らは、HVDC 用のコンバータには、昇圧と絶縁の機能を具備した高周波リンク型 DC-DC コンバータが適すと考え、動作周波数が数 kHz のトランスの材料については、鉄損低減の観点からアモルファス合金が最適であると明らかにした⁽¹⁾。また、近接効果による銅損の増加を明らかにし、これを抑制可能な巻線構成として 1 層毎交互巻を提案した⁽²⁾。

本稿では、直流連系用 DC-DC コンバータの小型模擬実験システムを用いて、1 層毎交互巻アモルファストランスを適用した際の特性について、種々検討を行ったので報告する。

小型模擬システムを用いた実験結果

Fig. 1 に、1 層毎交互巻アモルファストランスの形状・寸法と巻線配置を示す。1 次巻線と 2 次巻線が 1 層毎交互に配置されるため、漏れ磁束が極めて小さく、近接効果に起因する銅損の増加を抑制できる。

Fig. 2 に、直流連系用 DC-DC コンバータの小型模擬実験システムの構成を示す。風車は最大電力追従制御によって巻線電流が制御されることから、DC-DC コンバータの入力側は直流電流源で模擬した。一方、出力側は直流系統電圧が常に一定に保たれていると仮定し、定電圧源で模擬した。DC-DC コンバータの DC/AC 変換部は位相シフト制御により、トランスの交流印加電圧を一定に保つことができる。

Fig. 3 に、1 層毎交互巻アモルファストランスを用いて、duty = 0.6 としたときの観測波形を示す。この図を見ると、入力電圧と出力電圧の位相差がほぼ無く、環流電流も瞬時に減衰していることがわかる。これは 1 層毎交互巻トランスは結合係数が高く、漏れインダクタンスが極めて小さいためである。

Fig. 4 に効率の比較を示す。1 層毎交互巻を採用することで、近接効果の抑制、並びにスイッチング損失の低減により、効率が向上することが明らかとなった。

参考文献

- 1) 田中秀明, 中村健二, 一ノ倉理, マグネティックス研究会資料, MAG-14-29 (2014)
- 2) H. Tanaka, K. Nakamura, O. Ichinokura, *J. Magn. Soc. Jpn.*, Vol. 40, pp. 35-38 (2016).

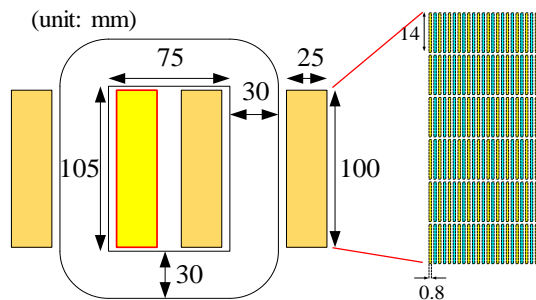


Fig. 1 Shape and dimensions of the amorphous transformer with interleaved-winding.

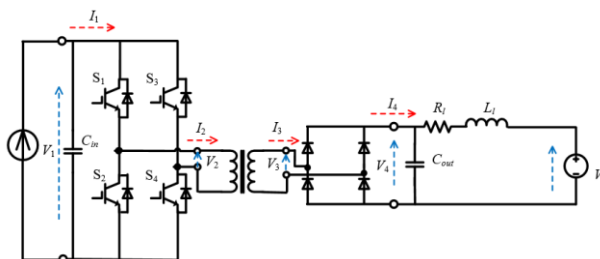


Fig. 2 Circuit configuration of the dc-dc converter for HVDC transmission system.

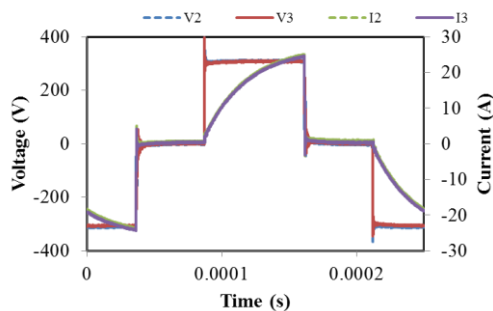


Fig. 3 Observed waveforms of the input and output voltage and current of the amorphous transformer (duty = 0.6).

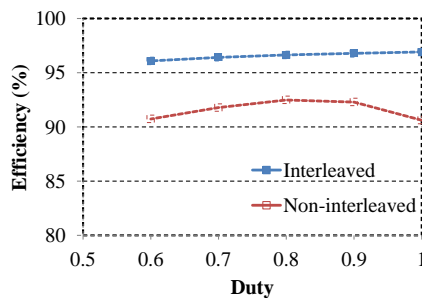


Fig. 4 Comparison of efficiency of the dc-dc converters when the transformer has interleaved-winding and non-interleaved-winding.

周波数拡散を用いた DC-DC コンバータのノイズと効率に 及ぼす磁気飽和の影響

西島健一, 天池伸吾*

(富山高等専門学校, *日産エンジニアリング株式会社)

Influence of Magnetic Saturation on Noise and Efficiency
of DC-DC Converter with Frequency Spreading

K.Nishijima, *S.Amaike

(National Institute of Technology, Toyama College, *Nissan Engineering, Ltd)

はじめに

パワエレ分野で EMI ノイズ規格が 150kHz 以下にまで拡大される動きが IEC で行われている¹⁾。150kHz 以下の周波数範囲では最もノイズレベルが高い基本波からのノイズ対策が必要となる。筆者は、ノイズ対策手法として、フィルタと周波数拡散機能の両面から最適な低減化を図るための設計指針を検討している²⁾。

本報告では、電子機器の小型化トレンドを阻害しない電源ノイズ対策として周波数拡散によるノイズ低減と変換効率に及ぼす磁気飽和の影響について述べる。

実験方法と結果

実験は昇圧形 DC-DC コンバータ ($V_{in}=7.2V \rightarrow V_{out}=12V$, $f_s \approx 110kHz$) を用い、PWM 制御 IC の周波数設定端子に三角波 ($f_m \approx 300Hz$) を RC カップリング入力することでスイッチング周波数を変調させている。周波数拡散で周波数が低周波に変調したときに、ON 時間が長くなり、大きい電流が流れ、インダクタ L の定格電流を超えて磁気飽和する可能性がある。実験では、磁気飽和の影響を調べるために L 値が同じ 47 μH で定格電流が 2.8A (磁気飽和なし) と 0.62A (磁気飽和あり) の異なるインダクタを用いて、伝導ノイズ (コンバータの入力 V_{in}) と効率 (P_{out}/P_{in}) の比較・検討を行った。その結果、定格電流が 2.8A のインダクタ (磁気飽和なし) では、周波数拡散の拡散幅を広げることでノイズ低減効果も大きくなり、このとき、出力電圧と効率はほぼ一定となった。これに対して、定格電流が 0.62A のインダクタ (磁気飽和あり) では、前者ほどのノイズ低減効果は得られず (8dBV 劣化)、このとき、出力電圧はほぼ一定を保つが効率は低下 (7% 劣化) した。図 1 に拡散幅 Δf に対する基本波ノイズ低減量と効率を示す。今後は、スイッチング電源と EMC の設計指針として検討を進めていく予定である。発表当日は詳細な実験・検討結果について述べる。

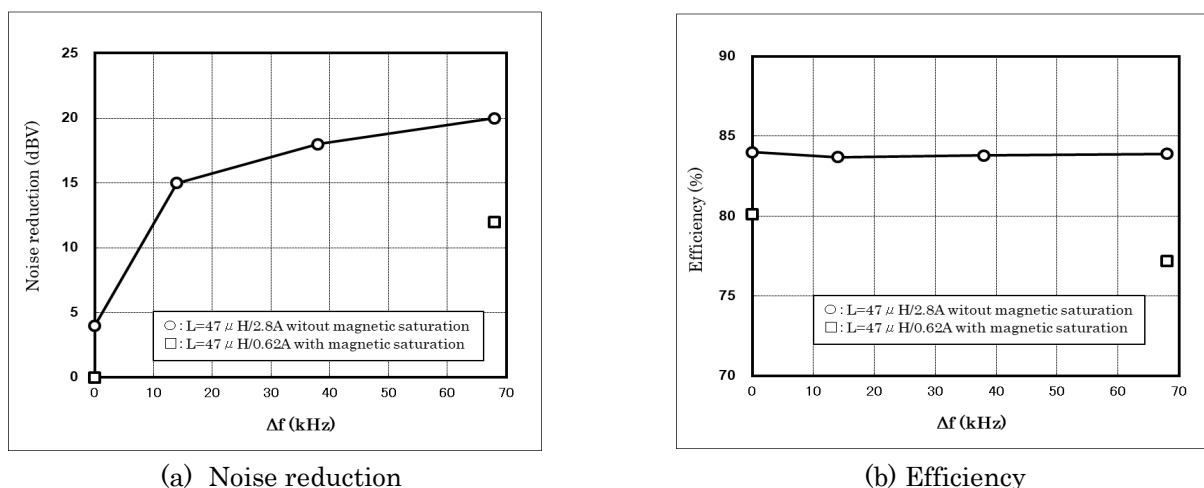


Fig.1 Noise reduction and efficiency for spreading width.

参考文献

- 1) Gerhard F.Bartak, Andreas Abart: *EMC'14/Tokyo*, 15P-B1(2014).
- 2) K.Nishijima, S.Ikeda: *Journal of the Japan Institute of Power Electronics*(in Japanese), **43**, pp.81-88(2018).