

誘導同期磁気ギヤの復帰トルクに関する検討

水穴裕真, 中村健二, *鈴木雄真, *立谷雄一, *操谷欽吾
(東北大学, *㈱プロスパイン)

Examination of Restarting Torque of Induction/Synchronous Magnetic Gears

Y. Mizuana, K. Nakamura, Y. Suzuki, Y. Tachiya, K. Kuritani

(Tohoku University, *Prospine Co., Ltd.)

はじめに

磁気ギヤは非接触で動力を伝達できるため、機械式ギヤと比べて振動・騒音が小さく、保守性に優れる。その中でも磁束変調型磁気ギヤは、他の磁気ギヤと比べてトルク密度が高い^{1), 2)}。一方、磁気ギヤは過大な負荷が印加されると脱調し、動力伝達ができなくなる。また、脱調後は負荷をある程度取り除かない限り、再始動することができない。

本稿では、脱調後の再始動性向上を目的として、誘導同期モータの原理に着目し、磁気ギヤの回転子にかご形導体を付加した誘導同期磁気ギヤを新たに提案するとともに、原理検証実験を行ったので報告する。

誘導同期磁気ギヤの原理検証

Fig. 1 に、原理検証機の諸元を示す。同図(a)の誘導同期磁気ギヤは、ギヤ比が6であり、内側回転子に28本の導体バーが等間隔に配置されている。また、同図(b)の誘導同期磁気ギヤは、ギヤ比が10.33であり、内側回転子に6本の導体バーが等間隔に配置されている。

Fig. 2 に、増速動作時における復帰トルクの測定結果を示す。磁気ギヤを一度脱調させてから負荷を下げている、再始動した時のトルクを復帰トルクとした。外側回転数は60 rpm, 80 rpm, 100 rpm とし、各回転数で10回ずつ測定を行った。

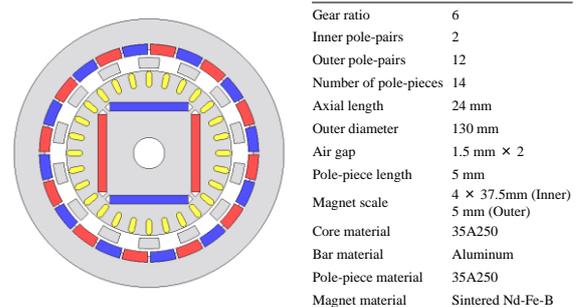
同図(a)より、ギヤ比6の場合、いずれの回転数においても、かご形導体を有する誘導同期磁気ギヤの方が、かご形導体の無い通常の磁気ギヤと比べて、復帰トルクが大きいことがわかる。また、同図(b)を見ると、ギヤ比10.33の場合、外側回転数100 rpmにおいて、かご形導体を付加することで脱調後の再始動が可能になっていることがわかる。

以上より、回転子にかご形導体を付加することで、脱調後の復帰トルクを改善できることが明らかになった。

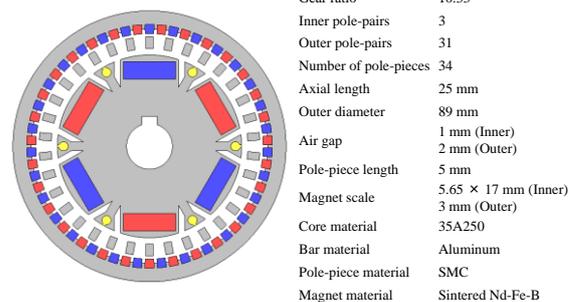
本研究の一部は東北大学 AIE 卓越大学院プログラムにより支援された。

参考文献

- 1) K. Atallah and D. Howe, *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 2844 (2001).
- 2) F. T. Jørgensen, P. O. Rasmussen, and T. O. Andersen: Summer Seminar on Nordic Network for Multi Disciplinary Optimized Electric Drives (2003)

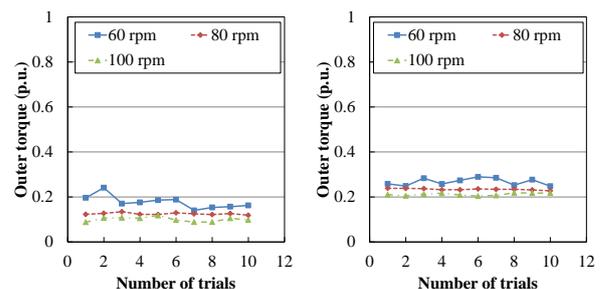


(a) Gear ratio 6

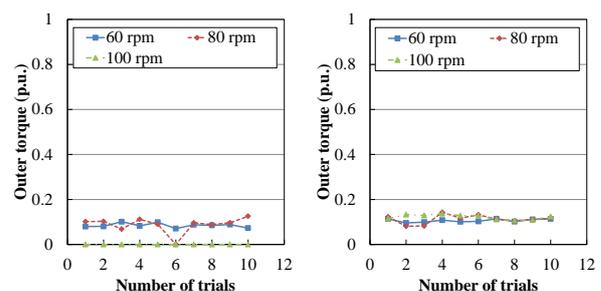


(b) Gear ratio 10.33

Fig. 1 Specifications of induction/synchronous magnetic gears.



(a) Gear ratio 6 (left : w/o bars, right : w/ bars)



(b) Gear ratio 10.33 (left : w/o bars, right : w/ bars)

Fig. 2 Comparison of measured restarting torque.

アンバランスポールピースによる整数ギヤ比磁気ギヤのコギングトルク低減に関する検討

戴博群, 中村健二, *鈴木雄真, *立谷雄一, *操谷欽吾
(東北大学, *株)プロスパイン)

Cogging Torque Reduction of Integer Gear Ratio Magnetic Gear by Applying Unbalanced Pole-Pieces

B. Dai, K. Nakamura, Y. Suzuki, 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動力を伝達できるため、機械式ギヤと比べて振動・騒音が小さく、メンテナンスフリーである。また、他の磁気ギヤと比べてトルク密度が高いこと、風力発電用の増速ギヤとしての応用が期待されている。

システム全体の設計要件に基づき、磁気ギヤには整数ギヤ比が求められるケースがあるが、この場合、高速側のコギングトルクが大きくなり、振動や騒音、起動エラーなどの問題が生じる。この問題に対して、スキュー構造は一つの有効なコギングトルク低減策だが²⁾、磁石形状が特殊になるため、特に風力発電用の大型機では製作性の面で不利である。

そこで本稿では、高速側のコギングトルク低減を目的として、新たにアンバランスポールピースを提案する。3次元有限要素法(3D-FEM)を用い、提案手法の有用性について検討を行ったので報告する。

コギングトルクの削減に関する検討

Fig. 1 に、考察に用いたアキシシャルギャップ型の磁気ギヤの諸元を示す³⁾。高速側回転子は表面磁石型、低速側回転子は埋込磁石型である。高速側回転子の鉄心材料は無方向性ケイ素鋼板、低速側回転子の鉄心とポールピースの材料は圧粉磁心である。

Fig. 2 に、ポールピースの周方向幅比が0.5で均一の従来のタイプと、周方向幅比が0.3, 0.8, 0.7と異なる3種類を組み合わせたアンバランスタイプを示す。

Fig. 3 に、3D-FEMを用いて算定した、両タイプの高速側のコギングトルク波形を示す。この図を見ると、アンバランスタイプのコギングトルクは大幅に低減していることがわかる。この要因を示すため、Fig. 4 に、アンバランスタイプの3種類のポールピースが作る各々のコギングトルク波形を示す。この図を見ると、各波形の位相がずれることで、互いに打ち消し合っ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) S. Ahmadrza Afsari, H. Heydari, and B. Dianati, *IEEE Trans. Magn.*, **51**, 1 (2015)
- 3) B. Dai, K. Nakamura *et al.*, *ICEMS 2020*, LS8H-2 (2020).

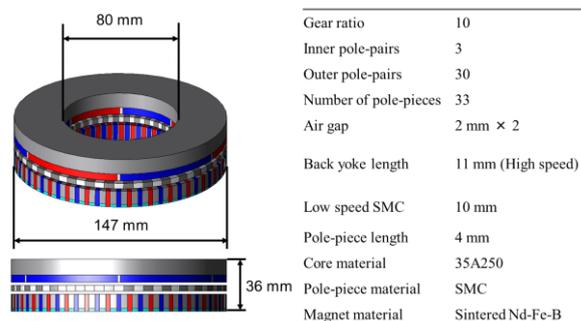


Fig. 1 Specifications of the discussed magnetic gears.

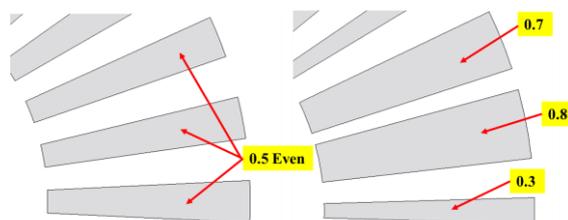


Fig. 2 Comparison of conventional and proposed pole-pieces layout (left: conventional, right: proposed).

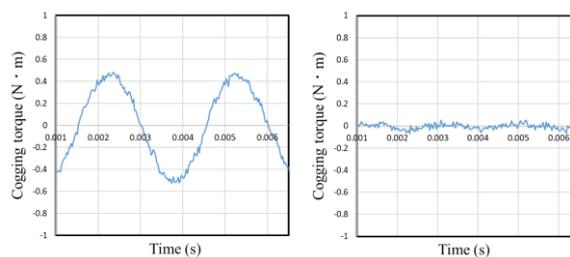


Fig. 3 Comparison of cogging torque of high-speed side rotor (left: conventional, right: proposed).

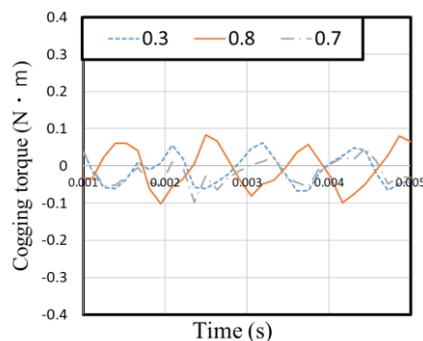


Fig. 4 Breakdown of the high-speed side cogging torque of the magnetic gear with unbalanced pole-pieces.

埋込磁石型磁気ギヤードモータの力率・効率に関する一考察

伊藤 亘輝, 中村 健二
(東北大学)

A Consideration of Power Factor and Efficiency of IPM-type Magnetic-Geared Motor

Koki Ito, Kenji Nakamura
(Tohoku University)

はじめに

先に筆者らは、埋込磁石型(IPM)磁気ギヤードモータを試作し、従来の表面磁石型よりも高効率であることを実証した¹⁾。また、IPM 磁気ギヤードモータはギヤ部とモータ部の磁氣的相互作用により、脱調トルクが変化することを明らかにした²⁾。本稿では、磁氣的相互作用が IPM 磁気ギヤードモータの力率や効率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。

磁氣的相互作用が力率・効率へ及ぼす影響

Fig. 1 に、考察対象とした IPM 磁気ギヤードモータの試作機の諸元を示す。はじめに磁氣的相互作用が力率へ及ぼす影響を調べるため、負荷角 30, 45, 90 度における電機子電圧の位相を 3D-FEM にて算定した。Fig. 2 に、負荷角ごとの電機子電圧の基本波成分の算定結果を示す。同図より、負荷角が大きいくほど電機子電圧と入力電流の位相差が大きくなり、力率が低下することがわかる。負荷角を増加することは磁気ギヤ部の変調磁束の位相を変化させることに等しいため、力率が変化するのは磁氣的相互作用の影響だといえる。結果より、高力率・高効率運転を行うには、負荷角の増加に伴い、電流位相を進めるのがよいと考えられる。Fig. 3 に、負荷角ごとの力率の算定結果を示す。同図より、力率が最大となる電流位相が、負荷角の増加に応じて進み位相側にシフトしていることが了解される。

Fig. 4 に負荷角ごとの効率の算定結果を示す。この図を見ると、進み電流位相側で効率が最大となることがわかる。すなわち、埋込磁石型磁気ギヤードモータは進み電流位相で駆動した方が、力率および効率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。

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)
- 2) 伊藤, 中村, 日本磁気学会論文特集号, 4,1, (2020)

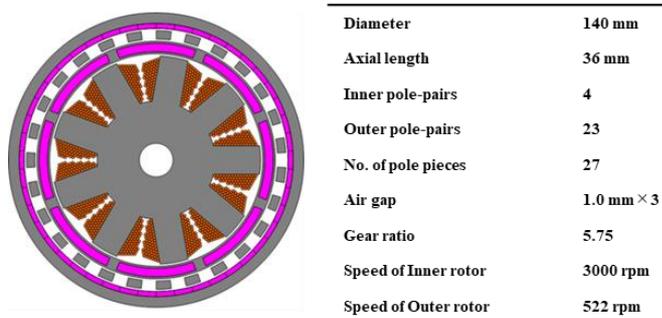


Fig. 1 Specifications of a prototyped IPM-type magnetic-gear motor.

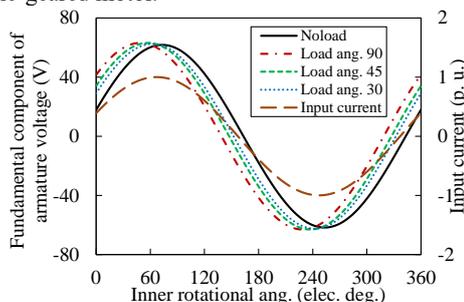


Fig. 2 Calculated waveforms of the armature voltage at various load angles.

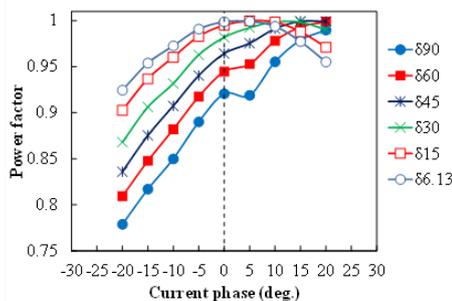


Fig. 3 Calculated displacement power factor at various current phases and load angles.

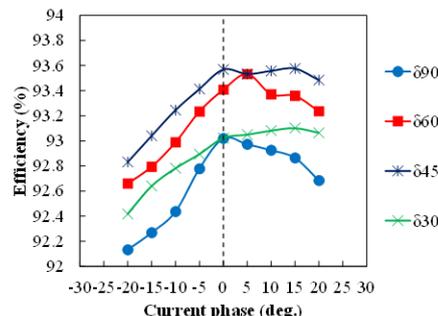


Fig. 4 Calculated efficiency at various current phases and load angles.

逆バイアス磁界印加用磁石を有する 横方向磁束型スイッチトリラクタンスモータの基礎特性

永井歩美, 三ツ谷和秀, 中村健二
(東北大学)

Basic Characteristics of Transverse-Flux-type Switched Reluctance Motor with
Permanent Magnets applying Reverse Bias Magnetic Field

A. Nagai, K. Mitsuya, K. Nakamura
(Tohoku University)

はじめに

横方向磁束型 (Transverse-Flux-type) モータとは、回転子の回転方向に対して主磁束が横切る方向に流れるモータの総称である。先に筆者らは、横方向磁束型 SRM (TF SRM) の試作試験を行い、一般的な SRM よりも大きなトルクを有することを明らかにした¹⁾。

本稿では、TF SRM のさらなるトルク向上を目的として、逆バイアス磁界印加用磁石を有する TF SRM について、3次元有限要素法 (3D-FEM) を用いて基礎特性を算定したので報告する。

提案する TF SRM の基礎特性

Fig. 1 に、逆バイアス磁界印加用磁石を有する TF SRM の基本構成を示す。この図より、回転子カットコアの内側に永久磁石が配置されていることがわかる。Fig. 2 に本 TF SRM の一極分の拡大図を示す。同図中の矢印は固定子巻線による磁束と永久磁石による磁束の流れを示しており、回転子において両者の磁束の流れが逆方向になっていることがわかる。これにより、励磁開始前の動作磁束密度の原点は磁石によって負方向に逆バイアスされ、鉄心の見かけ上の飽和磁束密度が高くなるため、トルクの増大が期待される。

Fig. 3 に電流密度対トルク特性を示す。この図を見ると、逆バイアス磁界印加用磁石により、全体的にトルクが増大したことがわかる。また、Fig. 4 に損失内訳および効率特性を示す。この図を見ると、特に高負荷側で銅損が著しく低減し、効率が向上していることがわかる。これは逆バイアス磁界印加用磁石によってトルクが向上したことに由来する。今後は試作試験を行う予定である。

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) T. Komoriya, Y. Ito, K. Nakamura, *J. Magn. Soc. Jpn. Special Issues.*, **3**, 58 (2019)[In Japanese].

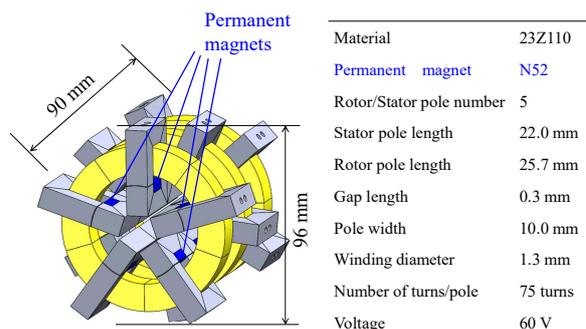


Fig. 1 Proposed TF SRM with permanent magnets applying reverse bias magnetic field.

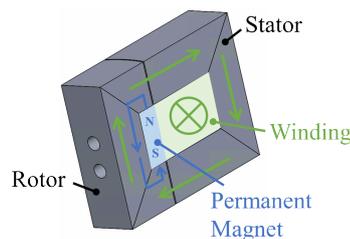


Fig. 2 Proposed TF SRM with permanent magnets applying reverse bias magnetic field. (one-pole).

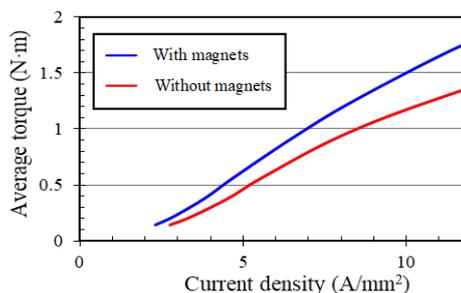
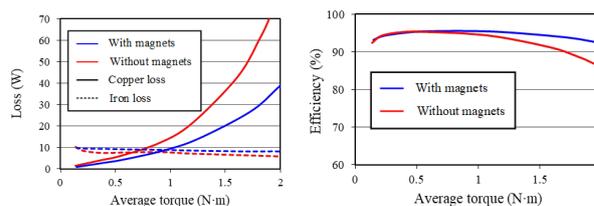


Fig. 3 Current density vs. torque characteristics of TF SRMs with and without magnets.



(a) Copper and iron losses (b) Efficiency
Fig. 4 Comparison of losses and efficiency of TF SRMs with and without magnets.

ワイヤ放電加工で製作した圧粉磁心 SR モータの特性検証

三ツ谷 和秀, 中村 健二
(東北大学)

Characteristics Investigation of SMC-based SR Motor Manufactured by using Wire Electric Discharge Machining

K. Mitsuya, K. Nakamura
(Tohoku University)

はじめに

圧粉磁心 (Soft Magnetic Composite: SMC) は、3次元磁気等方性を有し、高周波鉄損も小さいことから、次世代のモータ鉄心材料の一つとして期待されている。しかしながら、通常、圧粉磁心を用いたモータ鉄心の製作には、高価な金型が必須であり、これが初期検討段階の試作評価の障害となっている。そこで筆者らは、ワイヤ放電加工による鉄心製作に着目した。本稿では、Fig. 1 のスイッチトリラクタンス (SR) モータを考察対象とし、ワイヤ放電加工で製作した圧粉磁心 SR モータの特性を検証したので報告する。

ワイヤ放電加工で製作した圧粉磁心 SR モータの試験結果

Fig. 2 に試作した SR モータの固定子と回転子を示す。圧粉磁心は導電率が低いため、本来、導体を対象物とするワイヤ放電加工には適さない。そのため、加工時間は電磁鋼板の数倍程度かかったが、コアそのものには割れや欠けなどは生じなかった。

Fig. 3 に巻線電流密度対トルク特性を示す。両材料とも実機の方がやや特性が悪化した。なお、圧粉磁心が比較対象の電磁鋼板 (35A300) に比べて劣っているのは、材料の磁化特性の悪さに起因している。

Fig. 4 にトルク対鉄損特性を示す。この図を見ると、両材料とも実機の鉄損が計算値より悪化しており、この原因の一つとしてワイヤ放電加工による劣化が考えられる。ただし、鉄損の実測値と計算値の比は 35A300 が約 1.6 倍に対して、圧粉磁心は約 1.8 倍であり、劣化の度合いは両材料でほとんど差が無い。したがって、ワイヤ放電加工による圧粉磁心コアの製作は有用であり、初期検討段階における試作評価のハードルを下げる事が期待される。

参考文献

- 1) Y. Enomoto, H. Tokoi, K. Kobayashi, H. Amano, C. Ishihara, and K. Abe, *T. IEE Japan*, Vol. 129-D, pp. 1004-1010 (2009).
- 2) K. Nakamura, Y. Kumasaka, and O. Ichinokura, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 903, 012040 (2017).

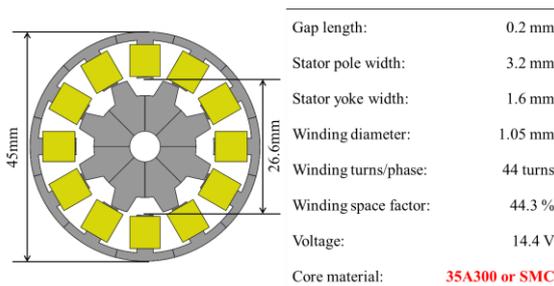


Fig. 1. Specifications of 12/8 SR motor.



Fig. 2. Stator and rotor cores of SMC-based SR motor manufactured by using wire electric discharge machining.

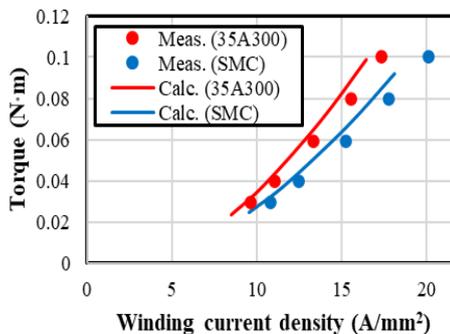


Fig. 3. Comparison of winding current density versus torque characteristics.

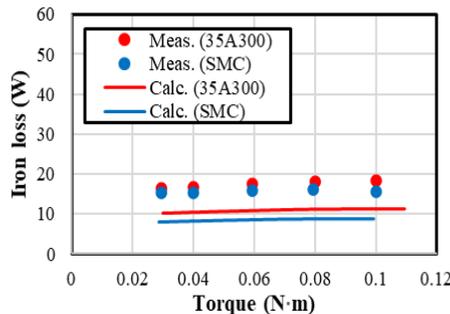


Fig. 4. Comparison of measured and calculated iron losses.