誘導同期磁気ギヤの原理検証および伝達特性向上

Principle Verification and Transmission Characteristics Improvement of Induction/Synchronous Magnetic Gears

水穴 裕真 ハ) †・中村 健二 ո)・鈴木 雄真 b)・立谷 雄一 b)・操谷 欽吾 b)

 ・
 ・
 ・
 ・

 ・
 ・

 ・

 ・
 ・
 ・

 ・

 ・

 ・
 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

Y. Mizuana ^{a)}[†], K. Nakamura ^{a)}, Y. Suzuki ^{b)}, Y. Tachiya ^{b)}, and K. Kuritani ^{b)}

^{a)} Tohoku University, Graduate School of Engineering, 6-6-11 Aoba Aramaki Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan

^{b)} Prospine Co., Ltd., 117 Shinsengarida, Matsuyamatsugihashi, Osaki, Miyagi 987-1305, Japan

Magnetic gears can transmit torque and change speed without any mechanical contacts. Therefore, vibration and acoustic noise are very low, and maintainability is high. Various kinds of magnetic gears have been proposed. Among them, the flux-modulated-type magnetic gear has a higher torque density and efficiency compared to conventional magnetic gears. Magnetic gears have a torque limiter function that allows them to step out and shut off power when overloaded. However, after stepping out, they cannot transmit power again unless the load torque is removed to some extent. This paper presents a novel induction/synchronous magnetic gears are tested.

Key words : Flux-modulated-type magnetic gear, induction/synchronous magnetic gear, restarting torque

1. はじめに

機械式ギヤは2つ以上の歯数の異なる歯車から構成され, 増減速や正逆転,動力分割など,様々な動力の変換と伝達 が可能である.現在,機械式ギヤは産業や民生,運輸など あらゆる分野で利用されており,動力伝達を行う上で欠か すことのできない重要な機械要素の一つとなっている.し かしながら,機械式ギヤは歯車同士の接触により動力の伝 達を行うため,振動や騒音,接触部での摩耗や発熱などの 問題が指摘される.また,大容量機の場合,接触部の冷却 や摩耗低減のための潤滑油系統が必須となる.これに伴い, システムが大型化・複雑化し,定期的な保守点検も不可欠 となる.

上記の問題に対し,近年,永久磁石を利用した磁気ギヤ が注目を集めている¹⁾.磁気ギヤは非接触で動力伝達可能で あるため,機械式ギヤと比べて振動や騒音が小さく,摩耗 や発塵がない.加えて,潤滑油系統も不要であり,保守性 に優れる.しかしながら,一般的な磁気ギヤは,機械式ギ ヤの歯を単純に永久磁石で置き換えた構造を有しており, 互いに対向した磁石同士でしか動力の伝達が行われないた め,トルク密度や効率が低く,実用には遠い存在であった. これに対して,磁束変調型磁気ギヤ²⁾は,内外2つの永久 磁石回転子と,その間に挟まれたポールピースと呼ばれる

Corresponding author: Y. Mizuana (e-mail: <u>yuma.mizuana.</u> <u>p1@dc.tohoku.ac.jp</u>).

複数の固定子磁極片から構成され、ポールピースにより磁 石磁束を変調することにより、ギヤとして動作する.磁束 変調型磁気ギヤは、内外すべての回転子磁石が動力伝達に 寄与することから、他種の磁気ギヤと比べてトルク密度が 高く^{3),4)}、実用化が最も期待されている.

これまで筆者らは、埋込磁石構造による磁石渦電流損の 低減⁵⁾、磁気ブリッジの位置変更によるトルク向上⁶⁾、アモ ルファス合金の利用による損失低減とトルク向上⁷⁾、軸方向 漏れ磁束を相殺可能な磁石による損失低減とトルク向上を 各々提案するとともに、これらすべてのアイデアを取り入 れた磁気ギヤについて試作・評価を行い、最高効率が 99% 以上に達することを明らかにした⁸⁾.

磁気ギヤの別の特徴の一つに、過大な負荷が印加された 際に脱調して動力を遮断するトルクリミッタ機能を有する ことが挙げられる.しかしながらその一方で、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 いという課題がある.

そこで本論文では,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.

2. 誘導同期磁気ギヤの基本構成と特徴

Fig.1に,誘導同期モータ並びに誘導同期磁気ギヤの構成 を示す.同図(a)の誘導同期モータは,導体バーと永久磁石 を有する回転子とコイルを有する固定子から構成される⁹⁰.



(a) Induction/synchronous motor



(b) Induction/synchronous magnetic gearFig. 1 Basic configuration of induction/synchronous motor and magnetic gear.

定常時は、同期モータとして動作するため高効率・高力率 である.一方、非定常時は導体バーに流れる誘導電流と固 定子で発生した磁束によってトルクが発生し、誘導モータ として動作するため、脱調することがない.また、導体バ ーがあることによって、定常時と非定常時の切り替えの際 に生じるハンチングを速やかに減衰させることができる.

同図(b)の誘導同期磁気ギヤは,誘導同期モータの固定子 部分を回転子とポールピースで置き換えた構成を有する. 定常時は,通常の磁気ギヤと同様に同期機として動作する. 一方,非同期時は,導体バーに流れる誘導電流とポールピ ースによって変調された磁束によってトルクが発生する. 誘導同期磁気ギヤは,このときに発生するトルクを利用す ることで,通常の磁気ギヤと比べて,より高負荷での再始 動が可能となる.



(a) General view



(b) Prototyped inner rotor

Fig. 2 Configuration of prototyped induction/ synchronous magnetic gear.

Table	1	Specifications	of	prototyped	induction/
synchr	onous	magnetic gear.			

Gear ratio	6
Inner pole-pairs	2
Outer pole-pairs	12
Number of pole pieces	14
Number of cage rotor bar	28
Axial length	24 mm
Outer diameter	130 mm
Air gap	$1.5~\mathrm{mm}~ imes~2$
End ring length	2 mm
Core material	35A250
Bar material	Aluminum
Pole piece material	35A250
Magnet material	Sintered Nd-Fe-B

3. 誘導同期磁気ギヤの原理検証実験

Fig. 2 および Table 1 に,原理検証機の諸元を示す.内側 極対数は 2,外側極対数は 12,ポールピース極数は 14 であ り,ギヤ比は 6 (= 12/2)である.また,内側回転子には 28 本のアルミ導体バーが周方向に等間隔で配置されている. なお,エンドリングの厚さは 2 mm である.原理検証機で



Fig. 3 Experimental setup.

は内側磁石とエンドリングが重なっていない。したがって, 磁石を抜いた状態でアルミをインジェクションすること で,磁石の熱減磁を避けることができる.

Fig. 3 に,実験装置の外観を示す.入力側にはサーボモー タを接続し,任意の速度で誘導同期磁気ギヤを回転させる. 一方,出力側にはヒステリシスブレーキを接続し,磁気ギ ヤに所望の負荷トルクを印加する.入出力軸にはそれぞれ トルクメータを接続し,入力側と出力側の回転速度および トルクを測定する.今回は,入力側を低速・大トルクの外 側回転子,出力側を高速・低トルクの内側回転子とし,誘 導同期磁気ギヤを増速動作させて原理検証を行った.

Fig. 4 に,再始動時の復帰トルクの観測波形の一例を示 す.以下,復帰トルクの測定方法について述べる.まず, 入力回転数一定の状態で負荷を増加させていき,誘導同期 磁気ギヤを1度脱調させる.誘導同期磁気ギヤが,誘導機 として出すことができるトルクは脱調トルクよりも小さい ため,脱調した瞬間に出力軸は停止する.その後,負荷を 少しずつ下げていき,誘導機として出すことができるトル クを下回ると,内外回転子が再度同期する.このときのト ルクを復帰トルクとして測定した.

Fig. 5 に,原理検証機の復帰トルクの測定結果を示す.導体バーがない通常の磁気ギヤと導体バーを有する誘導同期磁気ギヤそれぞれについて復帰トルクを測定した.入力回転数は,60 rpm,80 rpm,100 rpmとし,各回転数でそれぞれ10回ずつ測定を行った.縦軸は最大トルクで規格化した復帰トルクである.また,棒グラフは平均値,エラーバーは測定結果のばらつきである.同図を見ると,いずれの回転数においても,導体バーを有する誘導同期磁気ギヤの方が復帰トルクが大きくなっていることがわかる.

Fig. 6(a)に、入力回転数 60 rpm における原理検証機の最 大トルクの測定結果を示す. この図を見ると、原理検証機 の最大トルクは、導体バーがある場合とない場合どちらも 約 20 N·m/L であり、同等のトルク性能であることがわか る.

Fig. 6(b)に,入力回転数 60 rpm における効率の測定結果 を示す.縦軸は効率,横軸は最大トルクで規格化した出力 トルクである.同図より,誘導同期磁気ギヤの方が通常の



Fig. 4 Measured torque waveform in case of restarting.



Fig. 5 Measured restarting torque of prototyped induction/synchronous magnetic gear.

磁気ギヤと比べて効率が大幅に低下していることがわかる.これは導体バーの本数が多く,誘導電流による損失が 大きくなったためだと考えられる.

以上,本章では誘導同期磁気ギヤの原理検証実験を行い, 脱調後の再始動性が向上することを明らかにした.一方で, 導体バーの本数が原因で効率が低下する課題が新たに生じ た.また,トルクの改善も必要である.

4. 改良機の試作試験

トルクと効率の改善を目的として,改良機の試作試験を 行った.トルク密度 25 N・m/L 以上かつ最高効率 99%以上 を設計目標とした. Fig. 7 および Table 2 に,改良機の諸元 を示す.先行研究 ^(6)-8),10) では,ギヤ比 10.33 (内側極対数 3, 外側極対数 31, ポールピース極数 34)の磁気ギヤについて 検討されており,トルク,効率ともに優れた特性を有する ことが明らかになっている。以上の理由から,改良機のギ



(b) Efficiency

Fig. 6 Measured maximum torque and efficiency of prototype induction / synchronous magnetic gear.

ヤ比も 10.33 (内側極対数 3, 外側極対数 31, ポールピース 極数 34) を採用した. なお, エンドリングの厚さは 4 mm である. 伝達トルクの改善を目的として, 内側磁石をギャ ップ面に近づけた. また, 効率を改善するため, 内側磁石 同士の隙間に導体バーを配置した. 導体バーは回転対称性 を考慮すると, 磁石の間にしか配置することができないた め 6 本とした. また, 内側磁石とエンドリングが重なって いるため, 製作方法を工夫した. 具体的には, 内側ヨーク の一部を切断して内側磁石を取り付けた後, 切断箇所に別 のヨークを挿入して内側磁石を固定するという製作方法を 採用した.

Fig. 8に、改良機の復帰トルクの測定結果を示す.入力回 転数は、原理検証機と同様に、60 rpm,80 rpm,100 rpm とし、各回転数でそれぞれ10回ずつ測定を行った.また、 縦軸は最大トルクで規格化した復帰トルクであり、棒グラ フは平均値、エラーバーは測定結果のばらつきである.こ の図を見ると、いずれの回転数においても、導体バーを有





(b) Improved inner rotor

Fig. 7 Configuration of improved induction/ synchronous magnetic gear.

Table 2Specifications of improved induction/
synchronous magnetic gear.

Gear ratio	10.33		
Inner pole-pairs	3		
Outer pole-pairs	31		
Number of pole pieces	34		
Number of cage rotor bar	6		
Axial length	25 mm		
Outer diameter	89 mm		
Air con	1 mm (Inner)		
All gap	2 mm (Outer)		
End ring length	4 mm		
Core material	35A250		
Bar material	Aluminum		
Pole-piece material	SMC		
Magnet material	Sintered Nd-Fe-B		

する誘導同期磁気ギヤの方が復帰トルクが高いことがわかる.一方, Fig.5 に示した原理検証機の測定結果と比較すると,原理検証機の方が復帰トルクの改善効果が高いことが



Fig. 8 Measured restarting torque of improved induction / synchronous magnetic gear.

わかる.これは、バーの本数が多いほどバー間抵抗が小さ く誘導電流が流れやすいため、得られる誘導トルクが大き いことに起因していると考えられる.

Fig. 9(a)に,入力回転数 60 rpm における改良機の最大ト ルクの測定結果を示す. 同図より, 改良機の最大トルクは 26~28 N·m/L であり,原理検証機よりも伝達トルクが向上 していることがわかる.また、原理検証機では導体バーが ある場合とない場合とで同等のトルクが得られていたのに 対し、改良機では、導体バーがある場合の方がトルクが小 さくなった.この原因として以下の2点が考えられる.1 点目は、アルミをインジェクションする際に内側ヨークに 過大な圧力がかかり,内側磁石と導体バーの間に設けたフ ラックスバリアが狭くなったことで、磁石磁束が漏洩し、 有効磁束が減少したためだと考えられる.2点目は,製作方 法の違いによるものだと考えられる. 原理検証機では、内 側磁石とエンドリングが重なっていないため、インジェク ション前後で内側磁石の取り外しが可能な状態である.こ れに対し、改良機では、内側磁石とエンドリングが重なっ てしまうため、内側ヨークの一部を切断して内側磁石を取 り付けた後、切断箇所に別のヨークを挿入して内側磁石を 固定するという製作方法を採用した. そのため, 挿入した ヨークと回転子ヨークとの間に僅かなギャップが生じる. これにより有効磁束が減少し、トルクが低下したと考えら れる.

Fig. 9 (b)に, 入力回転数 60 rpm における改良機の効率の 測定結果を示す.縦軸は効率,横軸は最大トルクで規格化 した出力トルクである.同図を見ると,改良機の効率は導 体バーの無い通常の磁気ギヤとほぼ同等で,99%以上と極め て高いことがわかる.これは,導体バーの本数が減ったこ とで誘導電流による損失が小さくなったことが原因である と考えられる.

以上,本章では改良機の試作試験を行い,伝達トルクと 効率を改善し,設計目標を達成することができた.



(b) Efficiency

Fig. 9 Measured maximum torque and efficiency of improved induction / synchronous magnetic gear.

5. まとめ

以上,本論文では,磁気ギヤの脱調後の再始動性向上を 目的として,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,原理検証機および改良機 の試作試験を行った.

まず原理検証実験では、通常の磁気ギヤと導体バーを有 する誘導同期磁気ギヤそれぞれの復帰トルクを比較した. その結果、回転子に導体バーを付加することで、脱調後の 復帰トルクが改善されることを明らかにした.しかしなが らその一方で、効率が低いことが判明した.

次いで、伝達トルクと効率の改善を目的として、内側磁 石をギャップ側に近づけるとともに、導体バーの本数を減 らした改良機を試作して実験を行った.その結果、良好な 再始動性を維持しながら、伝達トルクと効率の改善を図る ことができた.

今後は、復帰トルクのさらなる向上のため、導体バーの 本数や形状について検討する予定である. **謝辞** 本研究の一部は東北大学人工知能エレクトロニクス 卓越大学院プログラムの支援を得て行われたものである.

References

- F. T. Jørgensen, P. O. Rasmussen, and T. O. Andersen: "Magnetic gears – a Review", *Summer Seminar on Nordic Network for Multi Disciplinary Optimized Electric Drives* (2003).
- 2) T. B. Martin, Jr.: "Magnetic transmission", U.S. Patent 3378710 (1968).
- K. Atallah and D. Howe: *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 2844 (2001).
- P. O. Rasmussen, T.O. Andersen, F.T. Jørgensen, and O. Nielsen: *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, 41, 764 (2005).

- T. Ikeda, K. Nakamura, and O. Ichinokura: J. Magn. Soc. Jpn., 34, 380 (2010).
- Y. Mizuana, K. Nakamura, Y. Suzuki, Y. Oishi, Y. Tachiya, and K. Kuritani: *T.Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **3**, 74 (2019).
- Y. Mizuana, K. Nakamura, Y. Suzuki, Y. Oishi, Y. Tachiya, and K. Kuritani: *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, 4, 52 (2020).
- Y. Mizuana, K. Nakamura, Y. Suzuki, Y. Oishi, Y. Tachiya, and K. Kuritani: J. Magn. Soc. Jpn., 45, 50 (2021).
- P. W. Huang, S. H. Mao, M. C. Tsai, and C. T. Liu: "Investigation of line start permanent magnet synchronous motors with interior-magnet rotors and surface-magnet rotors," 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems, pp. 2888-2893 (2008).
- K. Nakamura, M. Fukuoka, and O. Ichinokura: Journal of Applied Physics, 115, 17 (2014).

2021年10月1日受理, 2021年11月30日再受理, 2022年1月15日採録