

# 学 位 論 文 の 要 旨

## 論 文 名

非接触磁気継手および磁気歯車の高機能化に関する研究

氏名 藤田 智之 印

近年、エネルギーの有効利用の観点から、各種装置や機器の高効率化が求められている。このような背景の中、高い伝達効率が望めるとして、非接触で動力が伝達可能な磁気継手および磁気歯車が注目されている。磁気継手は、隔壁を介した動力伝達の目的やトルクリミッタ機能を利用した保護装置としての目的で利用されることが多い。保護装置として磁気継手を取り付ける場合、伝達トルク等の観点から、ギアモータのモータと減速機の上に継手を取り付けることが望ましい。そこで、本研究ではモータと減速機の上に設置する磁気継手の高機能化を目指し、磁石量の低減や保護のための同期外れ後の再同期化、起動可能トルクなどの性能向上について検討した。一方、磁気歯車は、非接触減速機もしくは非接触増速機としての使用が検討されている。その場合、磁気歯車は、大きなトルクを伝達する必要がある。そこで、本研究では、大きな伝達トルクが得られる高調波磁束を利用した表面磁石型磁気歯車に注目する。表面磁石型磁気歯車は、これまで多くの研究がなされているが、実用化時に必要と考えられる高速安定性、高トルク化、高減速比化の検討がなされていない。そこで、表面磁石型磁気歯車の実用化のため、高速安定性、高トルク化、高減速比化について提案をし、実験と磁場解析により提案の妥当性を検証した。

まず、磁気継手の試作機を製作し、磁石量の低減や同期外れ後の再同期化、起動可能トルクの向上について、その性能を評価した。試作した磁気継手を評価した結果、磁気継手の出力側形状を鉄製突極とした場合、再同期化ができることが確認できた。また、短絡環に発生する渦電流量を抑制することにより、磁気継手が同期外れした際に発生する連れ回りを抑制でき、保護機能として有効であることを明らかにした。ついで、試作した磁気継手の磁場解析を行い、実験結果と解析結果を比較した結果、磁場解析が設計段階で有効な手法であることが確認できた。そこで、磁場解析を用いて磁気継手を改良したところ、目標トルク近傍で保護動作を行う磁気継手が得られた。また、突極部に銅の巻線による短絡環を取り付けたることにより、起動可能トルクが上昇することが分かった。

続いて磁気歯車の高機能化について取り組んだ。まず、通常（SPM）型磁石配列と磁束集束（CSPM）型磁石配列を高速ロータに適用した表面磁石型磁気歯車を試作し、性能評価を行った。その結果、両磁気歯車共に無負荷状態のみならず、最大伝達トルク近傍の負荷をかけた状態においても3,000rpmまで安定な同期運転ができた。また、CSPM型の磁気歯車は、SPM型の歯車より伝達トルクは若干低下するが、効率が高くなることが確認できた。試作した両磁気歯車は、サイズが10cm程度で、伝達トルクはCSPM型、SPM型のいずれの歯車でも8.5N・m以上であり、実用化可能な性能を有している。ただし、高回転域における渦電流による損失が大きいことが分かった。これは、磁気歯車の高効率化には、磁極片の剛性を確保しつつ渦電流を低減するステータ歯車の開発が必要であることを示唆している。

さらなる伝達トルクの高トルク化を目指し、高速ロータに広い範囲で強い磁界が形成可能なハルバッハ（HPM）型磁石配列の適用を提案した。磁場解析の結果、表面磁石型磁気歯車の高速ロータにHPM型磁石配列を適用することで、高速ロータよりの磁束密度分布は複数の磁極片通り、かつ磁束密度を高めることに成功した。その結果、HPM型を用いた場合の最大伝達トルクは、SPM型に対し最大で6.9%向上した。したがって、表面磁石型磁気歯車の高速ロータにHPM型磁石配列を適用することが、伝達トルク向上に有効であることが確認できた。さらに、ステータ歯車の磁極片形状のトルクへの影響を検討した。磁場解析を行った結果、ステータ歯車の磁極片形状は、隣り合う磁極片へ磁束が短絡し難い形状とすることが伝達トルクの向上に繋がることが明らかとなった。この結果を踏まえ渦電流を低減するステータ歯車について検討した結果、高剛性でかつ渦電流が低減できるステータ歯車を得ることができた。

最後に、表面磁石型磁気歯車の高減速比化を目指し、径方向に多段化した方式の高減速磁気歯車を新たに提案した。提案した高減速磁気歯車の特性を、磁場解析を使い検証した。その結果、一段で大きな速比の磁気歯車を構成する場合の問題点を示し、提案した高減速磁気歯車が、省スペース化や部品点数の削減に有効であることが分かった。提案した高減速磁気歯車は、歯車の直径が13cm程度、長さが5.5cm程度のコンパクトな磁気歯車で、50N・m程度の大きな伝達トルクが得られることを確認した。以上より、高減速表面磁石型磁気歯車の基本的な設計仕様を明らかにできた。

本研究において、以上のように検討した結果、目的である磁気継手および磁気歯車の高機能化について実現可能であることが確認できた。今後は、ここでの内容をもとに磁気継手ならびに磁気歯車の実用化に向けた製造面を中心に検討していく所存である。

## Studies on High-Performance Magnetic Couplings and Magnetic Gears

Tomoyuki Fujita

Recently, devices and equipment are demanded with high efficiency for effective utilization of energy. Based on the above background, magnetic couplings and magnetic gears have attracted attention. Because their power transmission is performed on a non-contact, they have potential for high transmission efficiency. Usually, the magnetic coupling is used for the purpose of power transmission through the bulkhead or protection device using a torque limiter function. When a magnetic coupling is mounted as a protection device, the coupling is desirable to be attached between the gear reducer and the motor from the viewpoint of the transmission torque. Therefore, this research analyses the performance and improvement of the magnetic coupling to be mounted between the gear reducer and the motor. It shall be examined for reduction of magnet amount, consider re-synchronization after out-of-sync and improvement of a start-up torque. On the other hand, the magnetic gear is considered for using a magnetic gear reducer or a speed up magnetic gearbox. In this case, it is necessary for the magnetic gear to transmit a large torque. Therefore, in this study, the surface permanent magnetic gear using the harmonic flux is focused to obtain large transmission torque. Till now many studies have been conducted on this surface type magnetic gear. However, there is no study on high-speed stability, high torque and high reduction ratio which are in need for practical use. Therefore, for the practical application of surface permanent magnetic gear, this study has proposed the high-speed stability, high torque, and high gear ratio. And, the proposal contents evaluated the appropriateness by magnetic field analysis and experiment.

At first, a prototype of magnetic coupling was produced. Its performance was evaluated for reduction of magnet amount, re-synchronization after out of synchronization and improvement of a start-up torque. From measuring results of the magnetic coupling prototype, it was confirmed that re-synchronized can achieve when the output side of the magnetic coupling is iron poles. In addition, by suppressing the eddy current amount generated in the short-circuit ring, it is possible to prevent accompanying rotation that occurs when the magnetic coupling was out of synchronization, and it is effective as a protective function. Then, the analysis results and the experimental results were compared by performing a magnetic field analysis of the magnetic coupling of the prototype. This comparison confirmed that a magnetic field analysis method is effective at the design stage. And so, as a result of improvement by using a magnetic field analysis of the magnetic coupling, it was confirmed to perform a protection operation at near the target torque. Further, it was found that

start-up torque increases when the short-circuit ring of copper windings was mounted on the iron pole.

Next, the high-performance magnetic gear was studied. First, prototypes of the surface permanent magnetic gear were produced, whose high speed rotors have the Concentrated Surface Permanent Magnet arrangement (CSPM) type and standard magnet arrangement (Surface Permanent Magnet arrangement : SPM) type. Both of two types are evaluated those performances. Two type magnetic gears could be stable synchronous operation to 3,000 rpm with maximum torque and no-load condition. The transmission torque of CSPM type magnetic gear is slightly lower than that of the SPM type, but the increase of efficiency was confirmed. On both the prototype magnetic gears of CSPM type and SPM type, the sizes are about 10cm and the transmitting torque are 8.5N·m or more. These were confirmed to be a practically usable performance. However, the loss due to eddy currents in the high-speed range has been found large. Therefore, for high efficiency the developments of the stator gear with both reduction of eddy currents and maintaining the rigidity of the pole pieces are required.

For the aim of further high torque, Halbach Permanent Magnet arrangement (HPM) type is proposed to apply to the high-speed rotor. By the HPM the strong magnetic field can be formed in a wide range. A result of the magnetic field analysis, the magnetic flux density distribution from the high-speed rotors have succeeded in passing a number of pole pieces and the effective flux density increased by the application of the HPM in high-speed-rotor of magnetic gear. As a result, the maximum transmission torque of the HPM magnetic gear increased up to 6.9% than the SPM type. Therefore, applying HPM in high-speed rotor of the surface permanent magnetic gear is effective to improvement of the transmission torque. Furthermore, the influence of the pole piece shape of the stator gear on the torque was examined. By the magnetic field analysis, the pole-pieces of the surface permanent magnetic gear were found to improve the transmission torque in a shape magnetic flux which is difficult to be short-circuited. As results of investigation of the stator gear to reduce eddy currents based on above results, it was possible to obtain a stator gear can be reduced eddy current and a high rigidity.

Finally, a multi-stage radial direction magnetic gear system was proposed with the aim of high reduction ratio of the surface permanent magnetic gear. The characteristics of the proposed magnetic gear with a high reduction were verified by using the magnetic field analysis. The problem of the large speed ratio in a single stage magnetic gear was shown. And, it was found that the proposed high-reduction magnetic gear is effective in reducing the number of parts and space saving. The proposed high-reduction magnetic gear was compact magnetic gear with diameter 13cm and length 5.5cm. And, it obtained with large transmission torque of about 50N·m. From the above, it was clear for the design basic specifications of high reduction surface permanent magnetic gear.

In this study, through the investigation described above, it were confirmed that the

high-performance magnetic gear and the magnet coupling can be realized. In the future, for the practical use of magnetic gear and the magnetic coupling, I will consider mainly in terms of production based on the contents of the tis study.