

大学の研究・動向

回転機を基軸とした エネルギーイノベーションを目指して

工学研究科 電気工学専攻 優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座

特定教授 中村 武恒

特定助教 魏 亮亮

1. はじめに

当研究室は、日本電産（株）の寄附講座として2017年4月に設置され、回転機を中心とする先端電気機器とそのシステム化に関する研究を推進しています。即ち、電気-機械エネルギー変換過程の基礎的理解から出発して、それを回転機という有限空間構造の中で磁束の時空間制御に展開する回転機設計と制御法の実現、そしてインバータや冷却系など周辺システムまで含めて動的に整合するシステム化まで、精力的研究を実施しています。

我が国における電力供給の殆どは巻線界磁形同期発電機によって担われており、一方で同消費の実に50%以上はモータ駆動に依ります。つまり、私たちの生活に不可欠な電力の発生から消費に至る一連の流れにおいて、回転機の運動エネルギーの役割が非常に大きいことが分かります。さらには、上記電力系統の枠組みだけでなく、自動車や船舶、航空機など、分散型システムとして運転される輸送機器などの電気駆動化率も益々高まると考えられ、それら機器の駆動源がモータであることから、上記傾向がさらに高度かつ複雑に加速していくと予想されます。従って、電力を軸としたこれからのエネルギー問題を考える際には、回転機の存在を直接的あるいは間接的に意識しなければなりません。本稿では、当研究室が取り組んでいる研究の内、回転機に関する事例（基礎研究は除く）をご紹介します。

2. 永久磁石補助スイッチトリラクタンスモータ

スイッチトリラクタンスモータと呼ばれるモータの固定子の一部に、アルニコ磁石等の安価な磁石を導入した永久磁石補助スイッチトリラクタンスモータ (Permanent Magnet Assisted Switched Reluctance Motor: PM-SRM) の研究開発を行っています。本研究は、JST の研究成果展開事業“産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム: OPERA”「超スマート社会実現のカギを握る革新的半導体技術を基盤としたエネルギーイノベーションの創出」の一環として実施しており、PM-SRM の回転原理の解明と最適化設計法・制御法の開発、SiC パワーデバイスと組み合わせたシステム構成の検討、電気駆動式自動車への適用可能性の検討他を実施しています。

図1には、PM-SRM の概略図を示します [1,2]。本機のアイディアは、固定子のバックヨークの一部にアルニコ磁石を配するという単純な構造です。同磁石は、その残留磁束密度がNd系磁石と同等に高いものの、保磁力の小さなことが大きな課題でしたが、上記モータ構造における磁場変化の小さな場所に設置することで、出力密度、効率、および力率の全てを大きく改善出来ることが分かりました。また、

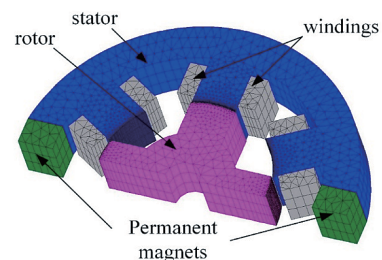


図1 永久磁石補助スイッチトリラクタンスモータ (PM-SRM) の3次元概略図 [1,2]

SRM で問題となるトルクリップルに関しては、例えば直接瞬時トルク制御などで低減することを考えていますが [3]、そもそもリップルが発生しない制御方法も検討中です。現在は、さらに種々のアイデアを投入して性能改善を図っており、その内 1 件は京都大学単独承継として特許出願準備中です。

3. 車載用誘導機の研究開発

企業との共同研究として、10 年以上に亘り車載駆動用誘導機の研究開発を実施してきました。現在のハイブリッド自動車や電気自動車駆動モータの主流は永久磁石モータであり、Nd 系磁石の強力な着磁束を利用して、高回転高出力化や可変速に対する高効率特性を実現しています。一方で、上記磁石の供給不安から、今後の電気駆動化率増加に対応できるモータ生産を維持できるか不透明な状況です。さらには、高速回転時には巻線に大きな逆起電力が発生するため、それを打ち消す必要もあります。

一方で、永久磁石を使用しないモータとして誘導機があり、その簡易な構造や保守の容易性などの理由から産業用モータとして広く使用されています。しかしながら、同機の回転子に吸収されたエネルギーの一部は回転エネルギーに変換されるものの、同変換には回転子に埋め込まれた導体に電流を誘導する必要があり、導体が有する抵抗によって Joule 損失が発生してしまいます。従って、永久磁石モータの特性が誘導モータに対して常に優れているという認識が一般的でした。しかしながら、我々の研究では、特に高速領域において上記認識が必ずしも正しいとは言えない条件を見出しています。

図 2 には、試作した最大出力 24 kW 級誘導機の外観写真を示します [4]。回転数は 1 万 rpm です。同機の最大効率マップの解析例を図 3 に示しますが、低速領域を除く広範な駆動領域において高効率であることが示されています。現在は、パーミアンス法と有限要素法を連成した免疫遺伝アルゴリズムに基づく最適化設計を実施しています。

4. 低速高効率永久磁石発電機の開発

2011 年より、企業との共同研究として小水力発電用低速発電機の研究開発を進めています。図 4 には、ダリウス水車を想定したシステムを対象として、タービン効率と発電機効率のピーク値を整合する考え方を示しています。本シナリオを具現するためには、タービンの効率特性を設計によってコントロールすることが困難であることから、低速で高効率の発電機を実現する必要があります。一般に、低速における回転機の効率は、巻線の Joule 損失が支配的になって低下してしま

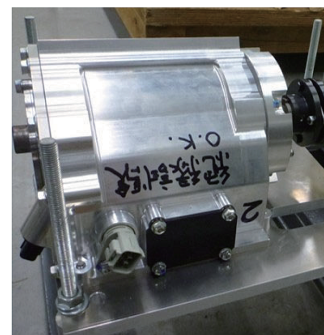


図 2 最大出力 24 kW 級誘導機の外観写真 [4]

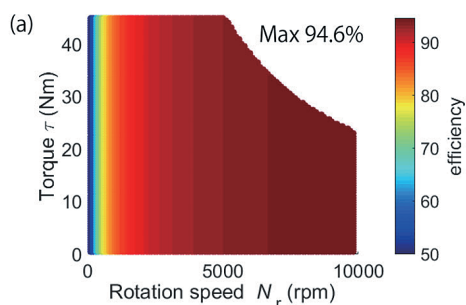


図 3 最大出力 24 kW 級誘導機の効率マップの解析例 [4]

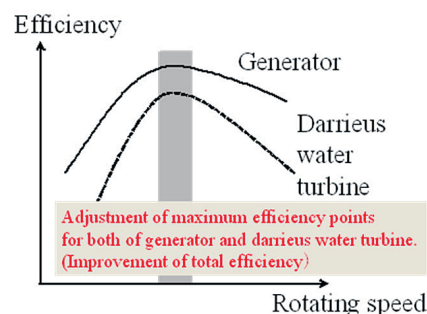


図 4 ダリウス水車一体型水力発電システムにおける効率最大化の考え方

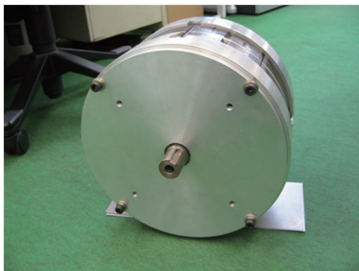


図5 1 kW 級低速高効率発電機の外観写真 [5]

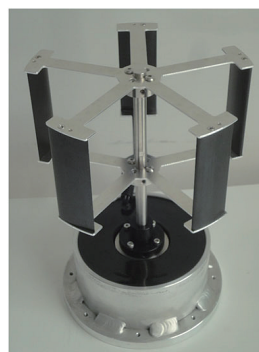


図6 200 W 級ダリウス水車一体型発電機の外観写真

います。従って、同損失の低減を目標として発電機の開発を実施しました。図5には、開発した1 kW 級発電機の外観写真を示します [5]。本機によって、回転数 200 rpm で 1 kW 程度の整流後発電電力が実現されており、誘電起電力定数は 1.715 V/rpm です。本発電機によれば、水力資源さえあれば災害時に1家庭分の電気を賄えます。さらに、図6には200 W クラスのダリウス水車一体型発電システムの外観写真を示します。本機は実用化レベルにあり、複数地域にて保安電灯用などの目的でフィールド試験を実施しています。

5. 高温超伝導誘導同期回転機の研究開発

高温超伝導材料の非線形電流輸送特性を利用して、それをかご形誘導機に適用した高温超伝導誘導同期回転機 (High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM) の基礎ならびに応用研究開発を推進しています [6,7]。本機は、かご形誘導機の構造ながら高温超伝導材料の臨界電流密度に伴う損失ゼロ特性を利用することによって、図7のように回転子 (かご形) 巻線に磁束を捕捉することが可能になり、同期回転可能であることを特長とします。また、本機は高温超伝導材料のゼロ抵抗特性だけでなく非線形磁束フロー特性も巧みに利用した唯一の回転機であると考えられ、①本質的特性として同期回転とすべり (非同期) 回転の両立性 [8]、②飛躍的なトルク密度の改善 [9]、③過負荷耐量や短時間定格の概念の成立 [10]、④“自律安定制御性”の概念の提唱 [11,12]、⑤非超伝導状態でも低出力で運転継続可能性 [13] 等、当研究室は HTS-ISM の研究を牽引しています。さらに、HTS-ISM の種々応用研究開発を産官学連携プロジェクトとして進めており、例えば液体水素移送ポンプの開発ならびに世界発の同移送試験成功 (平成 20 年度産業技術研究助成事業 (若手研究 Grant) (NEDO); 超伝導モータの研究開発は当研究室が担当) [14] や、輸送機器用モータシステムの研究開発を推進しています [15]。図8には NEDO の委託事業 “H21 年度省エネルギー革新技術開発事業 (第二次公募)” 「冷凍機一体型高温超伝導誘導同期駆動システムの研究開発」の一環として開発したプロトタイプ機を、また図9には JST の事業 “H24 年度戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化研究開発プロジェクト: ALCA” 「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転機システム」として研究開発したプロトタイプ機をそれぞれ示します [15]。上記 ALCA プロジェクトでは、さらに 50 kW 級全超伝導機の開発に成功し、前人未到の負荷試験や急可変速試験に成功しています [16,17]。

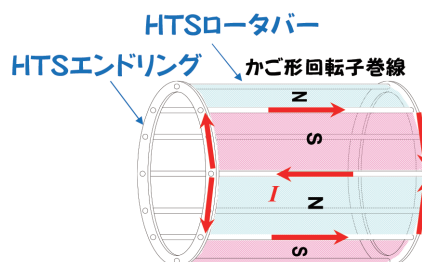
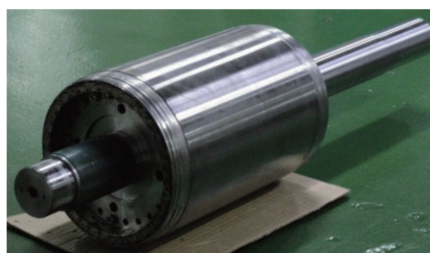


図7 高温超伝導かご形巻線への磁極形成のイメージ図



(a) 銅固定子



(b) 超伝導回転子

図8 NEDO プロで開発した 20 kW 級機の外観写真 [15]

6. その他

MW 級システムへの応用を目指し、風力発電発熱機の研究開発を実施しています [18]。本機は、変動する風力エネルギーについて、ある一定のエネルギーを電力として取り出し、残りの変動分を熱流体媒体によって蓄熱槽に導き、計画発電を実施するというアイデアです。熱を利用することから、その分エントロピーが大きくなってしまふものの、風力エネルギーの有効利用やあるいは電力システムに与える影響の最小化の観点から意義があると考えており、現在は大型システムを対象として発電と発熱量を自在にコントロールするアルゴリズムの研究を実施しています。また、ドローンへの適用を目指した Halbach 磁石配列の高出力密度モータの研究開発も実施しており、高さ 16 m の当研究室実験室での試験を目指して研究開発しています。



図9 ALCA プロで開発した 20 kW 級機の外観写真 [15]

7. むすび

本稿では、回転機の研究を中心として、当研究室の取り組みをご紹介しました。回転機の研究は、その基礎からそれを実現する材料特性、設計・制御技術、システム化、そしてシステム間の協調制御など、多角的に考える必要があります。さらには、対象とする現象をマルチスケールやマルチフィジックスを意識して考える必要があります。当研究室では、回転機が電力の主流を支えているという強い意識を持って上記課題に妥協することなく挑戦し、エネルギーイノベーションを実現できるようにこれからも取り組んでいきたいと考えています。

- [1] F. Kucuk and T. Nakamura, "Torque Density and Efficiency Improvement of a Switched Reluctance Motor via Low-cost Permanent Magnets," Proceedings of 23rd International Conference on Electrical Machines (ICEM'2018), pp. 2318-2322, Sep. 2018.
- [2] 中村 武恒, "アルニコ磁石を固定子に利用したスイッチトリラクタンスモータの高性能化," 京都大学電気関係教室技術情報雑誌 (cue), **40**, p. 22, Sep. 2018.
- [3] F. Kucuk and T. Nakamura, under review
- [4] M. Tobita, K. Ikeda, S. Itoh, T. Nakamura and G. Ma, "Characterization of 24 kW Class Squirrel-cage Induction Motor for Electric Vehicles," Proceedings of 23rd International Conference on Electrical Machines (ICEM'2018), pp. 97-103, Sep. 2018.

- [5] L. Wei, T. Nakamura and K. Imai, "Development and Optimization of Low-Speed and High-Efficiency Permanent Magnet Generator for Micro Hydro-electrical Generation System," *Renewable Energy*, accepted for publication.
- [6] 中村武恒, "高温超電導誘導同期回転機の開発現状," *低温工学*, **47** (6), pp. 384-391, Jun. 2012.
- [7] 中村武恒, "輸送機器用高温超伝導誘導同期モータの研究開発－マクロ非線形現象と高機能回転機システム－," *応用物理*, **82** (7), pp. 579-582, Jul. 2013.
- [8] T. Nakamura, Y. Ogama, H. Miyake, K. Nagao and T. Nishimura, "Novel rotating characteristics of a squirrel-cage-type HTS induction/synchronous motor," *Superconductor Science and Technology*, **20** (10), pp. 911-918, Oct. 2007.
- [9] T. Nakamura, K. Matsumura, T. Nishimura, K. Nagao, Y. Yamada, N. Amemiya, Y. Itoh, T. Terazawa and K. Osamura, "A high temperature superconducting induction/synchronous motor with a ten-fold improvement in torque density," *Superconductor Science and Technology*, **24** (1), 015014, Dec. 2010.
- [10] T. Nakamura, K. Ikeda, T. Karashima, S. Guo, M. Yoshikawa, Y. Itoh, T. Terazawa and Y. Ohashi, "Experimental and analytical study on torque density maximization of high temperature superconducting induction/synchronous motor," *Proceedings of 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2018)*, pp. 1179-1184, Jun. 2018.
- [11] K. Kitano, T. Nakamura, D. Sekiguchi, N. Amemiya, Y. Itoh, M. Yoshikawa, N. Okumura and Y. Ohashi, "Controllability of HTS Induction/synchronous Machine for Variable Speed Control," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **23** (3), 5202505, Jun. 2013.
- [12] K. Ikeda and T. Nakamura, in preparation
- [13] H. Shimura, T. Nakamura, H. Kitano, T. Nishimura, N. Amemiya and Y. Itoh, "Calculated Characteristics of HTS Induction/synchronous Machine below and above Its Critical Temperature," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **23** (3), 5201705, Jun. 2013.
- [14] K. Kajikawa, H. Kuga, T. Inoue, K. Watanabe, Y. Uchida, T. Nakamura, H. Kobayashi, M. Hongo, T. Kojima, H. Taguchi, Y. Naruo, T. Wakuda and K. Tanaka, "Development of a liquid hydrogen transfer pump system with MgB₂ wires," *Cryogenics*, **52** (11), pp. 615-619, Nov. 2012.
- [15] T. Nakamura, Y. Itoh, M. Yoshikawa, T. Nishimura, T. Ogasa, N. Amemiya, Y. Ohashi, S. Fukui and M. Furuse, "Tremendous Enhancement of Torque Density in HTS Induction/Synchronous Machine for Transportation Equipments," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **25** (3), 5202304, Jun. 2015.
- [16] 日経産業新聞「超電導の動力 車に船に 京大や住友電工 効率向上と小型化期待」(2018年4月3日付, 18面)
- [17] T. Nakamura, M. Yoshikawa, K. Ikeda, T. Karashima, T. Ogasa, R. Nishino, Y. Itoh, T. Terazawa, M. Furuse and S. Fukui, "Load Test and Variable Speed Control of a 50 kW Class Fully Superconducting Induction/Synchronous Motor for Transportation Equipment," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **29** (5), 5203005, Aug. 2019.
- [18] T. Okazaki, Y. Shirai and T. Nakamura, "Concept Study of Wind Power Utilizing Direct Thermal Energy Conversion and Thermal Energy Storage," *Renewable Energy*, **83**, pp. 332-338, Nov. 2015.