

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03218

研究課題名(和文)全超伝導誘導同期低速発電機の構造最適化ならびに制御法に関する研究

研究課題名(英文) Study on Structure Optimization and Control Method of Low Speed Fully-superconducting Induction/synchronous Generator

研究代表者

中村 武恒 (Nakamura, Taketsune)

京都大学・工学研究科・特定教授

研究者番号：30303861

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、京都大学が先導研究を展開している高温超伝導誘導同期回転機について、それを発電機に応用する際の構造最適化と制御法に関する研究を行った。まず、希土類系高温超伝導線材における直流電流輸送特性の詳細な測定と定式化を行い、当該特性式を用いた1 kW級機の設計を実施した。そして、同機の試作ならびに回転試験システムを構築し、世界初の安定した発電試験に成功した。また、トロイダル巻固定子の内側と外側の両者に超伝導かご形回転子を設置し、かつ各々の臨界電流を異なる値とする構造の提案を行った。さらに、小容量機の結果をもとに大容量機の電磁設計も実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、京都大学が世界最先端を走っている高温超伝導誘導同期回転機について、その全ての巻線を超低損失の高温超伝導線材で構成する全超伝導発電機の開発に成功した。従来の高温超伝導回転機において、これまで明確な負荷試験に成功しているのは京都大学のグループのみであり、さらに本研究の発電試験成功を含めると、その学術的意義は極めて大きい。さらに、本研究では希土類系高温超伝導線材によって曲げ径20 mm以下の小形巻線化にも成功しており、超伝導工学の観点からの礎になる。

本研究を進めて大型超伝導発電機が実現されれば、その高効率性によって、地球環境に優しい社会実現の一翼を担えると期待される。

研究成果の概要(英文)：In this research, we conducted a study on the structure optimization and control method of the high temperature superconducting induction/synchronous rotating machine, which Kyoto University is conducting leading research, when applying it to a generator. First, detailed measurement and formulation of DC current transport characteristics in rare-earth high-temperature superconducting wire were performed, and a 1 kW class machine was designed using this characteristic equation. Then, we built a prototype of this machine and a rotation test system, and succeeded in the world's first stable power generation test. We also proposed a structure in which superconducting squirrel-cage rotors are installed both inside and outside the toroidal winding stator, and the critical currents of the rotors are different. Furthermore, based on the results of the small-capacity machine, we also designed the electromagnetic design of the large-capacity machine.

研究分野：電気機器工学

キーワード：全超伝導回転機 誘導同期発電機 希土類系固定子 ビスマス系かご形巻線 トロイダル巻固定子 2重回転子構造 液体窒素冷却 臨界電流

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超伝導回転機の研究開発は、近年の高温超伝導材料技術の進展を背景として大きく進展しており、基礎研究から高出力応用に至るまで広く実施されている。特に、界磁巻線だけでなく電機子巻線も超伝導化する全超伝導回転機は、究極の高効率・高出力密度回転機として期待されている。しかしながら、全超伝導回転機研究はその殆どが解析的検討に留まっており、世界的に見ても小型機でさえも試作・試験した研究例が極めて少ない。また、現状は上記巻線に用いる超伝導線材の非線形電流輸送特性を正確に考慮した設計研究は少ないと思われる。即ち、高温超伝導線材の電流輸送特性(電界-電流密度特性)は運転温度や経験磁界ベクトルによって非線形かつ複雑に変化するものの、その定量的評価式を導入した研究は殆ど行われていない。現在まで、全超伝導機の回転試験成功例は、研究代表者ら⁽¹⁾の他は世界で 2,3 件程度でしかない。さらには、回転機の種類についても、巻線界磁型同期機が殆どであるが、産業応用として最も使用されている誘導機については、我々の他は殆ど研究されていない⁽¹⁾。同モータは、3 定格モータとしての使用が殆どであり、定格効率が低いという認識が一般的である。それに対し、研究代表者らは、これまで高温超伝導誘導同期回転機の研究開発を推進しており、かご形誘導機の簡易な構造や高温超伝導線材使用量を大幅に低減できる構造ながら、高効率同期回転可能等の特筆すべき高性能性を実証している。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者らが先導研究を推進している高温超伝導誘導同期回転機について、その高効率発電機への適用を目指した構造ならびに励磁方法の最適化技術を確立する。まず、同機の高効率・高出力密度特性を究極化し、プロトタイプ機(定格出力: 1 kW 級)を試作して世界初の全超伝導発電試験の成功を目指す。また、さらなる高性能化のために、新しい回転機構成を検討する。さらに、プロトタイプ機による成果をもとに大容量機を電磁設計する。

3. 研究の方法

定格出力 1 kW 級の全高温超伝導プロトタイプ機を研究開発する。特に、高温超伝導固定子巻線は大電流容量・低損失化を目標とし、分布巻・集中巻・トロイダル巻の中から最適な巻線方法を決定する。また、高温超伝導回転子巻線は接触抵抗の低減を目標とする。その際、高温超伝導線材の正確な非線形電流輸送特性について、その磁界依存性を含めて詳細に計測するとともに、それを定式化して解析コードに反映する。設計結果に基づいて、プロトタイプ機の試作・試験を実施する。最終的に、上記結果をもとに、大容量機を設計して大型システムの特性を定量化する。

4. 研究成果

(1) 1 kW 級全超伝導誘導同期発電機の試作を行った。小容量機では、小さな固定子コアに高温超伝導巻線を施工しなければならないことから、当該巻線の曲げ半径を小さくしなければならない。高温超伝導線材は酸化物であるために、一般に曲げ歪に弱く、曲げ径を小さくすると材料学的破壊のリスクが高くなる。そこで、種々調査検討ならびに基礎実験を実施した結果、本研究では SuperPower 社(米国)製の希土類系高温超伝導線材を使用して固定子巻線を試作することにした。図 1 には、試作した高温超伝導固定子の外観写真を示す。巻線構成としては、3 相 4 極 Y 結線の集中巻とした。同挿入図に示すように、巻数 12 のパンケーキコイルにて毎極毎相巻線を構成したが、最も小さな曲げ径は 20 mm 未満であった。なお、巻線はポリイミド絶縁されている。

上記高温超伝導固定子を、ビスマス系高温超伝導かご形回転子(図 2)と組み合わせて全超伝導誘導同期回転機を完成した。

(2) 試作した全超伝導発電機の回転試験システムを構築した。図 3(a)には、回転試験ホルダーを示す。完成した全超伝導誘導同期発電機を鉛直上向きに設置し、シャフトとカップリングを介して非接触トルク変換器および機械入力印加用永久磁石モータ(定格出力: 3.7 kW)に接続した。また、図 3(b)には全体システムの写真を示す。同図(a)の回転試験クライオスタットをメタルクライオスタット内に設置し、液体窒素浸漬冷却後に試験を実施した。

発電試験に際しては、まず機械入力印加用永久磁石モータ

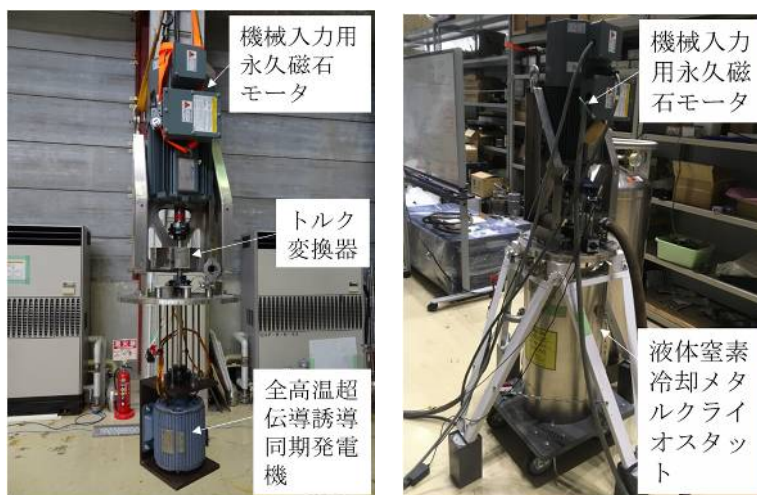


図 1: 希土類系高温超伝導固定子の外観写真(挿入図: 固定子スロットに希土類系巻線を施工した様子)



図 2: ビスマス系高温超伝導かご形回転子の外観写真

を専用の PWM (Pulse Width Modulation; パルス幅変調) インバータで駆動して、所定の回転数で回転させる。その後、全超伝導発電機を汎用 PWM インバータによって上記回転数と同期する周波数によって励磁する。そして、汎用インバータの励磁周波数を少しずつ下げることによって発電特性を測定した。なお、機械入力用モータの回転は、全高温超伝導発電機の励磁状態に影響を受けない強制回転としている。また、本研究では定常特性のみを対象としている。



(a) 回転試験ホルダー (b) 全体システム

図 3: 回転試験システムの外観写真

(3) 高温超伝導固定子(図 1)液体窒素中(77 K)におけるの直流電流輸送特性を評価した。図 4 に示すように、12 個の高温超伝導コイルの臨界電流は 91 A~98 A の範囲に収まっている。なお、上記巻線施工の際に特性劣化が生じたコイルは 1 個であり、即ち超伝導特性の観点から歩留まりの良い試作状況であった(当該コイルのみ巻き直しを行った)。さらには、本固定子は 4 回以上の熱サイクルを経験しているが、少なくとも発電機特性の観点からは劣化は生じていないと思われる。

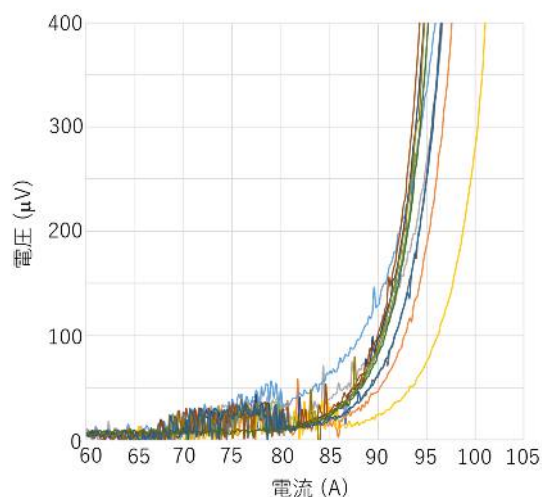


図 4: 高温超伝導固定子(図 1)の液体窒素中(77 K)における電圧-電流特性

(4) 試作した全超伝導発電機について、回転試験を実施した。なお、試作機を励磁してモータ駆動したところ、同期回転数の 1/7 の回転数に留まってしまった。これは、固定子巻線を集中巻構成としたことから、ギャップ磁束の空間高調波の影響に伴うクローリング現象と考えられる。

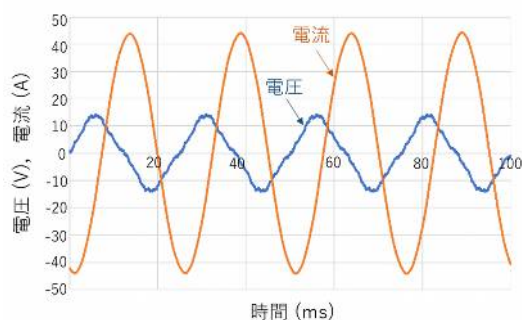


図 5: 負荷時発電波形の測定例
(周波数: 40 Hz、励磁電流: 30 A)

図 5 には、機械入力用永久磁石モータによって駆動した場合の負荷時発電波形(周波数: 40 Hz、励磁電流: 30 A)を示す。また、同様の測定を繰り返して得られた発電特性を図 6 に示す。本結果は、駆動周波数を 10 Hz~40 Hz の範囲で変化させ、また励磁電流を 10 A~30 A の範囲で変化させて得られた特性である。同図に示すように、試作した発電機によって世界初の全超伝導発電試験に成功した。重要な特性としては、ある閾値となる機械入力を超えて初めて発電動作が開始され、当該閾値は駆動周波数あるいは励磁電流が大きくなるほど高くなるという興味深い結果が得られている。なお、本実験によって最大で 550 W を超える発電が実現されている。

今後、本結果を精査することによって、高性能・高効率の高温超伝導発電機が実現されると期待される。いずれにしても、全超伝導高温超伝導機によって安定した負荷特性が得られたことは極めて大きな成果と考えられる。

(5) 2 重かご形回転子とトロイダル巻固定子を有する全超伝導回転機 (Double Squirrel-cage Rotor Toroidal-stator High Temperature Superconductor Induction/Synchronous Machine:

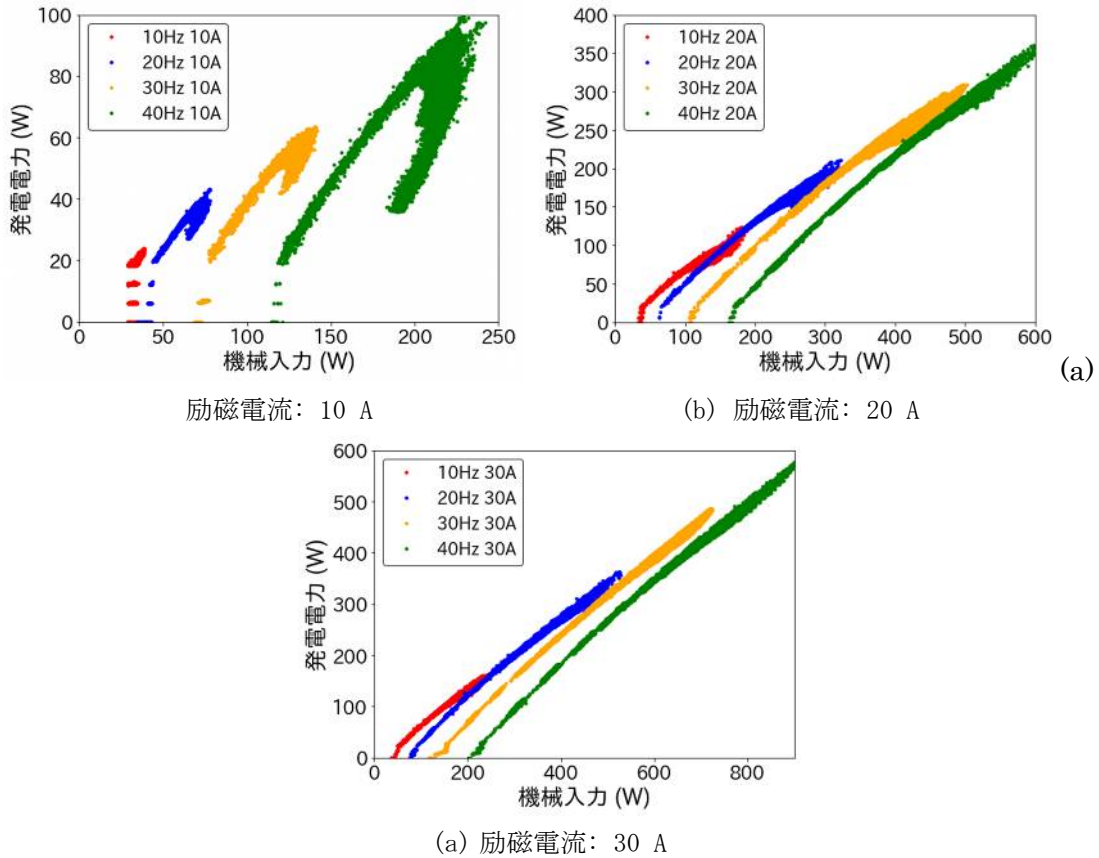


図 6: 全超伝導誘導同期発電機の発電試験結果

DSRTS-HTS-ISM) の提案を行った⁽²⁾。図 7 には、DSRTS-HTS-ISM の断面構造を示す。半径方向に巻線されたトロイダル固定子の内側だけでなく外側にも回転子を設置することによって、漏れ成分として失われていた磁束を主磁束として電気-機械エネルギー変換に利用できるだけでなく、回転機外部に余分な磁気遮蔽体を設置する必要がなくなる。

図 8 には、DSRTS-HTS-ISM における回転特性の電磁界解析結果の一例を示す。同図に示すように、従来の内側のみに回転子を有する場合 (Conventional) と DSRTS-HTS-ISM の内側回転子 (Inner rotor) の発生トルク値はほぼ同一値となっている。そして、DSRTS-HTS-ISM の外側回転子 (Outer rotor) の発生トルクは内側回転子の値より若干小さいものの、合成トルク (Double rotor) は 2 倍近く大きくなることが分かった。さらに、内側回転子と外側回転子の臨界電流を異なる値とすることで、広範な回転数とトルクの値に対して高効率特性を維持できる可能性を示唆した。

(6) その他、大容量機の電磁設計検討も実施した。今後は、より現実的な発電機構成を検討し、実用化を目指したい。

<引用文献>

- (1) D. Sekiguchi, T. Nakamura, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 22, no. 3, 5200904(4 pp) (2012)
- (2) 特願 2020-056792

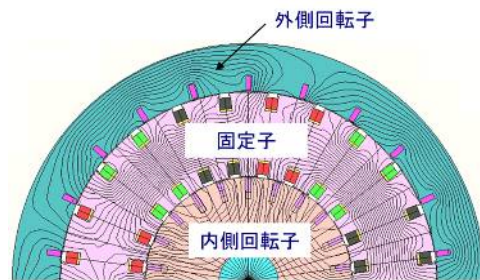


図 7: 2重かご形回転子とトロイダル巻固定子を有する超伝導回転機の断面図

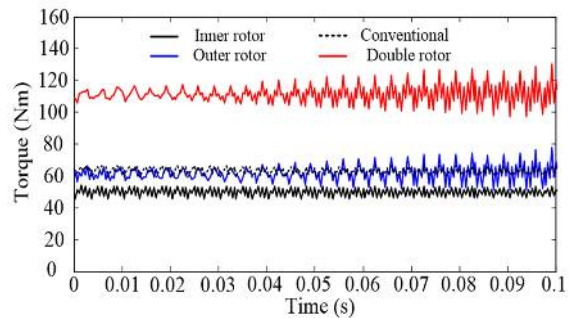


図 8: 2重かご形回転子とトロイダル巻固定子を有する超伝導回転機の電磁界解析結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 L. Wei, T. Nakamura, M. Yoshikawa, Y. Itoh and T. Terazawa	4. 巻 in press
2. 論文標題 Comparison of Different Stator Winding Configurations of Fully High-Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2020.2985687	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Nakamura, M. Okuno, M. Yoshikawa and Y. Itoh	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Quantitative characterization of nonlinear impedance and load characteristic of 50-kW-class fully superconducting induction/synchronous motor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physica C	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 L. Wei, T. Nakamura, M. Yoshikawa, Y. Itoh and T. Terazawa
2. 発表標題 Comparison of Different Stator Winding Structures on Rotating Performance of Fully High-Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor
3. 学会等名 26th International Conference on Magnet Technology (MT26) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 L. Wei and T. Nakamura
2. 発表標題 Analytical and Experimental Study on a Low-Speed and High-Efficiency 1 kW Class Fully High-Temperature Superconducting Induction/Synchronous Generator
3. 学会等名 26th International Conference on Magnet Technology (MT26) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Nakamura, T. Ogasa, M. Okuno, R. Nishino, M. Yoshikawa, Y. Itoh and T. Terazawa
2. 発表標題 R&D Status of High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motors of Several Tens of kW and Prospects towards 100 kW Output
3. 学会等名 10th Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics, 2nd International Cryogenic Materials Conference in Asia, and the CSSJ meeting (10thACASC-2ndAsianICMC-CSSJ) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Kuroda, T. Nakamura and R. Nishino
2. 発表標題 Long Term Rotation Test of a 5 kW-class HTS Induction/Synchronous Motor Cooled with Solid Argon and Small Amount of Liquid Nitrogen
3. 学会等名 2018 Applied Superconductivity Conference (ASC 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 超電導回転機	発明者 中村武恒	権利者 京都大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-056792	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----