

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289076

研究課題名(和文) 温度可変駆動型高温超伝導誘導同期回転機システムの研究

研究課題名(英文) Study on High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Machine with Variable Temperature Operation

研究代表者

中村 武恒 (Nakamura, Taketsune)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30303861

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：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モータについて、超伝導かご形巻線における電流輸送特性の温度依存性を積極的に利用した温度可変駆動に関する基礎研究を実施した。まず、電磁界解析ならびに非線形等価回路解析に基づいて、50 kW級機における回転特性の温度依存性を評価した。次に、5 kW級機を試作すると共に、同機をGM冷凍機によって冷却する回転試験クライオスタットを開発した。同試験システムを用いて、固定子を伝導冷却とし、さらに回転子を窒素ガス冷却として、冷却試験ならびに回転試験を実施した。その結果、温度可変運転を指向する際に有意な結果を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：This study carried out fundamental study on high temperature superconducting induction/synchronous motor (HTS-ISM), of which the principal investigator's group has promoted the pioneering works, aiming to variable temperature operation by the use of effective utilization of temperature dependent current transport property in the superconducting squirrel-cage windings.

We firstly evaluated the temperature dependency of rotating characteristics in 50 kW class motor, based upon electromagnetic field analysis and nonlinear electrical equivalent circuit.

Next, we fabricated a 5 kW class motor and then developed the cryostat for the rotation test of the motor that can be cooled by the use of GM cryocooler. The cooling tests and the rotation tests were performed by the use of the developed system, of which the stator was cooled by the heat conduction and the rotor by the nitrogen gas cooling. We got the fruitful data for the variable temperature operation of the HTS-ISM.

研究分野：超伝導工学

キーワード：高温超伝導 誘導同期回転機 同期トルク 誘導トルク 電流輸送特性 温度可変 冷凍機伝導冷却
ガス冷却

1. 研究開始当初の背景

近年、我が国における電力の安定供給問題は深刻化しており、一方で経済発展とともに低炭素化社会の実現が焦眉の急務となっている。安倍政権は、我が国の2020年までの温室効果ガス削減目標を05年比6~7%程度とする調整に入った[朝日新聞、2013年10月1日付、14面]。上記トリレンマとも言える課題を解決するためには、既存技術を大きく凌駕するイノベーションの創出が不可欠であり、特に我が国の電力消費の50%以上を占める回転機について革新技術が求められる。既存の産業用回転機としては、従来誘導機が多用されてきたが、近年では一部分野で永久磁石形回転機への置き換えが進められている。また、多くの産業分野では、省エネの観点から回転機の可変速運転が積極的に進められている。図1には、回転機の一般的トルク - 回転数特性を示す。同図において、低速領域の最大トルクが定トルク特性として規定され、最大出力に達した後は定出力特性となるように高速駆動される。ただし、実際の回転機駆動においては、上記最大出力特性が要求されるのは始動時などに限られており、定常回転時ではあまり大きな出力を要しない場合が多い。それにもかかわらず、回転機の設計に際しては、上記最大出力に対応できるように設計する必要がある。そのため、一般的常伝導回転機では、時間定格を設定するなどして短時間巻線に大電流を流し、上記最大出力に対応できるようにしている。

一方で、研究代表者らは、これまで長年に亘って高温超伝導誘導同期回転機の研究開発を先導しており、世界をリードする成果を上げている。本回転機は、簡易な構造を有するかご形誘導機をベースとしながらも、2次巻線を高温超伝導化することによって、すべり回転ならびに同期回転を両立、定常同期回転に伴って非常に高効率、過負荷が印加されても、すべり回転状態に移行して暫時運転可能(乱調や脱調しにくい)、既存の誘導機に比較して1桁を大きく上回る高トルク密度化・高出力密度化を実現可能、フェールセーフモードとして非超伝導状態でも暫時運転可能、可変速に対して安定回転可能(自律安定性)他、既存回転機では達成不可能な高性能化や高機能化が実現可能であることが実験ならびに解析に基づいて明らかにされている。図2には、高温超伝導(HTS)かご形巻線に磁極が形成される概念図を示す。同図に示すように、高温超伝導線材に磁束を捕捉させることによって、等価的に磁極が形成されて高効率な同期回転を実現可能である。また、超伝導線材の超低損失状態を利用して究極の高トルク密度化を実現すれば、図1の低速・高トルクを含めた全回転数範囲について、時間定格の設定無しで対応可能な回転機を実現可能である。

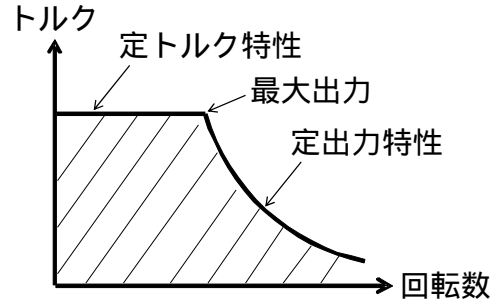


図1 回転機におけるトルク - 回転数特性の概略図

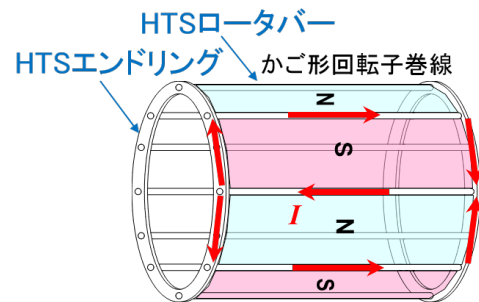


図2 高温超伝導(HTS)かご形巻線への磁極形成の模式図

2. 研究の目的

本研究では、かご形巻線に使用する高温超伝導線材について、臨界電流特性の温度依存性を積極的に利用した温度可変型高温超伝導回転機システムの基盤技術を確立する。即ち、5 kW 級試作機を対象にして、GM 冷凍機冷却回転試験システムを開発し、その特性を精査する。

3. 研究の方法

まず、5 kW 級高温超伝導誘導同期回転機(回転子: 超伝導、固定子: 銅)を設計し、ピスマス系高温超伝導テープ材を使用して実機試作する。その後、その回転特性を詳細に評価する。次に、上記試作機を GM によって冷却し、かつ回転試験可能なクライオスタットを開発し、その冷却特性および回転特性を実験的に精査する。

4. 研究成果

(1) まず、5 kW 級試作機の設計を実施した。その際、式(1)で与えられる最大同期トルク(P_{sm})が5 kW となるように設計値を決定した。

$$P_{sm} = 3 \frac{V^2}{2 \left[r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2)^2} \right]} \quad (1)$$

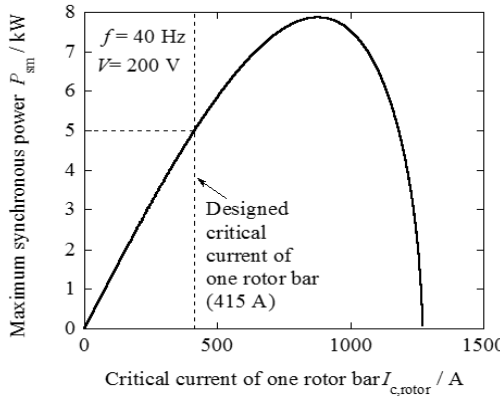


図3 5 kW 級試作機的设计結果

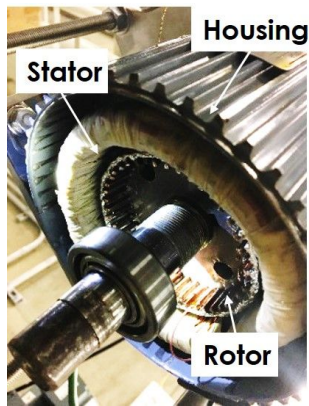
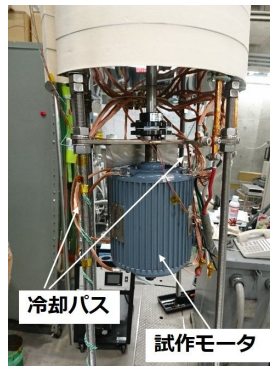


図4 試作した高温超伝導誘導同期モータ

ただし、 V は入力電圧、 r_1 は一次(固定子)巻線抵抗、 x_1+x_2' は一次側換算の漏れリアクタンスである。図3には、駆動周波数 40 Hz、入力線間電圧 200 V における P_{sm} の計算結果を示す。本結果から、出力 5 kW のときの高温超伝導ロータバーの臨界電流を 415 A と決定した。

図4には、試作した 5 kW 級機の写真を示す。固定子には、市販の銅巻線(3 相、4 極)を用い、回転子巻線をビスマス系高温超伝導テープ材によって作製した。なお、試作の一部について、核融合科学研究所の一般共同研究とのコラボレーションとして実施した。当



(a) 全体図



(b) コールドヘッド接続部

図5 冷却・回転試験ホルダ

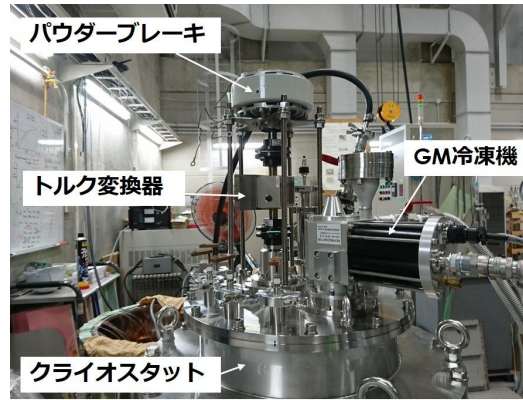


図6 トップフランジ部の外観写真



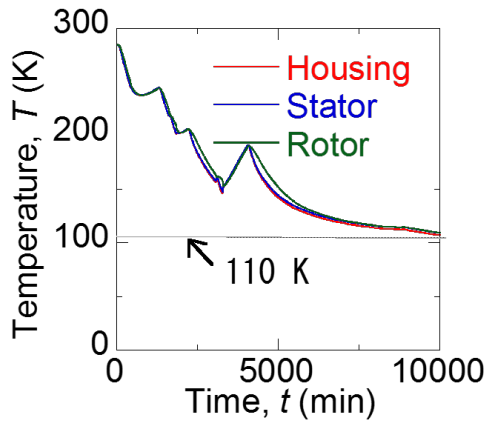
図7 回転試験系の外観

該共同研究では、極低温液体移送用高効率ポンプの検討を実施しており、本科研費の研究成果を発展させられる可能性があることから、コラボレーションすることにした。

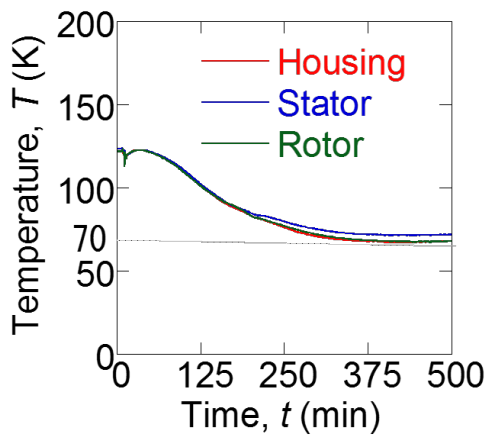
図5(a)には、試作機を伝導冷却回転試験ホルダに設置した様子を示す。試作機は、鉛直上向きにシャフトを伸ばし、トップフランジから釣り下げた SUS 棒によって固定する構造とした。また、試作機の上下ブラケットを固定する締め付け棒の接続ボルトを利用して、当該部と冷凍機コールドヘッド部(図5(b))を伝熱線によって接続した。この構造によって、固定子は固体伝導冷却されることになる。

図6には、伝導冷却回転試験クライオスタットのトップフランジ部の外観写真を示す。クライオスタット内から磁性流体シールを介して取り出したシャフトは、非接触トルク変換器を経て負荷印加用パウダーブレーキに接続されている。また、GM 冷凍機も設置されており、試作機固定子の伝導冷却を可能にしている。図7には、回転試験系の外観を示す。

(2) 次に、GM 冷凍機冷却された試作機の冷却試験を実施した。図8には、冷却特性の一例を示す。試作機のハウジング、回転子コア、および固定子コアに熱電対を設置して、GM 冷凍機運転時の冷却特性を窒素ガスの有無に対して測定した結果である。なお、図8(a)の冷却過程において温度が変動しているのは、GM 冷凍機のトラブルによって停止したこ



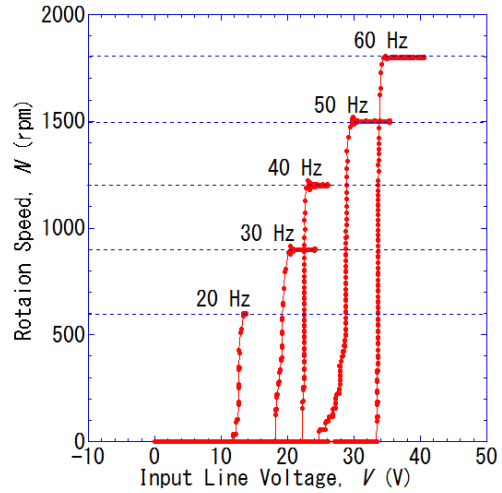
(a) 伝導冷却のみ



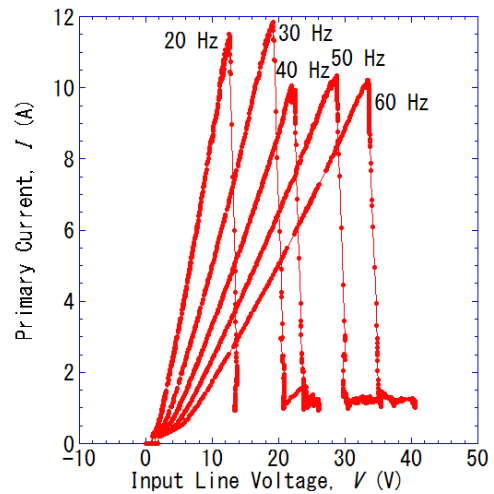
(b) 伝導冷却+窒素ガス

図 8 回転クライオスタットの冷却特性

とによるものである。同図から明らかなように、伝導冷却のみの結果(図 8(a))では、試作機がほぼ均一に冷却されている(到達温度: 110 K 程度)。一方、窒素ガスを封入した結果では(図 8(b))、若干温度分布が生じており、固定子の温度がやや高いものの、70 K 程度にまで冷却されることが分かった。その他、種々伝導冷却方法の改善を図る検討を実施しているが、紙面の都合により割愛する。(3) 項目(2)によって、試作機の冷凍機冷却が可能になったことから、当該方法によって温度を変化させ、回転試験を実施した。図 9 には、温度 73 K における回転特性の駆動周波数依存性を示す。同試験では、各駆動周波数を固定した条件下において、入力電圧に対する(a)回転数と(b)一次電流の変化を測定した。同図(a)において、駆動周波数を上げるほど、同期回転数に達する入力電圧が上昇している。一方、図(b)の一次電流特性を見ると、10~12 A 程度の電流値で同期引き入れされており、図(a)の引き入れ電圧の変化は当該電流値で決定されていると考えられる。なお、同期引き入れ後は一次電流が 1 A 程度に落ち着いている。



(a) 回転数



(b) 一次電流

図 9 温度 73 K における回転特性の駆動周波数依存性

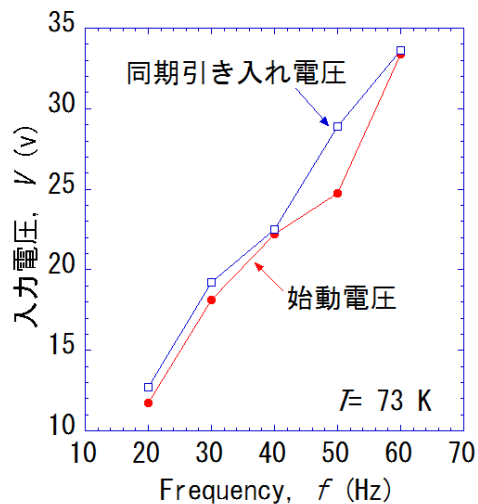
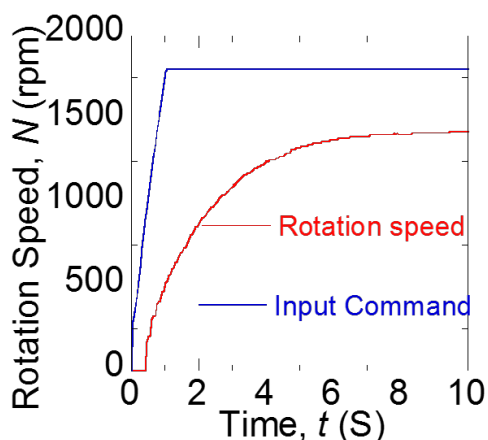
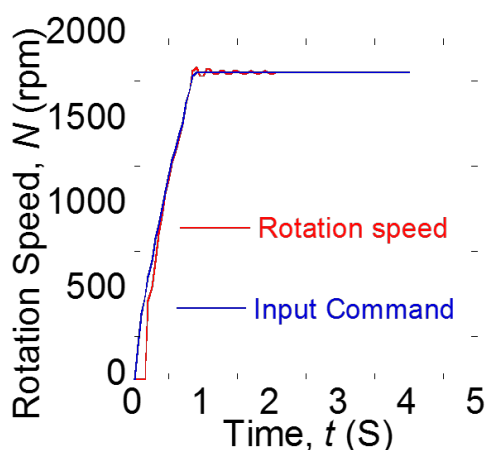


図 10 図 9 から得られた始動電圧と同期引き入れ電圧の周波数依存性 (73 K)



(a) 初期温度: 116 K



(b) 初期温度: 73 K

図 11 試作機の急加速試験結果

次に、急加速試験結果(駆動周波数: 60 Hz、同期回転数: 1800 rpm)の一例を示す。加速指令を 1 s として、試作機の追従特性を異なる温度で試験した。なお、本研究ではピスマス系高温超伝導テープ材を使用して超伝導回転子を試作しており、当該臨界温度は 110 K 程度である。まず、図 11(a)の試験結果(超伝導回転子: 常伝導状態)では、試作機の追従性が悪く、かつ回転数は 1300 rpm 程度のすべり回転であった。一方で、図 11(b)では(超伝導回転子: 超伝導状態)、試作機は加速指令に追従し、かつ同期回転数(1800 rpm)に到達している(到達時に若干の振動が観測されている)。本特性は、超伝導回転子の磁束フロー特性に伴う急峻な抵抗変化(加速時特性)とゼロ損失特性(定常時同期回転特性)に伴う。即ち、本試作機は、常伝導状態でも超伝導状態でも駆動可能であるが、超伝導状態では優れた過渡ならびに定常特性が実現されることが明らかになった。

(4) その他、別プロジェクトで開発した 50 kW 級機を対象として、その最大効率時特性の温度特性を非線形等価回路解析に基づいて明確化した。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

中村 武恒、志村 拓俊、雨宮 尚之、高温超電導誘導同期モータの駆動温度特性に関する解析的検討、低温工学、査読有、51 巻 5 号、2016、178-184

DOI: 10.2221/jcsj.51.178

〔学会発表〕(計 10 件)

T. Nakamura, Y. Itoh, M. Yoshikawa, T. Terazawa, T. Nishimura, T. Ogasa, T. Matsuo, N. Amemiya, Y. Ohashi, M. Furuse and S. Fukui、Prominent Performance of 20kW-Class High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Machine for Next Generation Automobile、The 15th IUMRS-International Conference in Asia (IUMRS-ICA 2014) (招待講演)、2014 年 8 月 28 日、Fukuoka University, Fukuoka (Japan)

中村武恒、輸送機器用高温超電導回転機システムの研究開発、電気三学会関西支部 専門講習会「超電導応用技術」(招待講演)、2015 年 11 月 27 日、中央電気倶楽部 (大阪市)

中村武恒、中温度領域で動作する超電導誘導同期回転機 - 材料と冷凍に求めるニーズ、平成 27 年度第 2 回新中温度域超伝導材料の特性に関する調査研究会(低温工学・超電導学会) (招待講演)、2015 年 12 月 3 日、姫路商工会議所 (姫路市)

T. Nakamura, HTS motor design, The 1st Asian Superconductivity Summer School 2016 (AS3 2016) (低温工学・超電導学会) (招待講演)、2016 年 8 月 25 日、Jeju National University, Jeju Island (Korea)

中村武恒、Pioneering Research on High-temperature Superconducting Induction/Synchronous Motors and Challenges in Their Application to Transportation Equipment、第 2 回永守賞表彰式 講演会 (永守財団) (招待講演)、2016 年 9 月 4 日、京都ホテルオークラ (京都市)

中村武恒、高温超電導誘導同期電動機の研究開発、第 21 回超電導・低温若手セミナー (低温工学・超電導学会 東北・北海道支部) (招待講演)、2016 年 9 月 27 日、朱鷺メッセ (新潟市)

中村武恒、西野竜平、黒田健太郎、今川信作、5 kW 級ピスマス系高温超伝導誘導同期モータのガス冷媒冷却下回転特性に関する実験的検討、2017 年度春季 (第 94 回) 低温工学・超電導学会、2017 年 5 月 22 日、タワーホール船堀 (江戸川区)

中村武恒、非線形超伝導現象から展開す

る電気 - 機械エネルギー変換と超伝導モータ、応用物理学会 (超伝導分科会 第55回研究会) (招待講演)、2017年7月4日、芝浦工業大学 豊洲キャンパス (江東区)-予定

T Nakamura, Superconducting motor, The 2nd Asian Superconductivity Summer School 2017 (AS3 2017) (招待講演)、2017年8月10日、Phoenix Seagaia Resort, Miyazaki (Japan)-予定

中村武恒、回転機 (モータ、発電機)、超伝導スクール2017(ASCOT)、2017年12月10日、産業技術総合研究所つくば西事業所 (つくば市)-予定

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 武恒 (NAKAMURA, Taketsune)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号： 30303861

(2) 研究協力者

伊藤 佳孝 (ITO, Yoshitaka)
株式会社イムラ材料開発研究所・研究開発グループ・主席研究員
研究者番号： 20527478