

機関番号：14301
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20560268
 研究課題名(和文) 高温超伝導かご型誘導同期発電機の全超伝導化と高出力化に関する研究
 研究課題名(英文) Study on full superconductivity and enlargement of output power of high temperature superconductor squirrel-cage induction/synchronous generator
 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

研究成果の概要(和文)：本研究では、研究代表者らが提案している高温超伝導誘導同期回転機について、同機の発電機応用を指向した高性能化に関する解析的かつ実験的検討を実施した。まず、室温から連続駆動可能なハイブリッド2重かご形構造を提案し、また高出力化の検討を実施した。さらに、高効率同期発電の原理を実証し、全超伝導化に成功した。

研究成果の概要(英文)： In this study, performance improvement of induction/synchronous machine for generator application, which has been proposed by representative researcher, was studied based on analysis and experiment. Firstly, the hybrid double-cage windings for the continuous operation from room temperature was proposed, and then enlargement of the output power was realized. Further, the high efficiency synchronous generation was succeeded and fully superconducting machine was realized.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：超伝導工学

科研費の分科・細目：5101

キーワード：高温超伝導、発電機、かご形誘導機、同期回転、風力発電、可変速運転、ビスマス系高温超伝導、全超伝導化

1. 研究開始当初の背景

近年の環境意識の高まりとともに、風力発電などのクリーンなエネルギーへの期待が大いに高まっている。風力発電機の開発は欧州が先行しており、近年では数MWクラスの大容量発電機開発がターゲットになりつつある。一方、風力用発電機としては、従来は安価なかご型誘導機が主流であったが、ACリンクに伴う突入電流の増大や固定速運転に伴って総合効率が悪いなど、諸問題があっ

た。従って、近年では巻線型同期発電機や永久磁石発電機の適用と、DCリンクによる可変速制御や多極化に伴うダイレクトドライブ運転等の研究開発が主流である。一方、永久磁石界磁発電機は特に大容量機では非常に高価になり、また増速機無しが多極同期機は、体格および重量ともに極めて大きくなってしまい、現状は実現困難と思われる。従って、本研究では、既存のほぼ最適化され尽くされたと思われるかご型誘導機構造をベースに、材料の観点からブレイクスルーを図る

べく、高温超伝導発電機を検討する。風力発電機の高温超伝導化については、以前より主として界磁超伝導同期発電機について検討が実施されており、国内でもフィージビリティスタディーが行われ、巻線界磁型ならびにバルク界磁型について検討されていると聞いている。しかしながら、いずれも未だ具体的開発には至っていない。一方、本申請で検討する高温超伝導誘導/同期発電機については、現状は申請者らの他は世界的に全く検討されていない。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者が世界を先導している高温超伝導誘導/同期機 (High Temperature Superconductor Induction/Synchronous Machine : 以下、HTS-ISM) の発電機応用を目指した研究を実施する。即ち、HTS-ISM の高出力化、全超伝導化、および高機能化を検討し、具体的応用先を見出す。

3. 研究の方法

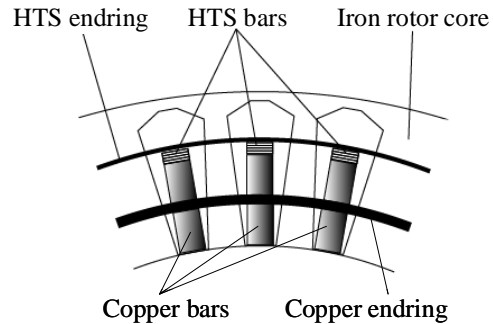
研究は、理論解析と実験の両面から実施した。理論解析に際しては、有限要素法 (電磁界解析)、非線形等価回路解析、DSP、PSIM を適用した。また、実験に際しては、数 kW 級実機を試作し、液体窒素中で試験を実施できるシステムを構築した。

4. 研究成果

本研究では、HTS-ISM の高性能化と具体的アプリケーションの明確化を目指した実験的かつ解析的検討を実施し、次のような成果を得ることができた。

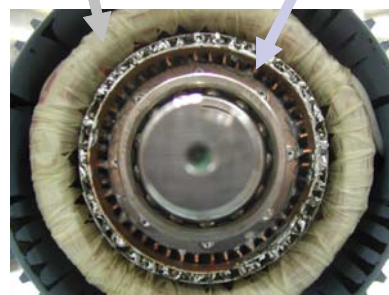
(1) 室温からの連続駆動可能性の検証

かご形二次巻線を高温超伝導体と銅帯で構成したハイブリッド2重構造とすることにより、非超伝導状態においても回転可能な高温超伝導回転機を初めて実現した。図1(a)にはハイブリッド2重かご形回転子の断面模式図を、また同図(b)には断面写真をそれぞれ示す。また、図2には温度上昇時における無負荷回転特性の一例を示す。同図から明らかのように、HTS-ISM が液体窒素に浸漬状態にある時間 ($t_w < 150$ s) は同期回転を維持しており、かつ一次電流は 3.6 A 程度を示している。一方、液体窒素を次第に気化させていくと HTS-ISM の温度が次第に上昇し、190 min 程度でまず回転数に揺らぎが生じている。さらに、200 min 程度経過一次電流も 2.5 A 程度に明確に低下している。即ち、この時点で HTS-ISM が完全に常伝導転移した



(a) 模式図

Conventional stator
Hybrid rotor



(b) 写真

図1 高温超伝導/常伝導ハイブリッド2重かご形回転子巻線の断面図

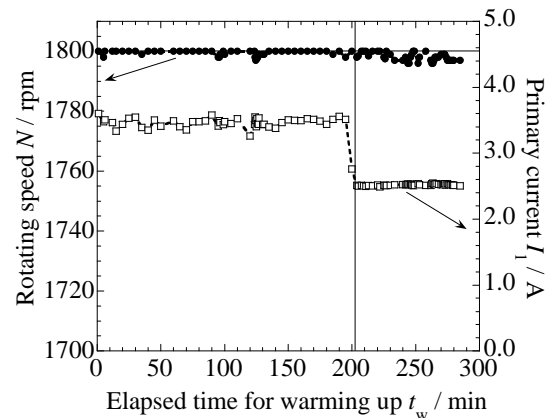


図2 図1の回転子を適用した昇温過程における無負荷回転試験結果の一例。

と考えられる。なお、常伝導状態に転移しても HTS-ISM は 100 min 以上安定に回転状態を維持した。このことは、HTS-ISM が非超伝導状態においても連続回転可能なことを示す明確な証拠と思われる。

(2) 高出力化の検討

HTS-ISM は、起磁力条件に応じてロータバーの臨界電流を最適に調整することによって、高出力化が達成可能なことを理論的に



図3 試作した 10 kW 級高温超伝導かご形回転子の外観写真（高温超伝導線材として、Bi-2223 テープ材を使用）。

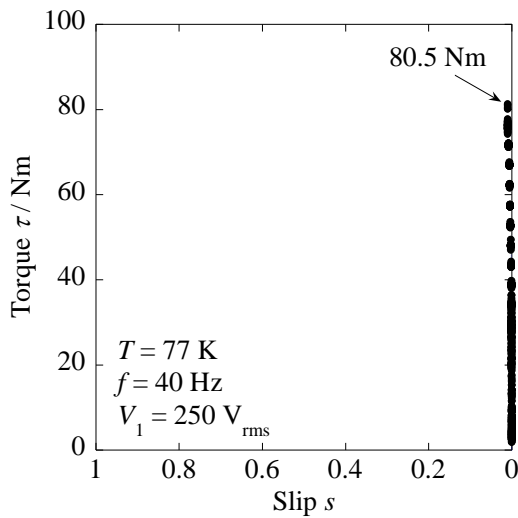


図4 図3の回転子を使用した負荷試験結果の一例（同期回転数：1800 rpm，運転温度：77 K（液体窒素浸漬冷却））。

明らかにしている。ここでは、既存の誘導機に対して一桁以上の高トルク密度化をターゲットとして、HTS-ISM の試作と実験的検証を行った。図3には、試作した高出力 HTS 回転子の外観写真を示す。また、図4には温度 77 K における負荷試験結果の一例を示す。同図から明らかなように、試作した HTS-ISM は準同期回転 (> 1796 rpm) にもかかわらず最大トルク 80 Nm (入力電圧: 250 V、一次周波数: 40 Hz) を達成することができた。このときの出力は約 10 kW である。改造前のアルミダイカスト回転子における定格すべりトルクが 8 Nm 程度 (停動トルク: 約 22 Nm) であることを考えると、約 1 桁の高トルク密度化を達成することができた。なお、本研究では、シャフト他の機械的耐性の心配からこれ以上の負荷試験は実施しなかったが、さらなる高トルク密度化を実現可能と期待される。

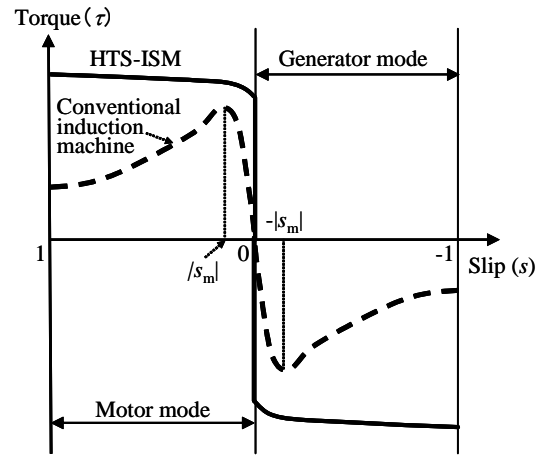


図5 HTS-ISM における同期発電の原理図（同期回転数以上で回転しようとする機械入力を与えると、負のトルク発生に伴い同期発電可能になる）。

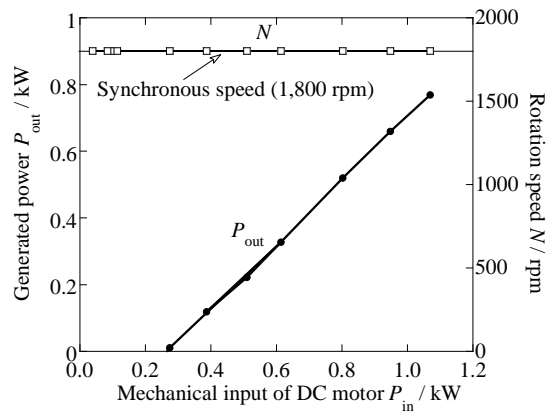


図6 HTS-ISM における同期発電試験の一例（温度：77 K）。

(3) 高効率同期発電の実証

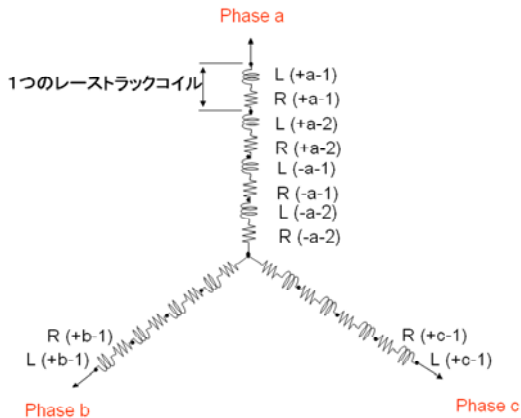
HTS-ISM は、かご形誘導機の基本構造を有しながらも、同期回転を実現可能である。一方、このことは、機械的入力に対して高効率な同期発電の実現可能性も期待される。そこで、本アイデアを実験的に検証した。図5には、HTS-ISM のトルクスべり特性を模式的に示す。従来機との比較から明らかなように、HTS-ISM は機械的入力に対して同期回転が可能であり、即ちこの回転領域を利用することによって、同期発電が可能である。図6には、試作機による発電試験結果の一例（運転温度：77 K）を示す。まず、HTS-ISM を無負荷で同期速度に引き入れ（1800 rpm）、その後機械的入力（横軸）に対する特性を測定している。同図から、機械的入力に対して、HTS-ISM が同期速度を維持したまま発電可能であることが明らかになった。なお、本試験システムでは、ベアリング他の機械損が大きく損失が大きくなっているため、その改良



(a) レーストラックコイルの外観写真



(b) コイルを固定子コアに挿入した状態



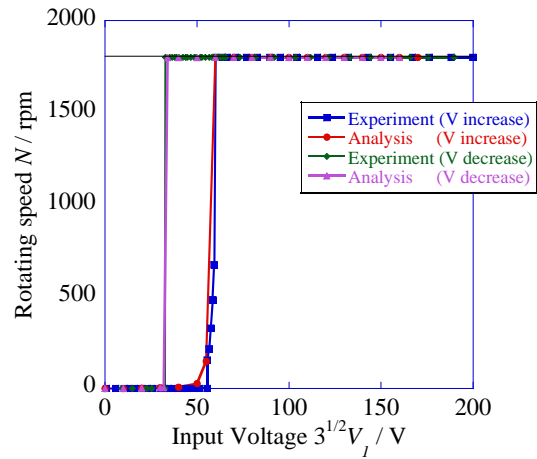
(c) 結線図

図 7 Bi-2223 固定子

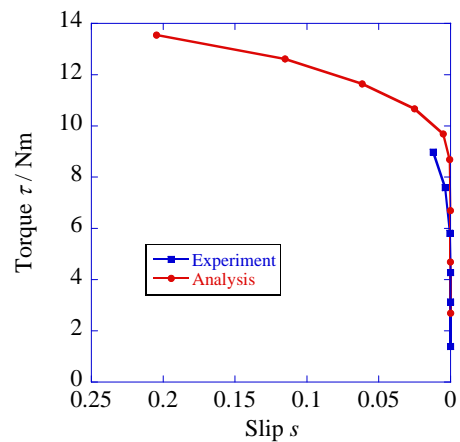
と、より正確な効率データの取得は今後の課題である。

(4) 全超伝導化の検討

HTS-ISM の究極の高効率化ならびに高出力化を達成するためには、固定子巻線までも高温超伝導導体で構成する全超伝導化の検討が不可欠である。しかしながら、これまで高温超伝導機に関しては、IHI が誘導子形と呼ばれるモータについて全超伝導回転試験



(a) 無負荷試験結果



(b) 負荷試験結果

図 8 HTS-ISM における実験結果と解析結果の比較 (温度: 77 K).

に成功しただけであり、ラジアルギャップ形について成功した例は無かった。そこで、Bi-2223 系高温超伝導テープ材を適用した固定子巻線技術の開発と、予備試験を実施した。固定子巻線は、レーストラックダブルパンケークコイルの組み合わせで構成することにした。図 7(a)には試作したレーストラックダブルパンケークコイルの写真、また同図(b)にはコイルを固定子コアに挿入した状態をそれぞれ示す。図 7(c)には、3 相 2 極配置とした場合の結線図を示す。

上記固定子に Bi-2223 回転子を組み合わせ、回転数 150 rpm 程度における回転試験に成功した。さらに、本成果をベースにさらなる研究開発を実施したところ、最終的に回転数 1800 rpm の回転試験にも成功している。

(5) 解析コードの開発

HTS-ISM の定量的特性評価を可能にするため、電圧方程式+力学方程式を適用した解析コードを開発した。図 8 には、それぞれ(a)

無負荷試験結果と(b)負荷試験結果の比較検討結果を示す。同図から明らかのように、実験結果と解析結果は良く一致している。従って、開発した解析コードを用いて、例えば可変速駆動時の特性評価他を実施することが可能になった。

(6) アプリケーションの検討

本研究成果の具体的アプリケーションを検討した。まず、当初目標の風力発電を検討した。概略かつ近似の入った設計ではあるが、5 MW 級機風力発電機を検討したところ、既存の回転機に対して小形かつ高効率となることを示すことができた。

また、電気鉄道駆動回転機への適用も検討した。机上検討ではあるが、直流き電システムについて HTS-ISM の導入効果を実証することができた。

(7) まとめ

以上、本研究では、HTS-ISM の発電機応用を目指した研究を実施した。その結果、室温からの連続駆動の可能性実証や、高出力密度化の検証、同期発電の実証、全超伝導化他、様々なポテンシャルを明確にすることができた。今後は、具体的アプリケーションについて、HTS-ISM 導入の効果を定量的に検討し、その実用化を目指していきたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① 小西武史, 中村武恒, 西村敏治, 雨宮尚之, "高温超電導電動機を電気鉄道に適用した電力負荷特性の向上に関する基礎検討", 電気学会論文誌 B, 査読有, 印刷中
- ② T. Konishi, T. Nakamura, T. Nishimura and N. Amemiya, "Analytic Evaluation of HTS Induction Motor for Electric Rolling Stock", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, 印刷中
- ③ 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, vol. 24, no. 1 査読有, 2011, 015014 (6pp)
- ④ 中村武恒, 小蒲義夫, 松村一弘, 西村敏治, 長尾和昌, 鹿島直二, 長屋重夫, "高温超電導誘導/同期機の発電特性に関する基礎研究", 低温工学, vol. 44, no. 3, 査読付, 2009, pp. 112-119

- ⑤ T. Nakamura, K. Nagao, T. Nishimura and K. Matsumura, "An Induction/synchronous motor having HTS/normal conductor hybrid double-cage rotor windings", Superconductor Science and Technology, vol. 22, 査読付, 2009, 045022(7pp)
- ⑥ T. Nakamura, T. Nishimura, K. Nagao, K. Matsumura and Y. Ogama, "Theoretical Analysis of High Temperature Superconducting Induction /Synchronous Machine Based on the Nonlinear Electrical Equivalent Circuit", Proceedings of XVIII International Conference on Electrical Machines (ICEM'08), Vilamoura, Portugal, 査読無, 2008, ID. 1278 (5pp)

[学会発表] (計 12 件)

- ① 中村武恒, 三澤慎太郎, 関口大輔, 北野紘生, 川西勇作, 雨宮尚之, 伊藤佳孝, 吉川雅章, 寺澤俊久, 長村光造, "高温超電導誘導/同期機の過負荷耐量に関する実験的検討", 2011 年度春季低温工学・超電導学会, 2011 年 5 月 19 日, 物質・材料研究機構, つくば市
- ② 中村武恒, 三澤慎太郎, 関口大輔, 北野紘生, 川西勇作, 雨宮尚之, 伊藤佳孝, 吉川雅章, 寺澤俊久, 長村光造, "高温超電導誘導/同期機の過負荷耐量に関する実験的検討", 2011 年度春季低温工学・超電導学会, 2011 年 5 月 19 日, 物質・材料研究機構, つくば市
- ③ T. Konishi, T. Nakamura, T. Nishimura and N. Amemiya, " Analytic Evaluation of HTS Induction Motor for Electric Rolling Stock ", Applied Superconductivity Conference 2010, Washington, D.C., USA, August 2, 2010
- ④ 浅井力矢, 松村一弘, 西村敏治, 関口大輔, 中村武恒, 雨宮尚之, "高温超電導誘導同期機の DSP を適用した VVVF 制御に関する基礎検討", 平成 22 年電気学会全国大会, 2010 年 3 月 19 日, 明治大学, 千代田区
- ⑤ 西村敏治, 松村一弘, 中村武恒, 浅井力矢, 関口大輔, 雨宮尚之, "交流電特性を考慮した全超電導誘導同期機の特性解析", 平成 22 年電気学会全国大会, 2010 年 3 月 19 日, 明治大学, 千代田区
- ⑥ 中村武恒, 西村敏治, 松村一弘, 関口大輔, 浅井力也, 雨宮尚之, "モータ用鉄心スロット中におけるビスマス系高温超電導テープ材ならびにレーストラックコイルの通電特性", 2009 年度秋季低温工学・超電導学会, 2009 年 11 月 18 日, 岡山大学, 岡山市
- ⑦ 松村一弘, 中村武恒, 西村敏治, 浅井力也, 関口大輔, 雨宮尚之, "高温超伝導

誘導/同期回転機の解析モデルによる負荷特性の評価”, 2009 年度秋季低温工学・超電導学会, 2009 年 11 月 18 日, 岡山大学, 岡山市

- ⑧ 西村敏治, 松村一弘, 中村武恒, 浅井力也, 関口大輔, 雨宮尚之, 伊藤佳孝, 吉川雅章, 寺澤俊久, “高温超電導かご型誘導/同期モータの可変速駆動を指向した効率マップに関する検討”, 2009 年度秋季低温工学・超電導学会, 2009 年 11 月 18 日, 岡山大学, 岡山市
- ⑨ 中村武恒, 松村一弘, 西村敏治, 長尾和昌, 伊藤佳孝, 寺澤俊久, 岡徹雄, 長村光造, 雨宮尚之, “高温超電導誘導/同期機の車載応用への適用可能性に関する検討”, 2009 年度春季低温工学・超電導学会, 2009 年 5 月 13 日, 早稲田大学, 新宿区
- ⑩ 西村敏治, 松村一弘, 山田裕輝, 長尾和昌, 中村武恒, 雨宮尚之, “全超電導かご形誘導/同期機の試験”, 平成 21 年電気学会全国大会, 2009 年 3 月 17 日, 北海道大学, 札幌市
- ⑪ 松村一弘, 中村武恒, 長尾和昌, “可変速制御を指向した高温超電導誘導/同期機の解析コード開発”, 平成 21 年 電気学会全国大会, 2009 年 3 月 17 日, 北海道大学, 札幌市
- ⑫ 長尾和昌, 山田裕輝, 松村一弘, 西村敏治, 中村武恒, 雨宮尚之, “ビスマス系かご形巻線を適用した高温超電導誘導/同期機における微小すべりの精密評価”, 平成 21 年 電気学会全国大会, 2009 年 3 月 17 日, 北海道大学, 札幌市

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 超電導回転機および超電導回転機システム

発明者: 中村武恒, 伊藤佳孝

権利者: 国立大学法人京都大学, アイシン精機株式会社

番号: 特願 2009-124940 号

出願年月日: 2009 年 5 月 25 日

国内外の別: 国内

[その他]

○受賞

・ 2010 年度低温工学協会論文賞

受賞者: 中村武恒, 小蒲義夫, 西村敏治, 松村一弘, 長尾和昌, 鹿島直二, 長屋重夫
受賞対象論文名: 高温超電導誘導/同期機の発電特性に関する基礎研究, 低温工学, vol. 44, no. 3 (2009) pp. 112-119

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) 研究分担者

該当無し

(3) 連携研究者

該当無し