

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656199

研究課題名（和文）リラクタンストルクを有する究極の高温超伝導誘導同期機実現への挑戦

研究課題名（英文）Challenge to realization of Ultimate HTS Induction/Synchronous machines that obtain Reluctance Torque

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、研究代表者らが先駆的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、リラクタンストルクを付与するトルク密度究極化に挑戦した。即ち、高温超伝導かご形回転子の鉄心コア内に 4 個の HTS バルク磁気遮蔽体を挿入する構造を提案し、その特性を解析的かつ実験的に明確化した。本成果によって、定常回転時には高効率の誘導同期トルクのみが発生するのに対して、高トルクが必要な始動時や過負荷時にのみ上記トルクにリラクタンストルクが追加される可能性を明確化した。

研究成果の概要（英文）：

In this study, we challenged realization of ultimate torque density of HTS induction/synchronous machine, in which we have been carrying out pioneering work, by introducing the additional HTS reluctance torque. That is, we installed four pieces of HTS shield body in the rotor core, and then studied their characteristics based on analysis and experiment. We showed the possibility that the studied rotor possesses high efficiency induction/synchronous torque (magnet torque) in steady state. Furthermore, the reluctance torque is added to the above-mentioned magnet torque only at the starting and/or the overload condition, at which higher torque is necessary for adequate traction force.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：超伝導工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：高温超伝導、誘導同期機、リラクタンストルク、磁気遮蔽、同期回転

1. 研究開始当初の背景

我が国における近年の回転機開発の主流は、永久磁石を適用した同期機である。特に、電気駆動式自動車を中心とする多くの輸送機器においては、埋め込み磁石形永久磁石モータが研究開発されている。車載用回転機の開発に際しては、限られた空間において出力密度を向上する必要がある、例えばトヨタ自動車（株）の第 3 世代プリウス駆動モータは 1 万 rpm を大きく超える回転数で駆動し、出

力向上を達成している。しかしながら、高速回転時の永久磁石モータでは固定子巻線に逆起電力が発生することから、それを補償するために所謂“弱め界磁制御”が必須であり、効率に影響を与えている。さらには、発熱の問題も深刻であり、現在は複雑な油冷機構によってようやく現在のシステムを実現している。一方、さらなる出力密度改善のためには、既存技術の延長では限界があると考えられ、技術的ブレークスルーが不可欠である。

その一つが高温超伝導技術と期待され、研究代表者らは高温超伝導誘導同期機[1]を世界に先駆けて研究開発している。同機を車載に適用すれば、低温環境を実現する冷凍機の消費電力を考慮しても、可変速駆動に対する高効率化や、あるいは高トルク密度化に伴うトランスミッションギアの省略によって、既存永久磁石駆動系に比較して飛躍的省エネ化が実現可能であると期待される[1]。従って、究極の高トルク（出力）密度化は必須となる。[1] 中村武恒、“特集：超電導産業機器技術の展開「電気自動車用超電導モータ技術開発の進展」”、超電導 Web21、2010年3月号（2010）pp. 5-7

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者らが研究開発している高温超伝導誘導同期回転機について、さらにリラクタンストルクを付与することにより、究極の高トルク密度化・高出力密度化を実現する。具体的には、かご形回転子巻線構造を採用し、同巻線を高温超伝導テープ材で構成することによって非常に大きな“同期トルク（磁束捕捉に伴う磁石トルク）”を得るだけでなく、回転子鉄心内に極数に応じて最適な高温超伝導磁気遮蔽体（高温超伝導バルク体）を挿入することにより、リラクタンストルクを付与する技術を開発し、その可能性を実証する。

本研究の高温超伝導誘導同期回転機は、まずかご形誘導機の簡易な構造を有しながらも、2次側かご形巻線を高温超伝導化することによって、非常に大きな“同期”トルクが得られることを特長とする。さらに、回転子鉄心内に理想的な磁気遮蔽特性を有する高温超伝導体（バルク体）を挿入してリラクタンストルクを付与することにより、究極の高トルク密度化を達成可能であり、例えば車載応用ではトランスミッションギアを省略するダイレクトドライブ駆動系を実現することが可能になると期待される。

3. 研究の方法

まず、高温超伝導遮蔽体の磁気遮蔽特性について基礎検討を実施する。次に、上記磁気遮蔽体を適用した高温超伝導誘導同期回転子の設計ならびに解析的特性評価を実施する。その後、上記設計した回転子を試作し、従来形常伝導（銅）固定子と組み合わせることによって、回転試験を実施する。試験は液体窒素大気圧沸点（77 K）以上にて実施する。図1には、本研究に使用した試験システムの外観写真を示す。試作機を、図の液体窒素冷却クライオスタット内に設置し、各種試験を実施する。最終的に、本提案の回転機について、その駆動概念を確立するとともに、既存機に対する優位性を明確化する。



図1 試作機試験用の液体窒素冷却クライオスタット外観写真

4. 研究成果

まず、リラクタンストルク付与のための高温超伝導磁気遮蔽体の断面積やその形状について、回転子コア中の電磁界解析を実施した。電磁界解析には、2次元有限要素法を用いた。その結果、比較的小さくかつ単純（長方形断面）についても効果が得られることを解析的に示した。

次に、高温超伝導磁気遮蔽体の候補として、高温超伝導テープ材をバンドル導体化したものと、高温超伝導バルク体について検討を進めた。その結果、高温超伝導バンドル導体は変動磁界印加に伴う常伝導保護層の渦電流損の心配があることから、高温超伝導バルク体について検討を進めることになり、メーカに作製依頼した。

上記高温超伝導磁気遮蔽体を適用した高温超伝導回転子の設計と解析を行った。解析に際しては、有限要素法を適用した。予測通り、HTS磁気遮蔽体導入でリラクタンズ発現に伴う磁極が形成される条件を見出すことに成功した。その後、回転子の試作を完了すると共に、まず液体窒素中の無負荷回転試験に成功した。回転試験に際しては、既存の常伝導（銅）固定子（特性が明確に分かっている）を適用し、試作回転子の特性を精査しやすいように工夫した。

図2には回転子断面の模式図を、また図3には試作した回転子の外観写真を示す。かご形巻線にはBi系高温超伝導テープ材が使われており、鉄心内にGd系バルク磁気遮蔽体が挿入されている。図4には、電磁界解析結果の一例を示す。磁気飽和が起こっていない通常回転時には、誘導同期トルク（磁石トルク）発現に寄与する4磁極成分のみが発生している（図4(a)）。一方で、高トルクが要求さ

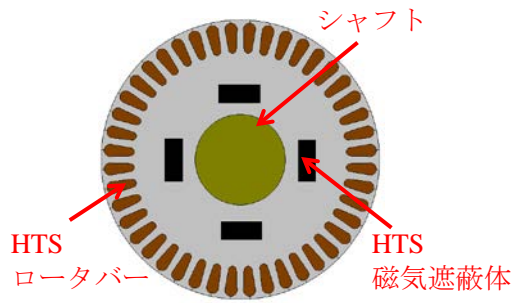
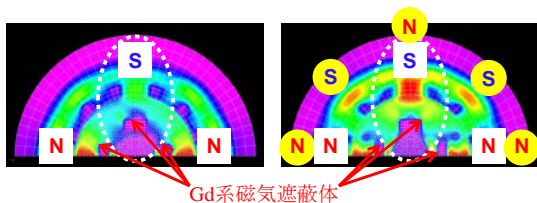


図2 リラクタンストルク発現形高温超伝導誘導同期回転子の概略断面図

Bi系 かご形巻線 Gd系 磁気遮蔽体



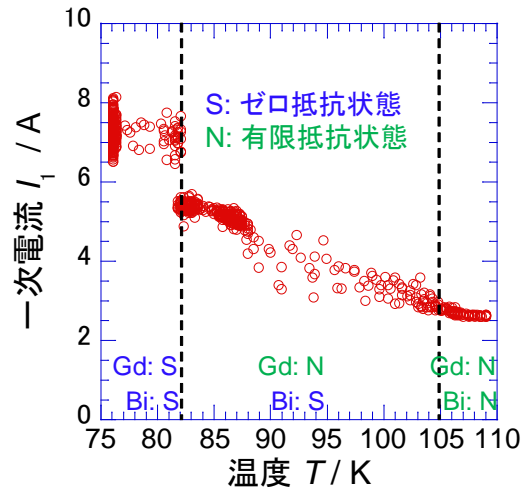
図3 試作機の外観写真



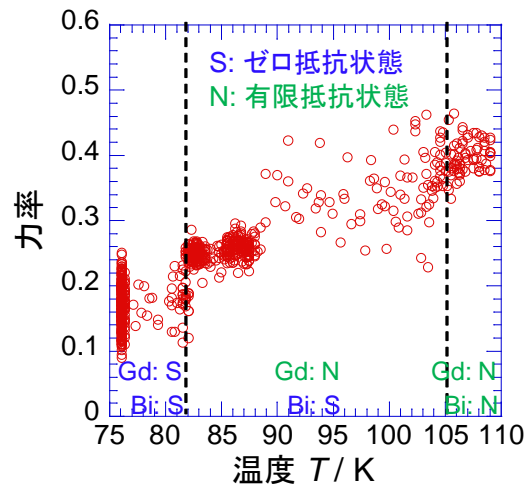
(a) 非飽和時 (b) 飽和時

図4 回転子断面内の電磁界解析結果(磁束密度分布)の一例

れる磁気飽和時には、上記4磁極に加えて8磁極も生じており(図4(b))、即ちリラクタンストルクが付加的に発現すると期待される。そこで、HTS 磁気遮蔽体の効果を検証するため、図3の回転子を従来形銅固定子(3相4極)と組み合わせ、昇温過程で実施した無負荷回転試験結果を図5に示す。同図では、試作機を液体窒素中で無負荷同期回転状態(600 rpm)とし、その後液体窒素を抜きながら昇温過程における回転特性を測定した。同図(a)に示すように、温度82 K程度において一次電流が減少しており、このときGd系バルク体の不可逆温度に達したと考えられる(なお、昇温過程における窒素の対流に伴う温度分布の影響によって、特性にバラつきが生じている)。一方、上記時点における力率は向上しており(図5(b))、このことはバ



(a) 一次電流



(b) 力率

図5 昇温過程における無負荷回転特性の試験結果

ルク体の損失状態への遷移に伴うものと考えられる。そして、温度105 K程度になるとさらに一次電流が低下しており(図5(a))、力率はさらに改善していることから(図5(b))、この温度はBi系かご形巻線の不可逆温度に対応する。つまり、上記両超伝導材料特性が回転特性として明確に現れていると考えられる。以上の結果から、リラクタンストルク発現形HTS-ISMの実現可能性が示されたものと考えられている。なお、最終的に高温超伝導回転機巻線が完全に常伝導転移後にも40分以上回転試験を継続したが、試作機は非常に安定に回転していた。

上記結果から、最大トルクが必要な高トルク同期回転状態でのみ自動的にリラクタンストルクが発現するHTSかご形回転子構造の実現可能性が示された。本研究のポイントは、最大トルクが必要な緩やかな磁気飽和状態

において、HTS 磁気遮蔽体がリラクタンストルクを発生し、HTS-ISM の誘導同期トルク（磁石トルク）に追加される。一方で、磁気飽和が起こらない通常回転時には、誘導同期トルクを発生する磁気回路を上記磁気遮蔽体が妨げず、リラクタンストルクも消失する。一般に、リラクタンストルクは力率や効率に悪影響を及ぼし、通常回転時に発生することは必ずしも好ましくない。従って本提案は、緩やかな磁気飽和現象を効果的に利用することによって、輸送機器特有の走行モードを制約条件とした高機能性と高効率性の両立が要求されるモータに適していると考えられる。図 6 には、一例として将来の車載駆動システム の概念図を示した。同図に示すように、本研究を発展させることによって直接駆動（ダイレクトドライブ）システムが実現可能と期待され、トランスミッション省略に伴って車体軽量化や車内スペース有効活用が可能になるだけでなく、パワートレインシステム全体の効率改善につながると期待される。今後は、可変速に対する実負荷試験を実施し、本研究をさらに発展させる予定である。

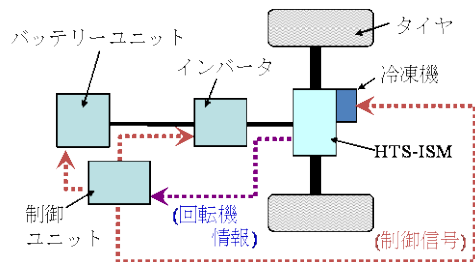


図 6 超伝導直接駆動輸送機器システム の概念図

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 0 件)

[学会発表] (計 3 件)

- ① (To be presented, accepted for oral presentation)
T. Nishimura, T. Nakamura, Q. Li, N. Amemiya and Y. Itoh, Potential for Torque Density maximization of HTS Induction/Synchronous Motor by Use of Superconducting Reluctance Torque, 23rd International Conference on Magnet Technology (MT23), July14-19, 2013, The Westin Copley Place (Boston, MA USA)
- ② 西村立男、中村武恒、李全、小笠卓郎、雨宮尚之、伊藤佳孝、始動時高トルク密度化と定常時効率化の両立を可能にするリラクタンストルク付与形高温超電導誘

導同期回転機に関する検討、2013 年度春季第 87 回低温工学・超電導学会研究発表会、2013 年 5 月 13 日～2013 年 5 月 15 日、タワーホール船堀（江戸川区）

- ③ 西村立男、中村武恒、雨宮尚之、伊藤佳孝、リラクタンストルクを有する究極の高温超電導誘導同期回転機の提案と特性検討、2012 年秋季第 86 回低温工学・超電導学会研究発表会、2012 年 11 月 7 日～2012 年 11 月 9 日、いわて県民情報交流センター（盛岡市）

[その他]

ホームページ等

超電導コミュニケーションズ (SUPERCOM) 2013 年 4 月号

<http://semrl.t.u-tokyo.ac.jp/supercom/>

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 (ITOH YOSHITAKA)

イムラ材料開発研究所・研究開発グループ・主任研究員

研究者番号：20527478