

世界初の実用化が迫る高温超電導誘導同期回転機

京都大学 大学院工学研究科

中村 武恒

1. はじめに

筆者の研究室は、2017年4月に日本電産(株)(2023年4月より、ニデック(株)に社名変更)の寄附講座として発足した。第1期が2022年3月に終了し、同年4月より第2期として活動継続させて頂いている。世界 No.1 の総合モーターメーカーの支援を得て、回転機を対象とした回転座標系における電磁現象の第一原理的検討と共に、電気-機械エネルギー変換過程の一般的表現法の確立に挑戦している。また、回転機、バッテリー、インバータ、負荷、および冷却系をインピーダンスとして統一的に扱い、そのマルチフィジックスの動的整合を検討している。

本稿では、筆者らが2005年から取り組んでいる高温超電導誘導同期回転機(High Temperature Superconductor Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM)を対象にして、これまでの取り組みの一例と将来展望を紹介する。

2. 高温超電導誘導同期回転機の原理と特長

HTS-ISMの基本構造は、世の中で最も汎用されているかご形誘導モータと同様である²⁾。図1には、かご形回転子巻線の概略図を示す。HTS-ISMの回転特性としての基本的考え方は、その回転子巻線を高温超電導化することにより、HTS材料の非線形電流伝送特性を巧みに利用することでインテリジェントな性能が実現される。

図2(a)にはHTS-ISMのトルク-回転数特性を、同図(b)にはHTS導体の電圧-電流特性をそれぞれ示す³⁾。(三相)交流回転機には、主として同期回転機と誘導回転機があり、一次側三相交流電圧によって固定子-回転子間のギャップに回転磁界を実現し、二次側(多くの場合回転子)の(独立した)磁極もしくは誘導電流によって変調を与えることでトルクを得る。同図(a)に示すように、HTS-ISMは上記両特性を本質的に兼ね備えている点が大きな特長である。また、同図(b)に示すように、同期回転は抵抗0特性として、そして誘導回転は非線形抵抗(磁束フロー抵抗)特性として実現される。勿論、誘導回転では回転子巻線内に損失が発生するが、この回転モードは過負荷耐量として使用でき、即ち始動時等の瞬間的に大きなトルクを要する状況下において有用となる。さらに、回転数が急激に変化する過渡状態においても、抵抗0特性と磁束フロー特性間を自律的に遷移することによって回転安定性が保証される。つまり、HTS-ISMはHTS材料の抵抗0特性のみでなく非線形電流伝送特性そのものを効果的に利用した回転機ということが出来る。

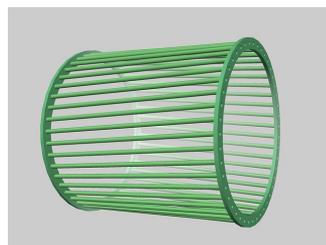
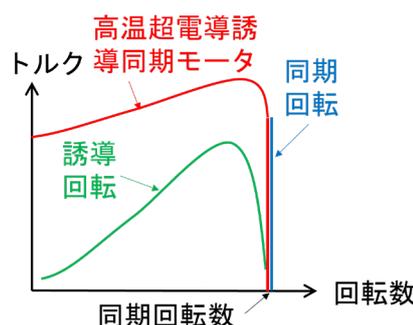
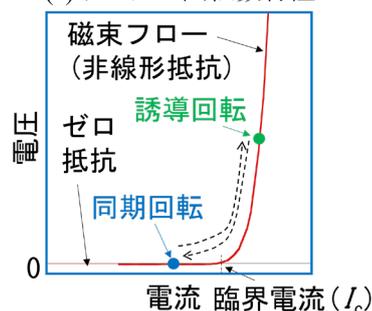


図1 かご形回転子巻線の概略図



(a)トルク-回転数特性



(b) HTS ロータバーの電圧-電流特性
図2 HTS-ISMの回転特性の模式図³⁾

3. 輸送機器を想定した開発例

これまで、NEDOやJST、科研費、企業共同研究費等からの支援を得て、主として陸上輸送機器用途を想定した研究開発を行ってきた。図3には、JST-ALCAプロジェクトとして開発した20kW級プロトタイプ機の外観写真を示す^{3,4)}。固定子は、市販のコア(定格出力3.7kWの誘導機)であり、回転子巻線にビスマス系HTSテープを用いている。本機は、3.7kW級モータの回転子を置き換えるだけで40kW超の出力が実現されており⁴⁾、即ち1桁以上の高出力密度化が容易に実現可能である。さらに、究極性能を解析的に検討し、110kW程度まで出力を高められる可能性を示している。その他、急激な加減速に対する安定性、同期回生特性、履歴回転特

性および同特性を利用した効率改善の可能性検討、最大効率マップ等、種々の特性を明らかにしている³⁾。

20 kW 級プロトタイプ機的设计技術を用いて、50 kW 級モデル機の開発を行った。本機は、回転子に加えて固定子も専用に開発した。

図 4(a)には銅固定子とビスマス系 HTS 回転子を組み合わせた 50 kW 級モデル機の外觀写真を示す⁵⁾。同機によって、例えば 99%を超える高効率化や室温運転の実現可能性を実証した⁵⁾。また、図 4(b)には全ての巻線をビスマス系 HTS テープで作製した全超電導機を示すが、負荷試験や軽負荷時加減速試験に成功している⁶⁾。

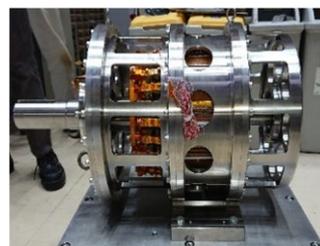
さらに、最近では 200 kW 級機の最適化設計を行っており、例えば 20 kW/kg を超える出力密度も実現できる状況にある⁷⁾。



図 3 20 kW 級 HTS-ISM の外觀写真^{3,4)}

4. まとめと今後の展望

以上、本稿では HTS-ISM を対象にして、これまでの研究開発状況の一例を紹介した。我々は実証主義に徹し、回っていないものは信じないをモットーに、理論・解析・試験を三つ巴にして研究開発を進め、ようやく実用レベルにまで辿り着きつつある。現在は、冷却構造やシステム化について実用化を担う企業とともに検討し、まずは例えば車載水素エンジン用液体水素昇圧ポンプ⁸⁾、水素サプライチェーン用ポンプ⁹⁾から社会実装を目指していきたい。関西発の高温超電導誘導同期モータの実用化の足音が聞こえている。なお、本稿で紹介した HTS-ISM の写真とその成果は、JST-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」の支援を受けた。



(a) 回転子超電導機⁵⁾



(b) 全超電導機

図 4 50 kW 級 HTS-ISM の外觀図⁶⁾

最後に、低温工学・超電導学会関西支部 50 周年に際し、一言お祝い申し上げます。益々のご発展をお祈り致しますと共に、今後共ご指導・ご鞭撻の程お願い申し上げます。

5. 参考文献

- 1) (ニデック(株)HP) <https://www.nidec.com/jp/corporate/news/2022/news0406-01/> (アクセス日: 2023年6月12日)
- 2) G. Morita, T. Nakamura and I. Muta : Superconductor Science and Technology, **19(6)** (2006) 473
- 3) 中村武恒: 低温工学 **57(2)** (2022) 101
- 4) T. Nakamura, et al. : IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **25** (2015) 5202304
- 5) T. Nakamura, et al. : IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **33(5)** (2023) 5200205
- 6) T. Nakamura, et al. : Physica C, **578** (2020) 1353662
- 7) I. Cirozlar, et al. : Abstract of Applied Superconductivity Conference 2022 (2022) ASC2022-4LPo1D
- 8) (トヨタ自動車(株)HP) <https://global.toyota.jp/newsroom/corporate/39234812.html> (アクセス日: 2023年6月12日)
- 9) (NEDO HP) <https://www.nedo.go.jp/content/100961947.pdf> (アクセス日: 2023年6月12日)