

バルク超電導体を用いた埋め込み永久磁石型同期モータの電磁設計

Electromagnetic Design of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors Using Bulk Superconductors

寺尾 悠, 赤田 渉, 大崎 博之(東大)

TERAO Yutaka, AKADA Wataru and OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)

E-mail: y.terao@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

近年、航空機をはじめとした輸送機器に搭載するモータには高出力密度が求められている。中でも電気自動車等に用いられる埋め込み永久磁石型同期モータ(IPMSM)は、表面永久磁石型同期モータ(SPMSM)と比較してマグネットトルクだけでなくリラクタンストルクを用いることが可能であり、弱め界磁制御等を組み合わせて幅広い回転数範囲での運用が可能となる。本モータに、バルク超電導体の磁気遮蔽特性を用いることにより通常よりも高いリラクタンストルクを得られる可能性がある。本発表では界磁部分にバルク超電導体を用いたIPMSM について有限要素法を用いた電磁設計を行なった結果を報告する。

2. 超電導 IPMSM の基本仕様

Fig. 1 及び Table 1 に、本研究で提案するバルク超電導体(以下、バルク)をモータ界磁に用いた超電導 IPMSM の概念図を示す。本モータの特徴は通常のパルクを用いた一般的な超電導モータ [1]と比べて、着磁によるマグネットトルクだけでなく、磁気遮蔽効果によるリラクタンストルクの使用も考慮していることである。最終的には MW クラスの出力を目指す、今回は原理実験を行なうことを前提に、市販の小型 IPMSM (直径 115 mm、軸方向長 40 mm、1.5 mm 厚 PM 使用)の界磁をバルク超電導体に置き換えた場合について考える。定格回転速度は 1800 rpm とし、検討するバルク超電導体の厚さは 1.5、3.0、5.0 mm の 3 通りとする。また液体窒素冷却を考慮し、冷却温度は 77 K とする。

3. FEM 解析によるモータの電磁特性

FEM 解析ソフト JMAG-Designer を用いて上記 IPMSM の電磁特性の解析を行い、リラクタンストルクやモータ出力のパルク厚さ依存性等について考察した。Fig. 2、3、4 に 1.5 mm 厚さの PM 及びバルク超電導体を用いた場合のマグネットトルク、リラクタンストルク、モータ出力の比較結果を示す。すなわち電機子電流の電流位相を変化させることでピークが発生する。パルクの着磁磁束密度は 1.0、1.2、1.5、2.0 T の 4 通りを考えた。Fig. 3 に示すように、すべての着磁ケースにおいてリラクタンストルクが PM のケースを上回っていることが分かる。マグネットトルクでの優位性もあわせると、1.5 T 程度の着磁により出力が 20 %程度向上している。しかし 1.5 mm 厚さのパルクでは、機械的な強度等が問題となるため、最低でも倍以上の厚さが必要になってくると考えられる。また回転子部分の最適構造についても別途検討を行なっている[2]。

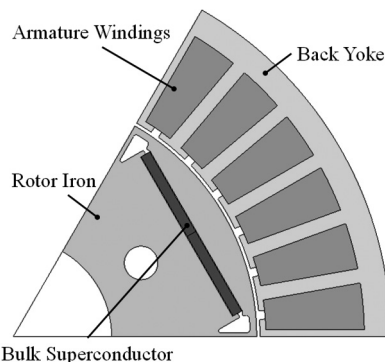


Fig. 1 Cross section of superconducting IPMSM

参考文献

1. Z. Huang, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 24, No. 3 (2014) #4602605
2. W. Akada, et al.: Presentation in 96th CSJ Conference, (2018) 2P-p16

Table 1. Motor specifications

Number of poles	6
Rotation speed	1800 rpm
Motor diameter	115 mm
Rotor diameter	74.2 mm
Effective length	40 mm
Thickness of bulk superconductors	1.5, 3.0, 5.0 mm
Operating temperature	77 K

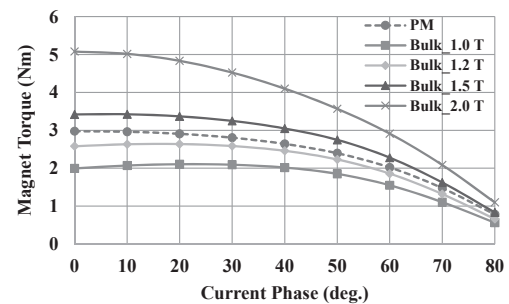


Fig. 2 Magnet torque as a function of current phase. PM and Bulk superconductor thickness is 1.5 mm

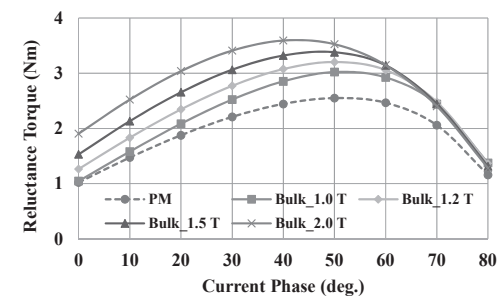


Fig. 3 Reluctance torque as a function of current phase. PM and Bulk superconductor thickness are 1.5 mm

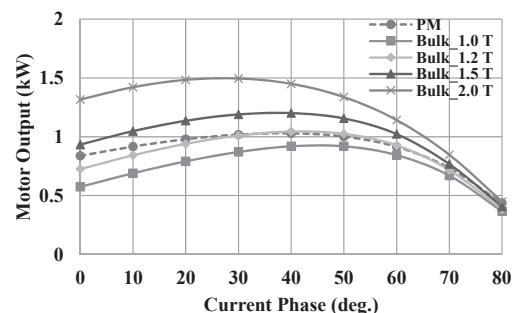


Fig. 4 Motor output as a function of current phase. PM and Bulk superconductor thickness are 1.5 mm

電気推進式航空旅客機に搭載する高出力密度全超電導モータの電磁特性 Electromagnetic Characteristics of High-output Density Fully Superconducting Motors for Electrical Aircraft Propulsion

寺尾 悠, 大崎 博之 (東大)

TERAO Yutaka and OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)

E-mail: y.terao@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

近年、電気推進式航空旅客機の実現に向けて世界中の企業・研究機関が研究開発を行なっている[1]。既に永久磁石モータ (PM モータ) 及びバッテリーを用いた一人乗り航空機の実証試験は複数の成功報告があり、最近では100人乗り以上の航空機への技術拡張が議論されている。その際に求められる電機推進用モータの出力密度は 16 kW/kg~20 kW/kg といわれており、PM モータの最高出力密度が 5.2 kW/kg であることを考えるとまだ技術障壁は高い。本発表では電気推進式航空旅客機に搭載する全超電導モータ (FSCM) に対して、有限要素法を用いた電磁設計を行い、バックヨーク重量削減に伴う出力密度向上と漏れ磁束のトレードオフ関係等の電磁特性について考察した結果について報告する。

2. 全超電導モータの特性

著者らは 2-6 MW 級の FSCM についてモータ出力が高い程高効率かつ高出力密度が得られることを示した[2]。よって本解析では 6 MW 級モータをベースにして出力密度向上のための考察を行なっていく。Table 1 に設計する全超電導モータ特性を示す。本モータは界磁コイルに YBCO 線材、電機子コイルに MgB₂ 線材を使用している。極数は 2 極で回転数は 5000 rpm である。モータ直径は 450 mm とし、バックヨーク厚さは 35 mm である。冷却温度は、液体水素の使用を前提として 20 K とした。本 FSCM をベースモデルとし、バックヨーク (BY) 厚さを 28 mm, 17.5 mm, 8.8 mm と薄くしていった場合の出力密度及びモータ周囲 20-100 mm の磁束密度を調べる。ただし、漏れ磁束におけるモータトルクの減少は、軸方向長を増加させることで補うこととする。またモータ重量として鉄、MgB₂、その他部分 (鉄重量+MgB₂ 重量の半分) を考慮するが、鉄重量 (BY 厚さ) が変化してもその他の重量は変化しないものとする。

3. 有限要素法による解析結果

Fig.2 に BY 厚さ別の FSCM 重量及びその際の FSCM の出力密度を示す。BY 厚さが初期設計の 50% (17.5 mm) 以下まで低減されれば出力密度 16 kW/kg 以上を達成可能であり、初期設計の 25% (8.8 mm) のケースでは 22.9 kW/kg を達成している。その一方で Fig.3 に示すように BY 厚さを低減するとモータ周囲への漏れ磁束が増大していく。ベースモデルの場合は FSCM 表面から 100 mm 離れた所で最大 20 mT 程度の漏れ磁界となるが、BY 厚さが 8.8 mm となった場合では 100 mm 離れた場所においても約 0.1 T と 5 倍近く増大していることが分かる。すなわち出力密度を上げたモータを使用する際には、モータ周辺への機器配置に配慮が必要である。

Table 1. FSCM Specifications

Motor output: P_M	6.0 MW
Number of poles: p	2
Rotation speed: N_{rot}	5000 rpm
Torque: T	11.5 MNm
Diameter: D	450 mm
Length: L	822 mm
Thickness of Back Yoke: t	35 mm
Operating temperature	20 K

4. まとめ

有限要素法解析によりFSCMの電磁設計を行い、バックヨーク厚さを低減した際の出力密度と漏れ磁束の関係について考察した。磁気シールドを低減することにより出力密度は向上するが、モータ周辺への漏れ磁界も増加する。よって推進系の設計においては、モータ以外の機器の配置等も十分に考慮して設計を行っていく必要がある。

謝辞

本研究の一部は、公益財団法人 永守財団の「研究助成 2017」を受けて行われたものである。

参考文献

1. C. E. Jones, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.26, No.6 (2016), pp. 1-9
2. Y. Terao, et al.: Presentation in IEEJ 2018 (2018) 5-186

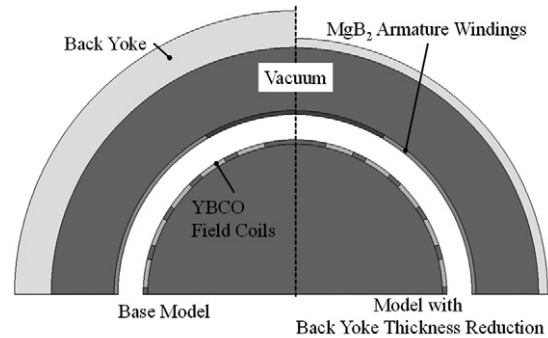


Fig.1 Conceptual diagram of the FSCM's back yoke thickness reduction

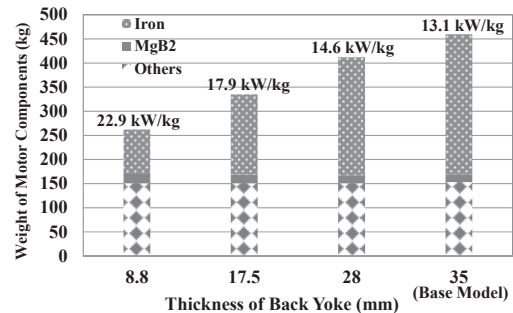


Fig.2 Weight of 6 MW class FSCM components with different back yoke thickness.

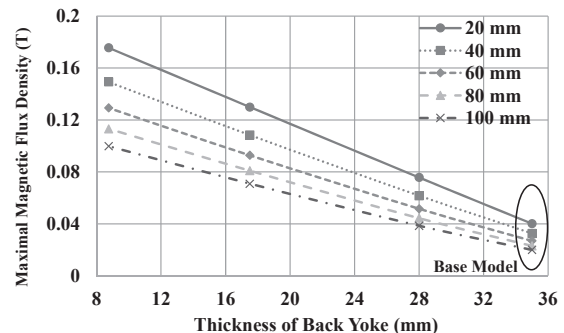


Fig.3 Maximal magnetic flux density around the FSCM as a function of back yoke thickness

輸送機器用高温超電導誘導同期モータの研究開発現状(1) ～20 kW 級プロトタイプ機の M-T 座標系を用いた過渡回転特性解析～ Research and Development Status of High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor for Transportation Equipment (1) – Analysis of Transient Rotating Characteristics of a 20 kW Class Prototype by Means of M-T Coordinate System-

池田 健一, 中村 武恒, 唐島 智治 (京大)

IKEDA Kenichi, NAKAMURA Taketsune, KARASHIMA Tomoharu (Kyoto Univ.)

E-mail: nakamura.taketsune.2a@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、輸送機器への実用を目指した高温超電導誘導同期モータ (High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM) 駆動システムの研究開発を実施している[1]。同システムでは、モータを可変速駆動するためのベクトル制御技術を確立する必要があるが、そのためには非線形電流輸送特性を有する超電導回転子の過渡回転特性を明らかにする必要がある。本講演では、磁束軸(M軸)–トルク軸(T軸)座標系(回転座標系)における特性解析を行い、過渡回転特性を明らかにしたので報告する。

2. 解析方法

Fig. 1には、検討対象である20 kW級HTS回転子の外観写真を示す[1]。HTS回転子巻線には、ビスマス系高温超電導線材を使用した。同回転子を銅固定子(3相, 4極)と組み合わせ、検討を行った。同機について、電圧方程式における回路パラメータを試験と電磁界解析に基づいて決定し、力学方程式と連成することによって過渡特性解析を行った。なお、HTSかご形巻線は非線形抵抗として表現し、磁気ヒステリシスに伴う自己インダクタンスの変化も考慮した。

3. 解析結果

Fig. 2には、一次電圧上昇時と下降時の履歴回転特性の結果を示す。同図に示すように、電圧上昇時は89 V付近で同期引き入れられているのに対し、下降時は50 V以下まで同期回転数を維持している。試験結果を解析的に再現すると、同図に示すようによく一致した。そこで、同解析結果をM-T軸変換すると、Fig. 3のようになった。同図から、電圧を上昇しても磁気遮蔽に伴う静止時はT軸電流が支配しており、同期引き入れの瞬間にM軸電流に切り替わることが分かった。本結果の物理的解釈など、詳細は講演当日に報告する。

謝辞

本研究は、(国研)科学技術振興機構(JST)のプロジェクト“H24 年度戦略的創造研究推進事業 先進的低炭素化技術開発(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」の一環として実施されたものである。

参考文献

1. T. Nakamura, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 25, no. 3 (2015.06) 5202304

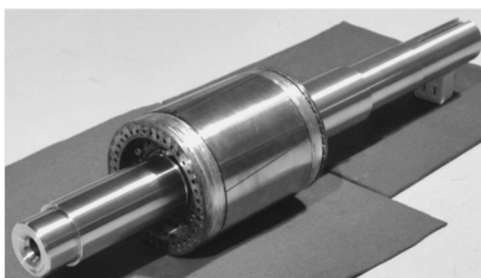


Fig. 1 Photograph of a 20 kW HTS-ISM

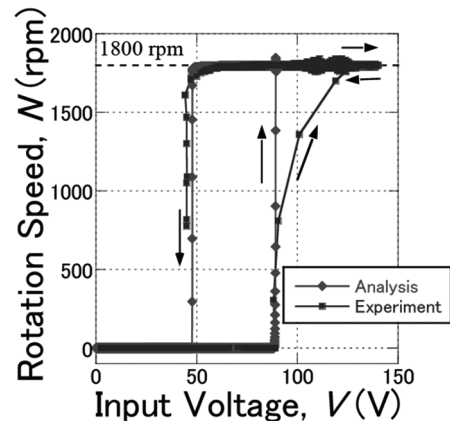
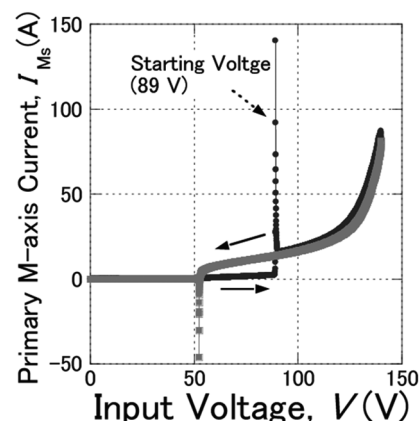
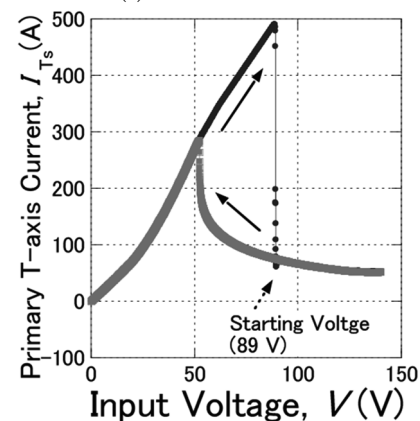


Fig. 2 A result of hysteretic rotating characteristic (77 K)



(a) M-axis current



(b) T-axis current

Fig. 3 Analysis results of hysteretic rotating characteristics of a 20 kW class HTS-ISM based on M-T axis

輸送機器用高温超電導誘導同期モータの研究開発現状(2) ～20 kW 級プロトタイプ機の熱等価回路による冷却特性評価～

Research and Development Status of High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor for Transportation Equipment (2)

- Cooling Characteristics of a 20 kW Class Prototype Based on Thermal Equivalent Circuit-

唐島 智治, 中村 武恒, 池田 健一 (京大); 大橋 義正 (アイシン精機)

KARASHIMA Tomoharu, NAKAMURA Taketsune, IKEDA Kenichi (Kyoto Univ.); OHASHI Yoshimasa (AISIN SEIKI)

E-mail: nakamura.taketsune.2a@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、輸送機器への実用を目指した高温超電導誘導同期モータ (High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM) 駆動システムの研究開発を実施している[1]。同システムでは、HTS-ISM が極低温冷却される必要があることから、特有の可変速駆動に対する温度変化を正確に評価するコードの開発が必須である。本講演では、上記解析を現実的解析時間で実現するため、熱等価回路を用いた解析コードを開発したので報告する。

2. 解析方法

Fig. 1には、検討対象である20 kW級プロトタイプ機の外観写真を示す[1]。HTS回転子巻線にはビスマス系高温超電導線材を使用しており、銅固定子(3相, 4極)と組み合わせている。同機について、Fig. 2のように3次元熱解析モデルを作成して、各部の温度特性を解析した。その際、固定子外周部には冷凍機による伝導冷却(冷凍出力: P_c)を仮定し、次式を用いた。

$$P_c = (2 \times 2.5) (T - 41) \text{ [W]} \quad (T: \text{温度}) \quad (1)$$

一方で、ギャップ部にはガス冷却による熱伝導[2]および熱対流[3]を仮定した。回転子シャフトおよび固定子コイルには、室温部からの熱侵入を与えた。さらに、Fig. 2のモデルに基づいて熱等価回路モデル(Fig. 3)を構築した。同図では、回転子周方向の対称性を利用して、径方向の熱等価回路をスロットの有無に対して並列回路として考えた。

3. 解析結果

Fig. 3には、スリーブ部とシャフト部における冷却特性の解析結果を示す。同図に示すように、熱等価回路の結果は3次元熱解析結果と一致しており、同方法の妥当性が示された。上記解析の詳細や、あるいは可変速駆動した場合の各量の温度変化など、詳細は講演当日に報告する。

謝辞

本研究は、(国研)科学技術振興機構(JST)のプロジェクト“H24 年度戦略的創造研究推進事業 先進的低炭素化技術開発 (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」の一環として実施されたものである。

参考文献

1. T. Nakamura, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 25, no. 3 (2015.06) 5202304
2. 橋 藤雄 他: 日本機械学会論文集 (1959)
3. 橋 藤雄 他: 日本機械学会論文集 (1963)

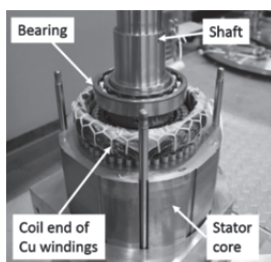


Fig. 1 Photograph of a 20 kW HTS-ISM [1]

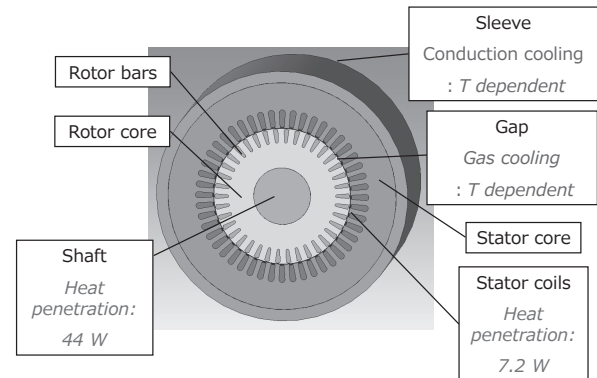


Fig. 2 3D thermal analysis model of a 20 kW class HTS-ISM

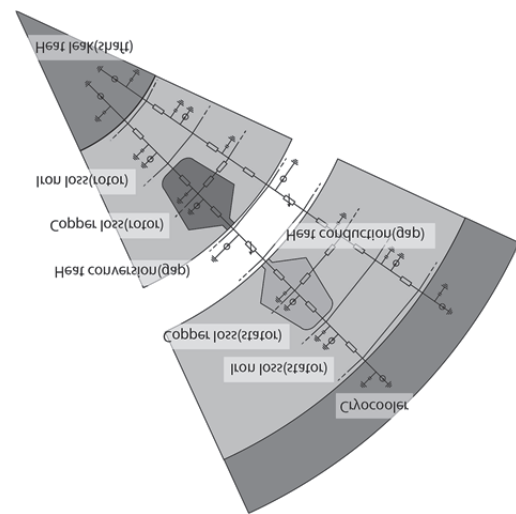


Fig. 3 Heat equivalent circuit of a 20 kW class HTS-ISM

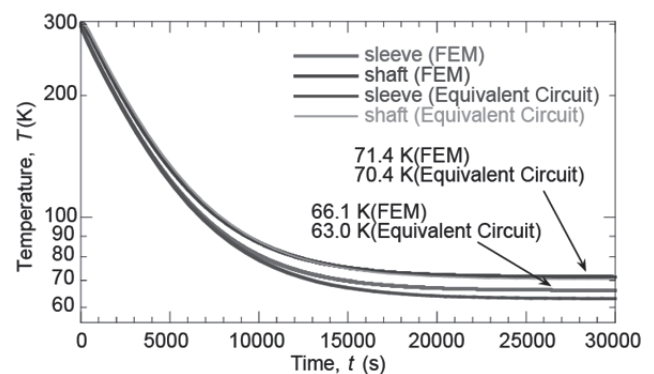


Fig. 4 Analysis results of cooling characteristics of a 20 kW HTS-ISM

輸送機器用高温超電導誘導同期モータの研究開発現状(3) ～磁束飽和と機械応力のトレードオフとしてのトルク密度限界～

Research and Development Status of High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor for Transportation Equipment (3) – Torque Density Limit from Viewpoint of Trade-off Relation between Magnetic Saturation and Mechanical Stress–

中村 武恒, 飛田 美和, 郭 思宇, 唐島 智治, 池田 健一 (京大)

NAKAMURA Taketsune, TOBITA Miwa, GUO Siyu, KARASHIMA Tomoharu, IKEDA Kenichi (Kyoto Univ.)

E-mail: nakamura.taketsune.2a@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、電車、バス、トラック他への応用を目指した高温超電導誘導同期モータの研究開発を実施している[1]。輸送機器用モータに求められる重要な性能の一つは、その高出力密度化あるいは高トルク密度化であり、特に直接駆動システムを指向する際は後者が重要になる。これまで、20 kW級プロトタイプ機について、定格同期出力の2倍を超える高トルク密度化を実験に基づいて明らかにし、さらに同5倍を超えるすべりトルクの実現可能性を解析的に示している[2]。本講演では、究極の高トルク密度化を目指して、当該限界値を磁束飽和と機械応力の観点から解析的に検討した報告する。

2. 解析方法

Fig. 1には、検討対象である20 kW級HTS回転子の外観写真を示す[1]。HTS回転子巻線にはBi系高温超電導線材を使用しており、銅固定子(3相、4極)と組み合わせている。上記プロトタイプ機の特徴を基準として、回転機の体格を相似形に変化させ、2次元電磁界解析と構造解析に基づいてトルク密度を検討した。Fig. 2には、電磁界/構造解析モデルを示す。

3. 解析結果

Fig. 3には、von Mises応力による構造解析結果の一例を示す。同図に示すように、HTS-ISMの応力は超電導ご形巻線が収められている鉄心歯頭部付近に集中していることが分かる。さらにFig. 4には、20 kWプロトタイプ機(Original model)を基準として、その0.8倍、0.5倍、および0.4倍体格モデルにおける規格化磁束密度(飽和値で規格化した磁束密度) B_n と規格化応力(降伏値で規格化した応力) σ_n について、電磁界解析と構造解析から得られた結果を示す。同図から、HTS-ISMを小形化することによって、その限界値を支配する制約が磁束飽和から応力限界に移行していることが分かる。詳細な議論については、講演当日に報告する。

謝辞

本研究は、(国研)科学技術振興機構(JST)のプロジェクト“H24 年度戦略的創造研究推進事業 先進的低炭素化技術開発(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」の一環として実施されたものである。

参考文献

1. T. Nakamura, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 25, no. 3 (2015.06) 5202304
2. T. Nakamura, et al.: SPEEDAM 2018, Amalfi, Italy, June 20-22 (2018) to be presented

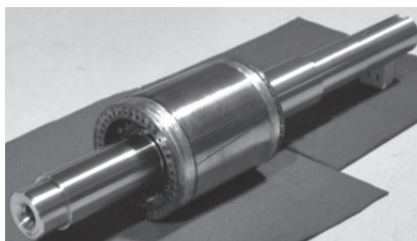


Fig. 1 Photograph of a 20 kW HTS-ISM [1]

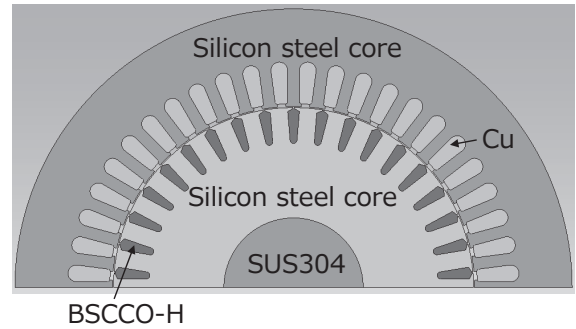


Fig. 2 Cross sectional diagram of electromagnetic/structural analysis model

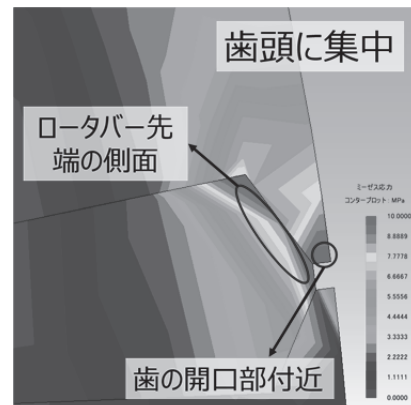


Fig. 3 An analysis result of von Mises stress contour for a 20 kW class HTS-ISM

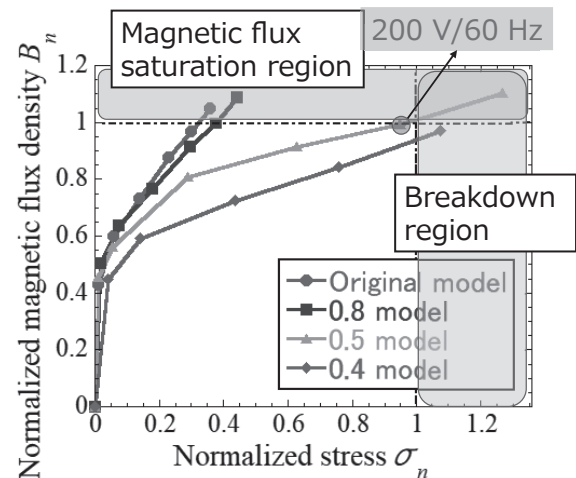


Fig. 4 Analysis results of relationship between normalized magnetic flux density vs. normalized stress