研究論文

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

中村 武恒^{*1,†}, 志村 拓俊^{*1}, 雨宮 尚之^{*1}

Analytical Study on the Operating Temperature Characteristics of High-temperature Superconducting Induction/Synchronous Motors

Taketsune NAKAMURA^{*1,†}, Hirotoishi SHIMURA^{*1} and Naoyuki AMEMIYA^{*1}

Synopsis: This paper presents an analytical study on the temperature dependency of rotating characteristics in high-temperature superconducting induction/synchronous motors based upon the application of a nonlinear electrical equivalent circuit. The nonlinear current transport property of a superconducting BSCCO rotor bar is firstly characterized for different temperatures, and then introduced to the equivalent circuit. The cooling efficiency of a cryocooler is also considered for calculating motor performance. It is shown that the subject motor shows high efficiency for variable rotation speed and torque even when considering cryocooler consumption power.

Keywords: hts-ism, temperature dependency, equivalent circuit, efficiency contour

(Some figures in this article may appear in colour only in the electronic version)

1. はじめに

近年、酸化物系高温超電導長尺線材の研究開発は大きく進展し、ビスマス系や希土類系線材について市販される状況にある。また、上記線材を利用した様々な大型機器研究開発が精力的に進められており、未だ線材長手方向の特性ばらつきをうまくコントロールした設計が必要であるものの¹⁾、既存機に対する優位性や新規機能の可能性が見出されつつあるように思われる。特に、超電導モータは最も重要な機器応用分野の一つと考えられ、船舶用モータ²⁻⁵⁾をはじめとして、バス・乗用車他陸上輸送機器駆動モータ^{6,7)}、液体水素移送ポンプ⁸⁾など多様な研究開発が展開されている。

一般に、モータ応用には巻線型同期機が対象とされており、界磁巻線 and/or 電機子巻線に超電導線材を適用する研究が行われている。一方で、我々は上記回転機として高温超電導誘導同期モータ (High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM) の研究開発を行っている⁹⁾。同機は、かご形誘導機の単純な構造を有しているながらも、2次巻線を超電導化するだけで、同期回転可能

などの特筆すべき高性能性を有している。

一般に、回転機の電気・機械エネルギー変換はそのギャップにおいて実現され、当該空間における磁束分布を如何に正弦波に近づけるかが重要である。しかしながら、高温超電導回転機では、電気装荷や磁気装荷を担う高温超電導線材特有の非線形電流輸送特性や高アスペクト比線材構造、機械的特性などの制約の中で回転機を設計する必要がある。例えば、ある程度形状が決まった高温超電導コイルを幾何学的制約として回転機を構造設計することから、それに伴って回転特性も多少の影響を受けることになる。上記条件のもとでは、必然的に空間磁束分布が理想状態から崩れる傾向にあり、それをどこまで設計で補償するか、あるいは複雑な温度・経路磁界ベクトル依存性を有する超電導特性の力技で抑え込めるかなど、超電導回転機特有の設計上の課題を克服していく必要がある。

上記課題の一つとして、超電導回転機の運転温度の問題が挙げられる。一般に良く知られているように、臨界電流に代表される超電導特性は温度が低下するほど向上し、一方で極低温冷却効率は温度が上昇するほど向上する。従って、冷却効率を考慮した超電導モータ特性を定量的に検討しておくことは、最適駆動温度の決定に際して極めて重要である。上記に関連した既報告としては、非超電導状態における運転を想定したモータ特性の温度依存性の検討がある⁹⁾。しかしながら、当該報告は主として冷凍機故障時のフェールセーフとしての特性検討に留まっており、また

Received February 29, 2016

^{*1} 京都大学大学院工学研究科

〒615-8510 京都府京都市西京区京都大学桂1番地

1 Kyoto-daigaku-katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8510, Japan

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

DOI: 10.2221/jesj.51.178

Fig. 1 Electrical equivalent circuit of HTS-ISM.⁹⁾

Table 1 Definition of circuit parameters⁹⁾

Symbol	Definition
V_1	Primary voltage
V_2'	Primary converted secondary excitation voltage
I_1	Primary current
I_2'	Primary converted secondary current
r_1	Primary resistance
R_n	Primary converted secondary normal resistance
R_{sc}	Primary converted secondary superconductive resistance
l_1	Primary leakage inductance
l_2'	Primary converted secondary leakage inductance
M	Exciting inductance
g_0	Exciting conductance
Φ_2'	Primary converted secondary linkage magnetic flux
F_2'	Primary converted secondary voltage
ω	Electrical angular frequency
s	slip
p	Number of poles
N	Number of coil turns

冷凍機消費電力も含めたシステム効率の検討には至っていない。

そこで本稿では、高温超電導誘導同期モータを対象として、高温超電導線材における電流輸送特性の温度特性を非線形抵抗として考慮した等価回路解析コードを利用し、冷凍機効率も考慮した特性を定量的に解析した。特に、効率マップに着目し、その既存機に対する比較検討を実施したので報告する。

2. 非線形等価回路解析による特性評価方法

交流回転機の定常特性は、多相平衡状態における実効値を考え、一相分離したフェーズ等価回路で議論できる。また、可変速特性を議論する際には、フェーズを拡張した空間ベクトル¹⁰⁾他の瞬時ベクトルを導入し、三相一括の検討が有効である。本論文では、定常特性に絞って検討することにし、可変速特性については別途報告している^{11,12)}。なお、上記等価回路解析は電磁界解析を近似する方法ではあるが、積極的に使用すべき解析方法であることを強調す

Fig. 2 Photograph of HTS-ISM prototype.^{6,9)}

Fig. 3 Two-dimensional electromagnetic field analysis model of 20 kW-class HTS-ISM prototype.⁹⁾

る。即ち、回転機における電気・機械エネルギー変換の際に主役である空間磁束は、その詳細な分布が電磁界解析によって明確になるが、一方で電気入力相数は電線からのみ可能である。その場合、回転機の特長は等価回路的に検討されるわけであり、空間磁束分布だけでは何も議論できない。従って、電磁界解析と等価回路解析は、電気機器の特性解析に際して相補的であるべきである。

Fig. 1には解析のための等価回路を、また Table 1には等価回路パラメータの定義をそれぞれ示した⁹⁾。回転機の特長評価に際して、鉄損の定量的表現が重要である。Fig. 1では、鉄損の内ヒステリシス損と渦電流損を分離して表現した。まず、ヒステリシス損失 P_h には、次式 (Steinmetz の式) を用いた。

$$P_h = k_h f B_m^{1.6} \quad (1)$$

また、渦電流損としては次式を用いた。

$$P_e = k_e f^2 B_m^2 \quad (2)$$

ここで、 k_h ならびに k_e はそれぞれの損失を与える比例係数であり、 f は周波数である。また、 B_m は最大磁束密度であり、 k_b を比例係数、 V_m を入力電圧最大値、 A を鉄心等価断面積とすると、次式で与えられる。

$$B_m = k_b \frac{V_m}{fA} \quad (3)$$

さらに、超電導かご型巻線の非線形電流輸送特性としては、 $F(I_2')$ として表現し、この詳細な式は次節に詳述する。

Table 2 Electrical equivalent circuit parameters obtained by two-dimensional electromagnetic field analysis (Fig. 3)

Frequency (Hz)	30	60	90	120
r_1 (Ω)	0.05	0.05	0.05	0.05
l_1 (mH)	1.062	1.034	1.010	0.998
l_2' (mH)	1.062	1.034	1.010	0.998
M' (mH)	11.48	10.89	10.63	10.48
g_e (mS)	1.461	1.435	1.435	1.403
k_h	0.1367	0.1501	0.1896	0.2418

(a) Electric field (E) vs. current density (J) curve at 77 K

(b) Resistivity (ρ) vs. temperature (T) curve

Fig. 4 Current transport property of one HTS rotor bar.⁹⁾

3. 対象機の諸元と等価回路解析

対象機は、3 相 8 極、6/9 短節集中巻の銅固定子巻線を有しており、かご形回転子巻線には BSCCO 線材を使用している。運転温度 77 K において最大同期出力 20 kW@1800 rpm を有する。同機の外観写真を Fig. 2 に示す。本機は、液体窒素で冷却されており、上部には液体窒素タンクを備えている。

Fig. 5 Torque (τ) vs. secondary current (I_2') curves for 70 K and 77 K.

3.1 等価回路定数の決定

まず、等価回路パラメータ (Fig. 1) を決定した。(株)JSOL の有限要素法解析ソフト JMAG-Designer[®]を用いて解析モデル (Fig. 3) を作成し、短絡試験ならびに無負荷試験を解析的に実施し、等価回路パラメータを決定した。なお、我々のモータは磁気回路を形成するために積極的に強磁性体を利用している。従って、同材料の非線形磁界強度-磁束密度特性を考慮して解析しており、等価回路パラメータが入力電圧や駆動周波数によって変化する。そこで、電圧/周波数=一定の条件にて、異なる周波数に対する解析を実施し、起磁力によって変化する等価回路パラメータを表現した。Table 2 には、得られたパラメータ値を示す。これら値を適当な多項式で近似して、モータの特性解析を実施した。

また、1 本の HTS ロータバーについて通電特性評価を行った。Fig. 4 には、それぞれ (a) 温度 77 K における通電特性と (b) 抵抗率 (ρ)-温度 (T) 特性を示す⁹⁾。Fig. 4(a) は、Weibull 関数を近似した次式によってフィッティングした¹³⁾。

$$E(J) = \begin{cases} 0, & J < J_{cm} \\ \rho_{ff} J_0 \left(\frac{J - J_{cm}}{J_0} \right)^m, & J \geq J_{cm} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 ρ_{ff} は一様磁束フロー抵抗率であり、 J_{cm} および J_0 はそれぞれ局所的臨界電流密度分布の最小値と分布幅に相当する値である。同図の実線にフィッティング結果を示すが、実験結果をうまく再現できている。また、Fig. 4(b) から不可逆温度 T_{irr} は 105 K であった。さらに、 J_{cm} の温度依存性として次式を仮定した。

$$J_{cm} = J_{cm0} \left(1 - \frac{T}{T_{irr}} \right) \quad (5)$$

J_{cm0} は温度 0 K における J_{cm} であり、 3×10^8 Am² であっ

(a) 70 K

(b) 78 K

(c) 90 K

Fig. 6 Analysis results of efficiency contours for HTS-ISM with a Cu stator.

た。本解析では、ロータバーの電流通電特性について、Fig. 4(a)の超電導特性と Fig. 4(b)の常電導特性の並列回路を考え、その長手方向に垂直な面を等電位面と仮定して電流分流の影響を考慮した。

3.2 等価回路解析の定量性の検討

等価回路解析法の定量性を検証するために、実機試験結果との比較検討を行った。Fig. 5 には、温度 70 K ならびに 77 K における負荷試験結果の一例を示す。なお、横軸は 1 次側換算の 2 次電流値をプロットしており、同電流によって超電導かご形巻線の実際の電流値を議論することができる。同図から明らかなように、解析結果は試験結果を定量的に記述できている。

4. 50 kW 級高温超電導機の効率マップの検討

4.1 解析条件

本解析では、最大出力 50 kW 級機を想定した。モータの最大トルク値は、低速駆動時は定トルクモードで制約され、一方高速では定出力モードで制約される。そして、上記駆動モードが切り替わる出力を最大出力としており、本検討では 1600 Nm@300 rpm とした。解析に際して、下記目標値を設定した。

(目標値)

最大トルク：1600 Nm；回転数< 300 rpm

最大出力(50000 W)/回転数；回転数>300 rpm

最高回転数：1800 rpm

最低運転温度：70 K

最高運転温度：100 K

また、制約条件および変数としては下記を設定した。

(制約条件)

線間実効電圧最大値：400 V

線間実効電圧/駆動周波数比：200 V/60 Hz

一相当たりの銅損：500 W

(変数)

温度： T

駆動周波数： f

二次電流： I_2

線間電圧： V

各回転数とトルクにおいて、上記条件下で解析を実行し、最大効率を求めた。

4.2 銅固定子を適用した場合のモータ単独効率

まず、銅固定子を適用した場合について、モータ単独の回転特性を解析した。Fig. 6 には、得られた効率マップを示す。同図に示すように、高回転領域では比較的高い効率が得られているものの、600 rpm 以下では低下している。また、一次銅損の制約から、駆動温度 70 K においてさえも、最大トルクが 740 Nm 程度以下に留まっている。このことは、可変速に対する高効率化のためだけでなく、高トルク密度化の観点からも固定子超電導化の必要性を示唆していることになる。

4.3 超電導固定子を適用した場合のモータ単独効率

そこで、固定子巻線も超電導化した全超電導モータについて、その特性を解析した。その際、HTS 固定子巻線の交

(a) 70 K

(a) Maximum total efficiency

(b) 78 K

(b) Operating temperature

(c) 90 K

(c) Total loss

Fig. 7 Analysis results of efficiency contours for HTS-ISM with a HTS stator.

流損失について、それを非線形抵抗 ζ で表現する必要がある。本研究では、我々の温度 77 K における測定結果に基づき、次の評価式を仮定した¹⁴⁾。

$$\zeta = 0.25 \mu\Omega/\text{AHz} \quad (6)$$

なおこの値は、鉄心内におけるビスマス系高温超電導固定

Fig. 8 Analysis results of optimum operational conditions for a fully superconducting HTS-ISM considering the COP of a cryocooler.

子巻線について、周波数範囲 20 Hz~100 Hz、通電電流範囲 0~12 A の交流損失実測値 (78 K) から得られたものである。従って、本解析における電流 (最大 200 A 程度) や温度変化を議論する際にある程度の誤差を伴うため、今後より正確な評価が必要である。

Fig. 7 には、得られた効率マップを示す。同図から明ら

かなように、Fig. 6 に比較して広範なトルクと回転数領域において高効率を実現できている。特に、温度 70 K の特性を比較すると明らかであるが、銅固定子に比較して大きく特性向上している結果は、ゼロ発進や運転・停止を繰り返す輸送機器において大きな効率改善効果になる。さらに、全超電導モータの場合では、温度によらず 1600 Nm の高トルクが実現できているが、駆動温度が上昇するにつれて、固定子銅損増大に伴って高トルク時の効率が低下している。

4.4 冷凍機 COP を考慮した駆動システム効率

最後に、4.3 節の結果をもとに、冷凍機 COP も考慮した最高効率マップを検討した。想定する冷凍機の性能としては、温度 80 K において（冷凍能力、COP）=（200 W, 0.1）とし、最低到達温度 22 K まで共に線形に低下すると仮定した。解析に際しては、4.1 節の解析条件にさらに上記冷凍機消費電力を損失としてカウントし、各トルクならびに回転数における最高効率と最適駆動温度を解析した。

Fig. 8 には、得られた解析結果を示す。まず、Fig. 8(a)には最高効率を示すが、トルク 500 Nm 程度以下、回転数 1000 rpm 以下の領域（軽負荷・低速走行モード）では、90%近い高効率が実現されている。また、広い駆動範囲にて 85%以上の効率が得られている。一方、最適駆動温度（Fig. 8(b)）については、ごく低トルク領域では 100 K 程度の駆動温度も有り得るが、特に高トルク・高出力領域では低温ほど効率が改善され、上記した軽負荷・低速走行モードでは、75 K～80 K で運転する方が良い結果となっている。Fig. 8(c)には、全損失（銅損＋鉄損）の解析結果を示す。同図に示すように、殆どの駆動領域において 200 W 以下に抑えられており、本解析で想定している冷凍機の冷凍能力で抜熱可能である。しかしながら、定トルクモードにおける最大出力付近では 1 kW を超えてしまっており、抜熱できない。このことに関しては、我々の別プロジェクトにおいて比熱利用型冷却構造を提案しており、つまり上記最大出力は短時間しか継続しないことから、系の熱容量にて吸収する構造を検討している。本検討については、稿を改めて報告する予定である。

5. まとめ

本稿では、輸送機器用途を想定した 50 kW 級高温超電導誘導同期モータを対象として、超電導線材特性の温度依存性や冷凍機性能も考慮した回転特性の解析を実施した。一般的等価回路を適用して、鉄材ならびに超電導線材の非線形特性を考慮した解析を実施し、駆動条件に応じた最大効率条件（起磁力、駆動温度）を明確化した。今後は、上記解析を実験的に検証していく予定である。また、さらなる定量評価のためには、超電導固定子巻線における交流損失の正確な評価も重要な研究課題となる。

検討対象とした HTS モータは、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の援助を受けて試作されたものである。また、本稿の議論の一部について、国立研究開発法人 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 先端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」の知見を使用した。本研究は、科学研究費補助金（基盤研究（B））、研究課題番号：26289076）の助成を受けて実施された。

参 考 文 献

- 1) T. Nakamura, et al.: “Longitudinal inhomogeneity of DC current transport properties in Gd-system HTS tapes – statistical approach for system design –,” TEION KOGAKU **48** (2013) 178-186 (in Japanese; also translated in CRYOGENICS through normal review process)
中村武恒ら：「Gd 系高温超電導テープ材における長手方向の不均一直流通電特性—システム設計のための統計学的検討—」, 低温工学 **48** (2013) 178-186（再度、通常の査読を経て CRYOGENICS に英訳）
- 2) B. Gamble, et al.: “Full power test of a 36.5 MW HTS propulsion motor,” IEEE Trans. Appl. Supercond. **21** (2011) 1083-1088
- 3) M. Frank, et al.: “Long-term operational experience with first Siemens 400 kW HTS machine in diverse configurations,” IEEE Trans. Appl. Supercond. **13** (2003) 2120 - 2123
- 4) J.H. Kim, et al.: “Conceptual design of a field coil for 5 MW HTS synchronous machine,” J. Supercond. Nov. Magnet. **26** (2013) 1247-1251
- 5) T. Yanamoto, et al.: “Electric propulsion motor development for commercial ships in Japan,” Proc. IEEE **103** (2015) 2333-2343
- 6) T. Nakamura, et al.: “Tremendous enhancement of torque density in HTS induction/synchronous machine for transportation equipments,” IEEE Trans. Appl. Supercond. **25** (2015) 5202304
- 7) H. Oyama, et al.: “Development of superconducting motor for electric bus,” Abstracts of CSSJ Conference **90** (2014) 69 (in Japanese)
尾山仁ら：「車載超電導モータの開発」, 第 90 回 2014 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 **90** (2014) 69
- 8) K. Kajikawa, et al.: “Development of a liquid hydrogen transfer pump system with MgB₂ wires,” Cryogenics **52** (2012) 615-619
- 9) H. Shimura, et al.: “Calculated characteristics of HTS induction/synchronous machine below and above its critical temperature,” IEEE Trans. Appl. Supercond. **23** (2013) 5201705
- 10) 金 東海：「現代電気機器理論」, 電気学会 (2010)
- 11) K. Kitano, et al.: “Controllability of HTS induction/synchronous machine for variable speed control,” IEEE Trans. Appl. Supercond. **23** (2013) 5202505
- 12) K. Muranaka, et al.: “Experimental and analytical studies on variable speed control of high temperature superconducting induction/synchronous motor,” IEEE Trans. Appl. Supercond. **26** (2016) 5201205
- 13) T. Kiss, et al.: “Critical current distribution and flux creep properties in Y₁Ba₂Cu₃O_{7-δ} superconducting thin films,” Advances in Superconductivity VII, Springer-Verlag, Tokyo (1995) 555-558
- 14) 三澤慎太郎：「高温超伝導誘導同期機の高超伝導化に向けた固定子巻線に関する基礎研究」, 京都大学修士論文 (2013)

中 村 武 恒 1969 年生。1993 年九州大学工学部電子工学科卒業。1998 年同大学院システム情報科学研究科博士後期課程（電気電子システム工学専攻）修了。同年京都大学大学院工学研究科勤務。現在准教授。主に、超電導回転機ならびに同マグネット、分散電源、産業・車載モータの研究に従事。低温工学・超電導学会、電気学会、IEEE、応用物理学会、未踏科学技術協会（超伝導科学技術研究会）会員。Superconductor Science and Technology 誌 Executive Board Member, 電気学会「超電導回転機の現状と将来動向 調査専門委員会」委員長, 他。博士(工学)。

志 村 拓 俊 2012 年京都大学工学部電気電子工学科卒業。2014 年同大学院工学研究科修士課程（電気工学専攻）修了。在学中は、超電導誘導同期モータの研究に従事。

雨 宮 尚 之 1962 年生。1990 年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年横浜国立大学勤務。2005 年同大学大学院工学研究院教授。2008 年京都大学大学院工学研究科教授。主として、超伝導体の電磁現象、超伝導マグネットの基盤技術の研究に従事。低温工学・超電導学会、電気学会、プラズマ・核融合学会、日本物理学会会員。工学博士。