

Characteristic study and loss reduction strategy of HTS stators for practical realization of fully superconducting HTS motors

李全, 三澤慎太郎, 中村武恒, 北野紘生, 雨宮尚之 (京都大学); 伊藤佳孝, 吉川雅章, 寺澤俊久 (イムラ材研); 奥村暢郎 (アイシン精機)

LI Quan, MISAWA Shintaro, NAKAMURA Taketsune, KITANO Hiroki, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University); ITOH Yoshitaka, YOSHIKAWA Masaaki, TERAZAWA Toshihisa (IMRA MATERIAL); OKUMURA Nobuo (AISIN SEIKI)
E-mail: quan@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. Introduction

High temperature superconducting induction/synchronous motor (HTS-ISM) characterized by both high torque density and high efficiency is one of the keys to realize next-generation environmental-friendly automobiles. This paper presents the up-to-date outcomes of characteristic study and loss reduction strategy of the HTS stator with 3-phase superconducting windings to develop fully superconducting motors.

2. Characteristic study and loss reduction

The HTS-ISM is capable of providing a torque density more than at least ten times as big as that of ordinary induction motors [1]. Such high torque density implies the conventional transmission gears (essential for the existing driving system of automobiles) are no longer necessary. This results in not only weight saving of automobile bodies, but also a remarkable efficiency improvement. So far, the HTS rotor of the HTS-ISM has been well studied. To enhance the torque density further and improve efficiency, it is necessary to study the HTS stator.

The HTS stator was designed to be 265/160 mm in outer/inner diameter, with a core length of 206 mm. Each phase contains 8 coils wound with DI-BSCCO tapes (2.8 mm wide and 0.36 mm thick). A control method for variable-speed driving of the HTS-ISM was developed by controlling the HTS stator to work in both small loss (AC loss) state and dissipative flux-flow state, for long duration continuous driving and short term starting/accelerating respectively.

The superconducting properties were studied by measuring the 3-phase HTS windings, as shown in Fig. 1. The stator was placed into a hollow cylinder tank with one adiabatic vacuum layer, fulfilled with liquid nitrogen during measurement. Each phase winding was measured individually by increasing DC current. The small loss (AC loss) state is defined as the state when electric field is smaller than 10^{-6} V/m and the flux-flow state is from 10^{-6} V/m to 10^{-4} V/m. Experimental results are presented in Fig. 2 left, with I_{c1} equal to 21.5 A and I_{c2} 30.7 A. The results prove that all three phases have almost the same superconducting properties and they are very well balanced.

Then, in order to investigate the practical working status of the HTS stator, the 3-phase winding were measured simultaneously with an input of balanced 3-phase AC voltage. Surprisingly, unbalanced 3-phase AC losses were observed as shown in Fig. 2 right, under the input of 60 Hz and 100 Hz. This is because of the nonlinear resistance of the HTS stator. Though the 3-phase voltage input is balanced, nonlinear resistance causes unbalanced current flowing through and consequently unbalanced losses.

Some possible approaches to reduce AC loss are improving winding method to reduce mirror effect and adopting high I_c HTS tapes to reduce load factor. By applying this strategy, high torque up to 1600 Nm with high efficiency can be realized with 150A I_c and 100 A load in Fig. 3. For continuous driving, AC loss can be reduced down to less than 200 W as Fig. 4.

3. Conclusion

Voltage control might not be suitable for the HTS-ISM, because of unbalanced AC losses. One practical solution is to apply current control. By applying the loss reduction strategy, both high torque and high efficiency can be ensured.

Acknowledgement

This work has been supported by Japan Science and Technology Agency (JST).

References

1. T. Nakamura: *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 24, No.1 (2011), 015014 (6pp)

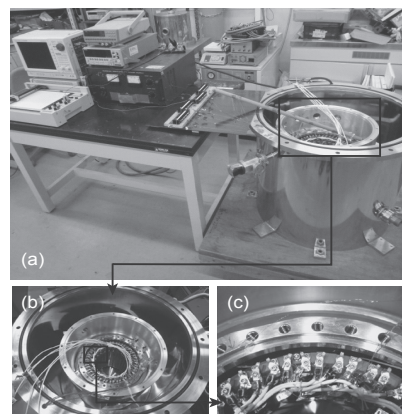


Fig. 1 Experiment setup.

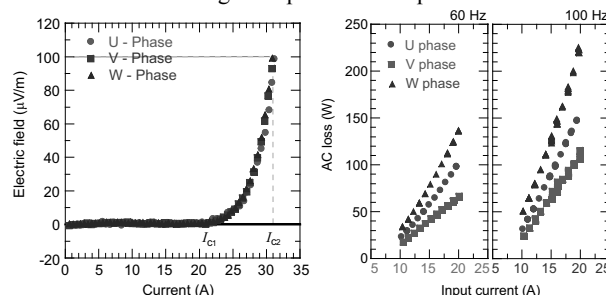


Fig. 2 Current transport properties and unbalanced AC loss.

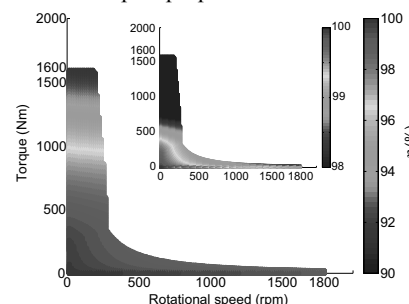


Fig. 3 Efficiency contour after AC loss reduction.

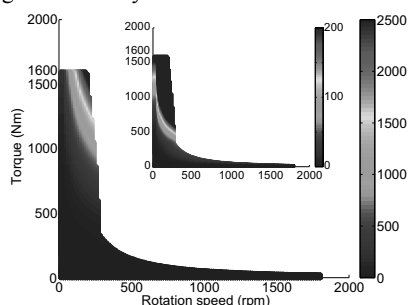


Fig. 4 Contour of reduced AC loss.

輸送機器用高温超電導誘導同期回転機の自律安定制御性の概念を 取り入れた可変速制御法に関する解析的検討

Characteristics Evaluation of HTS Induction/Synchronous Machine for Variable Speed Control

北野 紘生, 中村 武恒, 雨宮 尚之(京都大学); 伊藤 佳孝(イムラ材研); 奥村 暢朗(アイシン精機)
KITANO Hiroki, NAKAMURA Taketsune, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University); ITOH Yoshitaka (IMRA MATERIAL);
OKUMURA Nobuo (AISIN SEIKI)
E-mail: tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. まえがき

我々は、輸送機器応用を目指した高温超電導誘導/同期回転機 (High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM) の研究開発を実施している[1]。本回転機は、かご形誘導機の2次巻線を超電導化することにより、同期回転に伴う高効率化や高トルク密度化など、既存(常電導)回転機を凌駕する新機能を実現することができる。さらに、HTS 回転子巻線の起磁力依存非線形抵抗を利用することにより、回転安定性が保証されることを理論解析・実験により明確化した[2][3]。

本報告では、上記概念を導入した HTS-ISM の最大効率制御法について、前回[4]に引き続きさらに詳細な検討を実施したので報告する。

2. 解析方法

対象とした20 kW級HTS-ISMの外観写真を図1に示す。本機は、回転子側かご形巻線にDI-BSCCO[®]線材を適用しており、また固定子に3相8極の6/9短節銅巻線を有している。上記回転子の電磁界解析モデルを作成し、仮想無負荷試験ならびに拘束試験を実施するとともに、等価回路定数を決定した。次に、MATLAB/Simulink[®]を用いて等価回路解析を行った。その際、かご形誘導機の電圧方程式ならびに力学方程式を適用してHTS-ISMの解析コードを開発した。2次側HTS巻線の起磁力依存非線形抵抗の計算にはべき乗式(所謂n値モデル; $n=16.2$)を利用し、また同時に銀シース材への電流分流の影響も考慮した。さらに、実際のかご形巻線においては、ロータバーとエンドリングのハンダ接続抵抗が存在することから、その抵抗も考慮した。

3. 結果と検討

図2には、鉄損の影響の小さい軽負荷・低速回転領域における最大効率制御特性の解析結果を示す(簡単のため、鉄損の影響は無視している)。同図から明らかなように、要求負荷によらず高い効率が実現されている。また、図3には速度追従性示すが、指令後1 s程度で追従している。なお、トルク応答改善に伴う上記速度追従性のさらなる改善結果他、詳細は講演当日に報告する。

謝辞

本研究は、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) の一環として実施された。

参考文献

1. T. Nakamura: J. Cryo. Soc. Jpn, Vol. 47, No. 6 (2012) pp. 384-391
2. T. Nakamura, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 84 (2011) p. 95
3. H. Kitano, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p. 40

4. H. Kitano, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 86 (2012) p. 200

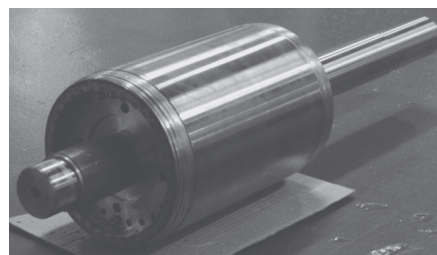


Fig. 1 Photograph of fabricated HTS rotor

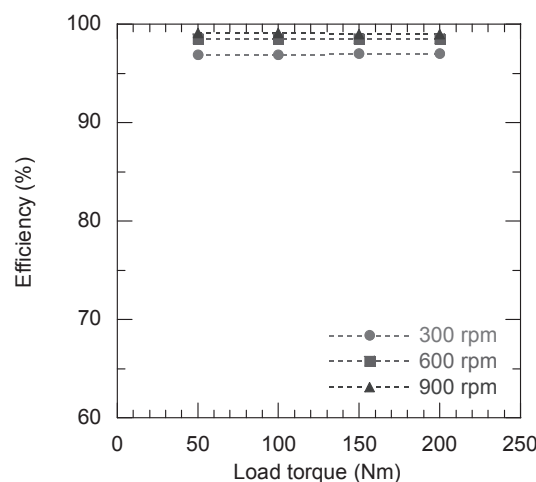


Fig. 2 Analysis results of load torque dependence of efficiency for different rotating speed

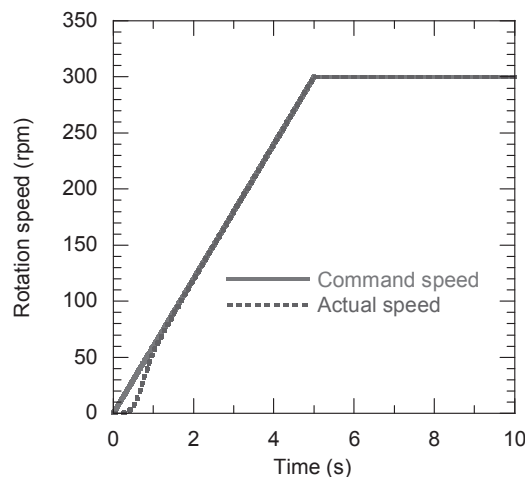


Fig. 3 Analysis result of rotating speed controllability based on maximum efficiency control method

20 kW 級高温超電導誘導同期回転機の超電導ならびに非超電導状態 における回転特性と冷却特性

Rotating and Cooling Characteristics of 20 kW Class HTS Induction/Synchronous Machine Operated at Superconducting as well as Non-Superconducting State

中村 武恒, 西村 立男, 志村 拓俊, 李 全, 小笠 卓郎, 雨宮 尚之(京都大学); 伊藤 佳孝, 吉川 雅章,
寺澤 俊久(イムラ材研); 奥村 暢朗 (アイシン精機)

NAKAMURA Taketsune, NISHIMURA Tatsuo, SHIMURA Hirotooshi, LI Quan, OGASA Takuro, AMEMIYA Naoyuki
(Kyoto University); ITOH Yoshitaka, YOSHIKAWA Masaaki, TERAZAWA Toshihisa (IMRA MATERIAL)
; OKUMURA Nobuo (AISIN SEIKI)
E-mail: tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. まえがき

我々は、電気駆動式自動車などの輸送機器応用を目指した高温超電導誘導/同期回転機(High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM)の研究開発を実施している[1]。これまで、20 kW 級プロトタイプ機を開発し、その基礎特性について各種検討を実施してきた[2]。また、ハイブリッド 2 重かご形巻線構造を提案し、非超電導状態における駆動可能性を示した[3]。

本報告では、20 kW 級プロトタイプ機について超電導状態ならびに非超電導状態における回転特性および冷却特性を評価したので報告する。

2. 解析方法

図1には、回転子巻線に使用しているBSCCOロータバーの外観写真を示す[2]。11枚のDI-BSCCO[®]テープ材をハンダにてバンドル導体化し、無酸素銅の上に固定した。本構造のハイブリッドロータバーを使用すれば、超電導状態(同期定常回転)と非超電導状態(すべり定常回転)の両者について駆動可能である。図2には、超電導回転子の外観写真を示す[2]。また、本回転子を銅製固定子(3相8極の8/9短節巻)と組み合わせ、試験を実施した。まず、液体窒素中において無負荷状態にて励磁し、同期回転状態に引き入れた。その後、回転状態を維持したまま昇温し、固定子上部の温度が110 K程度になるまで試験を続けた。

3. 結果と検討

図3には、昇温過程における無負荷回転数と温度変化の試験結果を示す。なお、ステータ下部温度(lower-part)表示に若干のオフセットがあったことから、液体窒素中において上部温度(upper-part)と一致するように補正している。

昇温開始後、上部温度は速やかに上昇しているが、下部温度は30分経過するまで液体窒素温度に維持されている。このことから、上記時間までは下部のみ液体窒素に浸漬された冷却状態にあると考えられる。その後下部も温度上昇を開始し、40分を超えたあたりで上下部温度が一旦一致するものの、その後再度温度差が生じた。そして、60分程度経過後には4~5 K程度の温度差を保っていた。上記温度差の原因他、冷却特性の詳細は現在検討中である。一方、回転数に着目すると、昇温開始後63分程度までは同期回転状態を維持している。その後、わずかにすべり回転状態に移行しているが、100分程度回転試験を継続しても安定回転していた。なお、すべり時回転数がステップ状の振る舞いを示しているが、これは回転数計の量子化誤差に伴うものであり、本質的特性ではない。上記より、経過時間63分においてBSCCOロータバーの平均的温度が不可逆温度を超えているものと思われる。

講演当日は、詳細な試験データについて報告する。

謝辞

本検討の一部は、科学研究費補助金(基盤研究(B), 課題番号: 23360124)の援助を受けた。

参考文献

1. 中村武恒: 低温工学, Vol. 47, No. 6 (2012) pp. 384-391
2. D. Sekiguchi, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 22, No. 3 (2012) 5200904 (4 pp)
3. T. Nakamura, et al.: Superconductor Science and Technology, Vol. 22 (2009) 045022(7pp)

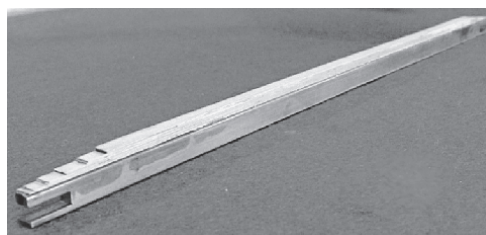


Fig. 1 Photograph of fabricated BSCCO rotor bar [2]

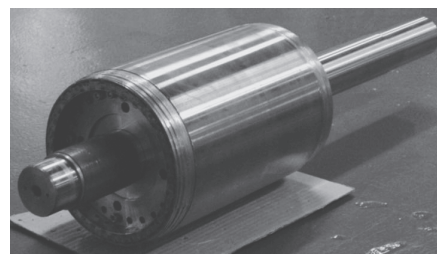


Fig. 2 Photograph of fabricated HTS rotor [2]

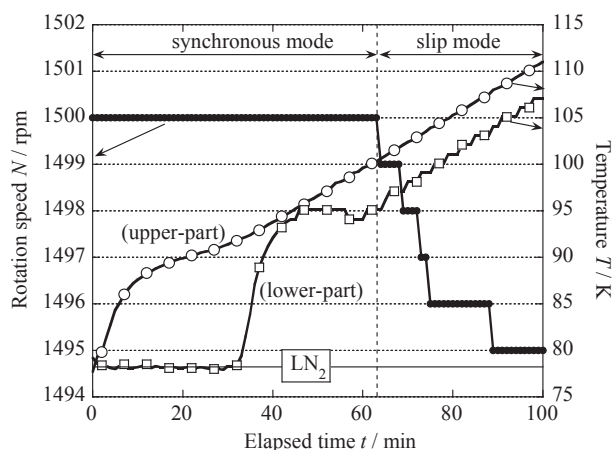


Fig. 3 Temporal variation of no-load rotation speed (N) and motor temperature (T) at warm-up process

始動時高トルク密度化と定常時高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

Study on HTS Induction/Synchronous Machine with Reluctance Torque Realizing Compatibility of Starting-Torque in High Density and Steady-State Operation in High Efficiency

西村 立男, 中村 武恒, 李 全, 小笠 卓郎, 雨宮 尚之 (京大); 伊藤 佳孝 (イムラ材研)
NISHIMURA Tatsuo, NAKAMURA Taketsune, LI Quan, OGASA Takuro, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University);
ITOH Yoshitaka (IMRA MATERIAL)
E-mail: tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、輸送機器への適用を目指した高温超電導誘導/同期回転機(High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM)の研究開発を実施している[1]。本回転機は、かご形誘導機の回転子巻線を超電導化することにより、同期回転に伴う高効率化、高トルク密度化他の性能向上を実現することができる。さらに、究極の高トルク密度化を実現するために、かご形回転子鉄心内に HTS 磁気遮蔽体を挿入することで、始動時や過負荷時にのみリラクタンストルクが発現する構造を提案している[2]。即ち、大きな牽引力を必要とする始動時他は鉄心が緩やかな磁気飽和を起こすため、HTS 磁気遮蔽体の影響が現れる。このとき、誘導同期トルクに加えてリラクタンストルクが発現して究極の高トルク密度化が実現される可能性がある(ただし、本状態では力率や効率が低くなる)。一方、鉄心が磁気飽和しない定常回転時は、リラクタンストルクが消失して誘導同期トルクのみが発現するため、力率や効率は高い値に維持される。

本研究では、上記提案の実現可能性を実験的かつ解析的に検討したので、その結果を報告する。

2. 実験ならびに解析方法

回転子の設計に際しては、かご形回転子巻線に DI-BSCCO[®]線材を適用し、回転子鉄心内にはGdBCO系のHTS磁気遮蔽体を挿入した。図1には試作した回転子の外観写真を示す。また、固定子巻線は8/9分布短節銅巻線である。モータの励磁には汎用PWMインバータを用いており、 $V/f = 69 \text{ V}/20 \text{ Hz}$ 一定制御により無負荷回転試験を実施した。回転試験中は、同時にモータ側面温度を計測し、上記回転特性の温度依存性を測定した。

さらに、鉄心の磁気飽和の程度による磁気遮蔽の様子を有限要素法により解析した。

3. 結果と考察

一次巻線電流の温度変化を図2に示す。温度82 K付近で電流値が下がっていることが確認され、このポイントはGdBCO系超電導体の不可逆温度付近と思われる。この結果より、HTS 磁気遮蔽体の効果が回転特性として現れていると考えられる。また、105 K 以上において電流値の変動幅が小さくなっていることから、この温度において HTS かご形巻線温度も不可逆温度を超えたものと考えられる。なお、上記試験中の回転数は、ほぼ同期回転数(600 rpm)を保持していた。

図3には、鉄心が磁気飽和した際の磁束密度コンター図の解析結果を示している。図3を見ると、誘導同期トルクを発現する4磁極(□)に加えて、2倍周期の磁極(○)が現れている。この8磁極により、リラクタンストルクが発現すると期待される。なお、非磁気飽和時には上記8磁極が消失し、誘導同期トルクのみが発生していると考えられる。

回転試験の詳細なデータやロータバーの超電導特性を考慮した解析結果他、詳細は講演当日に報告する。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金(挑戦的萌芽研究, No. 23656199)の援助を受けて実施された。

参考文献

1. D. Sekiguchi, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 22, No. 3 (2012.06) 5200904 (4 pp).
2. T. Nishimura, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 86 (2012) p.201



Fig.1 Photograph of fabricated HTS rotor

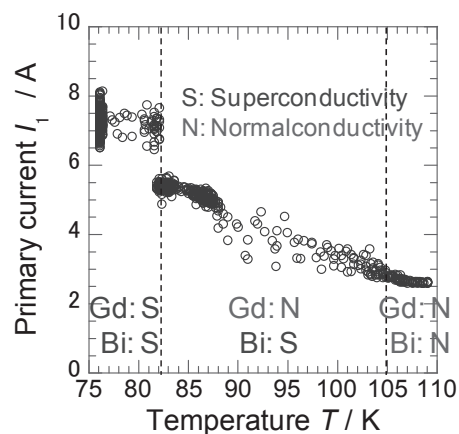


Fig. 2 Experimental result of temperature dependence of primary current in HTS-ISM at no-load condition

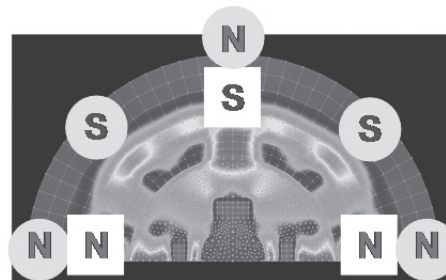


Fig. 3 Analysis result of magnetic flux density contour of HTS-ISM in magnetic saturation condition

荷重 20kN 超高温超電導磁気軸受による非接触回転試験

Contactless rotation of high temperature superconducting magnetic bearing over 20-kN load

荒井 有気, 吉澤 佳祐, 清野 寛, 柏木 隆行, 長嶋 賢(鉄道総研)

ARAI Yuuki, YOSHIZAWA Keisuke, SEINO Hiroshi, KASHIWAGI Takayuki, NAGASHIMA Ken (Railway Technical Research Institute)

E-mail: arai@rtri.or.jp

1. はじめに

超電導コイルと超電導バルク体を組合せた超電導磁気軸受を用いた鉄道用フライホイール蓄電装置の開発を進めている。これまでに、室温ボアを持つ超電導コイルと、液体窒素デューワー中に配置した超電導バルク体を組合せた超電導磁気軸受において、20 kN のスラスト荷重を浮上支持し、3600 rpm まで回転できることを確認している[1]。また、一つのクライオスタット内に超電導コイルおよび超電導バルク体を組合せた構造(提案する構造)を持つ模型試験装置[2]において、スラスト、ラジアル両荷重の非接触浮上支持および低次の共振点を越える回転数である 2000 rpm 以上での回転を行った[3]。

今回、後者と同様の構造を持ち、鉄道用蓄電装置に必要なフライホイール重量に相当する 20 kN 以上のスラスト荷重を発生可能な回転試験装置を設計・製作した。試験を実施し、20 kN を超える荷重を発生可能なこと、その状態で非接触浮上・回転が可能であることを確認したので報告する。

2. 20 kN 超高温超電導磁気軸受回転試験装置

これまでの知見を組合せ、提案する構造を有し、20 kN 以上の電磁力を発生させつつ回転試験が可能な装置を設計・製作した。外観写真を Fig. 1 に示す。また、概略図を Fig. 2 に示す。超電導コイルは DI-BSCCO 線材を用いた。巻き線内径 117 mm, 外径 292 mm, 高さ 75 mm, 巻数 4200 ターンである。超電導バルク体は GdBCO で、直径 140 mm, 厚み 20 mm (大) および直径 80 mm, 厚み 20 mm (小) の 2 種類を用いた。1 組の超電導磁気軸受は、超電導コイル 1 個、超電導バルク体 (大) 1 個、超電導バルク体 (小) 2 個で構成される。この超電導磁気軸受を上下に 1 組ずつ、向かい合わせて配置した。これにより、大質量のフライホイールが無くとも、電磁力として 20 kN 以上を発生しつつ、浮上・回転試験を実施可能である。

3. 静荷重試験・浮上回転試験

発生電磁力は超電導コイルが受ける超電導バルク体からの反力をロードセルで測定した。Fig. 3 に静荷重試験での超電導コイル電流と発生電磁力の関係を示す。最大 60 kN を発生し、鉄道規模以上の荷重を確認した。また、この状態では非接触浮上しており、磁気カップリングを用いた非接触トルク伝達での回転も行った。

4. まとめ

固定側の超電導コイルおよび回転側の超電導バルク体を一つのクライオスタット内に配置した超電導磁気軸受を製作し、鉄道規模に必要な 20 kN 以上のスラスト荷重の発生およびその状態での回転を確認した。

本研究の一部は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

参考文献

1. H. Seino, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.134
2. Y. Arai, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2011) p.27

3. Y. Arai, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 86 (2012) p.98

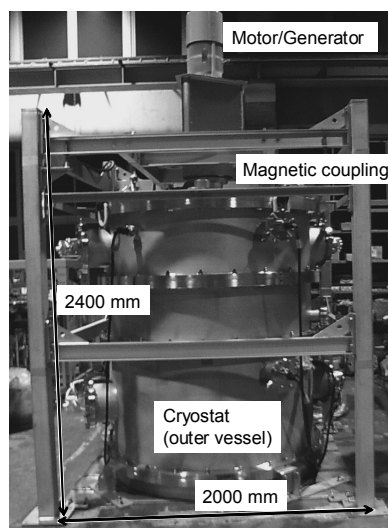


Fig. 1 Photograph of SC magnetic bearing

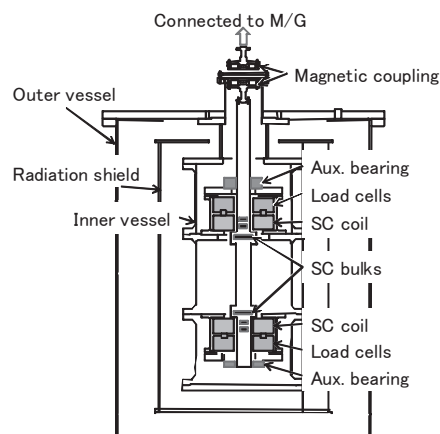


Fig. 2 Schematic view of SC magnetic bearing

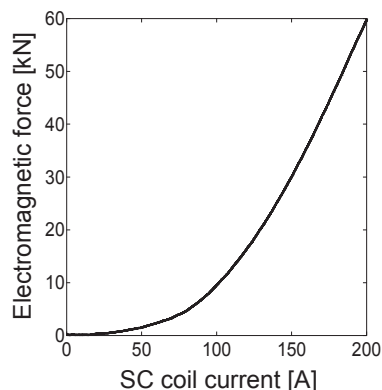


Fig. 3 Result of static load test

風力用大容量 HTS 発電機の現用型機、PM 機との電気性能比較

Comparison of electrical performance of large-scale HTS generators with conventional and PM machines

牧 直樹, 許 媛媛, 和泉 充(東京海洋大学)

MAKI Naoki, XU Yuanyuan, IZUMI Mitsuru (TUMST)

E-mail: naokmaki@tuba.ocn.ne.jp

1. はじめに

洋上風力発電システムの実用化が本格化しており、それに適した突極型 HTS(高温超電導)発電機の設計研究を進めている[1,2]。今回、開発した設計プログラムを用いて 10 MW の HTS 突極界磁発電機、銅界磁の現用型機並びに PM(永久磁石)界磁の PM 機の電気設計を行い、その電気性能について比較検討したので報告する。

2. 電気設計プログラム

経済性の高い HTS 発電機として、HTS 界磁コイルを磁性の突極磁極に支持する回転子と現用固定子を採用するレトロフィット機を提案している[2]。Fig.1 はこの突極型 HTS 発電機の電気設計プログラムを示す。この設計プログラムの特徴は、

- ①入力パラメータとして固定子外径、極ピッチ、極数、界磁極の磁束密度、HTS の励磁性能などを用いて多数の自動設計を行い、主に発電機重量と効率、HTS 線材の使用量を考慮して HTS 発電機の最適諸元と性能を定める。
- ②設計手順で定めた発電機諸元を用いて磁場解析を行い、界磁漏れ係数を求めるとともに HTS 経路磁場から HTS 発熱量さらにその許容値から界磁運転電流を算定し、設計手順にフィードバックして設計の適正化を図る。

一方、PM 発電機の電気設計では PM の厚さと平均経験磁場を想定して三次元磁場解析を行って経験磁場 B と起磁力 H の関係を求め、この B-H 特性と PM 減磁特性との交点から運転時の B と H を定め、PM 界磁の諸元にフィードバックする。また、現用型機の場合には HTS コイルに代えて通電電流密度が二桁小さい銅コイルを用いる。なお、PM 機と現用型機の界磁漏れ係数の計算は、HTS 機と同様に無負荷時における電機子鎖交磁束に対する界磁磁束の比率から求める。

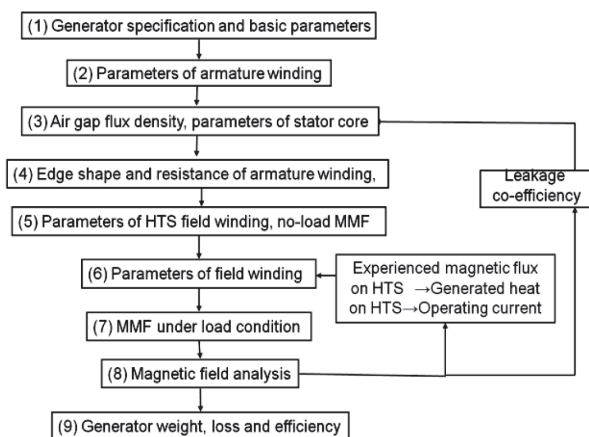


Fig.1 Flowchart of design program of HTS generators

3. HTS 機、現用型機並びに PM 機の電気設計と性能比較

Table 1 に有効出力 10MW の HTS 機、現用型機並びに PM 機的主要電気設計結果を示す。超低速機であるために発電機性能上から運転周波数の増大を図ることが不可欠となり、発電機外径が 15 m 程度と大きく発電機長さが 1 m 以下と短い大径短軸機となる。現用型機と PM 機では界磁起磁力が小さいので鉄心を未飽和領域で使用するために、HTS 機で

は界磁起磁力を大きく出来るので回転子鉄心を 2 T 程度の磁気飽和状態で使用するのが有利となる。PM 機では構造の簡単な表面磁石型を採用し、極数を HTS 機や現用型機の約 2 倍にとり、運転周波数の増大による発電機の軽量化を図る。

Table 1 の電気設計結果から各発電機は次の性能と特徴を有することが分かる。

- PM 機の空隙磁束密度は現用型機の 0.4 倍に減少するのに対して、HTS 機は 1.4 倍に増大して望ましい。
- PM 機と HTS 機の界磁起磁力はそれぞれ現用型機の 1.2 倍、2.0 倍が必要になる。
- PM 機の PM 重量は現用型機の界磁巻線重量の約 1/2 に減少するが、約 6 トンのコストは相当に高くなる。HTS 界磁巻線の重量は現用型機の 0.03 倍と大幅に低減するに伴い、発電機重量の 1/2 低減に大きく貢献する。
- PM 機の発電機重量は現用型機の 0.7 倍に減少するのに対して、HTS 機は 0.5 倍と大幅に減少する。
- HTS 機の電機子銅損は現用型機並みだが、PM 機は 1.5 倍に増大する。PM 機と HTS 機の界磁銅損はほぼ零であり、HTS 機には冷凍機動力が必要になる。これらの発電機損失を総合して求める発電機効率は、PM 機で現用型機とほぼ等しく、HTS 機で 1 % 向上する。

Table 1 Main design results of HTS, PM and conventional type generators (10 MW, 10 rpm, 3.3 kV, pf=1.0)

Generator type	Convention	PM	HTS
Field material	Cu	Nd system	Y system
Operating temperature [K]	330	330	68
Number of poles	96	200 (2.1)	96
Frequency [Hz]	8	16.7 (2.1)	8
Pole pitch [mm]	443	245 (0.55)	437
Rotor outer diameter [m]	13.5	15.6 (1.2)	13.3
Stator outer diameter D [m]	14.1	16.0 (1.15)	14.0
Stator length L [m]	0.66	0.71 (1.1)	0.32 (0.5)
Generator size LD ² [m ³]	131	182 (1.4)	63 (0.5)
Flux /pole [Wb]	0.174	0.052	0.117
Magnetic flux density in air gap [T]	0.76	0.31 (0.4)	1.05 (1.4)
Magnetomotive force of field winding [kA/pole]	16.3	19.2*(1.2)	32.2 (2.0)
Field winding weight [ton]	13.3	5.8 (0.44)	0.4 (0.03)
Generator weight [ton]	196 (2.0)	137 (0.7)	97 (0.5)
Iron loss [kW]	24	19	26
Armature copper loss [kW]	259	400 (1.5)	291 (1.1)
Field copper loss [kW]	179	0	1
Stray loss [kW]	18	56 (3.1)	19
Mechanical loss [kW]	20	23	19
Refrigerator power [kW]	0	0	44
Total electrical loss [kW]	500	497	399
Generator efficiency [%]	95.2	95.3 (+0.1)	96.2 (+1.0)

* PM 厚さは 30 mm なので PM 起磁力は $19.2 \times 10^3 / 30 = 640$ [A/mm]

(注) 括弧内の数値は現用型機に対する比率(効率は差)を示す

参考文献

1. N. Maki, N. Shinohara, M. Izumi: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.39
2. N. Maki, M. Izumi: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 86 (2012) p.203