

# 円形超電導界磁コイルを用いた大型風力発電機の電磁設計

## Electromagnetic design of wind turbine generators using circular superconducting field coils

クッデイス モハンマド ラシド, 関野 正樹, 大崎 博之(東大)

QUDDDES Mohammad Rashidul, SEKINO Masaki, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)

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

### 1. はじめに

大型風力発電機の実現において、発電機の重量やサイズが課題であり、発電機の高出力密度化、コンパクト・軽量化が求められる。超電導線材の高電流密度特性を利用して、高磁場を発生することによって、その課題を解決することを検討している[1]。本研究では、円形超電導コイルの適用を前提として、10 MW 級大型風力発電機の各種特性についてパラメータスタディと概念設計を行ってきたので、その結果について報告する。

### 2. 発電機概念構造と解析上基本条件

ダイレクトドライブ方式の発電機の設計の前提として、回転数を 10 rpm、コイル系の直径を 5 m とした。回転子側は空心構造である。また、超電導界磁コイルの使用条件として、温度 20 K、最大磁束密度 10 T 程度を想定し、界磁コイルの電流密度は 168 A/mm<sup>2</sup> を仮定した[2]。界磁コイルと電機子巻線間のギャップは 100 mm である。

円形超電導界磁コイルを用いた 10 MW 級風力発電機概念設計モデル例を図 1 に示す。図 1(a) のように、径方向磁界発生用超電導コイル 2 セットと軸方向磁界発生用超電導コイル 1 セットから界磁コイルは構成される。電機子巻線は銅線による 3 相集中巻構造とした。図 1(b) に示すように、電機子巻線は 4 列で構成される(図は 1/2 モデル)。このような発電機モデルに関して、有限要素法に基づく 3 次元電磁界解析を行い、発電機特性等を解析した。

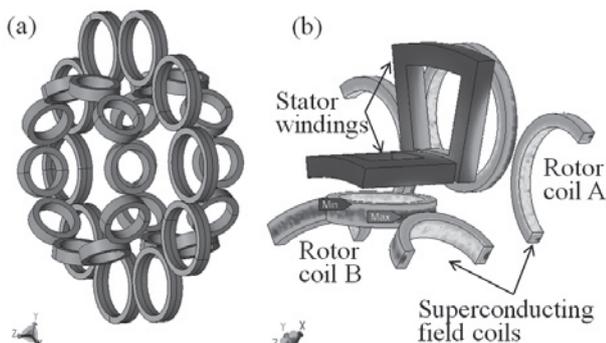


Fig.1 (a) Rotor coil design of a 10-pole generator, (b) 2 poles of the rotor and one set of stator coils (half model).

### 3. 各種特性の極数依存性

界磁コイルでの最大磁束密度、発電機体積、漏れ磁束、発電機出力特性等が極数に対してどのように依存するかを図 2 に示す。今回の検討では 6 極から 20 極の範囲で解析を行った。また、超電導界磁コイルの断面積はこの解析では 100 mm × 200 mm を仮定した。極数を多くすると超電導コイル直径が小さくなり、最大磁束密度は上昇する。逆に極数が少ないと超電導コイル直径が大きくなり、発電機体積も大きくなる。周辺への磁界の漏れは、界磁コイル系が大きくなると拡大し、例えば 0.05 T の範囲は発電機中心より径方向に 3.0~3.7 m である。

発電機コスト低減のためには、超電導線材量を減らすことは重要である。そこで、必要な超電導線材長を算出し、その極数依存性も調べたところ、極数とともに増加した。さらに、電

機子巻線も含めたモデルを構成し、発電機出力を算出した極数が多くなると、電機子巻線を配置することができる空間が小さく、10 MW 出力は困難となった。上記の検討に基づき、10 極を選定して、諸パラメータ調整により発電機特性の改善を行った結果を次に示す。

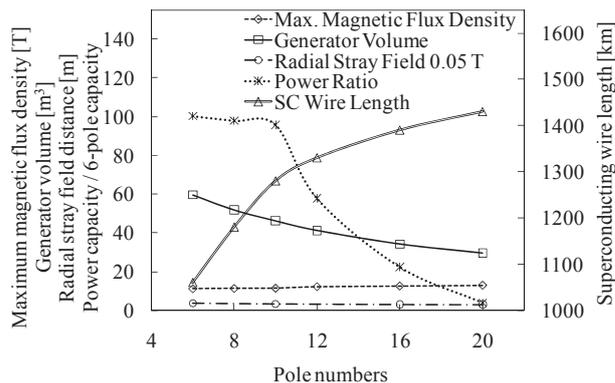


Fig.2 Generator characteristic dependence on pole numbers.

### 4. 10 極発電機の設計

超電導界磁コイルにおける最大磁束密度を 10 T 以下に抑えるため、超電導コイルの断面積を調整した。一方、電機子巻線は、占積率を 0.5 とし、コイル平均電流密度 2 A/mm<sup>2</sup> (導体電流密度 4 A/mm<sup>2</sup>) を仮定した。電機子巻線の誘導起電力特性を解析して、10 MW 級発電機に必要な電機子巻線の巻数を決定した。また、パラメータ調整において、超電導線材量の低減も重要条件とし、外側超電導コイルの直径を発電機出力に大きな影響が無い程度に縮小するなどをし、最終的に超電導線材長は約 1000 km となった。表 1 に設計結果の概要を示す。

さらに、固定子側に鉄心を入れることによって、最大で 35 % 程度の発電機出力の増加となる。逆に 10 MW 出力のためには、必要な超電導界磁コイルの断面積を A: 80mm × 160 mm, B: 64 mm × 128 mm までを縮小でき、超電導線材長は最短で 650 km まで短縮できる。しかし、直径 5m 程度の発電機の外周に近いところに鉄心を配置することになり、発電機重量の増大の程度は大きく、発電機を鉄心入り構造とするかどうかは、超電導線材量と発電機重量との間のトレードオフの評価が必要である。

Table 1: Design summary of air core 10 MW generator

Max. magnetic field density	10 T
Field coil current density	168 A/mm <sup>2</sup>
Field coil cross section	A: 97 mm × 194 mm B: 85 mm × 170 mm
Required SC wire length	1000 km

### 参考文献

- M. R. Quddes, et al. presented at ASC2010, 1LA-05 (2010)
- D.W. Hazelton, et al.: Proceedings of the IEEE, Vol. 97, No. 11 (2009), pp. 1831-1836

# 風力用5MW 突極型 YBCO 同期発電機の基本電気設計検討

## Fundamental Electrical Design Study of 5MW Salient-pole YBCO Synchronous Generators for Wind Power Systems

牧 直樹, 篠原 信行, 和泉 充 (東京海洋大学)  
 MAKI Naoki, SHINOHARA Nobuyuki, IZUMU Mitsuru (TUMSAT)  
 E-mail: naokmaki@tuba.ocn.ne.jp

### 1. はじめに

風力用5MW 突極型 HTS 発電機の基本電気設計を Bi 系線材適用に対して検討してきたが[1]、今回低コスト化を狙って77Kと60K 運転の Y 系線材使用発電機を対象に基本電気設計を行い、Bi 系線材を適用した発電機と比較するとともに、Y 系導体発熱量評価から運転電流を求めたので報告する。

### 2. 風力用5MW 発電機の電気設計検討

開発した基本電気設計プログラム[1]を用いて 5MW Y 系発電機の基本電気設計を行い、発電機パラメータが発電機性能(発電機重量、発電機効率、Y 系線材使用量)に及ぼす影響について検討し、次項が望ましいことを明らかにした。

- ・回転子外径は、高周速を得るため極力大きい 4.6m とする。
- ・高効率に向けて周波数を高めるように 40 極と多極化する。
- ・鉄心部磁束密度は、小型軽量化のため高い 1.95T を選ぶ。
- ・電機子電流密度は現用機並みの 3A/mm<sup>2</sup> とする。
- ・電気装荷は、空冷強化により 1.5 倍の 1200A/cm とする。

これらの設計方針に沿って実施した 5MW Y 系発電機の 77K と 60K 運転における主要な発電機諸元と性能を 60K 運転の Bi 系発電機と比較して Table1 に示す。いずれの発電機も良好な発電機性能を得るために回転子外径/固定子長さ = 4.62/0.99 ≒ 5 の大径縮長型になっている。ギャップ磁束密度は 1.11T と現用機タイプの 1.5 倍程度である。

77K 運転特性は 60K 運転に比べて Y 系線材使用量が 3.6 倍、発電機重量が 1.1 倍になるデメリットはあるが、Bi 系発電機と違って 77K 運転が可能であることは N<sub>2</sub> 冷却が可能になるなど極低温冷却システムの選択肢が広がる。60K 運転の Y 系発電機は Bi 系発電機に比べて HTS 線材使用量が 1/5 に低減し、発電機重量が 0.85 倍に軽量化できる大きいメリットが得られる。

77K 運転の Y 系発電機を対象に三次元磁場解析を行い、無負荷励磁における界磁極の平均磁場は 2T 程度となり、設計値とほぼ一致する結果が得られた。また、負荷時の磁場分布計算から、Y 系導体の最大経験磁場は 0.6T と比較的低いことが分かった。

Table 1 Main design results of 5MW YBCO generators (3.3 kV, 972 A, 15 rpm)

Generator	A	B	C
Stator outer diameter [m]	5.20	5.20	5.20
Stator length [m]	0.99	0.99	0.99
Flux /pole [Wb]	0.32	0.32	0.32
Magnetic flux density in air gap [T]	1.11	1.11	1.11
Synchronous reactance [pu]	0.52	0.54	0.51
Magnetomotive force of field winding [kA/極]	46.5	45.1	47.1
Size of HTS wires [mm <sup>2</sup> ]	0.2×5	0.2×5	0.22×4.2
Critical current density of HTS coils at 0.6 T vertical experienced magnetic field [A/mm <sup>2</sup> ]	57	196	39
Current of HTS coils [A]	57	196	36
Number of HTS coils [turns]	816	230	1210
Total length of HTS wires [km]	87	24	137
Generator weight [ton]	67	60	71
Efficiency [%]	95.8	95.7	95.7

### 3. Y 系導体発熱量の算定と運転電流の決定

Fig.1 に Y 系界磁コイルの通電電流に対する Y 系導体発熱量の評価結果を示す。各種界磁電流に対して三次元磁場解析を行い、Y 系界磁コイル各部の磁場の大きさや角度依存性を考慮して臨界電流と n 値から Y 系導体各部の発生電圧を求め、通電電流との積を HTS 導体全長に渡って積分して発熱量を求める [2]。この Y 系導体発熱量と極低温冷却装置の能力を考慮して、運転電流を決めることになる。例えば、導体発熱量を 100 W (全 40 極なので 1 極当たり 2.5 W) に制限する場合には、HTS 導体発熱量から求めた臨界電流は図 5.4.4 に示すように 74A となる。

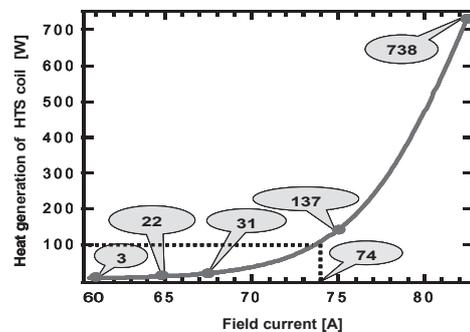


Fig.1 Electric loss of YBCO coils on 77 K operation

Fig.2 に 77K 運転の Y 系発電機の運転電流決定法を従来法と比較して示す。c 軸方向磁場に対する I<sub>c</sub> 特性と負荷線の交点から臨界電流を求める従来法に対して、導体発熱量から臨界電流を評価する方法は、臨界電流の磁場角度異方性をもつ Y 系線材には妥当な評価法である。臨界電流 74A は従来法による 59A よりも 1.25 倍大きく流せることを示しており、負荷率を 0.77 にとれば、通電電流は 74×0.77=57A となる。

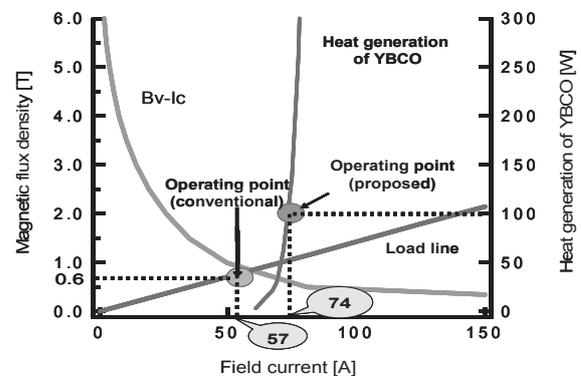


Fig.2 Determination of operating current for 77 K YBCO coils

### 参考文献

1. N. Maki: Abstracts of CSJ Conf., Vol. 83 (2010) p.21
2. Y. Koshiba: Abstracts of CSJ Conf., Vol. 83 (2010) p.22

# 超電導同期機の Phase-Domain モデル

## A Phase-Domain Model for Superconducting Synchronous Machines

ケバル ロイキ, 関野 正樹, 大崎 博之(東大)  
 QUEVAL Loic, SEKINO Masaki, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)  
 E-mail: lqueval@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

### 1. Introduction

We examine the possibility of modeling superconducting (SC) synchronous machines using the phase-domain (PD) model in association with the machine parameters obtained from a Finite Element Analysis (FEA). This approach permits to easily and efficiently predict the transient and steady-state behavior of the machine integrated with the rest of the power network, while taking into account harmonic effects due to magnetic circuit geometry with the same accuracy as the one that could be obtained with a computationally expensive FEA.

### 2. Mathematical model

The PD model is commonly expressed in terms of the machines physical phase variables. In motor convention, the voltage equation is expressed as,

$$\begin{bmatrix} v_{abc} \\ v_{qdr} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{qdr} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \lambda_{abc} \\ \lambda_{qdr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

and the flux linkages as,

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abc} \\ \lambda_{qdr} \end{bmatrix} = \mathbf{L}(\theta_r) \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{qdr} \end{bmatrix} \quad (2)$$

where  $p = d/dt$  and  $\theta_r$  is the rotor position. Note that the stator and rotor self and mutual inductance matrix  $\mathbf{L}$  depends on the rotor position. The electromagnetic torque  $T_e$  is expressed in the machine variables as,

$$T_e = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{qdr} \end{bmatrix}^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} \mathbf{L}(\theta_r) \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{qdr} \end{bmatrix} \quad (3)$$

The mechanical subsystem is assumed to be represented as,

$$p\theta_r = w_r \quad (4)$$

$$pw_r = \frac{P}{2J} (T_e - T_m) \quad (5)$$

where  $P$  is the number of poles,  $J$  is the moment of inertia,  $T_m$  is the mechanical torque, and  $w_r$  is the rotor speed.

Usually the PD model is then transformed into the  $qd$  model where the machine inductance matrix  $\mathbf{L}$  is constant due to Parks transformation. Nevertheless, the  $qd$  model is established based on the assumption that both the working flux distribution and the winding flux linkages are sinusoidal [1]. But because SC machines are generally air-cored, this assumption is not always reasonable and can bring important errors. The PD model is more complex but it permits to avoid it. We underline that working directly in the physical phase domain model simplifies the interfacing of the machine model with the power system network as it is not necessary to go through parameter transformations as in the case of the  $qd$  model.

### 3. Simulation

An air-cored HTS 10 MW class wind turbine generator with double layer distributed three-phase armature windings connected to a triphasic load [2] is simulated using the PD model implemented in a Simulink environment. The rotor position dependant inductance matrix and its derivative are obtained from FEA, stored in lookup-tables and retrieved in terms of the rotor position. Results of simulation of the machine startup are shown on Fig.2.

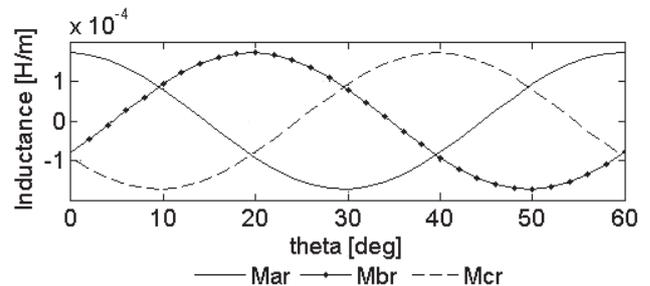


Fig.1. Rotor position dependant inductances.

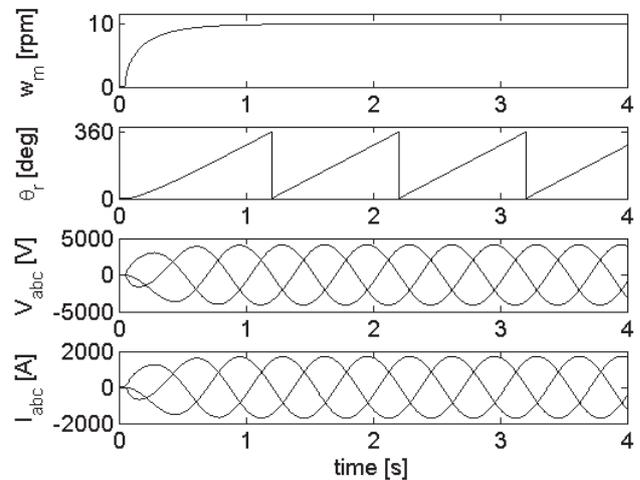


Fig.2. Simulation of the machine startup.

### 4. Conclusion

It has been underlined that simulation tools should be adapted to meet design criteria of SC machines. In view of this, a phase-domain model for SC synchronous machines has been proposed. To show the effectiveness of the method, it has been applied to an air-cored HTS 10 MW generator with distributed windings.

### References

- [1] Mohammed *et al*, *IEEE Proc. Magn.*, Vol. 41, No. 5, pp. 1628-1631, 2005
- [2] Ohsaki *et al*, *ICEMS 2010 Proc.*, pp.1303-1306, 2010

# 高温超電導電機子巻線を適用した永久磁石発電機のコギングトルク低減と発電特性改善に関する基礎検討

## Fundamental study on cogging torque reduction and generation characteristics improvement of permanent magnet generator having HTS armature windings

上原 亜矢, 中村 武恒, 雨宮 尚之 (京大); 平松 敬司 (E.エナジー); 松下 誠一 (松下電機総合)

UEHARA Aya, NAKAMURA Taketsune, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); HIRAMATSU Keiji (E. Energy)

; MATSUSHITA Seiichi (Matsushita Denki Sogo)

E-mail: tk\_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

近年、永久磁石形回転機が制御法の進展に相俟って様々な応用分野において使用されている。例えば、車載システムのリサイクル発電機では、如何に低速走行時においてもエネルギーを回収できるかがパワートレインシステム全体の高効率化の観点から重要な技術開発課題の一つと考えられる。一方、増速ギアを用いないダイレクトドライブシステムを指向する場合、電機子巻線抵抗の影響によって低速時効率が低下すると危惧されるが、我々は高温超電導電機子巻線を適用することによって克服することを検討している。さらに、永久磁石発電機の構造に起因する問題の一つにコギングトルクが挙げられ、構造あるいは制御法のアプローチからその低減法が検討されている。構造の観点からの改善策の一つとして、Switched Reluctance Motor (SRM) のケースでは、軸方向に多段スライド構造を採用し、トルク脈動を低減する方法が提案されている[1]。

本報告では、永久磁石発電機について検討を進めており、複数の発電機を直列接続し、その軸方向からみた空間位相をずらす方法(空間位相調整法)を検討したので報告する。

### 2. 解析方法と結果

解析には、有限要素法を適用した。まず、コギングトルクの低減効果を検討した。図1には、対象とした永久磁石発電機の解析モデル(3相、8極、1800rpm)を示す。このモデルで解析を実施し、その発電機を図2のように直列接続することを想定し、得られたトルク特性や誘導起電力について空間位相差(本配置では $\delta = 9.375^\circ$ )を考慮して重ね合わせることで空間位相調整法の効果を検討した。図3には、直列接続数とコギングトルクの関係(1台分の発電機のコギングトルクで規格化した値)を示すが、直列接続数を増やすことによってコギングトルクが大幅に低減している。また図4には、4連結発電機について誘導起電力波形を足し合わせた結果を示す。空間位相を調整しない場合の基本波ピーク値(約750V<sub>peak</sub>)に比較して、空間位相調整を施した場合には950V<sub>peak</sub>程度にまで改善している。

以上より、直列接続されている永久磁石形発電機に空間位相調整を施すことによって、コギングトルクが大幅に低減するだけでなく、誘導起電力波形も改善されることが明らかになった。

#### 参考文献

[1] T. Ueda, et al.: Abstracts of JIASC2008, Vol. III (2008) pp. 233-236

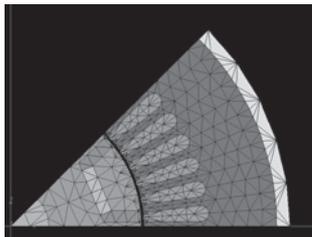


Fig. 1 Analysis model.

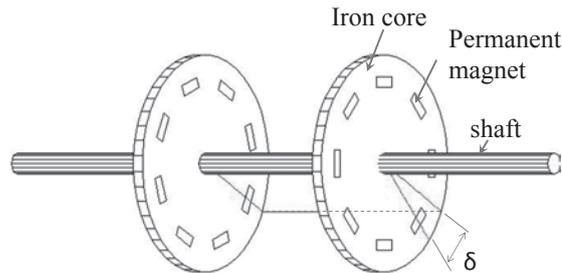


Fig. 2 Schematic diagram of series-connected HTS generator by use of relative mechanical angle tuning method.

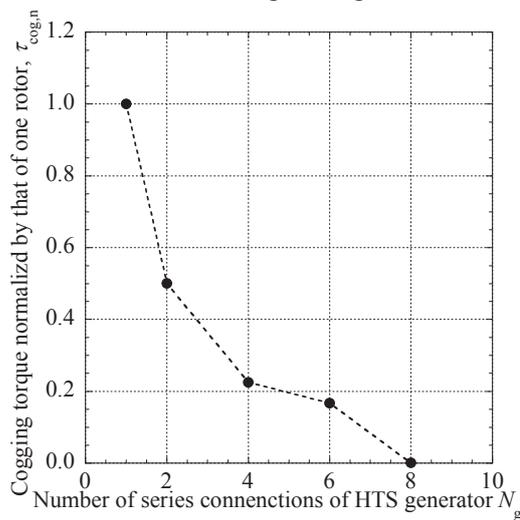


Fig. 3 Analysis results of cogging torque vs. number of series connections of HTS generators.

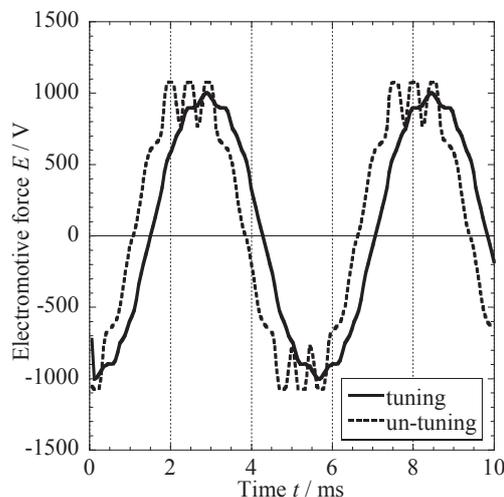


Fig. 4 Analysis results of total waveforms of electromotive force at no-load condition ( $N=1800$ rpm).

## 液体ヘリウム浸漬冷却 MgB<sub>2</sub> 超電導モータの回転特性

### Rotating characteristics of MgB<sub>2</sub> superconducting motor immersed in liquid helium

久家 広嗣, 梶川 一弘(九州大学); 中村 武恒(京都大学); 和久田 毅(日立製作所)

KUGA Hirotsugu, KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu Univ.); NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.); WAKUDA Tsuyoshi (Hitachi)  
E-mail: kuga@sc.kyushu-u.ac.jp

#### 1. はじめに

昨今のエネルギー問題や環境問題を改善する先進技術の 1 つとして、水素利用社会の可能性が検討されており[1]、我々の研究グループでは、液体水素を移送するためのポンプを駆動する高温超電導誘導/同期モータ(HTS-ISM)を提案している[2]。モータの巻線には MgB<sub>2</sub> 線材を適用し、臨界温度が 36 K のため、液体水素の大気圧下沸点である 20 K において超電導状態を維持できる。

これまで、上記超電導モータの試験システムは京都大に設置されており、実験及び解析による評価が行われてきた[3]。この超電導モータにインペラ等を取り付けてポンプデモシステムを構築するにあたり、試験システムを九州大に移設もしくは新設し、その早期立ち上げを目指している。今回、ポンプ駆動用超電導モータの評価を行うにあたり、液体ヘリウム浸漬冷却下でのモータ負荷試験を実施したので、その内容について報告する。

#### 2. 超電導モータ試験システムの概要

本研究における高温超電導誘導/同期モータは、既存の三相 4 極の誘導モータ構造において、ロータバーに MgB<sub>2</sub> 線材を適用したものである。この MgB<sub>2</sub> 線材は、Cu/Nb/MgB<sub>2</sub> の三層構造線であり、液体水素温度(20 K)下では単線でも大きな自己磁界臨界電流を持つため、線材 1 本でロータバー 1 本を構成している。固定子巻線は銅線で構成しており、極低温液中での試験のために、ベアリングの油抜きも行っている。この超電導モータは、Fig.1 に示すようにモータ回転軸シャフトが鉛直方向の配置とし、隣接する液体ヘリウム用の NbTi 液面計とともに、金属製クライオスタット内に収められる。モータの駆動には汎用の PWM インバータもしくはボルトスライダを用い、パワーメータ、光学式タコメータ、トルクメータにより電圧、電流、電力、回転速度、およびトルクなどのパラメータを測定する。モータへの負荷印加には、Fig.2 に示すようなニア駆動式プロニーブレーキを用いており、外部の制御装置により自動で負荷を印加することができる。

試験は、液体ヘリウム浸漬冷却下で行い、液面計とモータ内の固定子鉄心部及び固定子巻線部に設置された温度センサを監視してクライオスタット内のモータ全体が液体ヘリウムに浸かり、モータ部測定温度も 4 K を確認した状態で回転試験を行う。PWM インバータは  $V/f = 200 \text{ V} / 60 \text{ Hz}$  一定で制御しており、各周波数で無負荷条件における同期回転を確認した後、プロニーブレーキにより負荷印加を行い、同期トルクおよびすべりトルクを観測するとともに、各パラメータの測定を行った。

液体ヘリウム浸漬冷却下のモータ負荷試験に関しては、既に京都大での試験及び評価が行われており、その結果も報告されているが[4]、今回は、九州大での超電導モータ試験システムの立ち上げと、新たに自動で負荷印加を行える装置を導入したことによる装置の動作テストも兼ねた負荷試験を行った。試験結果の詳細については、講演当日に報告する。

#### 謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の平成 20 年度産業技術研究助成事業(課題番号: 08B38006a)の一環として実施したものである。

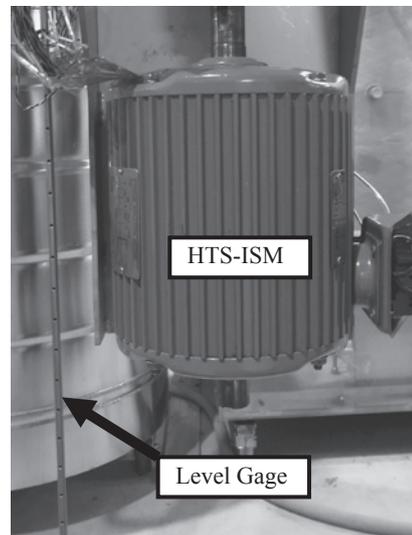


Fig.1 High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor (HTS-ISM) with MgB<sub>2</sub> Wires.

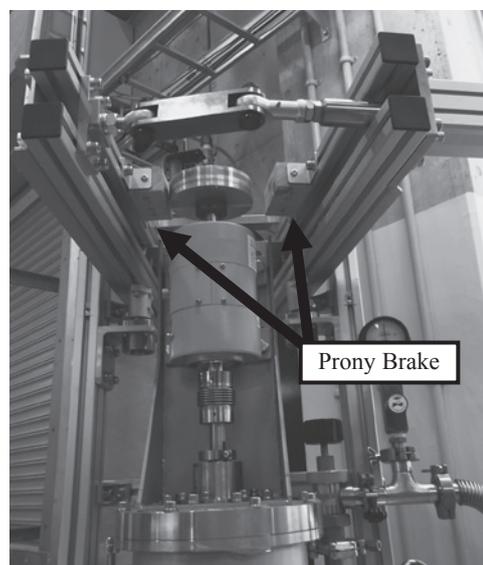


Fig.2 Prony Brake for Load Test.

#### 参考文献

1. 平林洋美:低温工学 40 (2005) 276.
2. K.Kajikawa et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 19 (2009) 1669.
3. 中村武恒他:2010 年度春季低温工学・超電導学会 (2010) 2C-a07.
4. K.Kajikawa et al.: Applied Superconductivity Conference 2010 (2010) 1LPE-03.

## 高温超電導誘導/同期機の過負荷耐量に関する実験的検討

## Experimental study on overload capacity of HTS induction/synchronous machine

中村 武恒, 三澤 慎太郎, 関口 大輔, 北野 紘生, 川西 勇作, 雨宮 尚之 (京大); 伊藤 佳孝, 吉川 雅章, 寺澤 俊久 (イムラ材研); 長村光造 (応用科研)

NAKAMURA Taketsune, MISAWA Shintaro, SEKIGUCHI Daisuke, KITANO Hiroki, KAWANISHI Yusaku, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); ITOH Yoshitaka, YOSHIKAWA Masaaki, TERAZAWA Toshihisa (IMRA); OSAMURA Kozo (RIAS)

E-mail: tk\_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

我々は、輸送機器(電気駆動式自動車, 電気車, 船舶他)への適用を目指した高温超電導誘導/同期機(High Temperature Superconductor Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM)の研究開発を実施している[1]。HTS-ISMの能力を最大限利用する精密設計のためには、短時間定格を含めて過負荷時出力を決定する必要がある。一般的に、超電導回転機の定格は、超電導巻線における磁界依存臨界電流の最小値を基準に、経験的な電流負荷率を設定して決定される。従って、HTS巻線の許容最大通電電流は上記最低臨界電流の制約条件で設計されると考えられる。一方、HTS線材の電流輸送特性は金属系に比較して通常ブロードであり、また高温動作に伴う高い比熱から熱的に安定と考えられる。従って、熱力学的に超電導状態がかつ損失を発生している磁束フロー状態も冷却とのバランスさえクリアすれば使用可能と期待され、その場合過負荷耐量の適用範囲が拡大し、より高出力密度の回転機が実現されると期待される。本報告では、ビスマス系全超電導 HTS-ISM について、上記概念の成立性を実験的に検証したので報告する。

## 2. 試作機と実験方法

本回転機は、固定子ならびに回転子巻線ともに DI-BSCCO<sup>®</sup>線材で試作した全超電導 HTS-ISM であり、特に固定子巻線は 24 個のレーストラックダブルパンケーキコイルを組み合わせた 3 相 4 極 2 層重ね巻の分布巻構成とした。図 1 には、固定子巻線用 DI-BSCCO<sup>®</sup>コイル(8 ターン, ポリイミド絶縁)の写真を示す。固定子コイルは、空芯ならびに鉄心挿入状態で逐一臨界電流を測定し、巻線工程に起因する劣化の無いことを確認している。最終的に、通電特性低下の大きいスロット内側コイルについて、(臨界電流, n 値) = (33.33 A, 11.40)であった。試作した HTS-ISM の外観写真を図 2 に示す。

## 3. 結果と考察

試作した全超電導 HTS-ISM を液体窒素浸漬冷却し、無負荷試験を実施した。なお、図 2 に示すように、試作機には GM 冷凍機も接続されており、液体窒素の蒸発を抑えている。試験には汎用の PWM インバータを使用し、周波数  $f$  が 5 Hz までは  $V/f = 8 \text{ V/5 Hz}$  (一定)の傾きで、また 5 Hz 以上では  $V/f = 50 \text{ V/60 Hz}$  (一定)の傾きで制御した。

図 3 には、試験結果の一例を示す。まず同図から明らかなように、試作した全超電導 HTS-ISM は、1800 rpm において同期回転が達成されている。この回転数は、例えばミドルクラスの自動車を想定してタイヤ径が 600 mm  $\phi$  とすると、200 km/h に相当する。即ち、ダイレクトドライブの自動車を検討する場合、上記回転数を最大値とする低損失化を検討すればよく、今回の全超電導機での成功はその第一歩と考えられる。なお、本回転機は機械損が大きく、大きな一次電流を必要としている。特に、回転数 1800 rpm における電流値は 35 A<sub>rms</sub> 程度に達しており、さらに最大 40 A<sub>rms</sub> の状態で運転したケースもあった。即ち、この値は HTS 固定子巻線における臨界電流(電界基準: 100  $\mu\text{V/m}$ )を超えているが、試作機は回転可能である。このことは、

上記した過負荷耐量の概念が磁束フロー状態にまで拡大された明確なエビデンスと考えられる。内部構造他、詳細は講演当日に報告する。

## 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(No. 20560268)の援助を受けて実施した。

## 参考文献

1. T. Nakamura: Superconductivity Web21, vol. 3 (2011) pp. 13-14



Fig. 1 Photograph of a DI-BSCCO<sup>®</sup> coil for stator windings.

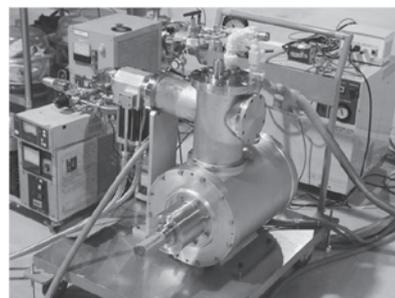


Fig. 2 Photograph of fully superconducting HTS induction/synchronous Motor (HTS-ISM).

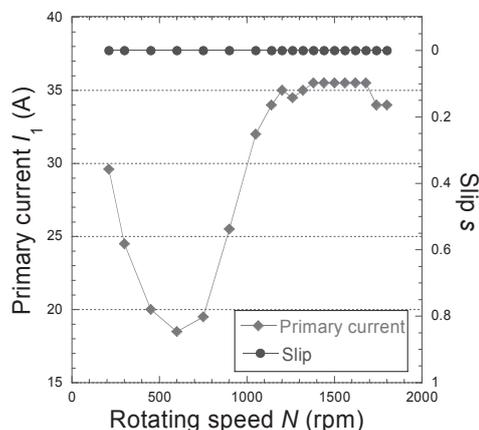


Fig. 3. Experimental results at 77 K.

## 高温超電導誘導/同期機の自律安定性に関する検討

## Study on autonomous stability of HTS induction/synchronous machine

中村 武恒, 北野 紘生, 雨宮 尚之 (京大); 伊藤 佳孝 (イムラ材研)

NAKAMURA Taketsune, KITANO Hiroki, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); ITOH Yoshitaka (IMRA)

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/同期機 (High Temperature Superconductor Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM) の研究開発を実施している[1]。本研究開発では、各輸送機器特有の可変速運転モードにおいて最適駆動法を検討する必要がある。しかしながら、HTS-ISM はかご形誘導機と同様の基本構造を有することから、もし Ohm の法則に従うかご形巻線抵抗が単純に低くなると回転不安定になり、一般的制御法では回転制御不能になると危惧されている。

上記課題に対し、HTS-ISM における高温超電導かご形巻線の起磁力依存非線形抵抗を利用することによって、自律安定制御可能であることを電圧方程式・力学方程式を適用した解析結果に基づいてまとめたので、その概要を報告する。

## 2. 解析方法

対象とした HTS-ISM は、3 相 4 極のかご形誘導機であり、かご形巻線のみ DI-BSCCO<sup>®</sup>線材で構成し、固定子巻線は既存の 8/9 分布短節巻銅巻線を採用した[2]。上記回転機の液体窒素浸漬冷却運転時 (温度: 77 K) の同期最大出力は 1.5 kW である。解析は、Matlab<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup>を利用して行った。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、2 次側 HTS かご形巻線の起磁力依存非線形抵抗の計算に際しては、べき乗式 (所謂  $n$  値モデル;  $n=23.08$ ) を利用し、かつ銀シース材への電流分流の効果も考慮して解析コードを開発した。さらには、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。図 1 には、適用した電圧 ( $V$ ) - 電流 ( $I$ ) 特性の模式図を示す。

## 3. 結果と考察

開発した解析コードを適用して、定常状態における HTS-ISM の無負荷特性や負荷特性を計算した結果、実験結果を良く再現できており、解析コードの妥当性が検証された[2]。そこで、上記コードを適用して負荷時の回転安定性を解析した。要求負荷 10 Nm の条件において、200 V (60 Hz) の電圧を直入し、回転数 ( $N$ )、トルク ( $\tau$ )、およびかご形 HTS 巻線発生抵抗 ( $R_r$ ) の時間変化を解析した。まず、ハンダ接続抵抗 (一定値; 図 1 の(a)) のみを導入した解析結果 (図 2) では、トルクが激しく振動して不安定となり、同期回転は確立しない。一方、上記に HTS 線材の起磁力依存非線形抵抗 ((図 1 の(a)+(b)) を考慮した場合の結果を図 3 に示す。同図から明らかなように、かご形巻線に大きな瞬時抵抗 ( $R_r$ ) が発生し、自律安定回転が可能である。具体的制御法など、詳細は当日に報告する。

## 謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託事業「H21 年度省エネルギー革新技術開発事業 (第二次公募)」の一環として実施したものである。

## 参考文献

1. T. Nakamura: Superconductivity Web21, vol. 3 (2011) pp. 13-14
2. K. Matsumura, T. Nakamura, et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol. 81 (2009) p. 36

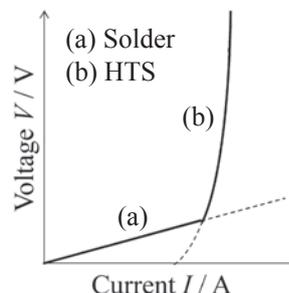


Fig. 1 Schematic diagram of voltage ( $V$ ) vs. current ( $I$ ) curves in HTS squirrel-cage windings.

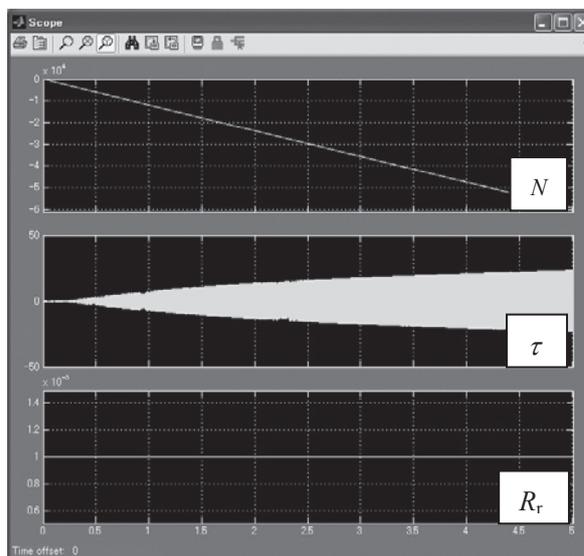


Fig. 2. Analysis results ( $R_r$  is obtained from (a) in Fig. 1).

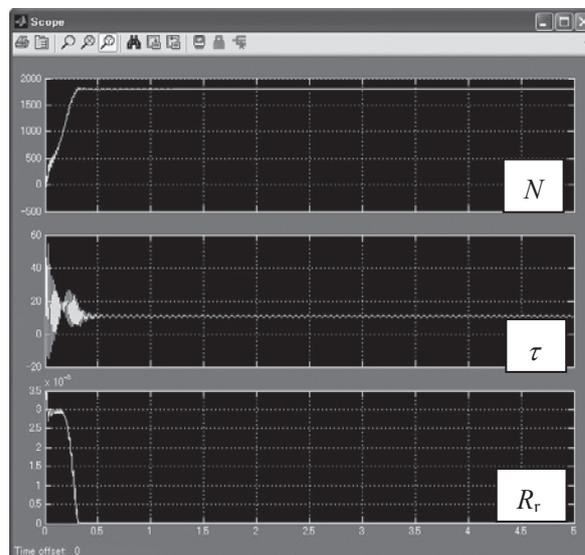


Fig. 3. Analysis results ( $R_r$  is obtained from (a)+(b) in Fig. 1).

## 20 kW 級高温超電導誘導同期機の研究開発現状

## Status of 20 kW class HTS induction/synchronous machine development

関口 大輔, 中村 武恒, 三澤 慎太郎, 川西 勇作, 北野 紘生, 松尾 哲司, 雨宮 尚之 (京大); 伊藤 佳孝, 吉川 雅章, 寺澤 俊久 (イムラ材研); 長村 光造 (応用科学研); 大橋 義正, 奥村 暢朗 (アイシン)

SEKIGUCHI Daisuke, NAKAMURA Taketsune, MISAWA Shintaro, KAWANISHI Yusaku, KITANO Hiroki, MATSUO Tetsuji, AMEMIIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); ITOH Yoshitaka, YOSHIKAWA Masaaki, TERAZAWA Toshihisa (IMRA) OSAMURA Kozo (RIAS); OHASHI Yoshimasa, OKUMURA Nobuo (AISIN)

E-mail: tk\_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

我々のグループは、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)からの委託のもと、輸送機器用高温超電導誘導同期機(High- $T_c$  Superconducting Induction-Synchronous Machine: HTS-ISM)の研究開発を行った。本研究開発では、HTS-ISMの高効率化だけでなく、ダイレクト駆動を指向した高トルク密度化の実現も重要である。高トルク密度化を実現するには、固定子が形成する回転磁界を大きくすることが有効である。そこで我々は、固定子ならびに回転子巻線を高温超電導線材で置き換えて大電流・低損失化を図ることで、高トルク密度化に挑戦している。

本講演では、全超電導 HTS-ISM 試験の前段階として、左記 HTS 固定子と同様の構成で銅固定子巻線を試作し、試験を実施したのでその結果を報告する。

## 2. モータ設計

HTS-ISM は、従来のかご型誘導機と同様の構造を有しており、固定子直径 265 mm, 軸長 200 mm である。3 相 8 極の集中巻を採用し、ロータスロット数は 34, 固定子は 24 スロットで、毎極毎相のターン数は 30 である。解析は、(株)JSOL 社製の JMAG を使用し、解析時間短縮のため、二次元軸対称モデルを考えた。固定子巻線抵抗は  $0.01 \mu \Omega$  とし、ロータバー抵抗については、収束の観点から可能な限り小さな抵抗値で検討しており、 $1 \times 10^{-10} \Omega m$  とした。Fig. 1 には、作成した解析モデル (断面図)を示す。全超電導機について、入力電圧 490 V, 固定子電流 61 A で出力 24.8 KW の解析結果が得られた。また、銅固定子巻線を用いた場合は、液体窒素冷却中での使用を考え、固定子巻線抵抗を  $0.12 \Omega$  とし、入力電圧 400 V で出力 14 KW が得られた。

## 3. モータ試作

試作機の固定子巻線は銅であるが、低抵抗化かつ大電流化を図るため、直径 0.8 mm の銅線を 2 本バンドルした導体を使用した。ロータバーには、住友電気工業 (株)製の DI-BSCCO® テープ材を 11 本束ねて用いることで、ロータバー 1 本あたりの臨界電流を 2090 A 程度にしている。なお、今回は固定子巻線が超電導線ではなく、銅であることから、作製の都合上、コイル配置が Fig.1 とは多少異なっている。

## 4. 実験結果と考察

Fig. 2 には実験系を、Fig. 3 には電流-トルク特性の実験結果をそれぞれ示す。負荷には永久磁石回転機を用い、周波数 50 Hz, 入力電圧 380 V とした。実験中、同期回転数 750 rpm を維持していた。今回の実験では、電源系の制約により、出力 7.5 KW を得るに留まった。7.5 KW 時の効率は、部分負荷時ながら、93%と高い値を示した。解析結果 14 KW と比較し、出力が低い値となっているのは、固定子巻線が実機では径方向外側に寄っており、漏れリアクタンスが高くなっていること、交流損失によりロータバーの等価抵抗が解析よりも大きくなっていることが考

えられる。この事を考慮し、モデルのコイル配置を変え、ロータバーの等価抵抗を上げると、実験結果に近い結果を得た。この解析値を Fig.3 に示す。今後、ロータバーにおける交流損失の評価を行い、固定子巻線にも超電導線材を用いた実機の試験も実施する予定である。

## 謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)の委託事業「H21 年度省エネルギー革新技術開発事業 (第二次公募)」の一環として実施したものである。

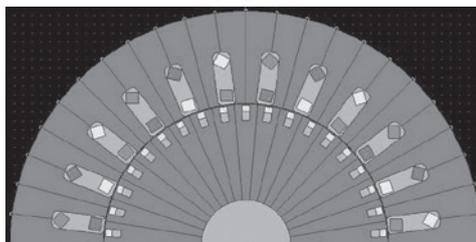


Fig. 1 Analysis model.

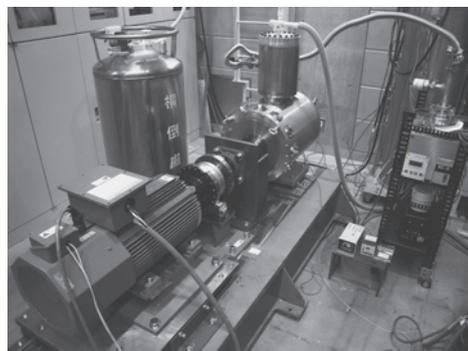


Fig. 2 Photograph of experimental system.

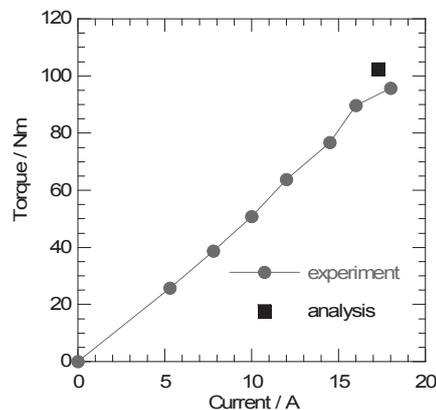


Fig. 3 Analysis and experimental results at 77 K.