7 万 kW 級超電導発電機用電機子 コイルの電氣的，機械的特性

正員 東 村 豊 (日 立)
 正員 高 橋 身 佳 (日 立)
 正員 八 木 恭 臣 (日 立)
 非会員 春 田 孝 (日 立)
 非会員 後 藤 和 夫 (日 立)
 正員 塩 原 亮 一 (Super-GM)

Electrical and Mechanical Characteristics of Armature Coil Bars for 70 MW Class Superconducting Generators

Yutaka Higashimura, Member, Miyoshi Takahashi, Member, Yasuomi Yagi, Member, Takashi Haruta, Non-member, Kazuo Gotoh, Non-member (Hitachi, Ltd.), Ryoichi Shiobara, Member (Super-GM)

This paper describes experimental results of investigations on electrical and mechanical characteristics of armature coil bars to develop the insulation and cooling structure of double transposed conductors for 70 MW class superconducting generators. Four kinds of bar strands consisted of transposed small rectangular wires with different insulation structure and short armature coil bar samples with those strands were trially produced. Electrical and mechanical characteristic tests verified that epoxy resin impregnated single fiber glass cover insulation on a polyamide-imide resin coating was most available for armature coils of air gap windings, and this structure had a sufficiently high durability for its use in 70 MW class machines.

キーワード：超電導発電機，空げき巻線固定子，電機子コイル，絶縁，空げき電機子巻線

1. ま え が き

超電導発電機は効率向上，小形軽量，送電系統の安定度向上などが期待できるため，世界的に開発が進められている。国内においても⁽¹⁾⁻⁽³⁾，昭和 63 年度から通産省ムーンライト計画で 20 万 kW 級パイロット機の設計と製作に必要な要素技術の研究開発を目的として，7 万 kW 級モデル機の基本設計と要素試作などが進められている。超電導発電機の固定子は，鉄心スロットに電機子コイルを収納する従来構造では超電導界磁巻線からの強磁界のため鉄心歯部が磁気飽和するので，一般に電機子巻線をスロットレス固定子鉄心と回転子間の空げきに直接配置する空げき巻線構造が採

用される。また，現在までに実用化されている超電導線材は交流電流用としてはまだ安定とは言えないので，ムーンライト計画で開発を進めている超電導発電機では回転子の界磁巻線のみを超電導巻線とし，電機子巻線は常電導巻線としている。

空げき巻線固定子では空げき磁束の大部分が巻線と鎖交するので，巻線導体の渦電流損および循環電流損が従来のスロット巻線より著しく増大し，また巻線に働く電磁力も数倍から 10 倍以上にも達する。従って，常電導とはいえ，空げき巻線固定子を開発するためには従来形機の技術のみでは困難で，導体損失を低減し，冷却，絶縁特性と機械的特性に優れた巻線構造とその支持方法を新たに開発していく必要がある。

表 1 7万kW級モデル機の仕様

Table 1. Specification of a 70 MW class model machine.

定格仕様		発電機体格	
容量	83 MVA	回転子外径	0.88 m
電圧	10 kV	固定子鉄心長	1.5 m
電流	4,792 A	軸受間長	4.9 m
周波数	60 Hz		
力率	0.9	固定子損失	
極数	2	銅損	415 kW
相数	3	鉄損	150 kW
回転数	3,600 rpm	漂遊損	100 kW
同期リアクタンス	0.35 pu	効率	98.84 %
定格界磁電圧	5 V		
定格界磁電流	3 kA		
最大磁束密度	4 T

図 1 7万kW級空げき巻線固定子の構成
Fig. 1. Sectional view of a 70 MW class air gap winding stator.

著者らは、4 MVA、50 MVA の超電導発電機の空げき巻線固定子を製作し、その技術開発について検討を重ねてきた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。このたび、これまでの研究成果をもとに7万kW級モデル機に採用できる巻線コイル構造の要素技術を開発できたので報告する。

2. 7万kW級超電導発電機の仕様

現在開発を進めつつある7万kW級モデル機は、20万kW級パイロット機の間径縮長のモデルである。基本設計の結果を表1と図1に示す⁽⁸⁾。電機子巻線は2層のダイヤモンド形のコイルとした。電機子巻線に鎖交する磁束密度は径方向位置で変化するが、コイル平均径位置での径方向と周方向の各成分の最大値は0.9 T、0.15 Tとなる。また発電機の端子で三相突発短絡が発生した場合の巻線電磁力は、径方向電磁力が支配的であり、その最大値は外径方向に0.36 MN/mとなる⁽⁷⁾。

3. 空げき固定子コイルの製作

今回の固定子コイルでは、2.5 mm×0.9 mmの平

表 2 細素線絶縁の種類
Table 2. Insulation of wires.

略 称	細素線絶縁仕様
A 形	ポリアミドイミド樹脂塗装
S 形	ポリイミドフィルム巻付け
AS 形	ポリアミドイミド樹脂塗装+ポリイミドフィルム巻付け
AG 形	ポリアミドイミド樹脂塗装+一重ガラス繊維巻付け

角素線（以下、細素線と略記）21本を図1のように転位したストランド（従来形機の素線に相当）を採用した⁽⁸⁾。専用の転位装置により、平角細素線を転位し、基本設計寸法以内に製作できた。このストランドを更に冷却管と共にレーベル転位して二重転位構造の導体部分を製作した。最適の細素線絶縁法を検討するため、表2のような絶縁の細素線のストランドを鉄心長の範囲内で360°転位した4種類のコイルを製作し、その特性を比較した。また、ストランドの転位角が0°、450°、540°であるコイルも製作し、最適のストランド転位角の検討もした。以下、本文では表2の略称で細素線絶縁の種類を示す。冷却管の曲げ加工は、無焼鈍冷間曲げ加工により所定の転位角に加工する方法をとった。冷却管の絶縁はしていない。エンド部の導体接続法として、全ストランドを短絡後接続片を引出し、この接続片どうしをろう付け構造にして接続する方法をとった。コイル絶縁層はマイカ絶縁層とし、真空加圧含浸法で形成した。以上の構造の採用により、先に開発した50 MVA固定子に対し導体占積率が25%高い固定子の製作見通しが得られた。

4. コイルの試験と考察

〈4・1〉 温度上昇特性 コイルの冷却は水冷方式を採用したが、熱を発生する細素線を間接的に冷却する構造であるため、温度上昇特性を十分検討しておく必要がある。この場合、導体の損失により発生する熱はほぼ冷却水により除去され、導体外周の対地絶縁層が温度分布に与える影響は少ないため、ここでは導体外周に断熱絶縁層を設けて温度上昇特性を評価した。温度は導体の軸方向中央部の表面と内部に熱電対を取付けて測定した。また、冷却水の入口、出口にも熱電対を取付け冷却水の温度上昇を測定した。なお冷却水の流量は流量計で、圧力損失は冷却水の入口と出口での圧力計の差から読取った。

通電電流に対する導体の温度上昇、すなわち銅損による導体の温度上昇の最大値を図2に示す。冷却水量は、ほぼ定格の2.6 l/minである。電流密度 δ は(通電電流)/(銅導体全断面積)を示し、温度上昇 Δt

図 2 導体の温度上昇
Fig. 2. Temperature rise of armature coil bars.

は冷却水温度を基準温度にして示している。最大温度上昇は導体断面の角部絶縁層詰物に近いストランド表面付近で生じており、3種類の導体とも同じ傾向であった。温度上昇は電流密度のほぼ2乗に比例して増大し、定格の電流密度(=7.7 A/mm²)で、A形導体で36°C、AG形導体で38.3°C、AS形導体で49°Cであり、A形導体が最も冷却特性がすぐれていた。モデル機導体の損失は、上記銅損のほかに導体自身や冷却管の渦電流損や循環電流損などの交流損失が加わる。この交流損は100 kW程度で電機子銅損の415 kWの24%程度と見込まれるので、実機適用時の温度上昇はA形導体で45°C、AG形導体で47.5°C、AS形導体で61°Cと推定される。AS形の導体の温度上昇が大きい理由は、ポリイミドフィルムと細素線絶縁間に樹脂が含浸せずボイドが生じ、導体断面の熱伝導率が低下したためと予想される。一方細素線に一重ガラス繊維を巻付けたAG形の導体では、ガラス繊維の間にまで樹脂がよく含浸し、A形導体と同等の温度上昇となると考えられる。

〈4・2〉 電気的特性 コイル製作時に角形の細素線を二重転位し、かつコイルエンドの曲げ加工を行うため、この加工に耐える細素線絶縁法が必要である。コイル完成後の細素線間絶縁破壊電圧の特性を図3に示す方法で評価した。各細素線より測定線を引出し、各細素線と他の細素線および冷却管との間に一定電圧を順に印加し、一巡すると100 Vステップで電圧を上昇し破壊電圧を求めた。測定結果は図4のように、破壊電圧はいずれも400 V以上であり、細素線間に発生する電圧(細素線を、二重転位しない場合の鎖交磁束による誘起電圧と等しいと考えてもたかだか8 V)より十分高い耐圧を有していることがわかった。

図 3 細素線間絶縁破壊電圧試験回路
Fig. 3. Test circuit for breakdown voltage between wires of coil bars.

△: いったん破壊しても400 V以上の耐圧を回復した試料
○: いったん高電圧で破壊した後は400 V以下に耐圧が低下した試料
◊: ()内に1500 Vで破壊しなかった細素線数を示す

図 4 コイルの細素線間絶縁破壊電圧
Fig. 4. Breakdown voltage between wires of coil bars.

図4において、△印はいったん破壊しても400 V以上の耐圧を回復する気中問接ぎが介在する破壊を示し、測定のためにコイルエンド部分の各細素線間の距離を広げる加工により劣化したこの部分の破壊と考えられる。○印はいったん高電圧で破壊した後は400 V以下に耐圧が低下する破壊を示し、細素線絶縁の破壊と考えられる。この○印の破壊値を比較すると、AG形以外のコイルではかなり低い値のものがあ、コイル製作時に細素線絶縁が劣化していると考えられる。一方AG形のコイルでは1500 V以上の値であり、ガラス繊維層の強度が効いて、二重転位やコイルエンドの曲げ加工による細素線絶縁の劣化はないと考えられる。対地絶縁層は従来形機と同様のマイカ絶縁層であるので、電気的な特性に関する課題は小さい。対地絶縁層のtan δの特性を図5に、絶縁破壊電圧を図6に示す。tan δの値は同様の従来形機のマイカ絶縁層に比較し若干大きな値であるが、電圧上昇によるtan δの増分が小さく、対地絶縁層は緻密に形成されていると言える。また、絶縁破壊電圧も試験電圧の2倍以上と十分に高い値を有していることを確認できた。

〈4・3〉 機械的特性 細素線絶縁は、コイルに加わる振動や応力などによる細素線相互の相対変位によ

図 5 コイルの $\tan \delta$ 電圧特性
Fig. 5. Dielectric loss tangent of coil bars
v. s. applied voltage.

図 6 コイルの絶縁破壊電圧
Fig. 6. Breakdown voltage of coil bars.

図 7 ストランドの曲げ疲労寿命
Fig. 7. Bending fatigue life characteristics
of strand.

り、劣化することが懸念される。この細素線絶縁の機械的な疲労強度を繰返し曲げ試験により評価した。供試体は、対地絶縁形成に使用したものと同一樹脂を含まれたストランドである。曲げ剛性が試験前の値の1/2に低下するまで、あるいは細素線絶縁が400Vのチェック電圧で破壊するまでの繰返し曲げ回数を測定した。測定結果を図7に示す。S形のストランドで

図 8 コイルの圧縮試験方法
Fig. 8. Test method for compressive
strength of coil bars.

○：切出し試験片の圧縮比例限界強度
●：切出し試験片の座屈強度
◎：400Vのチェック電圧で細素線間絶縁が破壊する圧縮強度（↑は未破壊を示す）

図 9 コイルの径方向圧縮強度
Fig. 9. Radial compressive strength of coil
bars.

は、数回の曲げ回数で細素線が絶縁破壊するものがあった。A形のストランドでは細素線絶縁がまず絶縁破壊したが、AS形、AG形のストランドでは、A形の細素線が絶縁破壊する回数以上で曲げ剛性が1/2に低下し、この時点でも細素線絶縁は破壊しなかった。従って、ポリアミドイミド樹脂塗膜上に形成したポリイミドフィルム層やガラス層は曲げ疲労の強度向上に大きな効果があることがわかった。A形、AS形、AG形のストランドの曲げ疲労特性は、いずれも図7のように対地絶縁層に採用したマイカ絶縁層の繰返し曲げ疲労特性より長寿命であることが確認できた。従って、対地絶縁層が破壊しないようコイル支持構造を設計していれば細素線絶縁の曲げ疲労による損傷は生じないと考えられる。

また、空けき巻線固定子においては、コイルにかかる電磁力が大きくなるのに対し、導体が細分割されて剛性が小さくなるので、三相短絡時などの圧縮力に対するコイルの圧縮強度は最も重要な特性の一つである。圧縮試験は図8(a)のような切出し試験片により

機械的強度を、図8(b)のような方法により細素線絶縁が絶縁破壊する圧縮強度を測定した。測定結果を図9に示す。図示のように細素線絶縁は、試験片が座屈する以上の圧縮力がかかっても400V以上の耐電圧性能を有していることが確認できた。また、コイルの圧縮比例限界は、三相突発短絡時の最も大きな応力である径方向の圧縮力以上であることが確認できた。

〈4・4〉 交流損失特性 二重転位した短尺導体に外部から交流磁界を印加し、細素線間およびストランド間の電流分布を測定し、適正転位角を検討した。

AS形細素線のストランドにおいて、有効長1m、幅200mmの励磁鉄心ギャップに交番磁界を発生させ、その中に供試ストランドおよびコイルを挿入し導体部に流れる電流をクランプ式電流計と、ログスキーコイルで測定した。図10に供試ストランド単位長さあたりの交流損失の測定値と計算値を示す。交流損失は磁束密度のほぼ2乗に比例して増大するが、転位を施すことにより、無転位のときの約1.3%に低減できることが示されている。なお、図10中の計算値は

$$W = \frac{\omega^2 B^2 d b^3 N}{24 \rho} \quad (\text{W/m}) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 W ：単位長さあたりの渦電流損(W/m)、 ω ：破束の角速度(rad/s)、 B ：印加磁束密度(T)、 d ：細素線の高さ方向寸法(m)、 b ：細素線の幅方向寸法(m)、 N ：細素線数、 ρ ：細素線の固有電気抵抗($\Omega \cdot \text{m}$)

によったものである。一点鎖線はストランドと同一の寸法の銅塊と想定した(以下、塊状ストランドと略記)もので、破線は2.5mm×0.9mmの絶縁された21本の銅線からなるストランドとして想定した計算値である。図によると、細素線が無転位のストランドの損失はストランドが塊状の場合に近い値を示す。すなわち、単に細素線に分割するだけでは循環電流による損失が加わるので、ストランドの交流損失を低減するためには併せて細素線間に転位を施す必要があることがわかる。細素線間を転位すると、ストランドの損失はほぼ細素線自体の高さと幅により決まる渦電流損のみに抑制されることが示されている。本試験では、励磁装置の制約から最大0.4Tまでの磁束密度を印加するにとどまったが、実機の電機子巻線位置の磁束密度はほぼ0.9Tであるので、ストランドの単位長さあたりの交流損失は10W/m程度となると推定される。

ストランドに転位を施したコイルを励磁鉄心のギャップに配置し、定格60Hzの交番磁界を印加し、各ストランドに流れる循環電流の大きさを測定した結果

図10 ストランドの交流損失
Fig. 10. AC loss of strands.

図11 ストランドに流れる循環電流
Fig. 11. Circulating current of strands.

を図11に示す。無転位の場合は各ストランドに流れる誘導電流の大きさの違いが大きく、両側端に位置するストランドへの電流集中が著しい。ストランドを転位すると誘導電流の偏りは小さくなり、ストランドを供試コイル有効長の範囲で一回転させた360°転位の導体が電流の偏りが最も少ない。以上の測定結果を基に循環電流損を無転位導体の場合に対する比で算出すると、360°、450°、540°転位では、それぞれ0.3、4、3.4%となり、導体の直線部の転位は360°が最適角度であることがわかる。なお、360°転位導体では、本試験のような平等磁界印加状態では、理想的には各ストランドの電圧がバランスして循環電流は流れないはずであるが、上述のように小さなレベルで生じているのは励磁鉄心端部のフリンジング磁束の影響によるもの

と推定される。

5. む す び

20万kW級パイロット機の設計、製作に必要な要素技術を確立するための7万kW級モデル機の仕様により角形細素線を二重転位した導体構成のコイルを製作し、その特性を評価した結果、以下のことがわかった。

(1) 細素線絶縁法として、ポリアミドイミド樹脂塗膜の上に一重ガラス繊維巻回層をエポキシ樹脂で焼付けた絶縁構成 (AG形) の特性は、コイル完成後の細素線絶縁破壊電圧が1,500V以上と高く、また曲げ疲労寿命は対地絶縁のマイカ絶縁層以上の特性を有し、かつコイルが座屈する以上の圧縮力を印加時にも400V以上の耐電圧性を有することを確認した。また、この絶縁法の細素線を用いたコイル導体の温度上昇は47.5°Cと十分低い値であることが推定された。従って、この細素線絶縁法は電氣的、機械的に十分な信頼性を有し、熱的にも良好な特性であることがわかった。

(2) 対地絶縁層は、その $\tan \delta$ 特性の電圧上昇による増分が小さく、かつ7万kW級モデル機の試験電圧の2倍以上の絶縁破壊電圧を有しており十分な性能を有することがわかった。

(3) 細素線を転位し、ストランド転位角を360°とすることで、細素線間、ストランド間の循環電流を抑制して、ストランドの交流電流損を10W/mと小さくできることを確認した。

以上の結果より7万kWモデル機のコイルの製作見通しが得られた。今後、コイル支持構造などの要素技術を開発し7万kW級モデル機固定子の開発に続けていく予定である。

なお本研究の遂行に終始御指導いただいた日立製作所日立工場 古山昌之副工場長、大井征雄部長、日立研究所 檜垣 勝博士、電力事業部 大川 令主任技師、茨城大学 高橋典義教授はじめ、コイルの製作や特性の測定に協力いただいた日立製作所日立工場 松崎俊夫氏、日立研究所 佐藤征規氏、新井啓治氏、高村誠氏ほかの方々に感謝いたします。

本研究は通商産業省工業技術院のムーンライト計画「超電導電力応用技術開発」の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構からの受託により、超電導発電機関連機器・材料技術研究組合 (Super-GM) の研究テーマとして実施したものである。

(平成2年8月23日受付)

文 献

- (1) S. L. Singh & C. J. Mole: "Future Development of Large Superconducting Generator", *IEEE Trans. Magnetics*, **MG-25**, 1783 (1989)
- (2) J. L. Smith, Jr.: "Overview of the Development of Superconducting Synchronous Generators", *IEEE Trans. Magnetics*, **MG-19**, 522 (1983)
- (3) Y. Rybin, I. Filippov, G. Kchutoretzky, Y. Tjurin, V. Varshavsky & S. Stefanovich: "Prior Tests of Superconducting Turbogenerator CTG-300", 11th International Conference on Magnet Technology MF-10, 28 August-1 September 1989 Tsukuba, Japan
- (4) M. Watanabe, M. Takahashi, N. Takahashi & T. Tsukui: "Experimental Study of a Practical Air Gap Winding Stator Arrangement for Large Turbine Generator", *IEEE Trans. Power Apparatus Systems*, **PAS-100**, 1901 (1981)
- (5) M. Takahashi, M. Watanabe, N. Takahashi, M. Kitamura, N. Maki & M. Ooi: "Performance Evaluation of 50 MVA Air Gap Winding Stator for Superconducting Generator", *IEEE Trans. Energy Conversion*, **4**, 264 (1989)
- (6) 高橋・渡部・高橋・東村・北村・田中: 「50 MVA 超電導発電機用空けき巻線固定子の試作」, 電学論 B, **103**, 880 (昭59-12)
- (7) 高橋・荒川・東村・八木・春田: 「70 MW 級超電導発電機の固定子基本設計」, 平2 電気学会全大, No. 879
- (8) 東村・高村・藤岡・高橋・八木・春田・後藤: 「70 MW 級超電導発電機固定子コイルの絶縁特性」, 平2 電気学会全大, No. 324

東 村 豊 (正員)

昭和21年9月5日生。45年3月京都工芸繊維大学卒業。同年4月(株)日立製作所に入社。以来、同社日立研究所において電力機器絶縁の研究開発に従事。現在、同所主任研究員。

高 橋 身 佳 (正員)

昭和24年5月11日生。47年3月秋田大学卒業。同年4月(株)日立製作所に入社。以来、同社日立研究所において回転電機の磁界、冷却、損失などの解析の研究開発に従事。現在、同所主任研究員。

八 木 恭 臣 (正員)

昭和29年5月10日生。54年3月東京大学修士課程修了。同年4月(株)日立製作所に入社。以来、同社日立工場において超電導磁石、核融合装置、タービン発電機、超電導発電機の設計、開発に従事。この間、60年1月～12月アメリカ・ミシガン大学にて修士課程修了。現在、同工場主任技師。

春 田 孝 (非会員)

昭和19年4月20日生。38年3月鹿児島工業高校卒業。同年4月(株)日立製作所に入社。以来、同社日立工場において回転電機コイルの設計、開発に従事。

後 藤 和 夫 (非会員)

昭和21年10月6日生。44年3月慶応義塾大学応用化学科卒業。同年4月(株)日立製作所に入社。同社日立研究所を経て、現在、同社日立工場にて大型電気機器の生産技術開発に従事。現在、同工場主任技師。

塩 原 亮 一 (正員)

昭和32年6月5日生。55年3月東京工業大学卒業。同年4月(株)日立製作所に入社。以来同社日立工場においてタービン発電機、超電導発電機の設計、開発に従事。この間、63年7月～平成元年7月MITに留学。平成元年12月より超電導発電関連機器・材料技術研究組合(Super-GM)にて7万kW級超電導発電機の研究開発の推進に従事。