超電導発電機用界磁巻線のテストコード

池野 義光, 上田 隆右, 大西 利只*

超電導発電機関連機器・材料技術研究組合 大阪市北区西天満 5-14-10 梅田 NU ビル

* 工業技術院電子技術総合研究所 つくば市梅園 1-1-4

(1993 年 11 月 25 日受理)

Test Codes for Field Windings of Superconducting Generator

Yoshimitsu IKENO, Takasuke AGETA and Toshitada ONISHI*

Engineering Research Association for Superconductive Generation Equipment and
Materials, 5-14-10, Nishitenma, Kita-ku, Osaka 530

* Electrotechnical Laboratory, AIST, 1-1-4 Umezono, Tsukuba 305

(Received November 25, 1993)

Synopsis :

The preparation of superconducting generator has been in steady progress, the construction of 70 MW model machine has been carried on as planned in the NEW SUNSHINE PROJECT. The R&D of NbTi field windings is the key technology, and the test codes has been developed. It is necessary to standardize the evaluation of superconductors used in generators. The test codes of NbTi superconductors has been considered. The following test codes have been developed to standardize the test methods; (1) pretreatment of sample, (2) form of sample, (3) test conditions, (4) test method, and (5) analyzation of test results. This paper will show an outline of the test codes and several analyzed results in 70 MW generator.

Keywords : test method, generator, field winding, NbTi superconductor, cyclic fatigue test

1. はじめに

通商産業省工業技術院のニューサンシャイン計画「超電導電力応用技術開発」の一環として、超電導発電機を中心に線材(金属系, 酸化物系), 冷凍システム, トータルシステム等の研究開発が行われている。このプロジェクトは, 1988 年より 1998 年の期間で, SuperGM が新エネルギー・産業技術開発機構 (NEDO) より受託し, 超電導発電機と各種関連機器・材料に関する要素技術の研究開発として, モデル機の設計, 試作・研究, 運転研究を行い, 超電導発電機の実用化技術の確立を目的としている。電力, 重電, 線材, 冷凍機等のメーカー 14 社と 2 財団法人が参加し持ち帰り研究を実施中である。

特に超電導発電機用界磁巻線は, 本プロジェクトの主要な研究開発課題で, 重電および線材メーカーが協

調して, より高特性を目指し研究開発を行ってきた。導体開発にあたり, 試験方法は ASTM 等で決められた試験法の他に発電機用導体特有の要求仕様に対応した各種項目を客観的・定量的に測定するため, 国研, 大学, 重電, 線材の各メンバーの総意をまとめ, 用語および試験法を標準化して発電機用 NbTi 導体のテストコードを作成した。

また, 界磁巻線に遠心力, 電磁力が加わった状態を模擬して, 大電流量導体に機械的応力を印加した状態で超電導特性を測定できる装置の開発により, 効率的に研究を進め, 発電機用 NbTi 導体の開発をほぼ終了した。

本文は発電機用導体の開発経緯を含めテストコードを中心に述べる。

Table 2 Configuration of superconductors for 70 MW class model machine.

	Slow response excitation		Quick response excite
	high stability type	high J_c type	low AC loss type
Strand superconductor		NbTi	
filament diameter (μm)	2	9	3
matrix		Cu/Ni	
twist pitch (mm)	4	16	5
diameter (mm)	0.4	1.6	0.5
Sub cable	12 strands Al		11 strands
Conductor			
configuration	6 strands	9 strands	7 strands
critical current	8,500 A (4 T)	10,500 A (5 T)	15,800 A (5 T)
field current (A)	3,000		3,200 A
current density (A/mm^2)			
Cross section of conductor

Fig.2 Role distribution in superconductor tests.

2. 発電機用界磁巻線の要求仕様と設計

超電導発電機は、界磁巻線に超電導線を用いるので現用機に比較し、

- (1) 発電効率の向上
- (2) 発電機本体の小型、軽量化
- (3) 電力系統安定度の向上

などのメリットを持っている。しかし、超電導界磁巻線の要求仕様には、遠心力および電磁力の複合した条

件下で使用されること、系統事故時の電流変化にともない交流損失が発生するなど、これまでの静止機器用超電導体に比べ過酷な条件に耐えることが要求される。

界磁電流の変動が生じる要因として、常時では系統電圧制御や不平衡負荷運転および系統並入などの微小擾乱、異常時では発電機負荷の遮断、送電線故障一除去一再閉路、発電機端子突発短絡、位相角 30 度以上の強制並列等、Table 1 に示す運転条件が抽出され

Fig. 3 The cyclic fatigue test machine.

る。また界磁電流の変動量は、ダンパの設計によっても変わるが、現状設計での試算値の最大値を示した。なお、解析には発電機の低温と常温の2層のダンパを考慮した Park モデルによりシミュレーションした。このように電流や電磁力の変動量をベースに界磁巻線用導体に対する要求性能が導出される。

導体設計のフロー図を Fig. 1 に示す。素線設計は発電機の設計条件および設計基準をもとに、素線構成、撚線構成、絶縁設計、交流損失などを考慮する必要がある。これらの設計基準をもとに Table 2 に示すとおり、低速応型機用導体として各系統擾乱に対し発電機が極力クエンチしないように、高純度アルミニウムを安定化材に用い温度上昇を抑制した高安定化型、発電機の小型化、低リアクタンス化を目的にコンパクトな導体とした高電流密度型、超速応型機用導体は系統擾乱時に生じる交流損失を大幅に低減した低損失型の3種類の導体が設計された。

3. 界磁巻線用導体の開発課題と試験項目

発電機用界磁巻線導体は 5 T で 10 kA 級の大容量導体で、その性能は最終的には 70 MW モデル機で検証されるが、開発レベルに応じ、素線、撚線、フル導体で特性を把握する必要がある。Fig. 2 に界磁巻線の性能を把握するための、試験レベル、試験内容を示した。ショートサンプルでの、基本特性である臨界電流などの単一特性と回転機で使用される場合に必要な遠心力、電磁力などの応力下での超電導特性を表わす複合特性、そして、長尺サンプルでの、実際の巻線を模擬した回転コイルなどの特性に分類される。各試験は

Table 3 Test items of superconductor for field winding.

Classifications	Test item
Simple property	geometrical dimensions
	properties
	resistivity (RRR)
	electrical strand critical current
	properties conductor critical current
Complex property	AC loss
	mechanical tensile property
	properties compressive property
	resistivity under strain
	stability
	rigidity
	critical current under strain
	AC loss under strain
	quench current
	withstand voltage

重電・線材メーカー各社で分担して行った。

また遠心力、電磁力を模擬するため、機械的応力を与えながら超電導特性（臨界電流、交流損失）を測定できる応力下超電導導体試験装置¹⁾ (Fig. 3) を開発し、担当各社での個々の測定だけでなく、共通試験装置の意味でも使用した。

発電機用界磁巻線の開発課題を検証するために必要と考えられる試験項目を Table 3 に示す。各々の試験は各メーカーが分担して行うため、この試験項目の中で最低限おさえておくべき項目に関して、試験方法、結果の求め方などを統一した。

4. テストコードの目的

Table 3 の試験項目には ASTM スタンダードが適用できる項目も一部ある。ASTM スタンダードは、現状では 600 アンペア以下の臨界電流測定を規定した特性試験法²⁾ および超電導関連用語³⁾ の定義が決められている。また、研究開発中の各種機器に限定した試験法(例えば加速器用マグネットの線材、導体の ICFA スタンダード⁴⁾ など)も提案されている。

しかし、これらは限定された条件での測定法であり、一般的に適用できる訳ではない。また、発電機用界磁巻線としての特殊な要求特性もあるため、開発に必要な用語、試験項目、試験方法、試験結果の求め方などについて規定した超電導発電機用 NbTi 線材テ

Table 4 I_c measurement method of NbTi field winding conductor.

Specimen	Strand, stranded wire and restored strand	Conductor
Precision and accuracy	field accuracy $\leq \pm 1\%$	$\leftarrow$
	uniformity $\leq \pm 1\%$	$\leftarrow$
	current source precision $\leq \pm 0.5\%$	$\leq \pm 1\%$
	percent ripple $\leq \pm 0.1\%$	$\leq \pm 0.5\%$
Mandrel material	fiberglass-epoxy (equivalent to G-10)	$\leftarrow$
	solenoidal winding on mandrel	mandel dia $\geq 20 \times$ specimen thickness
Angle between specimen axis & field	$90 \pm 6^\circ$	$\leftarrow$
Lorentz force	inward	$\leftarrow$
Terminology	Pb40-Sn60 solder	$\leftarrow$
	soldered part $\geq 2 \times L_p$ (L_p : stranded pitch)	$\leftarrow$
	soldering temperature $\leq 250^\circ\text{C}$	$\leftarrow$
	V-I tap distance $\geq 10\text{ mm}$	$\leftarrow$
	V-V tap separation $\geq 1 \times L_p$ (non-insulated strand) $\geq 4 \times L_p$ (insulated strands)	$\leftarrow$
I_c criteria	ρ ; $10^{-13} \Omega\text{m}$ [stranded wire]	ρ ; $10^{-13} \Omega\text{m}$
	ρ ; $10^{-14} \Omega\text{m}$ [strand]	self-field correction
Temperature correction	estimate a value at 4.22 K by correcting result	$\leftarrow$
Report	absolute pressure or specimen temperature	$\leftarrow$
	specimen length, V-V tap and V-I tap distance	$\leftarrow$

ストコードを作成した。作成された試験項目は超電導の基本的な特性として必要な幾何学的特性（構造、寸法）、電磁気的特性（臨界電流、残留抵抗比、交流損失）、機械的特性（引張強度、圧縮剛性）などの単一特性試験と界磁巻線に必要な応力下での臨界電流・交流損失、残留抵抗などの複合特性試験の、13の項目にわたる。

5. 単一特性試験に関するテストコード

超電導の基本特性を測定するための試験方法を表わす。

5.1 超電導線の外観試験および構造試験

超電導線の構造や形態、寸法に関連した試験方法を規定している。試験サンプルは、作製導体が平角成形撚線構造であることから成形加工の特殊性および撚りピッチを考慮して両端各 400 mm 長さをサンプリングする。素線外径、一次撚線、導体の外接寸法を測定する。

また導体の寸法は巻線時の張力または圧縮力に相当する荷重を加え長手方向に 2 箇所以上測定し、それぞれの平均値とする。導体断面積については、厚さおよ

び幅の測定値から求める。

5.2 超電導線の抵抗—温度特性試験

残留抵抗比の測定方法について規定している。試験サンプル長は 100 mm 以上とし、直流 4 端子法により常温および臨界温度 T_c の直上 (10 K 近傍) の電気抵抗を測定する。常温での測定値を 300 K に換算する時の Cu, Al の定質量温度係数 $\alpha(\text{K}^{-1})$ は、それぞれ 0.0039, 0.0040 とする。 T_c 直上 (10 K 近傍) の抵抗値を残留抵抗値とし、単位は Ωm^{-1} とする。参考値として安定化材の RRR (Residual Resistance Ratio) を 300 K および T_c 直上の抵抗値から求める。また、安定化材の磁気抵抗効果を測定する必要がある時は、磁界均一度を考慮し、試料は外部磁界方向に対し $90^\circ \pm 6^\circ$ 以内とする。

5.3 NbTi 極細多芯超電導線の I_c -B(J_c -B) 試験

試験サンプルをホルダーにソレノイド巻し、印加磁界中で 4 端子法により電流—電圧特性を X-Y レコーダ等で記録する。カレント・トランスファ電圧が発生した場合にはこれを差し引く。Table 4 には、素線、撚線および導体の試験条件、結果の求め方をまとめて示す。試験条件として、測定装置の磁界の精度お

Fig. 4 Determination of critical current after self field correction.

よび均一度、電源の電流精度、リップル率、サンプルホルダーの材質は素線、導体共通であるが、導体では大電流のため自己磁界補正を行う。

またいずれの場合も測定時のヘリウム蒸気圧を測定し、 ^4He 蒸気圧暫定温度目盛 (EPT-76) を用いて測定温度を求め、4.22 K の標準大気圧に換算した値を臨界電流とする。(付録 1 参照)

導体の自己磁界補正については、外部磁界と自己磁界の和で表わされる最大値を用い、自己磁界はソレノイドコイルとして数値計算により求める。等価試験サンプル長さは、導体長さの $1/8$ と仮定して求める。

(導体の最大磁界を経験する領域は、平角燃線のため全素線の $1/2$ 領域、導体の高さ方向も $1/2$ の領域、また素線断面の超電導フィラメントも片側の表面に近い部分 $1/2$ としてその積 $1/8$ と仮定。) このため、Fig. 4 に示すように、 I - V 測定チャートから I_{c2} を求め、 I_{c2} を導体の臨界電流と定義する。

5.4 超電導線の引張試験

金属材料の引張試験方法 (JIS Z2241) に準じた超電導素線の引張試験について規定している。一次燃線、導体の引張試験は参考値とする。試験機は JIS B 7721 (引張試験機) を用いる。歪み速度は $1 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ とする。

試験温度は $5 \sim 35^\circ\text{C}$ (常温), $77 \text{ K} \pm 2 \text{ K}$ (液体窒素温度), $4.2 \text{ K} \pm 0.5 \text{ K}$ (液体ヘリウム温度) の範囲とし、耐力、引張強さ、縦弾性係数、破断伸びの求め方は JIS Z2241 と同様とする。

5.5 超電導線の圧縮剛性試験

導体の剛性評価を目的とした試験方法を規定してい

Fig. 5 Schematic view of sample holder for stability test.

る。試験は、導体サンプルを複数枚積層し、常温 (必要であれば、液体窒素温度) で、最大荷重を設計荷重の 1.5 倍とし、 0 から最大荷重まで 3 サイクル印加した後、時間に対し積層導体の厚さの変化が安定するまで最大荷重を保持する。圧縮剛性は荷重-変位曲線がほぼ一定となる 3 サイクル目の荷重-変位曲線の設計荷重での傾きから求める。

圧縮弾性係数は圧縮応力 (圧縮荷重を圧縮断面積で除した値) 一歪 (圧縮荷重下の変位を初期高さで除した値) 曲線を直線近似し、その傾きで表される。ここで、初期高さは成形燃線であることを考慮して、 1 MPa に相当する荷重を加えたときの値とする。

Fig. 6 Evaluation of quench energy.

5.6 超電導線の安定性試験

導体サンプルにヒーターを巻き付け (Fig. 5), 実機の巻線と同様なロードライン上のバイアス磁界を印加し, 臨界温度マージンがゼロ (臨界電流) からマージン $0.1 \sim 0.5$ K の範囲で常電導状態への転移に要するヒーターパワーを測定する。ヒーター加熱時間は 60 Hz の 4 サイクルに相当する 0.07 秒とし, 電圧端子間に $10 \mu\text{V}$ 以上の電圧が継続する場合をクエンチとみなす。

Fig. 6 の特性カーブで, 導体の交流損失から算出される温度上昇分に相当するクエンチエネルギー $W1$ を $W2$ から差し引き, その値 $W3$ を過渡状態でのクエンチエネルギーとする。

5.7 モデルコイルの安定性試験

モデルコイルの巻線内に 2ヶ所ヒーターを巻き付け前項と同様な試験を行う。またクエンチ伝播についても観察する。

5.8 超電導線の交流損失試験

各モデル機の運転条件に合わせた交流損失測定における試験装置, 試験方法, 試験結果のまとめ方について規定している。(磁化法, 蒸発法については後述 6.4 の項を参照)

6. 複合特性試験に関係するテストコード

単一特性試験に機械的応力などの要因が加えられた状態での超電導特性を試験することを特徴としており, 特にこの導体開発のために開発した応力下超電導体試験装置の試験を対象としている。

6.1 超電導線の抵抗—温度—歪試験

サンプルを引張試験機などで一定応力を加えた状態

で 5.2 と同様の試験を行う。

6.2 超電導線の I_c -B-歪 (J_c -B-歪) 試験

装置, 試験条件などは全て 5.3 の I_c -B 測定と同様とし, 試験サンプルに曲げ歪, 引張歪, 圧縮歪のいずれかの方法で歪を加える。

6.3 超電導線の圧縮応力下 I_c -B (J_c -B) 試験

応力下超電導体試験装置により, 繰返し圧縮応力下での I_c -B 特性を測定する。界磁巻線のスロットに巻かれる方向に合わせサンプルを FRP ホルダーに巻込む。導体に外部磁界および圧縮応力を加え臨界電流を測定する。測定条件は導体の I_c -B 試験に準じる。

6.4 超電導線の圧縮応力下交流損失試験

応力下導体試験装置を用い, 導体の繰返し応力下での交流損失を測定する。試験サンプルは試験片の反磁場係数による誤差を小さくするため, 数十メートル長さの試料を FRP ボビンに密巻した単層ソレノイドコイルとする。巻線方向 (フラットワイズ巻, あるいはエッジワイズ巻) はモデル機の界磁巻線と同方向とし, 遠心力, 電磁力が作用する応力が模擬できるようにする。

サンプルに油圧試験機で応力を一定値まで加えた後, 直流コイルにより外部磁場を印加する。つぎにサンプルに一定電流を通電後, 交流コイルを所定の条件で一定時間運転する。結果のまとめ方は磁化法では, パルス磁界により 1 周期の磁界振幅を与え, サンプルから発生する磁化信号をピックアップコイルで検出し, 磁化曲線の面積を算出する。ヒステリシス損 Q_h は周波数依存性の結果から周波数をゼロに外挿したときの値とする。蒸発法では, 無通電状態の自然侵入熱および通電時のリード線のジュール熱を交流運転時の発生

熱から差し引き、交流損失を求める。

参考として有効フィラメント径、幾何学的フィラメント径、実効比抵抗、渦電流損失を式により計算で求める。(付録2参照)

7. おわりに

超電導発電機用界磁巻線の開発に必要な主な試験項目について関連用語、試験方法、試験結果の整理などについてまとめ、テストコードを作成した。本テストコードをもとに、発電機用 NbTi 導体は、年度毎に開発仕様をレベルアップすると共に応力下特性測定装置を活用し、要求仕様を十分に満足することを確認して高特性の導体開発を終了した⁵⁾。現在、導体は 70 MW モデル機ローターへの巻線が行われており、今後は工場、現地における実証試験を行い、モデル機の信頼性を検証する予定である⁶⁾。

これまで述べてきた試験方法などのテストコードは超電導特性試験法の限定された範囲ではあるが、現在行われつつある JIS や IEC 規格等の参考になれば幸いである。

なお、本テストコードの作成に携わっていただいた Super-GM、超電導材料分科会の大学、国立研究所、重電、線材メーカーの委員各位に心より感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 秋田 調ら：電気学会静止器・回転機合同研究会資料 SA-92-77, RM-92-140 (1992) 1
- 2) ASTM Standards: B 714-82
- 3) ASTM Standards: B 713-82
- 4) ICFA Standard for Superconducting Wire and Cable of Accelerator Magnets, June 1992
- 5) 小川哲次ら：電気学会静止器・回転機合同研究会資料 SA-92-76, RM-92-139 (1992) 123
- 6) 小川哲次ら：電気学会静止器・回転機合同研究会資料 SA-92-75, RM-92-138 (1992) 113

付 録 1

臨界電流の温度補正

磁界 B は 4~7.5 T, 温度 T は 4.22 K ± 1 K の範囲で適用

$$I_c(B, 4.22 K)$$

$$= I_c(B, T) / (1 - ((T - 4.22) / (T_c(B) - 4.22)))$$

ここで、 $T_c(B) = 9.3 \sqrt{(1 - B/14.5)}$

B: 試験磁界 (T)

T: 試験温度 (K)

$I_c(B, T)$: B テスラ, T ケルビンでの I_c

を表す。

付 録 2

有効フィラメント径の算出

$$Q_h(\text{ヒステリシス損失}) = (8/3\pi) d_{\text{eff}} J_c(B) B_m$$

B_m : 変動磁界の振幅 (T)

において、 $J_c = J_{c0} B_0 / (B + B_0)$ とおくと B_1 から B_2 まで振幅した場合、積分して $Q_h = 8/3\pi d_{\text{eff}} J_{c0} \ln((B_2 + B_0)/(B_1 + B_0))$ を得る。これより有効フィラメント径 d_{eff} を算出する。

幾何学的フィラメント径の算出

試料の重量 (A) とフィラメントのみの重量 (B) を測定し、

N (マトリクス比)

$= \text{フィラメントの比重} \times (A - B) / \text{マトリクスの比重} \times B$

を算出する。つぎに次式を用いて、幾何学的フィラメント径 d を算出する。

$$(D/2)^2 \pi (1/(N+1)) = n(d/2)^2 \pi$$

ここで、 D : 線径

n : フィラメント本数

を表す。

実効比抵抗の算出

Q_{c+e} (総合損失 + 渦電流損失)

$$= B^2 / \rho_{\text{eff}} (l_p / 2\pi)^2 \text{ より実効比抵抗 } \rho_{\text{eff}} \text{ を算出する。}$$

ここで、 l_p : ツイストピッチを表す。

渦電流損失の算出

線材の長さ方向に直角方向から磁界を受ける場合、渦電流損失 $Pe (W m^{-1})$ は、

$$Pe = (1/12\rho) \eta \dot{B}^2 a^2 b \text{ で与えられる。ここで、}$$

ρ : 安定化材の比抵抗 (Ωm)

$\dot{B}$: 磁界の時間変化率 (T_{sec}^{-1})

a : 安定化材断面の磁界に垂直な辺の長さ (m)

b : 安定化材断面の磁界に平行な辺の長さ (m)

η : 補正係数

を表す。