高安定低速応超電導発電機の開発 — 70 MW 級超電導発電機 —

八坂 保弘[†], 山口 潔, 塩原 亮一, 高橋 身佳, 大石 郁夫^{*}

(株)日立製作所 日立市幸町 3-1-1 ([†]E-mail: yasuihiro_yasaka@pis.hitachi.co.jp)

^{*} Super-GM 大阪市北区西天満 5-14-10

(2000 年 12 月 22 日受理)

Development of a Superconducting Generator Having Highly Stabilized Superconducting Field Winding — 70 MW Class Superconducting Generator —

Yasuhiro YASAKA, Kiyoshi YAMAGUCHI, Ryoichi SHIOBARA, Miyoshi TAKAHASHI and Ikuo OISHI^{*}

Hitachi, Ltd., 3-1-1 Saiwai-cho, Hitachi 317-8511

^{*} Super-GM, 5-14-10 Nishitenma, Kita-ku, Osaka 530-0047

(Received December 22, 2000)

Synopsis: Since 1988, the development of a practical superconducting generator has been carried out in Japan. The authors have developed a rotor with a highly stabilized superconducting field winding and a stator with an air gap winding composed of double transposed copper coils. A series of tests were completed at the end of 1997. The output of 78.8 MW was recorded, which was the highest value obtained worldwide. The development of the generator and the test results are described.

Keywords: superconducting generator, superconductivity, superconducting field winding, air gap armature winding, load tests

1. はじめに

通産省一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」で昭和 63 年に始められた実用超電導発電機の開発¹⁾の中で 70 MW 級超電導発電機の回転子ならびに固定子の開発²⁾を行った。この開発において高安定低速応型の回転子と 3 種類の回転子に共通して用いられる固定子の開発・製作ならびに試験を行ったので、それらについて解説を行う。

2. 空隙電機子巻線電機子

超電導発電機の固定子の主要部分は空隙電機子巻線とそれを支える非磁性・非導電性のティースである。これらについて概説する。

Fig.1 に 70 MW 級超電導発電機固定子の断面を示す。超電導発電機では電機子巻線部に鉄ティースを持たない空隙電機子巻線を採用した。このため電機子导体には界磁磁束ならびに自らが作る磁界が直接印加される。開発した 2 重転位電機子巻線导体を Fig. 2 に示す。交流損失低減のため、絶縁された銅の細素線を 2.5 mm × 0.9 mm と細線化し、これらを 21 本転位・絶縁して 1 重転位导体を構成した。この 14 本を水冷用 SUS パイプと共にさらに転位し、外部絶縁を施して最終导体とした。导体については絶縁試験を行って現用機並みの誘電特性と課電劣化特性を得て 30 年以上の寿命を有することを確認した。また、通電試験等を行い 5,000 A 級の通電容量と渦電流損失が十分に小さいことを確認した。

電機子巻線部は、空隙巻線構造のため電磁力は直接

Fig. 1 Cross-section of a stator of a 70 MW
superconducting generator.

導体に作用し、導体は十分な絶縁と共に電磁力に対する支持固定がされる。そこで、非金属・非磁性であるガラス系 FRP を選定し、FRP ティースの最適形状に関する数値解析などにより複合方式の形状を決定した。Fig. 3 に FRP ティースを示す。導体とティースについては各種モデル試験を実施して振動、疲労特性などを確認し巻線支持法の適用性を確認した。

その他の部分についても各種モデル試験を実施して考案した形状・構成・材料その他の適用性を確認した後、固定子を製作した。

Fig. 4 に 70 MW 級モデル機固定子の概観を示す。

3. 高安定低速応型回転子

開発を担当した回転子は以下の特徴を持つ。

- (1) 高安定型の界磁巻線
- (2) 単層常温ダンパ
- (3) 二重軸受方式による熱収縮機構

Fig. 3 Glass-fiber reinforced teeth.

(b) cross-sectional photograph

Fig. 2 Double-transposed armature conductor.

Fig. 4 Completed stator of a 70 MW machine.

Fig. 5 Cross-section of rotor having highly stabilized field winding.

(4) 三層低温ダンパ

回転子の基本設計においてこれらの特徴を含み、FS概念設計による 200 MW 級機の回転子を実効長で 1/3 に縮長して、体格、電気定数、寸法等の基本設計を行った。その結果を Table 1 に示す。Fig.5 には回転子の断面構造を示す。

この回転子と先の固定子とを組み合わせた発電機では容量 83 MVA、端子電圧 10 kV、電機子電流 4,792 A、力率 0.9、回転数 3,600 rpm である。

界磁巻線には、高安定化を図るため安定化材の一部に高純度 Al を使用した超電導導体を採用した。低温ダンパ材には HIP(Hot Isostatic Pressing) による SUS-Cu-SUS 三層構造を採用し、単層 (Ni-Al-Cu) 常温ダンパ共に二重ダンパ構造として、外部変動磁場に対して所定の減衰効果を発揮する構造となっている。

Table 1 Specifications and dimensions of a 70 MW class superconducting generator.

Item		Spec.
Rating	(MVA)	83
Voltage	(kV)	10
Current	(A)	4,792
Power factor		0.9
Number of poles		2
Speed	(rpm)	3600
Synchronous reactance	(pu)	0.35
Field current	(rating/max. A)	3,000/3,600
Sweep rate of field current	(A/s)	300
Rotor diameter	(mm)	880

熱収縮吸収機構としては大容量機への拡張性を考慮し、二重軸受方式を採用した。

3.1 界磁巻線

界磁巻線には高安定化のため NbTi 超電導体を用い高純度 Al を (99.999%) その安定化材の一部に有する多重撚線導体を用いた。導体および界磁巻線の安定性設計は、回転場でのヘリウム熱伝達の測定結果を反映して、定格 3,600 rpm 時のヘリウム中の熱流束向上 (静止場と比較して 10 倍) を考慮し、マドック理論に基づき実施した。理論計算の結果、超電導導体の残留抵抗として $12\mu\Omega/m$ が実現できれば、3,600 rpm、3,000 A において完全安定化の可能性があることがわかった。超電導導体に関する要素技術開発の結果、以上に示した要求仕様を満足する導体を開発し、さらに発電機寿命期間に相当する繰返し応力印加試験での特性劣化のないことを確認した。開発した超電導導体を Fig. 6 に示す。

Fig. 6 Superconductor of field winding.

Fig. 7 Field winding support shaft in machining.

3.2 構造材およびダンパ

巻線取付軸には、常温および極低温下で強度と靱性が仕様を満足する高強度で非磁性の A286 を採用した。時効熱処理後の難切削性を考慮して軸材は固溶化状態で粗加工し、時効熱処理後に仕上げ加工を行った。その 0.2% 耐力は、常温でおよそ 750 MPa、4 K で約 920 MPa を得ることできた。三次元的な複雑形状のスロット溝加工には NC 制御の加工機を用いた。Fig. 7 に最終機械加工中の巻線取付軸を示す。

ヘリウムベッセルについても高速心力や压力容器としての強度を確保するため A286 材を用いた。

ダンパについては、常温ダンパと低温ダンパにより低周波領域（～0.1 Hz）での磁束透過性と 60 ならびに 120 Hz 近傍での変動磁束遮蔽のため二重ダンパ方式を採用した。常温ダンパ材として、高周波磁束遮蔽に優れた単層構造の NiCuAl 合金を開発した。機械特性として 760 MPa の 0.2% 耐力を得、電気抵抗率として $50 \mu \Omega \cdot \text{cm}$ を得ることができた。

低温ダンパには HIP により高純度の Cu を高強度の SUS で内外周面から異種金属間の完全な接合を行って、低周波磁束遮蔽に優れた三層構造材を開発した。

3.3 熱収縮機構

二重軸受型回転子の熱収縮吸収機構はその名のとおり、反駆動側において常温ダンパとトルクチューブが別々の軸受で支持されて互いに締結されない 2 重軸受方式を採用した。工場試験および実証試験において、常温ならびに極低温での振動試験の結果、各軸受部ならびに HTC 部の軸振動はいずれも管理値以下となった。工場試験結果を反映しての低温バランス法（反駆動側の低温部ロータ端部にバランス面を設けた）により大型機への拡張性を有するものである。

Fig. 8 Structure of field winding.

3.4 界磁巻線モデルによる検証

複雑な形状の鞍型界磁巻線の設計・製作技術を開発するため、界磁巻線および巻線取付軸などを模擬して直線を短くした界磁巻線モデルを製作し、静止状態で通電試験を実施した。その結果、鞍型コイルにおいて短尺導体レベルの通電特性が得られ、採用した巻線手法、支持・冷却構造が 70 MW 級モデル機に適用できることを確認した。

4. モデル機回転子の設計と製作

以上に述べた開発要素技術を用いて、回転子の設計・製作を実施した。設計検討では界磁巻線の安定性解析、共振点を避けた内部配管およびサポート間隔の詳細設計、多チャンネル計測システムなどの設計を実施した。回転子製作では巻線軸材の機械加工の後、超電導導体を巻線軸に直接巻線した。Fig. 8 に示すように、導体絶縁を持たない超電導導体をスロット内にエッジワイズに巻線し、絶縁スペーサにより電気絶縁と冷却流路を確保すると共に遠心力に対する支持機能を持つ構造としている。

巻線終了後、4.2 K 液体ヘリウムおよび 1.8 K 飽和超流動ヘリウム冷媒中において界磁巻線の静止状態での励磁試験およびヒータ試験を実施し、超電導界磁巻線の健全性と安定性を確認した。

引き続き、低温ダンパ装着、内部配管の組立、常温ダンパの取り付けなどを行い、モデル機回転子として完成させた。Fig. 9 に完成したロータの外観を示す。

Fig. 9 Completed rotor.

5. 工場試験

完成した回転子を先に述べた固定子と組み合わせ、工場試験を実施し、電気定数、効率等の基本特性を確認した。

- 工場試験での主な試験項目とその結果を示す。
- ・ 真空試験：64 時間の排気時間で真空度 1.3×10^{-3} Torr を達成した
 - ・ 低速ターニング貯液、起動試験：貯液状態での回転子の低速ターニングの可能性を確認した。
 - ・ 熱負荷測定試験：熱負荷の回転数依存性を確認した（定格回転、無通電時の回転子単体熱負荷：53 W）。
 - ・ 界磁電流測定試験およびヒータ試験：無負荷

Table 2 Measured machine constants.

Reactance unit: pu									
	X_d	X_d'	X_d''	X_d'''	X_q	X_q'	X_q''	X_q'''	X_2
measured	0.406	0.34	0.23	0.23	0.406	*	0.193	0.187	0.07
designed	0.42	0.25	0.21	0.18	0.42	0.21	0.18	0.18	-

Time constant unit: s									
	T_d	T_d'	T_d''	T_{d0}	T_{d0}'	T_{d0}''	T_{q0}	T_{q0}'	T_a
measured	11.8	0.06	0.02	*	*	*	*	*	0.1
designed	186**	0.92	0.03	260**	1.1	0.04	1.1	0.04	0.11

* have not been measured
** If the inner resistance of the current source is taken into consideration, the measured value becomes equal to the designed value.

Fig. 10 Characteristics of no-load and three-phase short circuit.

- での 1.2 pu 電機子電圧相当の界磁電流 (2,819 A) まで界磁巻線はクエンチせず安定に通電できることを確認した。ヒータ試験による安定性試験において、界磁電流 2,783 A で 4.33 W のヒータ入熱で常電導部が停滞した。これ以下の熱擾乱に対して超電導状態を復帰し、界磁巻線は安定であることを確認した。
- ・ 励磁速応試験：1.2 pu 無負荷電圧相当、0.65 pu/s の界磁遮断試験で界磁巻線はクエンチせず、安定であることを確認した。

以上のような工場試験結果より現地実証試験に向けた基本特性を確認した。

6. 実証試験・その他

工場試験を終えた回転子と固定子は冷凍システムと組み合わせて試験センターでの現地実証試験を平成 9 年 3 月から開始し同年 12 月に終了した。

この間、超電導発電機としての基本特性を把握することともに、70 MW 級発電 (78.7 MW) や定格容量相当の進相運転能力 (82.2 MVA) を実証した。

以下、実証試験の主要な結果をまとめる。

(1) 電気基本特性および発電機主要定数

ダルトン・カメロン法、すべり法、無負荷飽和特性、三相短絡特性、三等突発短絡特性試験等を実施し発電機の諸定数を得た。

Fig.10 に無負荷特性および三相短絡特性を示す。無

負荷状態での界磁電流を 2,320 A（発電機定格電圧 10.0 kV）まで通電し、直線性の良い界磁電流－発電機電圧特性を得た。一方、定数測定のための三相短絡試験を実施し、界磁電流 942 A で発電機定格電流 4,792 A を得た。これらの結果から同期リアクタンス $X_d=0.41$ pu を得た。

Table 2 にこの発電機の定数をまとめて示す。 X_d は最新の 3 次元電磁界解析手法を用いた解析値として 0.42 pu を得、実験値とのよい一致を見た。

(2) 発電機効率

効率試験の結果、規約効率として 98.15% を得た。これらの結果を基に 200 MW パイロット機の効率を試算した結果、ステータ端部のフェーシング部での渦電流損失低減策を講ずることにより、現用機と比較して 0.6%（冷凍機動力を考慮すれば 0.5%）程度の効率向上が期待できる。

(3) 超電導界磁巻線の安定性

界磁巻線の安定性評価のため、界磁巻線部に設置した抵抗ヒータを用いヒータクエンチ試験を実施した。界磁巻線の完全安定化領域は、工場試験の約 2,700 A から実証試験時には約 2,100 A まで低下し、界磁巻線の安定性低下が観測された。また、有負荷状態で発電機電圧を 0.95 pu から 1.05 pu に上昇中に、界磁電流 2,820 A でクエンチ検出器が動作した。現地での界磁巻線の特性を Fig.11 に示す。

完全安定化領域の低下については回転子の解体調査の結果、ならびに工場および現地実証試験時の諸試験条件を総合的に考慮し、界磁巻線安定性定価の要因分析を行った。この結果、安定性低下は以下の主要因その他が複合して生じたものと考えられる。

- 1) 導体構造に起因する常電導発生時の導体内温度差の発生：FEM 解析の結果、常電導転移時に導体内で最大 5 K の温度差が発生する可能性があることが分かった。このことは等価的に導体の冷却性能ひいては安定性を低下させる。
- 2) 高遠心力下電磁力下での安定化材アルミニウムの歪み感受性に起因する比抵抗増加：極低温、回転数 3,000 rpm 以上での運転は、工場試験時約 20 回、実証試験時 40 回以上に及び、この過程で繰り返し歪を受けた。

Fig. 11 Characteristics of field winding.

7. まとめ

高安定型回転子は空隙電気巻線固定子と組み合わせて平成 9 年 12 月に現地実証試験を終了した。この間、超電導発電機による 70 MW 級発電を達成し、また、定格容量相当の進相無効電力供給能力、低同期リアクタンス等の超電導発電機のメリットを実証した。

界磁巻線の安定性向上については、高剛性化による歪低減や構造簡素化による常電導転移時の導体内温度差の低減が必要であるが、一連の要素技術やモデル機技術の開発を通じて 200 MW 級パイロット機の設計・製作技術確立の見通しを得た。

本研究は、通産省工業技術院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、新エネルギー・産業技術開発機構（NEDO）からの受託により実施したものである。

参考文献

- 1) T. Ageta: Proceeding of ICEC16/1997 899-904
- 2) K. Yamaguchi, et al.: IEEE Trans. on Applied Superconductivity 7 (1997) 527-530