

講座：超伝導技術Ⅳ

5. 超伝導応用機器

5.2 超伝導発電機

市川建美, 池田文構
(超伝導発電関連機器・材料技術研究組合)
(1994年10月20日受理)

Application of Superconducting Technologies Superconducting Generator

ICHIKAWA Tatsumi and IKEDA Bunko

*Engineering Research Association for Superconductive Generation Equipment and Materials
(Super-GM), Osaka 530, Japan.*

(Received 20 October 1994)

Abstract

The application of superconducting technologies to electric power apparatuses is greatly contribute to saving energy and resources. Superconducting generator (SCG) will be promising alternatives for improving power system stability, increasing generation efficiency, and reducing manufacturing cost with compact size. Super-GM has been conducting an 11 year project since 1988 mainly R&D on SCGs, which has been commissioned from NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization) as a part of the New Sunshine Project of AIST (Agency of Industrial Science and Technology) of MITI (the Ministry of International Trade and Industry). In this paper, the current situation of R&D on 70MW class SCGs in Super-GM is presented with emphasis on superconducting technology.

Keywords:

superconducting generator, field winding, niobium titanium superconductor, slow response excitation, quick response excitation, multicylindrical rotor, winding support shaft, torque tube, damper, air gap armature winding,

1. はじめに

超伝導技術の電力機器への応用は、機器の効率向上、大容量化、小型・軽量化などの省エネルギー、省資源ひいては地球環境への貢献が期待され

る。なかでも超伝導発電機は低リアクタンス化による電力系統安定度の向上、効率向上による運転経費の低減、小型・軽量化による製造費の削減など現用機に比べ多くの特徴があり、超伝導電力応

用機器の先導役として1970年代から国内および欧米各国において鋭意開発が進められている [1].

我国においては、当研究組合 (Super-GM) が通商産業省工業技術院のニューサンシャイン計画の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの研究委託を受け、1988年度から20万 kW 級超伝導発電機 (パイロット機) を目指した7万 kW 級モデル機の研究開発を進めている。

本章では Super-GM が研究開発を進めている、界磁巻線に超伝導導体を使用する超伝導発電機の構造と開発課題、主な研究成果と現在の開発状況について、特に超伝導技術の観点から紹介する。

2. 超伝導発電機の基本構造と開発課題

超伝導発電機の構成は原理的には従来発電機と同一である。しかし、高磁界 (最大磁界 5T) を発生して発電機の高性能化を図るために、高速回転 (例えば3600rpm) するロータに組み込む界磁巻線には NbTi 超伝導導体を使用する。このため、構造上は Fig. 1 に示すよう非常に異なっている。

ロータは、中央にヘリウム貯液槽を設けた巻線取付軸、冷媒閉じ込め用のヘリウムベッセル、熱の輻射侵入を防ぐ真空断熱層と輻射シールド、電機子巻線からの非同期磁界を遮蔽するダンパから成る多重円筒構造である。ダンパは常温ダンパお

Table 1 Main R&D items of 70MW class model machines.

Object	R&D items
Field winding	·High capability of superconductor. ·Supporting technique of winding.
Multi-cylindrical rotor	·Material selection of component. ·Machining and fabrication technique.
Helium transfer coupling	·Sealing technique of coolant. ·Reliability under long term operation.
Air gap armature winding	·Low loss conductor. ·Supporting technique of winding.
Operation and system control	·Same operability as conventional machine. ·Quench detection of field winding.

よび低温ダンパ (輻射シールドと兼用) がある。前者は主として過渡時の初期に生ずる交流磁界を遮蔽し、後者はそれに引き続く電力動揺や界磁制御で生ずる秒単位の磁界変化を遮蔽する。さらに、駆動軸からトルクを伝達するトルクチューブ、冷媒を給排送するヘリウム給排装置 (HTC) などから構成される。

一方、ステータは高磁界となるため、巻線を支持するティースに鉄を用いない空隙電機子巻線構造を採用している。

このような構造上の特徴から、Table 1 に示すような超伝導発電機特有の開発課題がある。

Super-GM では、パイロット機の設計・製作に必要な各種要素技術を効率的に開発するため、励磁速応性 (界磁制御をほとんど行わない低速応型と積極的に制御する超速応型) と超伝導導体、

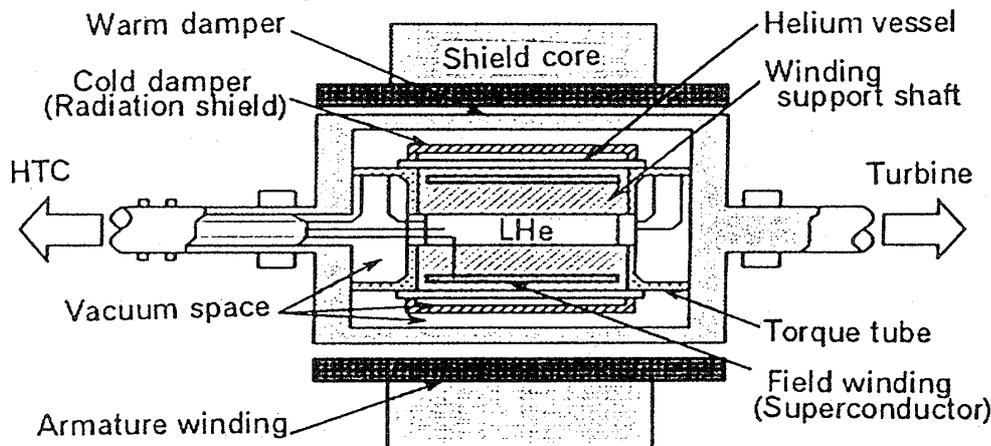


Fig. 1 Schematic diagram of superconducting generator developing in Super-GM.

Table 2 Main parameters of 70MW class model machines.

Item	Slow response excitation		Quick response excitation type	
	type A	type B		
1.Design parameter				
Capacity	MVA	83	83	73
Voltage	kV	10	10	10
Current	A	4,792	4,792	4,215
Power factor		0.9	0.9	0.9
Rotating speed	rpm	3,600	3,600	3,600
Synchronous reactance	p.u.	0.35	0.35	0.45
Field current				
Rating	A	3,000	3,000	3,200
Max.	A	3,600	3,600	4,500
Max. flux density	T	4.8	5.4	6.0
Rotor diameter	mm	880	890	885
Shield core length	mm	1,500	1,500	1,500
2.Superconductor type		High stability	High current density	Low AC loss
3.Rotor structure				
Warm damper		Single layered	Squirrel cage	Three layered
Cold damper		Three layered	Single layered	Single layered
Mechanism for thermal shrinkage		Double bearing	Flexible disk	Flexible support
4.Stator structure		Air gap winding	Double transposition conductor	Water cooled

および多重円筒構造に特徴を有する3本の7万kW級モデル機ロータ（低速応型A機およびB機，超速応型機）を開発し，それぞれ課題分担して研究開発を推進している。

3. 超伝導発電機の要素技術開発の状況

基本設計に基づく7万kW級モデル機の主要設計諸元をTable 2に示す[1]。また，各モデル機ロータの多重円筒構造の違いをFig. 2に示す。

3.1 ロータ

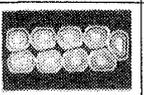
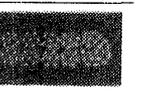
(1) 超伝導導体

モデル機の仕様を満たす3種類（A機用高安定型導体，B機用高電流密度型導体および超速応機用低損失型導体）のNbTi侵漬冷却型超伝導導体を開発した。各々の諸元と超伝導特性をTable 3に示す。

高安定型導体は，完全安定化を指向したアルミ安定化導体であり，素線絶縁および導体絶縁を施していない。高電流密度型導体は，導体絶縁にポリイミド系テープを巻き付け，その上にプリプレ

グ絶縁テープをスパイラル状に飛ばし巻きした高剛性導体である。低損失型導体では，励磁制御に伴う交流損失を低減するためフィラメント径を細くし，数 μ のホルマール絶縁を施した素線を二重撚線している。また，導体絶縁は絶縁テープを

Table 3 Main parameters of NbTi pool boiling cooled superconductors of 70MW class model rotors.

Item	Superconductor type		
	High stability (for A rotor)	High current density (for B rotor)	Low AC loss (for quick response type)
1. Strand			
Strand dia.	0.4 mm	1.61 mm	0.59 mm
Filament dia.	9.7 μ	8.8 μ	3.5 μ
Matrix ratio	CuNi/Cu/NbTi: 0.69/0.99/1	CuNi/Cu/NbTi: 1.8/0.9/1	Cu/NbTi=1.4
Stabilizer	Al divided by CuNi	Cu	Cu
Structure	Compacted double stranded	Compacted stranded	Compacted double stranded
2. Conductor			
Size	3.7 mm \times 6.1 mm	2.9 mm \times 7.4 mm	9.2 mm \times 3.1 mm
Void fraction	19.7 %	12.3 %	25 %
Critical current (at 4.2 K)	11,400 A at 4T	13,770 A at 5T	21,060 A at 4T
(Residual resistance)	5,700 A at 7T	7,830 A at 7T	10,010 A at 7T
Residual resistance	6.5 $\mu\Omega$ /m at 4T,10K	174(RRR) at 0T,10K	154(RRR) at 0T,10K
AC loss	3.9kW/m ² at 4T,5T/s	18.8kW/m ² at 4.6T,5T/s	9.8kW/m ² at 4~6T,10T/s
3. Cross section			
			

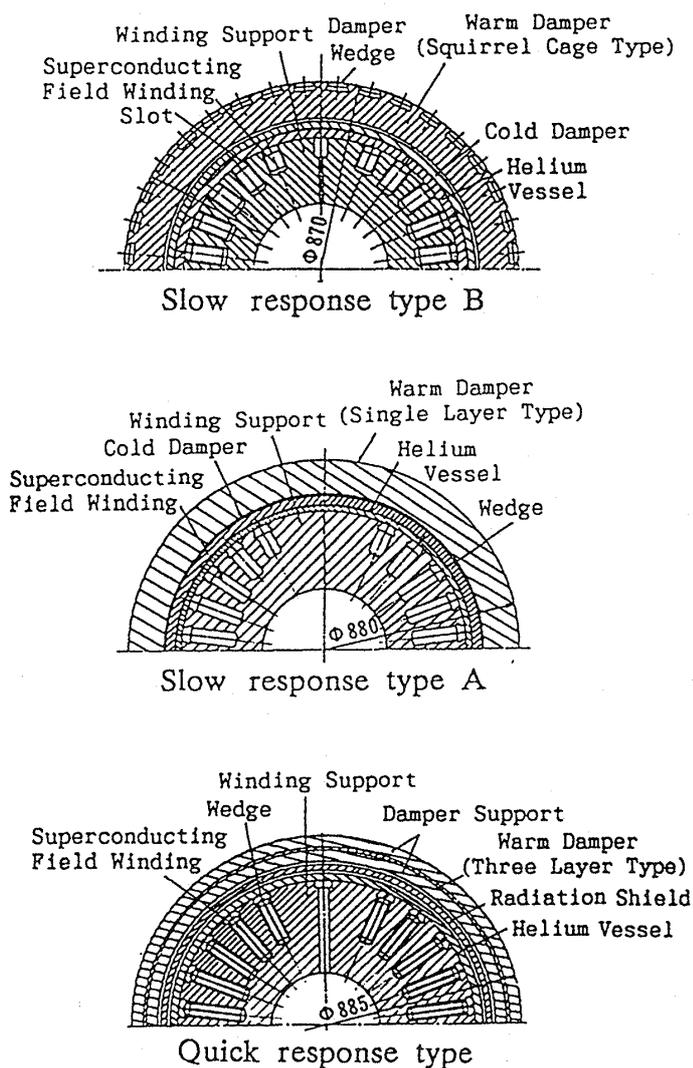


Fig. 2 Cross section of 70MW class model rotors.

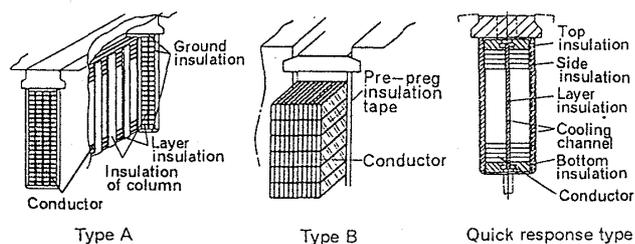


Fig. 3 Winding structure of 70MW class model rotors.

飛ばし巻きすることとしている。

各導体とも新規に開発した応力下超伝導導体試験装置を用いて、繰返し応力（応力 10^4 回）を印加し機械的健全性を確認した。

(2) 界磁巻線構造

モデル機ロータはフルロット方式を採用しており、界磁巻線は巻線取付軸に設けられた鞍型ロット内に収められる。したがって、コイル巻線部は、巻線取付軸とヘリウムベッセルにより対地絶縁を介して支持される。そこで、導体開発と平行して、モデル機の巻線取付軸と巻線構造などを一部模擬した界磁巻線モデルを製作し、巻線技術および支持・固定技術を検証した。Fig. 3に検証成果を反映した各ロータの界磁巻線構造を示す。

低速応型 A 機は、導体をロット幅方向に 4 列エッジワイズに張力をかけて巻線する [2]。巻線時に絶縁テープを導体とともに巻き込んでターン間絶縁を施し、エッジクーリングの構造（端面は導体がむき出しのまま）を取っている。

低速応型 B 機では、1 ロットに数十ターンのスパイラル絶縁を施した導体を、フラットワイズに巻重ねて冷却チャンネルを形成する。

Table 4 Structural materials of 70MW class model rotors.

Components	Structural materials		
	Slow response excitation		Quick response excitation type
	type A	type B	
Winding support shaft	A286	A286	Modified Inconel 718
Torque tube	A286	A286	Modified Inconel 718
Warm damper	[Single layered] Ni-Cu-Al alloy	[Squirrel cage] Cu alloy 18Mn-18Cr (end ring) A286 (support)	[Three layered] A286/Cr-Cu/A286
Cold damper/Radiation shield	[Three layer] SUS/Cu/SUS	A2219-T6	A286
Structural I for thermal shrinkage	Inconel 718	Ti-6Al-4V	Inconel 718

一方、超速応機では、導体をスロット幅方向に2列エッジワイズに巻線し、中央と側部の絶縁スペーサに形成される流路、および導体間の流路の両方で冷却チャンネルを形成する。

(3) 構造部材と製造技術

Table 4にロータ主要構造材の選定結果を示す。

高強度を要する巻線取付軸材およびトルクチューブ材、導電性のダンパ材などは、試験片を製作して材料試験や疲労試験を実施し、機械的および電氣的に適正な材料を選定した。特に巻線取付軸材は大型化製造技術(超速応機)を検討し、モデル機クラスまでは胴部一体化製造に見通しを得た。

また、ロータは多重円筒から成る溶接構造物であり、要素モデルなどによる接合試験を実施して、溶接部の健全性を確認し、溶接施工法および組立手順を確立した。

籠型常温ダンパ(B機)では、シールド効果を把握するモデル、およびモデル機と同径縮長の籠型ダンパモデルを製作し、シールド特性、加工性・組立性などの総合検証を実施した。一方、異種金属円筒部材の組合せである三層低温ダンパ(A機)および三層常温ダンパ(超速応機)の製作では、接合強度などから熱間等方圧加圧法(HIP)を選定し、モデル機製作に反映している。

(4) 関連要素技術

ヘリウム給排装置の回転部と固定部間のシールには磁性流体シール方式を採用し、ヘリウム搬送効率などを総合的に検証するHTC総合検証モデルを製作して、運転信頼性、分解・組立性などを検証した。また、モデル機を模擬した高速回転時のヘリウムの熱伝達測定試験を実施し、熱流束が静止時の数倍以上優れていることを確認した。

(5) 総合回転試験

低速応型B機用の界磁巻線モデルに組み込んだFig. 4に示すロータ部分モデルを製作し、総合回転試験を実施した[3]。

高速回転時の振動特性は、無励磁および励磁状態とも良好であり、また定格回転数での電流クエンチ試験では、短尺導体の性能にはほぼ一致することを確認した。さらに、液体ヘリウム貯液状態で

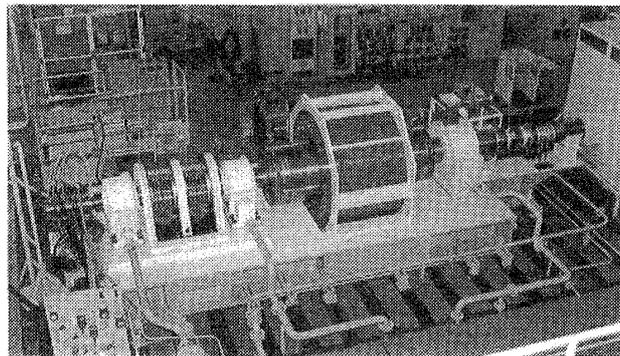


Fig. 4 Rotation test with current excitation of the partial rotor model to have the same diameter and 1/3 winding length as the 70MW class model rotor for slow response type B.

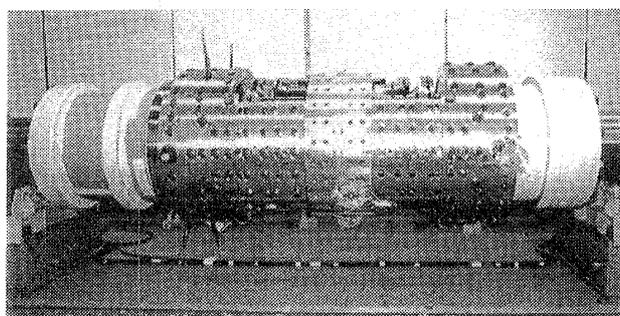


Fig. 5 Field winding of the partial rotor model to have the same diameter and 1/2 winding length as the 70MW class model rotor for quick response type.

の低速ターニング試験では、超伝導発電機の日間起動停止運転(DSS: Daily Start and Stop)に見通しを得た。

一方、超速応型ロータ部分モデルは、Fig. 5に示すように界磁巻線の巻線作業を完了し、静止励磁試験に着手する予定である。

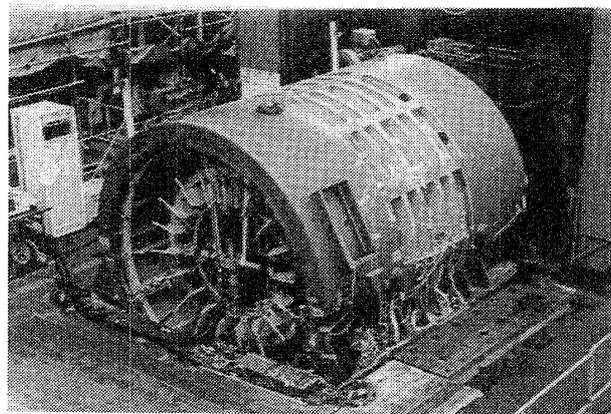


Fig. 6 Outer view of the armature winding model, which has the same cross section, 2/3 shield core length and 1/3 no. of armature windings as the 70MW class model stator.

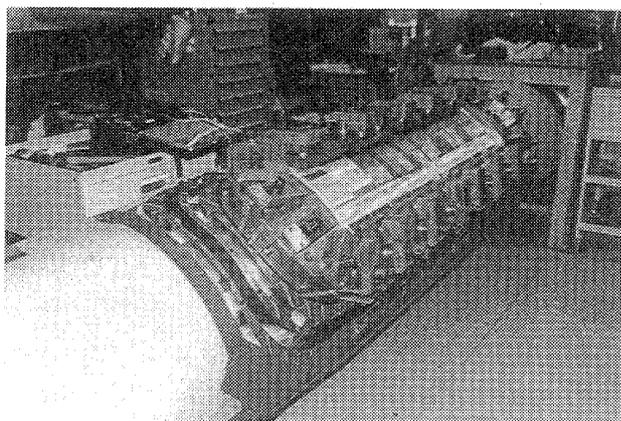


Fig. 7 Winding support shaft for the 70MW class model rotor of slow response type A.

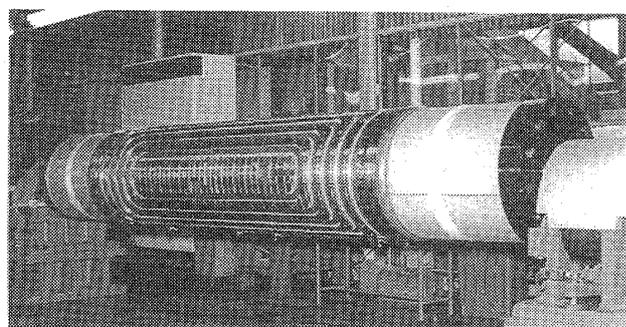


Fig. 8 Winding support shaft for the 70MW class model rotor of slow response type B.

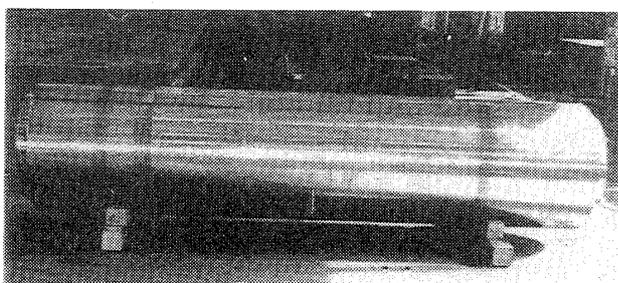


Fig. 9 Winding support shaft before machining of the 70MW class model rotor for quick response type made by electro-slag remelting (ESR) Inconel ingot, which is among the biggest ones without butt joint in the world.

3.2 ステータ

電機子巻線導体は、渦電流損および循環電流損を低減するため、平角絶縁素線を転位したストランドを、さらに冷却管とともにレーベル転位する構造の二重転位導体を開発した。また、ティースにはFRPを採用するため、直線部および端部の導体支持構造や磁気シールドの冷却構造などについて、要素モデルを製作して機械的強度や冷却特性を検証した。一方、ステータの組立性および電

氣的・機械的特性の確認は、Fig. 6に示すステータ巻線モデルを製作して、総合的に検証した。

4. モデル機の開発状況

上記の要素技術開発成果を反映した、7万kW級モデル機ロータの製作を進めており、Fig. 7～9に、現在の状況を示す。低速応型A機およびB機とも、本年末までには静止励磁試験を完了し、ロータの本格的な組立に着手する予定である。また、超速応機では界磁巻線取付軸材の製作を終了

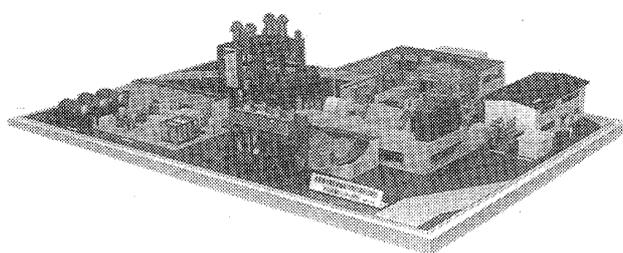


Fig. 10 Field test facility for 70MW class model machines by the Motor-Generator testing method (The pump-back testing method), which is constructing in the Osaka power station, Kansai Electric Power Company Inc..

し、現在機械加工に着手している。

一方、ステータは電機子巻線、FRPティースなどの部品製作を終了し、モデル機ステータの本格的な組立に着手している。

5. まとめ

Super-GMでは長期連続運転(10000時間以上)可能なヘリウム冷凍システムも平行して開発しており、これまでに要素技術開発と工場試験などから、開発目標である液化能力100ℓ/H、不純物濃度0.1ppm以下を達成した。

さらに、超伝導発電機固有の試験方法や解析手法および運用法の確立と、総合的な運転信頼性の検証を目的に、工場および現地実証試験を実施する予定である。特に後者については、発電機単体の性能および信頼性の検証を重視したM-G方式(返環負荷法)を選定して、Fig. 10に示すような試験設備を現在関西電力(株)大阪火力発電所構内

に建設中である。

以上のように超伝導発電機の開発は、本プロジェクトの開始以来6年を経過し、要素技術開発と部分モデルを用いた検証により着実に研究を進め超伝導固有の基本技術をほぼ確立した。現在、これらの技術を集大成した7万kW級モデル機の製作に本格的に取り組んでいるところである。

参考文献

- [1] T. Ageta *et al.*, Recent Development of 70MW class Superconducting Generators (Part 1), CIGRE, Paris, Aug. 29-Sept. 2, 1994.
- [2] 山口潔他：70MW級超伝導発電機の界磁巻線モデルの試験，第47回低温工学・超伝導学会予稿集(1992) 228.
- [3] 上田明紀他：超伝導発電機のロータ部分モデルの回転中のクエンチ特性，平成4年電気学会静止器・回転機合同研究会資料，RM-92-144.