技術資料

超電導発電機の開発とその回転子の構造・材料・溶接*

北 島 敏 男**

Development of Superconducting Generator and Structure, Materials and Welding of Its Rotor*

by Toshio Kitajima**

キーワード：超電導，発電機，極低温，構造材料，溶接，回転子

1. はじめに

超電導発電機は，超電導技術の超低損失化，高電流密度化，高磁界化などの特徴を生かして，発電機効率の向上，小型・軽量化，電力系統の安定度向上などが図られることから，大幅な省エネルギー，省資源およびコスト低減が期待される。そのため，超電導技術を発電機に適用するための基礎研究は着実に進んでおり，海外諸国および日本において実験機が試作・試験されている。さらに，日本では通商産業省工業技術院のムーンライト計画のなかで，超電導発電機関連機器・材料技術研究組合において超電導発電機とその周辺機器・材料技術を中心に，昭和 63 年度から 8 年間にわたり研究開発を行うことになっている。

ここでは，超電導発電機の研究開発状況とともに，超電導発電機回転子の構造，構造材料および溶接について，通商産業省工業技術院のムーンライト計画の一環として実施された昭和 62 年度調査委託研究の成果を踏まえて紹介する。

2. 超電導発電機の開発状況

2.1 海外の開発状況

海外における超電導発電機の研究開発は，図 1 に見ら

れるようにアメリカで最も早く着手され，1970 年代に数 MVA 規模の試作が行われた。アメリカにおいては，その後 WH 社が EPRI の資金援助を受けて，1979 年に 300MVA プロトタイプ機の開発に着手し，各種の解析，製作法の検討およびモデル実験を経てほぼ設計を終了していた。しかし，資金面の問題で 1983 年にこのプロジェクトは中止された。また，MIT はエネルギー省の資金援助の下に，アドバンス型の 10MVA 機を開発中である。

西ドイツおよびフランスでは，比較的大型の回転子モデルに取りかかり，一気に実用機に近いプロトタイプ機の開発につなげようとする計画が成された。西ドイツシーメンス社では，すでに 120/400MVA プロトタイプ機用回転子モデルの製作を終え，固定子モデルの製作に着手している。フランスでは，フランス電力公社と Alsthom 社の共同研究で 1976 年に試験を終了した。この結果から，Alsthom 社は，政府に対し 250MW 超電導発電機を製作し発電所にて運転する計画を提案したが，資金面の問題で実現していない。

ソ連においては，実験機としての 1.5MVA 機の経験を経て 20MVA 機を開発し 1981 年に試験を行った。現在 300MW 機を開発中であり，工場試験後発電所での運転が予定されている。また，並行して 1200MW 機の設計が進行中であり，1990 年代初期に製作を完了し続いて試験を行う予定である。

上記以外に，イギリス，中国，スイス，イタリア，チェコ，オーストリアでもモデルあるいは小型機の試作研究が行われてきた。

2.2 国内の開発状況

*原稿受付 昭和 63 年 11 月 30 日
** 超電導発電機関連機器・材料技術研究組合
Engineering Research Association for
Superconductive Generation Equipment
and Materials

図1 超電導発電機の開発状況

表1 研究開発スケジュール

項目	昭和(年度)	63	64	65	66	67	68	69	70
1. 超電導線材の研究開発		金属系超電導体(発電機用・交流機用)、酸化物材料の研究開発							
2. 超電導発電機の研究開発 (低速応型, 超速応型)		要素技術の開発, 部分モデル試験							
						回転子電機子製作, 据付, 運転研究, 解体調査			
						20万kW級パイロット機の要素技術の研究			
3. 冷凍システムの研究開発		在来型システムの高信頼度化, 新型システムの研究開発							
4. トータルシステムの研究		超電導発電システムの試験法, 解析法, 運用技術の確立							
		国内外研究機関との情報交換, 技術交流, データベースの構築							
						中間評価			

日本では、超電導発電機の研究開発は1970年以前に着手され、その後1970年代後半に6.25MVA機が、続いて1980年代に入って30MVA機、50MVA機および3MVA機が試作され試験も終えている。これらの超電導発電機は、基礎研究の段階に位置づけられるもので、超電導発電機概念設計が可能な技術レベルまで引き上げるとともに、今後の研究開発課題の発掘に大きな役割を果たした。

2.3 「超電導電力応用技術」研究開発について

昭和63年3月通商産業省工業技術院により大型省エネルギー技術研究開発「超電導電力応用技術」の基本計画が策定された。これは、酸化物系材料を含めた超電導線材の研究開発と超電導電力応用機器の先駆けとなる超電導発電機の研究開発を中心に、材料面および電力機器面の両面から研究開発を行うものである。超電導発電関連機器・材料技術研究組合が取組む昭和63年度から70

年度にいたる研究開発スケジュールを表 1 に示す。

以下に研究開発内容の概要を示す。

(1) 超電導線材の研究開発

- (a) 金属系材料については、超電導発電機で要求される超電導体の高性能化、大電流量化の研究開発を行い、交流機器への適用を目的とした商用周波数で使用可能な超電導体を開発する。
- (b) 酸化物系材料については、電力機器に利用可能な線材化、高電流密度化の研究開発を行う。

(2) 超電導発電機の研究開発

- (a) 200MVA 級パイロット機 (技術的検証機) の設計・製作に必要な各種要素技術と発電機部分モデルの研究開発を行う。
- (b) さらに、最終段階において、個々の要素技術を結集して 70MW 級モデル機を試作し、運転研究により長期信頼性および耐久性などの検証を行う。

(3) 冷凍システムの研究開発

在来型冷凍システムの高信頼化と新型高性能冷凍システムの研究開発を行う。

(4) トータルシステムの研究

- (a) 70MW 級モデル機の試験方法の研究、試験結果の解析および運用技術の確立を図る。
- (b) 各種超電導電力応用機器の電力システムへの適用性とその導入効果について調査・検討を行う。

3. 超電導発電機回転子の構造と溶接

現在研究開発が進められている超電導発電機の概略構造を図 2 に、また構成要素の特徴と機能を表 2 に示す。

超電導発電機の回転子は、界磁巻線部が約 4K の極低温状態に冷却されるので、真空断熱層を設けた多重円筒構造である。また、電機子巻線は固定子鉄心ティースを除去した空隙巻線構造を採用する。これは、超電導界磁巻線の採用によりギャップ (回転子と固定子間の空隙) 磁束密度を大幅に高めることができるので、現用機のように鉄心ティースを有すると、その磁束密度が飽和磁束密度を越えて鉄損が過大となることに依る。

3.1 回転子の構造

回転子界磁巻線は、巻線取付軸の外周側に加工されたスロットに巻線され、界磁巻線の遠心力と電磁力に対する支持はウェッジおよびスロット側面のティースでなされる。巻線取付軸の外周側にはヘリウムベッセル、輻射シールドおよび常温ダンパが設置される。また、巻線取付軸にはトルクチューブが取り付け、タービンからの機械トルクを伝達する。回転子の両端部には軸受で支持される端部軸があり、駆動側端部軸でタービンと直結される。ヘリウム給排装置から供給された液体ヘリウムは、巻線取付軸の内径側のヘリウム槽から巻線取付軸の半径方向孔を経て外径側へ達し、スロット内に流入して超電導界

図 2 超電導発電機の概略図

表2 超電導発電機の構成要素の特徴と機能

構成要素		特徴	機能
回転子	界磁巻線	超電導導体	高磁束密度発生
	巻線取付軸	スロットを持つ円筒	遠心力、電磁力に対する界磁巻線の支持
	常温ダンパ	ダンパとサポートの複合円筒	電磁シールド、系統動揺へのダンピング
	輻射シールド (低温ダンパ)	低放射率材の薄肉円筒	常温ロータからの輻射熱シールド（固定子巻線の変動磁界からの防護）
	トルクチューブ	薄肉円筒	トルク伝達、熱侵入防止
	電流リード	ヘリウムガス冷却導体	界磁巻線へ直流電流を通電
	ヘリウム給排装置（HTC）	磁性流体シールとパイオネット	回転子と静止部のヘリウム流路結合
固定子	電機子巻線	空隙巻線	高エネルギー密度の電力発生
	磁気シールド	積層電磁鋼板	漏れ磁束のシールド

磁巻線を浸漬する。導体の発生熱を吸収し密度の減少した液体ヘリウムはヘリウム槽へ戻り、ヘリウム槽で蒸発したガスヘリウムは給排装置から機外へ排出される。常温ダンパの内側は高真空にし、残留気体の対流による極低温部への熱侵入を抑制する。

以下に回転子の主なコンポーネントについて機械構造物としての特徴を記す。

(a) 巻線取付軸

強大な遠心力と電磁力に対して超電導磁巻線を固定する軸である。そのためスロット加工されるので良好な機械加工性が望まれる。使用温度は主に液体ヘリウム温度であるので、極低温での強度と靱性が重要視される。

(b) トルクチューブ

界磁巻線に機械トルクを伝達するもので巻線取付軸端部にあたる。一端が極低温部で他端が常温部であるため、熱侵入を極力小さくするために常温から極低温にわたる温度範囲で高強度の材料で薄肉化を図ることが望まれる。

(c) ヘリウムベッセル

巻線取付軸外周部に取付く円筒状のベッセルは、遠心力と内圧により液体ヘリウムが飛散するのを防止する。その両端は巻線取付軸に気密溶接される。

(d) 輻射シールド

残留気体伝熱と輻射侵入熱を低減するために、巻線取付軸外周を真空断熱層を介して覆い、トルクチューブに取付けられる。

(e) 常温ダンパ

常温ダンパは、系統事故時の回転子動揺のダンピングおよび超電導界磁巻線への電機子反作用変動磁界の電磁

シールドの機能を有するため、高い電気伝導度が要求される。一方強大な遠心力と電磁力が作用するためダンパの支持が不可欠となる。図3に示すように、現在三種類の構造が考えられている。

① 単層ダンパ

ダンパ自身で応力に耐えるために、高強度でかつ高電気伝導度の非磁性鋼を用いる。

② カゴ型ダンパ

高強度非磁性鋼の円筒にスロットを加工し、そこに良導電性のウェッジを納め、円筒の両側に短絡環（ダンパリング）を取付け、カゴ型制動回路を形成する。

③ 三層ダンパ

銅合金のダンパを中心に配し、内外周からサンドイッチ状に焼ばめまたは爆接により高強度非磁性鋼で支持する。

(f) 熱収縮対策構造

超電導界磁巻線を保持する回転子内筒部（巻線取付軸）は約4Kの極低温状態になるのに対して、回転子内筒部と同心状に取付き支持される回転子外筒部（常温ダンパ）は常温以上で使用される。したがってトルクチューブを常温ダンパの両端に直接結合すると、薄肉のトルクチューブに熱収縮に伴う熱応力が発生する。そこで、トルクチューブの熱応力を緩和する方法として図4に示す二方式が考えられている。

3.2 回転子の製造方法と溶接

現用機の回転子軸材は、鍛造による一体物で製造されている。それに対して、超電導発電機の回転子は多重円筒構造であるため、大型化に伴い製造上の問題が生じると思われる。大型の円筒を一体物で製造するには二つの

図 3 超電導発電機回転子の横断面

問題がある。一つは、健全な大型インゴットを製造する技術が確立されていないという点で、後述する超電導回転子の候補材料では、現在インゴット重量で 10~20 トンが技術面および設備面で限界になっている。もう一つの問題は、インゴットから長尺円筒を一体物で製造する技術に関するものである。押し出し法は加工設備の能力から長さの制約を受ける。中空鍛造による方法は、鍛練の困難さに伴う材料特性不足や歩留りの低下を生じる。以上の問題が解決されない限り、溶接構造にならざるを得ない。長尺円筒の溶接構造として図 5 が考えられる。

回転子のコンポーネントを組立てて多重円筒を構成するためには、一体物からの削り出しが不可能である場合は、溶接による接合が必要となる。特に真空断熱層を形成するために、気密保持のための溶接が各所に施される。また、機械強度を要求されるコンポーネントの接合とし

図 4 トルクチューブの熱応力緩和法

て、巻線取付軸とトルクチューブの接合があげられる。巻線取付軸は、その外周にスロットが加工され内径部にヘリウム槽を設けるために厚肉円筒である。それに対して、トルクチューブは、常温部からの熱侵入抑制という点から薄肉円筒が望まれる。前述のように、トルクチューブはタービンの機械トルクを巻線取付軸に伝達する機能を有し、三相突発短絡などの事故時に過大なトルクが生じることから、両者を一体化することが望ましいが、材料の部留りや機械加工技術などを考えると溶接による接合が必要となろう。

その他ヘリウム給排用の内部配管の配設など、超電導発電機の回転子は溶接が多用される。その溶接法は、母材材質や溶接部の形状によって選択されるが、極低温の機械特性にすぐれ、入熱量を少なくして熱影響範囲を小さくできることから、TIG 溶接が第一の候補としてあげられる。

3. 3 回転子構造材料への要求

超電導発電機回転子は、常温から極低温域にわたって高速回転による大きな遠心力と電磁力を受けるため、その構造材料には高強度と高靱性が要求される。一般に、温度の上昇とともに靱性は向上するが強度は低下するので、常温での運転に耐えるためには常温強度の高い材料が必要である。構造材料として要求される耐力および破壊靱性値から、現在下記の候補材料があげられている。

- ① オーステナイト系ステンレス鋼 …… SUS304, 316 系
 - ② 鉄基超合金 …… A286
 - ③ チタン合金 …… Ti-5Al-2.5Sn(ELI), Ti-6Al-4V
 - ④ ニッケル基超合金 …… インコネル 706, 718
- 静的強度および破壊靱性ととも重要な特性として、遠

(a) 板曲げ+溶接

(b) 二分割+溶接

(c) イモ継ぎ

図5 長尺円筒物の溶接構造

心力、電磁力、熱歪などの繰返しに対する疲労特性がある。

また、上記機械特性以外の共通する要求特性としては、電気機器であることから電気抵抗や透磁率もあげられる。極低温で長時間の負荷を受けた場合、非磁性の金属相が強磁性相に変態する材料がある。これによりマグネットの磁界分布が擾乱を受け、発電特性に影響が及ぶことから、溶接部も含め安定な非磁性相を有する材料が必要となる。さらに、素材としての特性だけでなく多重円筒溶接構造物を製造し、回転子に仕上げるための熱間加工、切削および溶接性も要求特性として重要である。

4. 回転子構造材料の課題

超電導発電機の回転子は、高速回転による遠心力をはじめ種々の荷重とそれらの繰返しに対して、構造健全性が維持されなければならない。そのためには、運転条件

に応じた精度高い応力状態の把握とそれに適した特性を有する構造材料の選択が必要となる。最近前節にあげた候補材料について、疲労特性を含めて活発に研究が行われており、断片的ではあるが特性データが蓄積されつつある。しかし、溶接部を含む極低温疲労特性および破壊特性のデータはまだ十分とは言えず、下記を含め今後データの蓄積が必要である。

- ①低サイクルまたは高サイクル疲労の見極めとその特性
- ②切欠きおよび亀裂材の疲労特性
- ③比熱・熱伝導率が極低温で極めて小さく、歪速度によっては発熱し易くなることから、疲労特性に及ぼす繰返し速度の影響
- ④溶接部疲労特性に及ぼす欠陥および残留応力の影響
- ⑤溶接部を含めた疲労亀裂進展特性

溶接技術について言えば、同種材料のみならず異種材料間に適合する溶接材料、溶接方法及と装置を開発することも課題である。溶接を回避し一体鍛造にするためには、前述のように大型鋼塊製造法や中空鍛造などの製造技術の確立が待たれる。

その他、切削やドリル穴明けの機械加工を施す上で、候補材料はいずれも高強度かつ高靱性材料のため加工しにくい。機械加工性の向上は、材料面の改良よりも工具などの加工技術面からの改良が望まれる。

5. おわりに

超電導技術を発電機に適用するには、高速回転機であるために克服すべき課題が多い。回転場で使用できる超電導導体の開発とその支持構造技術の確立とともに、極低温状態を維持するための技術の確立が必要不可欠である。その中で、溶接技術は、機械的にも電氣的にも超電導発電機の信頼性の確保という観点から最重要技術の一つであり、その進歩が期待される。

参考文献

- 1) 超電導発電関連機器・材料技術研究組合：「超電導発電関連機器・材料技術のフィージビリティ調査研究」昭和62年度ムーンライト計画委託調査研究成果報告書 昭和63年3月
- 2) 上田隆右：「超電導発電機と電力システム」ENERGY 昭和63年4月
- 3) 前川一夫：「超電導電力応用技術のあらし」OHM 昭和63年5月