U.D.C. 621. 313. 322. 026. 648-815: (621. 3. 045. 5: 538. 945)

特集 超電導と応用技術

超電導発電機の主要技術

Key Technologies of Superconducting Generator

超電導発電機は次世代タービン発電機として期待され、日本では200 MW級技 術検証機に向けての要素技術などの開発が進められており、一方、西ドイツで は120/400 MVA機、ソ連でも300 MW機の開発が行われている。この超電導発 電機には、在来機と構造が大きく異なる低温多重円筒回転子と空隙(げき)巻線 固定子が使用されるので、実用化には運転特性と信頼性の実証が不可欠である。 超電導発電機の運転特性を明確にする目的で、50 MVA機を製作し各種の試験 を行った。また、大型技術検証機の概念設計によって主要な技術課題を明らか にした。さらに、将来型高温超電導発電機の構造、効果、技術課題などの適用 性について検討し、金属系線材並みの性能を持つ線材開発が前提条件になるこ とを示した。

牧 直樹*	Naoki Maki
山口 潔*	Kiyoshi Yamaguchi
高橋身佳*	Miyoshi Takahashi
尾形久直**	Hisanao Ogata
八木恭臣***	Yasuomi Yagi

言

火力発電および原子力発電に使用されるタービン発電機の 回転子は、従来水素ガスあるいは水によって冷却されている。 液体へリウムで冷却される超電導界磁巻線を用いた次世代タ ービン発電機には、大幅な質量低減と効率向上および電力系 統安定度向上効果が期待できる¹⁾。このように大きいメリット を持つ超電導発電機は、図1に示すように世界各国で実用化 開発が積極的に進められている。特に、わが国ではこれまで の3~50 MVA機の開発実績をもとに、通商産業省工業技術 院ムーンライト計画で、「超電導電力応用技術開発」として新 エネルギー・産業技術総合開発機構が、昭和63年度から200 MW級技術検証機に向けての要素技術開発を開始した。ここ では、発電機構成要素の信頼性と過負荷耐力を検証するため、 70 MW級開発研究機の研究開発を中心とした技術開発を進め ている²⁾。

本稿では、50 MVA機の試験結果と技術検証機の概念設計 結果に基づいて、超電導発電機に必要な主要技術について考 察するとともに、高温超電導体の発電機への適用性について 述べる。

2 基本構造

超電導発電機の基本構造を図2に示す。回転子は主に,高 磁場を発生させる超電導界磁巻線,回転力を伝達するトルク



注:●(試験済み),○(開発中), (計画中)

図 | 超電導発電機の開発状況 現在,日本では50 MVA機が最大 容量であるが,200 MW級(計画)技術検証機に向けて要素技術の開発が 進められている。

導界磁巻線部への熱侵入を防止する点から,多重円筒構造が 採用され,各円筒体間を真空に維持して断熱する。他方,固 定子は主に界磁の高磁束密度を許容する空隙電機子巻線,お よび外部への磁束漏れを防ぐ磁気シールドから構成される。 さらに,発電機外部にへりウム給排装置を介して界磁巻線に 冷媒を供給するへりウム液化装置と,コレクタリングを介し て界磁巻線に電流を供給する直流電源が設置される。

43

3 50 MVA機の特性試験

チューブ,事故時の回転子動揺を抑えるダンパ,および回 スにヘリウィカ供給,批出すて給批准署で構成されて、初	転 超電導発電機の運転特性を明確にする目的で、日立製作所 またり、日本製作所 1000000000000000000000000000000000000
于にヘリリムを供給・排出りる結排表直(構成される。超	电 は电力中天伽充所と協力して、 50 MV A 赦滅を殺任し各裡 武
* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所機械研究所 工学博士 **	** 日立製作所日立工場

622 日立評論 VOL. 71 No. 7 (1989-7)



300 F



図3 超電導回転子の予冷特性 回転子速度700 r/min,液体ヘリウム供給量50 l/hで予冷運転を行い,36時間後に界磁巻線が超電導性を示した。

験を行った。以下に,超電導発電機の代表的な運転特性を示す。

3.1 ヘリウム冷却特性³⁾

44

予冷運転中のトルクチューブと界磁巻線温度, ヘリウムガ ス流量, 界磁巻線抵抗および回転子内ヘリウムの液面高さの 時間的変化を図3に示す。予冷運転は回転子に熱収縮不平衡 や真空リークが生じないように低速回転(700 r/min)させなが ら,最初から液体へリウムを徐々に供給(50 1/h一定)する方法 で行った。異磁巻線温度は予冷初期を除いてほぼ直線的に低 できた。

3.2 同期投入調相運転4)

50 MVA機を社内電力系統に同期投入したときのオシログ ラムと、同期投入後の調相運転によって測定したV曲線を図4 に示す。同期投入後、電機子電流にスイング現象が現れてい るが、ダンパの制動効果により数秒後には定常状態に落ち着 いている。また、このときの界磁電流の変動はほとんど見ら

(1つた。 赤磁を 緑温度は 丁 介 初期 を 除いて はば 直線的 に 低	れす,ダンパのシールド効果も良好であることが確認できた。
下し、約36時間後に界磁巻線の電気抵抗が急激に減少し超電	界磁電流と電機子電流の関係を示すV曲線は、同期リアクタ
導性を示した。その後,液体ヘリウム供給量を約1001/hに増	ンスが小さく磁気飽和もほとんどないため、在来機よりも非
加させて回転子内の貯液を行った。液面が落ち着いたところ	常にシャープなV字形になるのが特徴である。すなわち、超電
で各種試験に移ったが、重要な予冷運転法を確立することが	導発電機はわずかな界磁電流の変化で無効電力を大きく制御

超電導発電機の主要技術 623



電圧を異位相9.9度で系統へ同期投入し、ダンパの制動効果、シールド効果が十分であること 同期投入時のオシログラムとV曲線 図 4 が確認できた。

できることがわかった。

3方式ともに長所・短所があり, 超電導界磁巻線の支持法 表丨

本発電機は、これら調相運転試験結果から問題なく系統に 投入後発電動作に移れることが確認できた。

技術検証機の主要技術課題 4

技術検証機の主要技術課題については、 ムーンライト計画 の一環として調査研究を実施した。その検討結果も踏まえて のシステム解析,超電導界磁巻線,空隙電機子巻線の開発に ついて以下に述べる。

4.1 システム解析

遠隔地に設置され負荷追従運転に適した1,000 MW級超速 応励磁発電機、および都市近郊に設置されDSS(Daily Start Stop)に適した200 MW級低速応励磁発電機の概念設計を実 施した。さらに、200 MW級機の技術課題を解決するために、 同径縮長形の70 MW級開発研究機のシステム解析を行った。 本機は200 MW級機の同径縮長モデルとすることで、遠心力や 電磁力などの機械要素に加わる外力を模擬できる。70 MW, 200 MW級機ともに同期リアクタンスは0.35 p.u. 程度と小さ く,在来機の約号である。このため,送電電力限界容量が増

界磁巻線の端部には最大磁場4~6Tが生ずるので、この端部 方式が考えられているので、試作および解析結果に基づいて その得失を比較する。レーストラック巻線のボルト支持法は, の磁束集中を抑制することが必要である。 巻線作業が容易で支持構造も強いが, 巻線端部での磁束集中 超電導導体は、ひずみに強く巻線作業が容易で大電流を流 が大きくなる欠点がある。くら(鞍)形集中巻線のバンド支持 せる成型より線が望ましい。また,高い熱安定性を得るために 法は, 製作が比較的容易であるが, 支持構造が弱い欠点があ アルミ安定化材を使用し,かつ交流損失を低減するために高い 電気抵抗を持つCuNiで導体を分割する構成が有望である。 る。鞍形分布巻線のウェッジ支持法は、巻線作業が困難であ

容量の大きさによって使い分けされる。小容量は100 MW以下,中容量 は100~300 MW, 大容量は300 MW以上を言う。

<u>方式</u> 項目	ボルト	バンド	ウェッジ
構造	ボルト 米加ト 界磁巻線 春線軸	バンド 巻線軸 界磁巻線	ウェッジ ● 日本の 参線軸 界磁巻線
卷線形状	レーストラック	くら(鞍)形(集中巻)	鞍形(分布巻)
卷線作業	容易	やや困難	困難
磁束集中	大	中	/]\
支持構造	中	弱勁	強
適用性	小・中容量機	小・中容量機	中・大容量機

るが、磁束集中が小さく支持構造も強いので実用的と考えら れる。

45

中・大容量機に適用が有望な超電導界磁巻線のスロット内 ウェッジ支持構造例を図5に示す。スロット内に整然と配列 大するなど電力系統安定度の改善が期待できる。 された多数の超電導導体の側面を、遠心力によって加圧され 4.2 超電導界磁巻線5) た超臨界圧ヘリウムが半径方向内側へ流れながら冷却する。 界磁巻線の支持法には、巻線形状と関連して表1に示す3

624 日立評論 VOL. 71 No. 7 (1989-7)



図 5 超電導界磁巻線のスロット内ウェッジ支持構造 多数の超 電導導体がスロット内に配列され、その側面にヘリウムが流れて冷却する。 構造例を図6に示す。在来機の鉄ティースに代わる強度部材 として、絶縁ティースが円筒形磁気シールド内周側のダブテ ール溝の中にはめ込まれる。銅素線を1回より合わせたサブ 導体を、さらにより合わせる二重転位導体を用いることによ って、ギャップ磁束が導体に直接交じわって生ずる渦電流を 低減させる。

また,銅素線を丸断面でなく四角断面として導体占積率を 向上させるとともに,機械的に剛性の高い巻線の実現を図っ た。これにより,在来機よりも一桁(けた)大きい電磁力に耐 えることが期待できる。

5 高温超電導体の適用効果⁶⁾

高温超電導体を用いて1,000 MW級超電導発電機の概念設計を行った結果を表3に示す。窒素冷却機(~77 K)をヘリウム冷却機(~4 K)と比較すると、次のような特徴がある。 (1) 基本構造は同じであるが、輻(ふく)射シールドが不要に、真空断熱が容易に、また冷媒給排装置が簡単になる。 (2) 発電機体格の増大を防止する点から、超電導コイル電流密度は5 Tの磁場で75 A/mm²以上が必要である。

4.3 空隙電機子巻線5)

電機子巻線形状として, **表2**に示す3方式が考えられてい るので,試作および解析結果に基づいてその得失を比較する。 へリカル巻とパンケーキ巻は,組立は容易であるが,界磁磁 束の有効利用率を示す巻線係数が小さく,補修も不可能であ る。ダイヤモンド巻は,組立がやや困難であるが,巻線係数が 大きく補修も可能なので実用的と言える。

中・大容量機に適用が有望な空隙電機子巻線の構成と支持

表2 空隙電機子巻線の形状 3方式ともに長所・短所があるが, 中・大容量機には補修が可能なダイヤモンド巻が有望である。



(3) 冷媒供給量は¹/₄に低減するので、冷媒と冷凍機のコスト
 は大幅に低下する。



卷線係数	大 (>0.9)	中 (~0.6)	中(~0.6)	
組 立	やや困難	容 易	容易	
補修	可能	不可能	不可能	
適用性	中・大容量機	小・中容量機	小・中容量機	

図6 空隙電機子巻線胴部の構成と支持構造 在来機の鉄ティースに代わって絶縁物ティースが用いられ、その中間のスロットに二重転位された電機子導体が挿入される。

46

表3 1,000 MW超電導発電機の設計諸元 窒素冷却機の回転子構造はヘリウム冷却機とほぼ同様であるが、空気冷却機の 場合にはダンパがスロット内に挿入されるなど在来機に近くなる。

-	④ ヘリウム	⑧ 窒 素	©窒素	②空気	① 空 気
発電機(冷媒 導体電流密度)	150 A/mm ²	150 A/mm ²	75 A/mm ²	150 A/mm ²	60 A/mm ²
同 期 リ ア ク タ ン ス (p.u.)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
初期過渡リアクタンス (p.u.)	0.13	0.13	0.12	0.12	0.10
開 路 時 定 数 (s)	1,600	1,600	3,400	900	2,500
回 転 子 外 径(m)	1.12	1.12	1.30	0.83	1.12
軸 受 間 ス パ ン(m)	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
回 転 子 質 量(ton)	60	58	85	45	65
発 電 機 質 量(ton)	450	448	500	425	445
冷媒供給量(l/h) 最大磁束密度(T) 発電機効率(%)	120 4.6 99.54	30 4.6 99.57	30 4.4 99.54	2.5 99.54	2.9 99.54

- (4) 発電機の質量低減と効率向上,発電機定数は大差ない。
 次に,空気冷却機(~300 K)をヘリウム冷却機(~4 K)と比較すると,次のような特徴がある。
- (1) 真空断熱,冷媒給排装置,熱収縮対策,厚肉円筒ダンパ, トルクチューブが不要になるなど構造が大きく変わり,在来

表4 高温超電導発電機の開発課題 5 Tの磁場下で1,000 A/mm² 以上の電流密度を持ち,経年変化のない線材の開発が最大課題である。

項目	内容
 超電導線 所要B-J_c特性 安定化,低損失化 長尺線製造法 	(Y系, Bi系, TI系などの線材開発が必要) 5 T磁場で80 A/mm ² 以上の電流密度 多心化,安定化材料と構造最適化 数百メートル以上の線材製作
 7. 界磁巻線 (1) 巻線法 (2) 絶縁,支持法 (3) 接続法 	(鞍形,レーストラック形巻線が困難) 所要機械性能(ひずみ,引張り,圧縮) 導体絶縁法,巻線支持構造 低損失,高強度接続法
 回転子 用磁巻線冷却法 構造部品 保護システム 	冷媒循環法,電流リード冷却法 構成材料と構造最適化 クエンチ検出と対策

機の構造に近くなる。

(2) 超電導コイル電流密度は5Tで60A/mm²以上が要求される。

(3) ギャップを任意に選ぶことによって,大径短軸形から小 径長軸形までの設計がでぎ,発電機定数も適切な値とするこ とができる。

(4) ダンパが不要になり、回転子質量が約0.7倍に低減する。 効率向上は0~0.2%と小さい。

高温超電導体を適用した場合の技術課題を表4に示す。高 温超電導体の臨界電流密度を5T程度の磁場条件下で少なく とも1,000 A/mm²以上に向上させなければ,安定化材や絶縁 物および冷却通路を持つ支持構造体を含めた超電導コイルの 電流密度を80 A/mm²以上にすることは難しい。超電導コイル の実現には,数百メートル以上の長尺線を製造できることが 条件になる。実用超電導線の開発を目指して,多心線化と薄 膜の多層化が検討されている。

6 結 言

超電導発電機の代表的運転特性,主要技術課題,高温超電 導体の適用性について述べた。50 MVA機の予冷運転と社内試 験結果,および実用に適した超電導界磁巻線と空隙電機子巻 線の主要技術課題を明らかにした。また,窒素と空気で冷却

参考文献

5)

- 1) 植田,外: 50 MVA級超電導同期発電機の開発,日立評論,66, 2,163~166(昭59-2)
- 2) 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(1988-3)
- 山口,外:50 MVA超電導回転子のヘリウム冷却特性,電気学 会静止器研究会,SA-85-25,51~59(昭60-10)
- 4) 高橋,外:50 MVA超電導発電機の電気特性,電気学会回転機 研究会 PM-86-12 05~102(昭61-1)

される高温超電導発電機の概念設計を行い、構造と性能上の
特徴および技術課題を明らかにした。
日本,西ドイツ,ソ連で大型超電導発電機の開発が進めら
れているが、いずれも実用化に不可欠な信頼性試験を十分に
行う予定であり、超電導発電機の実用化への見通しは明るい。

研究会, RM-86-12, 95~103(昭61-1)
牧:超電導発電機の構造,低温工学材料部会シンポジウム(昭
63-9)
牧:超電導回転機と材料開発一酸化物高温超電導材料の回転
機への適用性,昭和63年電気・情報関連学会連合大会,1-49~
52(昭63-10)

47

論文抄録

時変逆フィルタによる合成開 ロレーダ画像のぼけ除去方式 日立製作所 坪井 晃・本間弘一・他 名

計測自動制御学会論文集

23, 11, 1139~1144(昭62-11)

合成開口レーダは全天候で高精細な画 像が得られる次世代のリモートセンシン グ用センサである。このセンサの観測デ ータはレーダホログラムであり,利用の ためにはホログラムから地表画像を再生 する必要がある。本論文は高画質な画像 を得るための再生方式を提案する。

レーダ信号に含まれるレンジマイグレ ーションと呼ばれる幾何学的ひずみによ って,再生画像に生じる距離方向のぼけ を精密に除去する方法とアルゴリズムを 与えた。提案する方法は,従来方法でぼ けを抑制し,次に時変パラメータを持つ ぼけ除去内挿カーネルと受信信号との積 和演算によって,残ったぼけを除去する 2段階から成る。提案方法の解像度改善 効果は,従来方式比50%であることをシ ミュレーション実験によって確認した。 セレクタ法によるニッケル基 超合金単結晶の方位制御 日立製作所 吉成 明・森本庄吾・他 | 名

鋳物

80, 1, 32~36(昭63-1)

鋳型引出し式一方向凝固装置を用い て、セレクタ法によるNi基超合金単結晶 の方位制御に影響する要因を明らかにす るとともに、〈100〉方位の単結晶を製造す るための鋳造条件について検討した。そ の結果、〈100〉方位の単結晶を製造するた めには、スタータを柱状晶組織にするこ とが必要であり、そのためには鋳込温度 を高くし、鋳型加熱温度を合金の液相線 温度以上に加熱することが望ましいこと がわかった。これらの結果に基づき、チ ル面の形状、鋳込温度、鋳型加熱温度を 適当に選ぶことによって、〈100〉方位から 10度以内の方位を持つ丸棒単結晶を、歩 留り100%で製造することに成功した。 SEMおよびビデオを利用した FRCのクラック進展観察 日立製作所 坂本広志 ^{セラミックス} 23, 3, 211~213(昭63-3)

FRC(繊維強化セラミックス), SI₃N₄-SiC繊維複合体の破壊でのクラックの進 展挙動を,SEMと曲げ試験機を組み合わ せた装置で観察,写真撮影およびビデオ 録画した。曲げ試験時での応力-ひずみ特 性の測定およびクラック進展挙動の観察 結果から,このようなIn-situ観察により 繊維によるセラミックスの強化機構や, クラック進展挙動が明らかになった。

