70MW級超電導発電機の特徴と電磁気特性

正員 佐藤 征規 (日立製作所) 正員 高橋 身佳 (日立製作所)
正員 井出 一正 (日立製作所) 正員 高橋 和彦 (日立製作所)
正員 塩原 亮一 (日立製作所) 正員 荻原 正弘 (日立製作所)
非会員 佐藤 浩之 (日立製作所) 正員 山口 潔 (日立製作所)
正員 高橋 龍吉 (Super-GM) 正員 草深 浩 (Super-GM)

Electromagnetic Characteristics of 70MW-Class Superconducting Generator

Masaki Sato, Miyoshi Takahashi, Kazumasa Ide, Kazuhiko Takahashi, Ryoichi Shiobara, Masahiro Ogihara,
Hirokyu Sato, Kiyoshi Yamaguchi(Hitachi Ltd.) Takahashi Ryukichi, Hiroshi Kusafuka(Super-GM)

Abstract
A national project of development of a superconducting generator(SCG) has been carried out since 1988 in Japan under the New sunshine Project of AIST, MITI. A superconducting generator is supposed to have merits of stability improvement on transmission line, higher efficiency and compactness. A 70MW-class superconducting generator is the goal of the project. Hitachi Ltd has been developing a rotor having superconducting field winding and a stator having air-gap armature winding. The superconducting generator was tested in the Hitachi works, and a full-scale demonstration test was finished on December in 1997 in the Super-GM test site. The machine showed excellent performances, which are enough for a 70MW-class generator.

キーワード：超電導発電機，空隙電機子巻線，磁気シールド，磁束，効率

1. まえがき

超電導発電機(Superconducting generator 以下SCGと略称)は現用機に比較して、電力系統の安定度向上、効率向上、コンパクト化等の利点があり、次世代の発電機として昭和63年から通産省工業技術院主導によるニューサンシャイン計画の下に超電導発電関連機器・材料技術研究組合(Super-GM)の中で70MW級超電導発電機(70MW級モデル機)を対象として実用化を目指した研究開発が進められている。このプロジェクトでは実用規模の200MW級パイロット機を製作するのに必要な技術開発を目的とし、共通に使用される固定子と構造・特性にそれぞれ特徴を持つ3種類の超電導回転子と回転子の冷媒として使用するヘリウムの液化冷凍機システムの開発を行っている⁽¹⁾⁽²⁾。

本報告で述べる超電導発電機は、回転子としてアルミニウム安定化超電導導体を用いた超電導界磁巻線を有し、固定子には空隙電機子巻線構造を用いたことを特徴としている。本回転子においては定格運転状態で部分的常電導状態が生じても回転場の高い冷却能力によって超電導状態が保たれる設計(完全安定化設計)を行い、さらに固定子には2重巻位電機子導体を用いて損失の低減を計った空隙電機子巻線構造を採用している。

本報告は、ニューサンシャイン計画の中で実施された現地実証試験⁽³⁾結果の代表例について述べると同時に有限要素法による磁界解析結果の比較及び現用機の特性ととの比較を行いながら超電導発電機の特徴の概略について述べる。

2. 70MW級超電導発電機の概要

表1に、70MW級超電導発電機の主なる仕様を示す。容量は200MW級機を最適設計し、その同径縮長モデルとして約1/3長の70MW級とした⁽⁴⁾。

図1に、超電導発電機の概略構成と特徴を示す。回転子中心の巻線取付軸に超電導界磁巻線が取り付けられている。

界磁巻線は液体ヘリウムで冷却されるので軸端に設けられたヘリウム給排装置を通してヘリウムが供給される。界磁巻線は、円筒の低温ダンパ・常温ダンパ等で覆われ、現用機のように界磁巻線を固定するウエッジ等が表面になくほぼ完全な円筒回転子となっている。

固定子を構成する主要部分は、磁気シールド部と空隙電機子巻線部であり、空隙電機子巻線は損失低減を目的とし

表1 70MW級超電導発電機の主なる仕様

Table 1. Specifications of 70MW-class SCG

容量	[kVA]	83000
電圧	[V]	10000
電流	[A]	4792
周波数	[Hz]	60
相数		3
回転速度	[rpm]	3600
力率	[%]	90
極数		2

て細素線を2重に転位した2重転位導体で構成している。
 図2に、70MW級超電導発電機の工場試験時における外観を示す。発電機本体、信号変換器盤、コレクタリングカバー、ヘリウムデュア等を見ることができる。

図3に70MW級超電導発電機の概略構造を示す。駆動用電動機に直結されるカップリング付近には界磁巻線の性能を実証するための回転子計測信号等を外部に取り出すためのデータ転送装置を設けている。

固定子の主要部分は、磁気シールドと空隙電機子巻線である。薄鉄板を軸方向に積層して構成した磁気シールドには軸方向に適当な間隔で銅製の冷却パッドを配置し、パッド内に設けた流路に通水して冷却する構造となっている。

空隙電機子巻線は、軸方向に積層したFRPディースによって磁気シールドに固定した構造となっている。巻線は

ステンレス製の冷却水配管で冷却される。

3. 70MW級超電導発電機の電磁気特性

<3.1> 試験回路の概略および試験条件

図4に、70MW級超電導発電機の現地実証試験時の概略レイアウトを示す。超電導発電機は負荷用同期機に直結され更に駆動用電動機に直結されている。負荷試験時の負荷角は超電導発電機と負荷用電動機の直結角度を調整して設定することができる。

図5に、試験時の主回路の概略を示す。超電導発電機と負荷用同期機は発電機遮断器を介して電氣的に接続され各々の界磁電流を調整することによって負荷を調整できる。また、突発短絡試験、ダンパ試験時には、超電導発電機主回路に別途設けられた短絡用遮断器、電圧調整器を用いて試験ができる。試験方法および試験条件は特に断りのない限り、現用機と同様にJEC-114-1979によって行った。

<3.2> 70MW級超電導発電機の基本特性

図6に発電機の基本特性を表す無負荷飽和曲線・三相短絡曲線の実測値と解析値を示す。無負荷飽和曲線は現用機

図1 超電導発電機の概略構成と特徴

Fig. 1. Characteristic of SCG

図2 70MW級超電導発電機の外観(工場試験時)

Fig. 2. 70MW-class SCG (at shop test)

図3 70MW級超電導発電機の概略構造

Fig. 3. Cross-section of 70MW-class SCG

のように鉄心ティース部での飽和がなく超電導発電機ではほとんど直線となっている。実測値と解析値もよく一致し開発した電磁界解析ツールが超電導発電機に十分適用できることを確認した。

図7に出力特性を示す。進相運転領域でのこの種の試験はほとんど実施されないが、現地実証試験においては超電導発電機の特徴の一つである進相運転領域拡大を確認するために実施された。出力特性は遅相領域では界磁電流による制限、進相領域では局部過熱からの制限を受けるが、超電導発電機では、進相領域において、現用機に比べ運転可能範囲を大きくとることが可能であることが実証できた。

<3.3> 70 MW級超電導発電機の電磁気特性

表2に、超電導発電機の主要な定数の測定結果を示す。図6に示した無負荷飽和・三相短絡特性から発電機の同期リアクタンス(X_d)を算定し、 $X_d=0.406[\text{p.u.}]$ の値を得た。表2には、現用機における同期リアクタンスも併せて表示したが、現用機に比べてその値は約1/4となり、超電導発電機による低リアクタンス化が計られ送電容量等の増大に寄与できることが確認された。また、測定値と設計値はほぼ一致し超電導発電機の各定数算定法が妥当であることを示している。表中短絡過渡時定数の測定値と設計値に大きな差が認められるが、これは超電導界磁巻線クエンチ時の保護として挿入した抵抗の影響によるものでこれらを考慮するとほぼ設計値に一致する。

表3に、超電導発電機の効率を示す。70 MW級での効率は98.15%であるが、この値を基に200 MW級超電導発電機の効率を試算すると99.08%と推定され、現用機の効率98.3~98.6%を上回り、超電導発電機による高効率化

図4 70 MW級超電導発電機の概略レイアウト
Fig. 4. Testing configuration

図5 70 MW級超電導発電機の主回路構成
Fig. 5. Testing main circuit

が図られることが実証された。

図8に、磁気シールド内の周方向磁束密度分布を示す。磁気シールド中央部に比べて端部で磁束密度が高くなっている。これは現用機とほぼ同一の分布である。発電機の運転条件により磁束密度分布は変化し進相運転時には磁気シールド中央部が減少し、端部で増加する事がわかる。図8には、三次元磁界解析⁽⁴⁾結果を併せて示したが、測定値と解析値は数値、傾向共によく一致していることがわかる。

図9に、超電導発電機磁界解析時の要素分割図を示す。解析モデルは鉄製のエンドプレート、銅製のフェーシングも含めてモデル化し要素数約15500である。

図10に、ダンパシールド効果を示す。図10は、極低周波(直流)時に電機子電流によって発生する磁束のうち、界磁巻線に鎖交する磁束を基準(1.0[p.u.])とし、磁束の周波

図6 基本特性(無負荷飽和・三相短絡特性)
Fig. 6. Open-and short-circuit characteristics

図7 70 MW級超電導発電機出力特性
Fig. 7. Operation and the capability curve

数変化によって界磁巻線鎖交磁束がどのように変化するかを検討しシールド効果を評価したものである。

ダンパシールド効果は、界磁巻線鎖交磁束の減少によって表されるが、試験結果からでは、シールド効果は周波数0.1[Hz]以上から顕著に現れている。回転子表面の過熱等に影響の大きい逆相成分周波数120[Hz]に関してみると直流磁束に対して界磁巻線鎖交磁束は約1万分の1に減少しており、十分シールド効果のあることを示している。図10には、当初計画した二次元磁界解析によるシールド効果の検討結果を併せて示した。実測のシールド効果の傾向とよく一致し、解析手法が妥当であることを示している。

図11はインピーダンス計算時の低温ダンパ、常温ダンパに発生するうず電流分布を示す。低温・常温ダンパに誘導電流が流れることによって反作用磁束を発生し結果的に界磁巻線に鎖交する磁束をシールドしていることがわかる。

またこの誘導電流で発生する損失による回転子表面の温度上昇は、サーモラベル及び赤外線放射型温度計を用いた表面温度の測定結果、特に問題となる値でないことが確認できた。更に多重円筒回転子は、回転子表面に現用機のような回転子スロットとウエッジ間あるいはウエッジとウエッジ間のように電食の発生部署がない構造となっている。これらを考慮して多重円筒回転子は外乱磁束に対して耐量

表 2 70MW級超電導発電機の主な定数
Table 2. Test results of 70MW class SCG
(Reactances and time-constants)

	測定値	設計値	現用機
同期リアクタンス [p.u.]	0.406	0.420	1.72
過渡リアクタンス [p.u.]	0.338	0.25	0.283
次過渡リアクタンス [p.u.]	0.23	0.21	0.188
次々過渡リアクタンス [p.u.]	0.23	0.18	—
逆相リアクタンス [p.u.]	0.187	0.18	0.197
短絡過渡時定数 [sec]	11.8	186	0.96
短絡次過渡時定数 [sec]	0.06	0.92	0.036
短絡次々過渡時定数 [sec]	0.02	0.03	—
電機子時定数 [sec]	0.1	0.11	0.38

表 3 70MW級超電導発電機の効率
Table 3. Efficiency of SCG

	70MW級 モデル機	200MW級 パイロット機
	実証試験結果	試算値
機械損 [kW]	325.9	430.2
鉄損 [kW]	540.3	646.7
電機子抵抗損 [kW]	385.2	593.4
漂遊負荷損 [kW]	154.1	195.7
ブラシ損 [kW]	5.7	5.7
全損失 [kW]	1411.2	1871.7
規約効率 [%]	98.15	99.08
現用機効率 [%]		98.3~98.6%
	(力率0.9)	(力率0.9)

の大きい構造であると言える。

図12は、三相突発短絡試験時の電機子電流及び界磁電流の変化を示す。また図12には、本超電導発電機とほぼ同容量の現用機の突発短絡時の波形変化(上段:電機子電流, 下段:界磁電流)も併せて示した。現用機の場合はダンパ効果が小さく界磁巻線に突発短絡時の外乱が侵入し界磁電流の変動が大きく発生しているが、超電導発電機においては低温・常温ダンパのダンパ効果が現れ、界磁電流はゆっくりとした低周波での変化となっている。

図13及び図14は、過酷試験結果を示した。試験は現用機でもほとんど経験することがないような異常事態に相当する条件を設定している。図13及び図14に示す電機子電流、電圧、界磁電流等は各過酷試験時に異常が発生していないことを示すと同時に、発電機のフィールドデータとして貴重なものである。

図 8 磁気シールド内周方向磁束密度分布

Fig. 8. Magnetic flux density distribution at magnetic shield

図 9 70MW級超電導発電機三次元磁界解析
[要素分割図]

Fig. 9. Finite element meshes for the analyzed model

図13は、短時間逆相耐量試験時の電機子の電圧、電流波形を示す。現用機の許容短時間耐量の1.5倍の $I_2t=15$ 以上の確認を目的に試験を実施した。実際の試験では遮断器の設定精度上の制限から通電継続時間は14.3[sec]、この時流れた逆相電流は平均で約1.12[p. u.]となった。この値は現用機の1.5倍を上回り $I_2t=17.9$ であり、現用機の耐量に比べて非常に高い値である。本試験を実施後、回転子表面で逆相誘導電流が集中する回転子端部での温度を確認したが60[°C]以下であった。また、逆相耐量の評価は短時間耐量と連続耐量があり、逆相電流を現用機の1.5倍相当の $I_2=0.12$ [p. u.]で約3時間の連続逆相耐量試験を実施したが回転子表面の温度は問題となる値ではなかった。

図14は、超電導発電機異位相投入時の電機子電圧、電機子電流、界磁電流波形を示す。本試験は超電導発電機の電圧と負荷用同期機の電圧位相を約180度ずれた状態で超電導発電機と負荷用同期機間の発電機遮断器を投入し瞬時に再開放する試験である。目的は発電機主変圧器側で短絡事故が発生した場合界磁巻線がクエンチしないことの確認、また空隙電機子巻線の支持強度、多重円筒回転子の強度が十分であり、発電機全体としての信頼性を確認することで

図10 70MW級超電導発電機ダンパシールド効果
Fig. 10. Damper shield effect of 70MW-class SCG

図11 有限要素法によるうず電流解析結果
(周波数=120[Hz])
Fig. 11. Distribution of eddy current

あり、いわゆる三相再閉路試験に準ずる試験といえる。超電導発電機にとっては短時間の間に発電機短絡・開放が行われ、短絡継続時間は0.25[sec]と短時間であるが、非常に過酷な試験である。試験実施後の固定子、回転子には異常が認められず、70MW級超電導発電機は十分過酷試験に耐えうることが実証された。

4. あとがき

完成した70MW級超電導発電機の現地実証試験を通して、超電導発電機の特徴である電力系統の安定度向上、効率向上等が十分図れることが確認できた。また空隙電機子巻線方式、多重円筒型回転子構造が信頼性における発電機構造として十分実用可能であることが実証できた。

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・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託により実施したものである。

(平成11年4月6日受付、同11年6月15日再受付)

文献

- (1) N. Higuchi, et al, "Recent Progress of Development of 70MW Class Superconducting Generators", IEEE Trans. on MAGNETICS, VOL3, NO. 1, MARCH 1993
- (2) 佐藤, 高橋, 塩原, 佐藤, 山口, 木村:
「70MW級超電導発電機の電磁気特性」
平9電気学会全大, No. 1091
- (3) 今井, 草深, 高橋, 島田, 渋谷, 塩原, 山口, 高橋:
「70MW級高安定低速応型超電導発電機の諸特性」:
平10超電導応用電力機器・回転機合同研究会,
ASC-98-20, RM-98-34
- (4) 高橋, 高橋, 佐藤, 塩原, 植田, 木村:
「70MW級超電導発電機ステータの三次元磁界解析」
平9電気学会電力・エネルギー部門大会, No. 668

図12 三相突発短絡試験時の電機子電流
Fig. 12. Test result of three-phase sudden short-circuit

図13 70MW級超電導発電機の短時間逆相耐量
Fig. 13. Negative-phase-sequence overcurrent test

佐藤 征規 (正員)昭和18年5月26日生。昭和34年4月(株)日立製作所入社。日立工場を経て日立研究所に勤務。その間昭和47年日立製作所茨城工業専門学校電気科を卒業。回転電気機械の研究に従事。

高橋 身佳 (正員)昭和24年5月11日生。昭和47年3月秋田大学鉱山学部電気工学科卒業。同年4月(株)日立製作所入社。日立研究所勤務。回転電気機械の研究に従事。現在、同所主任研究員。工学博士。日本応用磁気学会、低温工学会、IEEE会員。平成元年及び平成8年電気学会論文賞受賞。

図14 70MW級超電導発電機異位相投入
Fig. 14. Differential-phase-sudden-short-circuit test

井出 一正 (正員)昭和39年1月5日生。昭和63年東北大学大学院工学研究科電気及び工学専攻博士前期課程修了。同年4月(株)日立製作所入社。日立研究所を経て平成11年4月日立電力本部電力設計部勤務。大型回転機の研究、開発に従事。工学博士。日本応用磁気学会会員。IEEE Member。平成4年及び平成6年電気学会論文発表賞、平成5年電気学会論文賞受賞。

高橋 和彦 (正員)昭和39年2月20日生。平成元年3月法政大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月(株)日立製作所入社日立研究所勤務。MRイメージング装置、回転電気機械の磁界解析に関する研究に従事。日本応用磁気学会会員。平成6年及び平成9年電気学会論文発表賞受賞。

塩原 亮一 (正員)昭和32年6月5日生。昭和55年3月東京工業大学電気電子工学科卒業。同年4月(株)日立製作所入社。日立工場勤務。タービン発電機、超電導発電機に関する設計に従事。

萩原 正弘 (正員)1956年9月27日生。84年明治大学修士課程修了。同年(株)日立製作所入社。日立研究所にて超電導材料の研究に従事。その後、日立工場にて工技院NSSの超電導発電機の研究開発に従事。現在、本社事業部に勤務。主任技師。

佐藤 浩之 (非会員)1964年12月生。89年名古屋大学理学部物理学科卒。同年(株)日立製作所入社。日立工場を経て日立事業所に勤務。タービン発電機及び超電導発電機の開発・設計に従事。

山口 潔 (正員)1951年生。74年九州大学工学部機械工学科卒業。同年(株)日立製作所入社。50 MVA超電導発電機、放射光装置等の超電導応用機器の研究開発を経てニューサンシャイン計画の70MW級超電導発電機開発に従事。現在、同社日立研究所主任研究員。低温工学会員。IEEE会員。

高橋 龍吉 (正員)昭和27年3月16日生。昭和54年3月大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻前期課程修了。同年4月(株)日立製作所入社。日立研究所勤務。超電導マグネットに関する研究に従事。平成9年10月よりSuper-GMに出向、現在に至る。プラズマ核融合学会低温工学会員。工学博士。

草深 浩 (正員)1960年8月12日生。83年同志社大学工学部電気工学科卒業。同年中部電力(株)入社。主として火力発電所の保守・建設に従事。91年4月～9月(財)名古屋産業科学研究所中部ハイテクセンター短期研究生。96年7月よりSuper-GMに出向。現在、同組合試験センター課長。