

超電導発電機は、現用発電機に比べ低損失、小型・軽量、電力系統の安定度向上などの利点をもっている。これらの利点から、超電導電力応用機器の一つとして実用化が期待され研究開発が進められている。

わが国では、ニューサンシャイン計画の一環として、現在7万kW級モデル機の開発が進められている。そのなかで、当社は励磁制御が可能な超速応励磁型超電導発電機を開発を行い、ロータ部分モデルの製作および回転励磁試験ならびに、7万kW級モデル機の静止励磁試験を実施して成果を上げている。

The merits of superconducting generators are lower loss, reduced size and weight, and improved power system stability. The development of such generators for practical application is now being actively pursued.

In Japan, a 70 MW-class model machine is being developed as part of the New Sunshine Project. Under this project, Toshiba has been developing a quick-response excitation type superconducting generator in which excitation control can be actively carried out. Toshiba has successfully fabricated a partial rotor model and conducted an excitation test in rotating condition, and is studying a 70 MW-class model machine.

This paper describes the recent results of these activities for the development of the superconducting generator.

1 まえがき

超電導発電機は現用発電機に比べて多くのメリット⁽¹⁾があることから、電力系統に導入される先導的な超電導電力応用機器として、わが国では7万kW級モデル機の研究開発が国家プロジェクトとして進められている⁽²⁾。

当社は、そのなかで超速応励磁型超電導発電機を開発を担当しており、多くの研究成果を上げている。

2 超電導発電機の構成

図1に超電導発電機と現用発電機の構造比較を示す。超電導発電機は、界磁巻線にNbTi系の超電導体を使用し、大電流を流すことにより約4Tの高磁界を発生(現用発電機では約1T)させ、エネルギー密度を高めて小型・軽量化を図っている。回転子は真空断熱層やダンパ層などをもち多重円筒構造となっている。固定子は、回転子から発生する磁束密度が高いために、鉄心を用いない空隙(げき)電機子巻線構造を採用している。回転子軸端には、静止部と回転部間で液体ヘリウム供給とガスヘリウム排出を行うためのヘリウム給排装置(HTC)を設けている。

3 超速応励磁型超電導発電機の特長と開発課題

超電導発電機を電力系統に導入・実用化するためには、現用機と同様に、系統側の電氣的な外乱時(例えば系統短絡

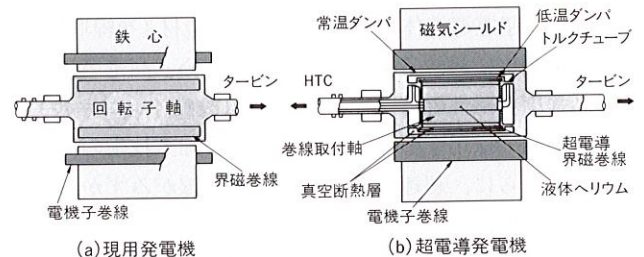


図1. 現用発電機と超電導発電機の構造比較 超電導発電機は現用機と異なり、多重円筒構成で内部に液体ヘリウムをもっている。

Structures of superconducting and conventional generators

事故など)に、界磁電流を急速に変化させ発電機電圧を制御し発電機を安定に運転させる必要がある。超速応励磁型超電導発電機は、界磁電流を1秒間で定格電流(数千A)相当分を急速に変化させること(超速応励磁)が可能で、他の超電導発電機に比べ実用機にもっとも近いといわれている。

超速応励磁型超電導発電機の技術開発課題を表1に示す。また、同発電機の特長は次のとおりである。

- (1) 超電導発電機一般の特長である同期リアクタンスを低くできることはもちろんのこと、発電機端子電圧を制御する励磁制御能力が高いため、過渡的に送電できる電力が大きく系統の安定度が向上する。
- (2) 需要側で過渡的に多くの遅相無効電力を必要とする場合でも、大きな界磁電流を流して発電機端子電圧を一定に保つことができ、系統の電圧安定度が向上する。

表1. 超速応励磁型超電導発電機の技術開発課題
Technologies for development

項 目		主要技術課題
発	超電導体	○低損失・大電流導体(極細多芯成形撚り線)の開発
	界磁巻線	○大電流成形撚り線の高遠心力場における安定性確保と冷却の両立(巻線化技術, 固定法, 冷却法) ○高い頂上電圧に対する界磁回路の絶縁方式の確立
機	構造部材	○速応励磁時の構成部材の渦電流損の把握, 低減と冷却 ○非磁性高強度高抵抗大口径長尺管の材料開発と加工技術(インコネル718など)
	常温ダンパ	○速応励磁と逆相・非同期磁界の双方に対して適切な特性をもつ材料と構造の開発
	ふく射シールド	○高抵抗材を用いた内部冷却構造
励磁装置・システム		○超電導発電機用速応励磁装置・システムの開発
運 用 技 術		○速応励磁を考慮した監視制御・保護方式の開発 ○電力系統安定性の把握(定常時, 過渡時)

超速応励磁型超電導発電機では、界磁電流の急速な変化に対する交流損失を低減するため、極細で多芯(しん)の超電導線を二重に撚(よ)った平角成形導体を開発・採用した。導体の剛性が低いことや印加電圧が高いことから、併せて導体の固定・巻線・絶縁・冷却技術などについても開発した。また、超電導導体を支持固定する構造材(巻線取付軸)は、界磁変化に対する損失を低減するため、高電気抵抗かつ高強度非磁性の特殊なNi基合金(改良インコネル)の材料を開発・採用するとともに、材料の加工技術の開発も行った。さらに、超速応励磁時に界磁巻線がみずから発生する磁界変化に対しては透過性をもつが、系統じょう乱時などの外部で発生する逆相分の非同期磁界に対しては高い減衰特性をもつダンパ構造(三層構造のダンパ)を開発した。

4 最近の研究成果

要素技術開発の総結集であるロータ部分モデルを製作し、1996年度に回転検証試験を実施するとともに、97年度には7万kW級モデル機用回転子の静止励磁試験を実施した。

4.1 ロータ部分モデル試験の成果

図2にロータ部分モデルの試験状況を示す。主な成果は次のとおりである。

- (1) 冷却特性 試験では、回転子の界磁巻線を極低温まで冷却するために最初に液体窒素を用いて冷却し、途中で液体ヘリウムに置換・冷却するという方法を採用した。その結果、約35時間で常温から極低温まで冷却できた。
- (2) 振動特性 常温状態および極低温状態で、停止状態から定格回転数の3,600rpmまで運転したときの振動特性を図3に示す。試験の結果、振動値は30μmp-p

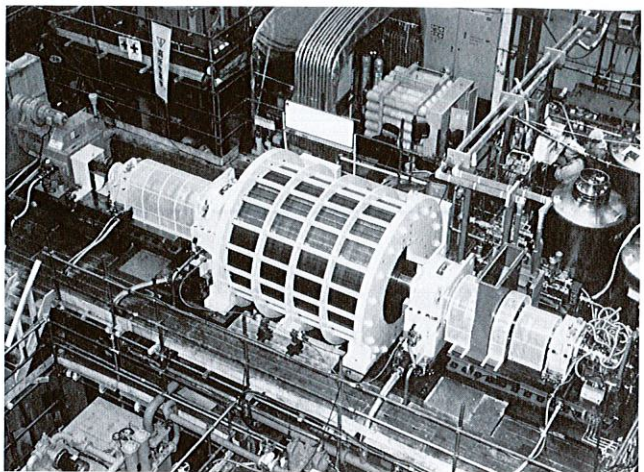
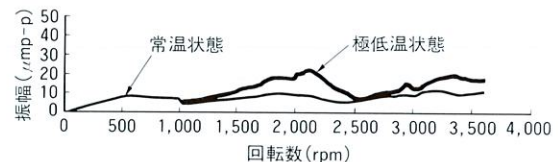
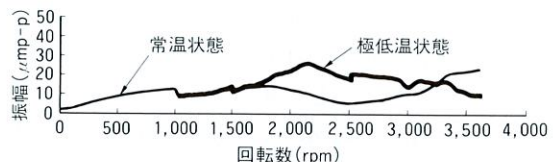


図2. ロータ部分モデルの試験状況 回転子の回転遠心力場での構造健全性、界磁巻線の超電導特性などの検証を目的として回転励磁試験を行った。

Overall view of partial rotor model under testing



(a) 駆動側軸受部



(b) 反駆動側軸受部

図3. ロータ部分モデルの振動特性試験結果 常温で振動バランス調整を行った後冷却し、3,600rpmまで昇速して振動を測定し、運用上問題ないことを実証した。

Vibration characteristics of partial rotor model

以下であり、かつ冷却による振動量の変化も低く、実運用上問題ないことを実証した。

- (3) 過酷試験 クエンチ(常電導転移)試験や常温過速度試験(4,320rpm)を実施し発電機の健全性を検証した。同試験中の振動の変化もごくわずかであった。また、クエンチ試験時の発電機の機内圧力は最大で0.3MPaで実運用上問題ないことを実証した。
- (4) パルス励磁特性 定格回転数で回転させながら、毎秒5,000Aという電流変化率で折り返す三角波パルス励磁を行った。その結果、7万kW級モデル機相当の急激な界磁電流変化に対して、クエンチを起こさずに安定に運転できることを検証した。

4.2 7万kW級モデル機静止励磁試験の成果

7万kW級モデル機の静止励磁試験を実施し、静止場での界磁巻線の超電導特性を検証した。クライオスタットへのつり込み時の界磁巻線を図4に示す。主な試験の成果は次のとおりである。

- (1) 界磁巻線特性 極低温状態で2.5kVrms 1分間の耐電圧試験を行い界磁巻線絶縁の健全性を確認した。定格界磁電流(3,200A)通電時の回転子表面の磁場を測定し、設定値とほぼ一致すること、および通電による発熱量の増加が十分小さいことを検証した。
- (2) クエンチ特性 電流を増加してクエンチ電流を測定した(クエンチ試験)。その結果、発電機の最大運転電流(4,500A)以上の電流(4,840A)まで通電できることを確認した。また、クエンチ時にも発熱量を十分に低く抑えることができることを検証した。
- (3) パルス励磁特性 100Aから4,330Aまで、毎秒

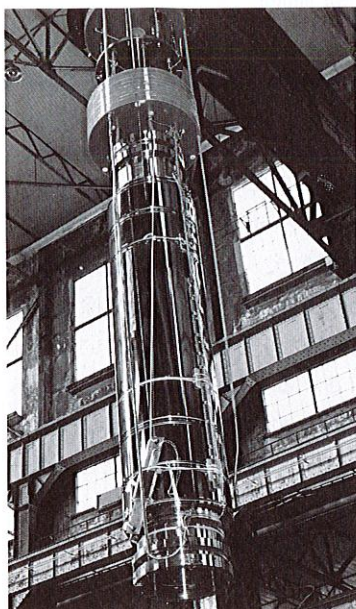


図4. クライオスタットへのつり込み時の界磁巻線 モデル機静止励磁試験は界磁巻線の巻線取付け軸を縦型の大型クライオスタットに挿入して試験を実施した。

Field winding of 70 MW-class model machine rotor

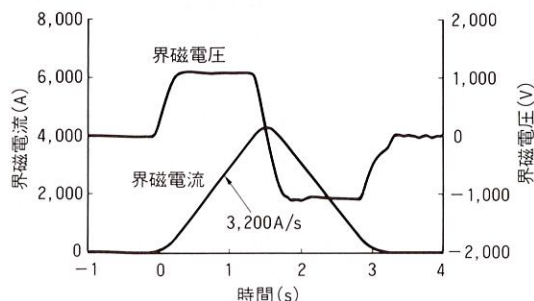


図5. パルス励磁試験結果 所定の電流変化率が一定となるように電源電圧を制御して印加し、クエンチの発生がなく通電できることを実証した。

Results of pulse excitation test

3,200 Aの電流変化率で折り返す三角波パルス励磁を行った。その結果、交流損失によりクエンチを発生することもなく通電可能であることを検証した。試験結果の一部を図5に示す。

5 今後の予定

7万kW 超速応励磁型モデル機用回転子は、ふく射シールドや常温ダンパを組立てのうえ、多重円筒回転子として完成し、97年度末に工場で行った回転励磁試験を行い、その後関西電力(株)の大阪発電所構内に建設された試験センターに搬入して、98年度に現地試験を実施する予定である。

6 あとがき

以上に述べた成果により、超電導発電機の実用化が一歩前進した。21世紀に向かって電力需要の増大が予想され、電力の安定供給のためには、発電所の偏在化・集中化・送電の長距離化や電力システムの安定度の低下などの問題、さらには省資源・地球環境問題も絡んだ省エネルギー化、高効率化といった多くの問題を克服していく必要がある。超電導発電機の実現はこれらの諸問題に一つの解を与えてくれるものと確信している。

この開発研究は、通商産業省 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)からの受託により超電導発電機関連機器・材料技術研究組合(Super-GM)の研究テーマとして実施した。

文献

- (1) 長村英博, 他: 超速応励磁型超電導発電機, 東芝レビュー, 46, 5, pp.398-401 (1991)
- (2) 市川建美: 超電導発電機-実証試験の開始真近な研究開発-, 電気学会誌, 117, 4, pp.117-221 (1997)



長村 英博 Hidehiro Nagamura

火力事業部 火力電機技術部主務。
火力発電所電気システムのエンジニアリング業務に従事。
Thermal Power Plant Div.



中西 一夫 Kazuo Nakanishi

重電技術研究所 回転機器技術開発部主査。
発電機設計および超電導機器の開発に従事。
Heavy Apparatus Engineering Lab.



中村 英之 Hideyuki Nakamura

京浜事業所 発電機部。
発電機設計および超電導発電機の開発に従事。
Keihin Product Operations