

## 論文の内容の要旨

論文題目 7万 kW 級超電導発電機の特性・性能  
に関する実証的試験研究

氏 名 今井 義博

### 1. はじめに

従来の超電導発電機の研究開発では、実用化を目指した大容量機の研究では、超電導発電機の単体としての特性、性能の実証および評価が中心であり、また、比較的小容量機の研究開発では、基本特性および、系統特性の実証に関する研究が中心であって、超電導発電機と冷凍システムを組み合わせた超電導発電システムとしてハードウェアからシステムに至る実証的研究が少ない。

本論文では、超電導発電システムに関して、以下の5点を主要な研究課題とした。

- ・超電導発電機の特長、すなわち低同期リアクタンス、進相運転能力、高効率、ダンパ特性の実証と評価。
- ・実用機として必要と考えられる長時間の実負荷運転と DSS 運転の実証と評価。
- ・系統事故時にも現用機と同等の信頼性を有することの実証と評価。
- ・実電力系統における各種電圧変動に対する超電導発電機の特性検証および評価。
- ・コンバインドサイクル発電等に超電導発電機を適用するにあたっての起動方法の検証と評価。

### 2. 試験設備の概要

試験に用いた7万 kW 級超電導発電機の仕様を表1に示す。超電導発電機の開発課題は多岐にわたるため、実証試験には3種類のロータ（低速応型A機、低速応型B機、超速応型機）と共用のステータを用いた。また、試験は電力系統への影響なしに実負荷試験や過酷試験が出来る M-G 方式（返還負荷法）を採用した。実証試験の項目は、現用発電機の試験法（JEC-114）をベースに実用段階における超電導発電機に必要なと考えられる試験項目に加え、開発機としての各種技術課題の検証を目的に計画、実施した。さらに、超電導発電機の実運用上の性能検証の充実を図るため、系統連系試験およびコンバインドサイクル発電等における起動方法に関する試験を追加実施した。

表 1 7万 kW 超電導発電機の仕様

		低速応型A機	低速応型B機	超速応型機
容量	MVA	83	83	73
電圧	V	10	10	10
電流	A	4792	4792	4215
同期リアクタンス	pu	0.35	0.35	0.45
ロータ	界磁電流 定格/最大 A	3000/3600	3000/3600	3200/4500
	界磁電流変化率 A/s	300	300	3200
	界磁巻線導体	高安定型	高電流密度型	低損失型
	常温ダンパ	単層	かご型	三層
	低温ダンパ	三層	単層	単層(輻射シールド)
熱収縮部支持方式	二重軸受	フレキシブルディスク	フレキシブルサポート	
ステータ		亀甲形空隙電機子巻線 水冷・2重転位・常電導導体(銅) 磁気シールド		

### 3. 低速応型および超速応型超電導発電機の実証試験結果と評価

実証試験では、超電導発電機の基本的な性能および特長の実証と評価を行った。そのうち、超電導発電機の性能・特長について、実証試験結果から以下の点を明らかとした。

#### (1) 超電導発電機の特長の実証

- ・ 機器定数測定結果およびその解析結果から超電導発電機の低同期リアクタンスを、効率試験及びその解析から超電導発電機の高効率を実証した。
- ・ 各種負荷条件において、熱的・機械的に安定な運転特性を実証するとともに、現用機に比較して約 2 倍の進相運転能力を実証した。
- ・ 逆相電流試験では、JEC114 で規定されている現用機の 1.5 倍以上の試験条件で連続逆相耐量試験および短時間逆相耐量試験を実施したが、超電導発電機に異常はなく、優れた逆相耐量を実証した。また、連続逆相試験結果から、常温ダンパの温度上昇と許容温度から逆相電流 0.28pu 程度までの連続運転が可能と考えられる。
- ・ 変圧器高圧側 3 相突発短絡に相当する試験として、短絡電流、電磁トルク、初期界磁電流、界磁電流最大変化率を等価指標として、リアクトル短絡法および異位相短絡法により想定事故と同等な条件で試験を行ったが、熱負荷、振動に異常はなく、また、解析により求めた回転子各部応力に対して、材料の許容値は十分な耐力のあることを検証した。

また、実証試験結果の評価から、超電導発電機的设计および運用に関して下記の知見を得た。

- ・ 超電導発電機は、ロータとステータの両方の巻線が非磁性体に装着された空隙巻線構造となるため、磁気回路設計において 3 次元電磁界解析が必要である。
- ・ 超電導発電機の界磁巻線抵抗はほぼ零であることから、時定数は現用機に比較して一桁以上大きくなる。しかしながら実用上は、励磁電源の内部抵抗に大きく依存することから、ブラシに加え励磁電源の等価的な抵抗を考慮して時定数を算出する必要がある。
- ・ 超電導発電機固定子の磁気シールド端部構造は、損失低減の観点からテーパコア構造とする必要がある。
- ・ ダンパシールド特性は、その磁気遮蔽効果は、低速応型では 0.1Hz 程度から、超速応型では数 Hz 程度から顕著となり、逆相成分周波数 (120Hz) でそれぞれ  $10^{-3}$  および  $10^{-4}$  オーダーとその特性は、設計値と実測値が良く一致し設計手法の妥当性を検証した。
- ・ 発電機の出力変更時における液体ヘリウムの供給は、デュワ圧力および送液弁開度一

定の条件において自律的に制御できる。

- ・超速応型機の巻線取付軸に使用した改良インコネル 718 は、わずかな磁化特性を有しており、この影響により磁束が強められ定格界磁電流は、設計値より約 10%低減された。この結果より、改良インコネル材の使用により界磁巻線の仕様が緩和できることが示唆された。
- ・超電導発電機の励磁装置では、サイリスタ変換器が発生する 5 次以上の高調波のリップル電圧は、界磁巻線取付軸に渦電流損失の増加や界磁巻線の自己インダクタンスの低下、さらには界磁巻線のリップル電流増大と損失増加を引き起こす。したがって、これらの損失を低減するためにサイリスタ変換器の後に平滑回路として L-R 型フィルタを付加する必要がある。

#### 4. 系統連系試験結果と評価

実際の電力系統システムでの超電導発電機の運転性能を検証するため、超速応型超電導発電機を 77kV 系の送電線を介して商用電力系統へ連系した。超電導発電機の電圧は、系統連系のため新設した変圧器の定格電圧にあわせ 6.9kV とした。この連系試験において、同モデル機を超電導同期調相機として使用し、実系統の電圧変動下において安定に運転できることおよび電圧安定化効果や運転性能を実証的に明らかにした。本試験においては、励磁装置に PSS 機能を付加しておらず、またダンパ構成が常温ダンパのみで、低温ダンパを有する低速応型よりダンピング力が弱いにもかかわらず、各種変動に対して良好なダンピング特性を示した。また、5 機無限大系統における超電導発電機の導入による系統電圧の安定化効果についてシミュレーションを行い、現用機に比して電圧変動を安定化する効果が大きいことを明らかにした。

さらに、超電導発電機の特長の検証として、高調波吸収効果および進相運転能力の実証を行った。高調波吸収効果については、受電点から流入する電流の高調波のフーリエ解析を行った結果、超電導機ありの場合、5 次の高調波成分が超電導機なしの場合より多く、超電導発電機の高調波吸収効果を実証した。この結果、超電導発電機の高い逆相耐力を考慮すれば電力系統の高調波抑制機器として期待できる。また、進相運転の能力については、77kV 系統の分路リアクトルのスケジュール運転の代替運転を行い、無効電力の安定運転に成功した。この間、超電導発電機のヘリウム液面、軸振動、フェーシング温度の異常が無く、リアクトルの代替運転が可能であることを実証した。この結果から、超電導発電機の導入により、系統の調相設備の削減が期待できる。

以上の実証試験結果およびシミュレーションから、超電導発電機は、系統の擾乱に対して安定に運転でき、現用機に比べ  $X_d$  が 1/3、進相運転能力が倍などの優れた性能を有することから、高い系統電圧安定化能力を有するといえる。

#### 5. コンバインドサイクル発電等における超電導発電機の起動方式の検討

現状のコンバインドサイクル発電システムやガスタービン発電システムでは、ガスタービン着火速度まで別途起動装置を用いて昇速する必要があるが、超電導発電機ではその構造上、現用機で用いられている方法をそのまま適用することが出来ない。このため、超電導発電機の起動方法についての検討が必要であるが、これについては従来十分な検討がなされていなかった。

考えられる起動方法のひとつとして、超電導発電機の常温ダンパを活用して超電導発電機を誘導機として起動する方式がある。これは、低速ターニングから液体ヘリウムを安定に貯液できる回転数まで、誘導機として起動および昇速を行い、貯液完了後は、界磁巻線に通電して現用機と同様にサイリスタ起動によりタービン着火速度まで昇速する方法であ

る。ここでは、超速応型超電導発電機を可変周波数可変電圧の定電流インバータ（VVVF）電源と組み合わせて誘導機起動方式の試験を行い、数 rpm のターニング状態から液体ヘリウムの貯液が安定して出来る 360rpm まで昇速できることを実証するとともに、解析により 20 万 kW 級超電導発電機でも誘導機起動方式が可能であることを明らかにした。

実証実験に先立ち、解析により誘導機起動方式が適用可能か検討を行った。図 1 に電機子電流 587A における発生トルクとすべり周波数の結果を示す。超速応型超電導発電機の場合、巻線取付軸を代表とする極低温部材に使用している改良インコネル材の磁化の影響を受け、磁化なしに比し発生トルクが大きい。起動に必要な 450Nm を十分に確保できることを確認した。

実証試験では、超速応型超電導発電機をターニング状態から液体ヘリウムの貯液が安定して行える 360rpm まで誘導機起動方式により昇速し、液体ヘリウムの貯液完了後に界磁巻線に通電した。この間、超電導発電機の振動及び各部温度に異常はなく、この結果から、この回転数以上での昇速時、超電導発電機を同期電動機としてサイリスタ起動できる可能性を見出した。さらに、

解析により実用規模である 20 万 kW 級超電導発電機においても、電機子の通電電流を定格の 10%以上にすれば、本起動方式が適用可能であることを明らかとした。また、貯液時の極低温部材の損失発生を抑えるには、電機子の通電電流を増加することが有効であることを明らかにした。

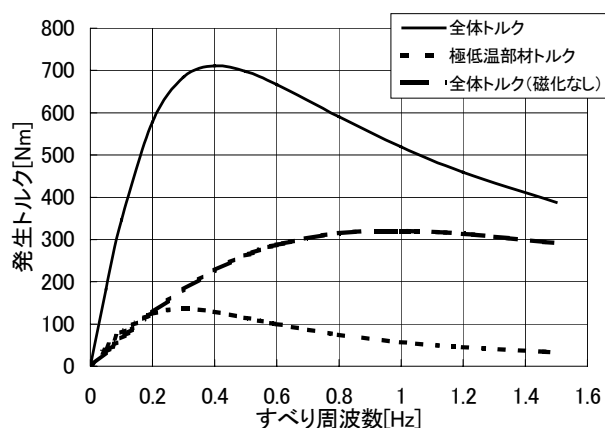


図 1 誘導機起動時の発生トルク

## 6. まとめ

本研究では、超電導発電機の実用化を目指し、超電導発電機の特長、性能および実運用における性能検証の実証と評価を行った。その結果、超電導発電機の特長を実証するとともに、設計の妥当性および解析精度の確認ができ、また、系統事故時における耐力も十分であることを実証した。さらに、超電導発電システムの構築に関して新たな知見も得られた。これらの結果を通して、技術的には、超電導発電システムの実用化は、現在の技術水準で十分可能と考えられる。今後は、一層のコスト削減を図り、原動機を含めた総合検証を経て実用化に至るものと考えられる。