

一軸式コンバインドサイクル発電設備用全含浸絶縁水素間 接冷却タービン発電機

Global VPI Insulated Indirectly Hydrogen-Cooled Turbine Generator for Single-Shaft Type
 Combined Cycle Power Generation Facilities

山崎 勝 YAMAZAKI Masaru

新倉 仁之 NIKKURA Hitoshi

谷藤 怜 TANIFUJI Satoshi

富士電機は、全含浸絶縁システムの空気冷却タービン発電機において多くの実績を持っている。沖縄電力株式会社 吉の浦火力発電所 1・2号機向けに全含浸水素間接冷却タービン発電機的设计・製作を行った。これは、構造・製造方法の多くを空気冷却タービン発電機と基本的に同一とする両軸駆動の一軸式コンバインドサイクル発電設備用の発電機である。実績から得られたデータや通風解析および強度解析により、最適化や信頼性の向上を実現している。各種試験において、性能を満足する結果を得ており、現地でも良好な運転状態にある。

Fuji Electric has a great deal of experience in air-cooled turbine generators for global VPI insulation systems. We designed and built global VPI indirectly hydrogen-cooled turbine generators for Yoshinoura thermal power plant No. 1 and No. 2 of The Okinawa Electric Power Company, Incorporated. These are double-end drive generators for a single-shaft, combined cycle power generation facilities that use many of the same basic construction and manufacturing methods as air-cooled turbine generators. Using data obtained through experience and results from ventilation analysis and strength analysis, we are achieving optimization and increased reliability.

Through each type of test, we are obtaining results that satisfy performance expectations and we are seeing favorable operating conditions at the power plants.

1 まえがき

ガスタービンと小型の蒸気タービンから構成されているコンバインドサイクル発電方式は、発電効率や運用性が良く、環境負荷が低いという利点があり、近年、広く採用されるようになった。また、この発電方式は急速起動が可能のため、DSS (Daily Start & Stop) 運用が容易に行え、昼夜の電力需要の格差が大きい場合にも対応が可能であり、今後ともいっそう需要は増加するものと予想される⁽¹⁾⁽²⁾。

このたび富士電機が、沖縄電力株式会社 吉の浦火力発電所 1・2号機向けに設計・製作した発電機は、一軸式コンバインドサイクル発電設備用の全含浸絶縁システムを適用した水素間接冷却タービン発電機である。本稿では、その特徴と適用技術について述べる。

2 一軸式コンバインドサイクル発電設備の特徴

コンバインドサイクル発電設備には、ガスタービン-発電機-蒸気タービンを一軸上に並べた一軸式と、ガスタービン発電設備と蒸気タービン発電設備を別に設置する多軸式とがある。一般に一軸式発電設備では、複数系列を設置し、それぞれ独立して運用することができる。発電必要量が

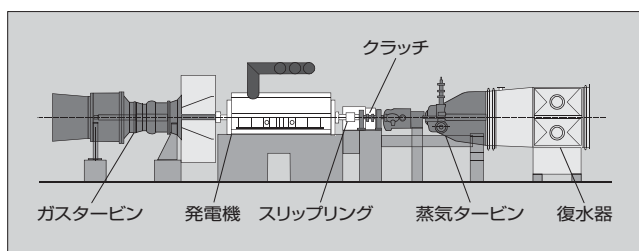


図1 一軸式コンバインドサイクル発電設備の構成例

減ったときには系列単位で停止し、他の系列が定格負荷で運転できるようにする。これにより、プラント全体の部分負荷効率を高く保つことができる。図1に、富士電機とシーメンス社の協業による一軸式コンバインドサイクル発電設備の構成例を示す。

3 発電機の特徴

発電機的主要仕様を表1に、断面図を図2に示す。この水素間接冷却タービン発電機は、固定子巻線、固定子鉄心および回転子巻線の構造と製造方法を、空気冷却タービン発電機と基本的に同一とした。そのため、空気冷却タービン発電機での多くの実績、共通技術および設備の共有化などに基づく高い信頼性を得ることができた。

表1 300MVA 水素間接冷却タービン発電機的主要仕様

| 項目 | 仕様 |
|--------|-------------------------|
| 出力 | 300 MVA |
| 電圧 | 16,000 V |
| 力率 | 0.85 |
| 周波数 | 60 Hz |
| 冷却方式 | 固定子: 水素間接 回転子: 水素直接 |
| 水素ガス圧力 | 0.4 MPaG |
| 冷媒温度 | 43 °C |
| 回転速度 | 3,600 min ⁻¹ |
| 励磁方式 | サイリスタ直接励磁 |
| 全長 | 13.1 m |
| 全質量 | 325 t |

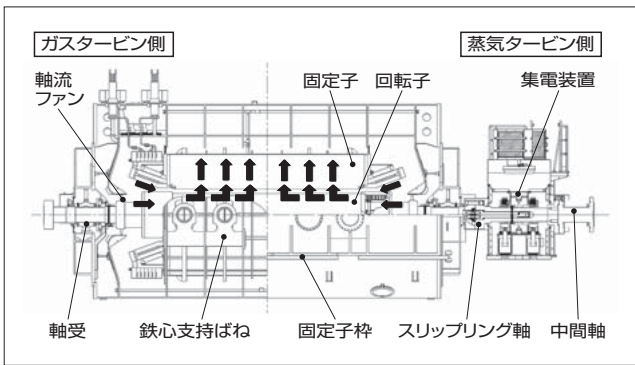


図2 300 MVA 水素間接冷却タービン発電機の断面図

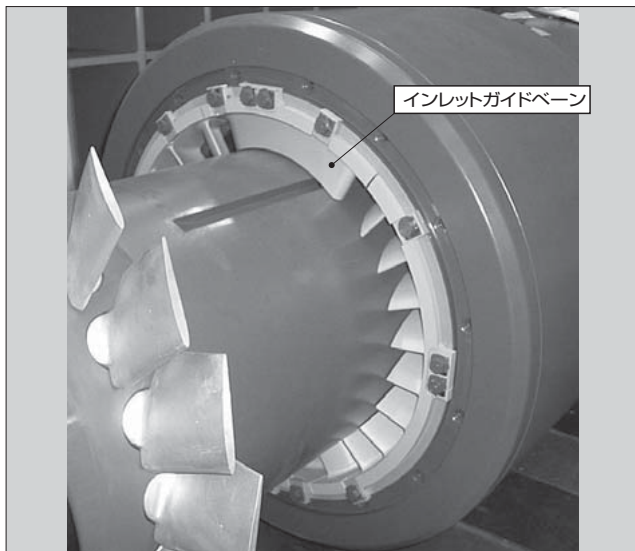


図3 インレットガイドベーン

3.1 冷却方式

本発電機は、固定子の冷却に水素間接冷却方式を採用している。通風経路については、図2の矢印に示すように、回転子両端の軸流ファンから固定子および回転子の各部に冷却ガスが送り込まれ、固定子の冷却ガスの流れは全て内径側から外径側へ流す方式としている。

これらの冷却や通風方式は、富士電機が数多くの実績を持つ空気冷却タービン発電機と同じ方式であり、試作実験機や実績から得られたデータを基に設計され、最適な冷却ダクトの配置と冷却風量の分布によって、巻線温度分布の均一化を図っている。

また、回転子に対しては、コイル各部の冷却風量の均一化を図るため、図3に示すインレットガイドベーンを保持リング支え内径部に設け、冷却性能の向上を実現している。

3.2 回転子の構造

図1に示すとおり、一軸式コンバインドサイクル発電設備では、発電機の両端にガスタービンと蒸気タービンを配置しているため、次の配慮をしている。

(1) 軸系全体での曲げ・ねじり振動応答計算

本発電設備は、ガスタービンシンプルサイクルとコン



図4 鉄心支持ばね

バインドサイクルの両運転が可能である。いずれの運用も発電機の定格回転速度と危険速度とが近づかないよう配慮し、十分な振動応答の検討を行っている。

(2) スリップリング軸材

発電機の回転子は、両軸駆動となり、駆動トルクが伝達される。また、短絡事故時に耐え得る強度を備える必要から、スリップリング軸材に、発電機の軸材と同一のNiCrMoV鋼を採用している。

(3) 絶縁カップリング

回転子軸は、運転中に発生する起電力により、主軸、軸受および二つの軸受を結ぶ構造物の間を電流が還流し、発電機の運転に支障をきたす恐れがある。そこで、電流が還流しないように、軸受には電流回路を遮断するための絶縁を施している。今回は中間軸の軸受を介して電流が還流しないように、スリップリング軸と中間軸間の接続には絶縁カップリングを適用している。

3.3 固定子の構造

固定子鉄心は、圧力容器である円筒状の固定子枠に図4に示す鉄心支持ばねを介して支持されている。適切なばね効果によって鉄心の電磁振動が固定子枠に伝わるのを抑制する構造である。

4 全含浸絶縁技術

固定子の絶縁には、富士電機が長年実績を積んできた全含浸絶縁技術と、国内最大の規模で、世界でも屈指の全含浸製造設備を用いた全含浸絶縁システムを適用している。

全含浸絶縁固定子を図5に示す。固定子巻線と鉄心は一体で絶縁樹脂を含まれることから、鉄心と巻線、くさびが強力に固着して緩みにくくなるため、信頼性が向上し、メンテナンスも低減することができる。また、巻線と鉄心との間に樹脂で充填され空隙がないことから、巻線から鉄心への放熱性が良くなり、巻線単体で含浸する方式に比べて

〈注〉 シンプルサイクル：燃料を用いる原動機で発電のみ行うエネルギーシステムをいう。

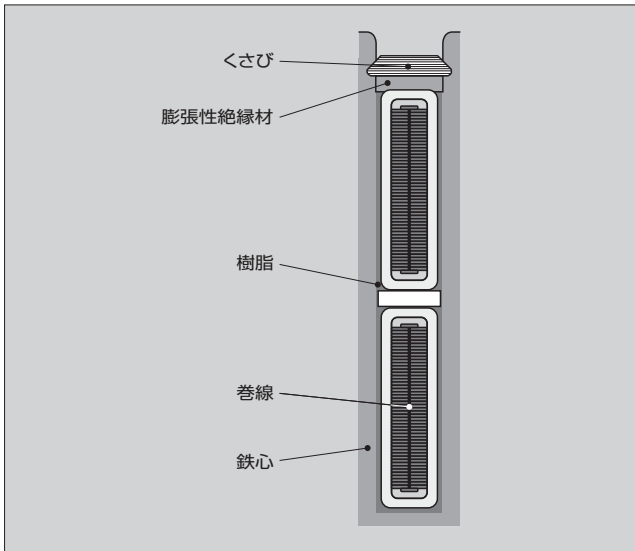


図5 全含浸絶縁固定子

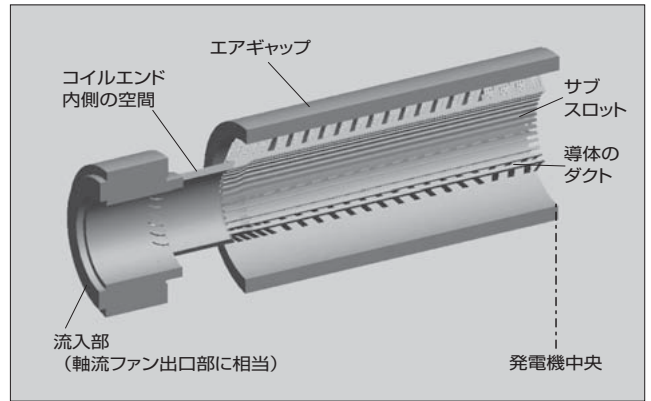


図7 回転子の通風解析モデル

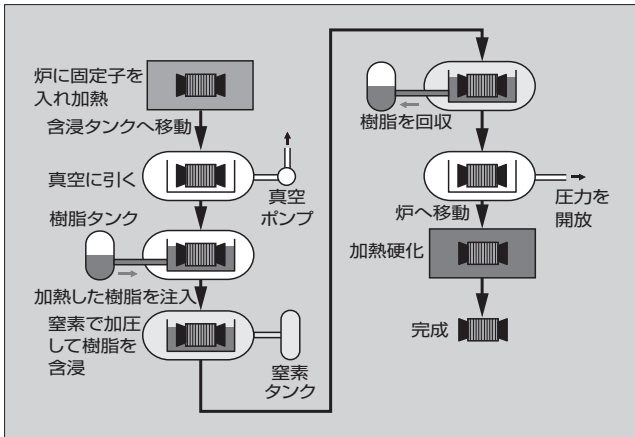


図6 全含浸絶縁工程

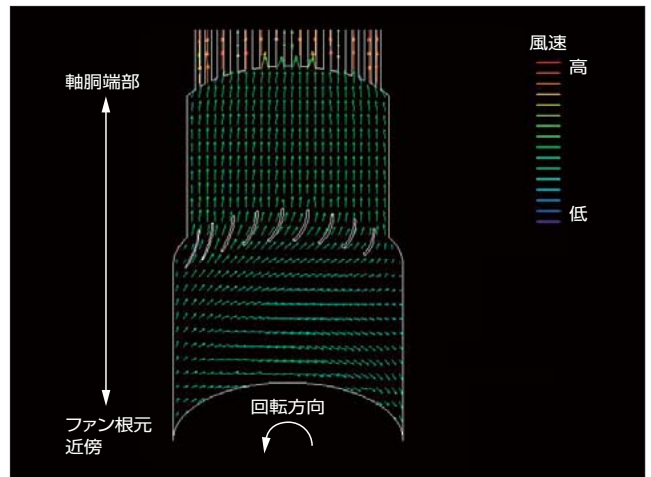


図8 回転子コイルエンド部の通風解析結果の例

冷却性能が向上するなどの利点がある。

全含浸絶縁の含浸処理工程を図6に示す。主絶縁材であるマイカガラステープなどを導体に巻いた後に、巻線を固定子鉄心スロットに挿入し、所定の巻線接続を行う。次に、固定子と巻線とを一体でエポキシ樹脂槽にて真空含浸させる。この工程は、一度に全ての巻線に樹脂含浸の処理をするため、大型の発電機では極めて重要である。このため、樹脂の粘度、硬化剤の配合比などを厳密に管理し、モニタリングシステムによって含浸処理工程における温度、真空度、加圧時の圧力および巻線の静電容量を測定することで、樹脂の含浸について状態の常時監視と制御を行う。

5 解析技術

5.1 通風解析

通風解析では、近年のハードウェアやソフトウェアの性能向上によって、解析モデルの要素数を以前に比べて多くすることが可能になり、発電機機内の冷却のような複雑な流れでも比較的精度の高い計算ができるようになってきている。また、回転中の回転子内部の流れを実測することは非常に

困難であるが、熱流体解析を用いることで流れの分布などの精度の高い把握が可能になっている。全含浸絶縁水素間接冷却タービン発電機的设计においても、流体解析を用いて最適な通風冷却を実現している。

回転子コイルエンド部の流れ解析例を紹介する。図7に、回転子の通風解析モデルを示す。軸端の軸流ファンの出口部、コイルエンド内側の空間、導体のダクトおよびエアギャップをモデル化している。回転子を定格速度で回転させた状態での流れ場計算とし、解析領域への入口となる軸流ファン部および出口となるエアギャップなどの境界条件には、別途実施の風量分布計算値を用いて解析を行った。図8に、回転子コイルエンド部の通風解析結果の例を示す。

5.2 強度解析

コンバインドサイクル発電の特徴である高頻度起動停止における信頼性を確保するために、回転子保持リング焼きばめ部の強度解析を実施した。回転子保持リングは、回転時の遠心力下での回転子コイルエンドを保持するため、所定の焼きばめ代で回転子軸端部に焼きばめを行う。静止時には回転子軸端部に対して焼きばめ部に圧縮応力が発生し、回転時には遠心力による保持リング径の拡大によりその圧縮応力が解放され、起動停止により繰り返し応力が発生する。そのため、応力の集中を避けるとともに、繰り

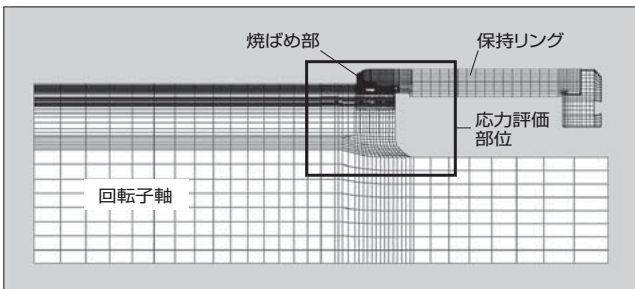


図9 保持リングの強度解析モデル

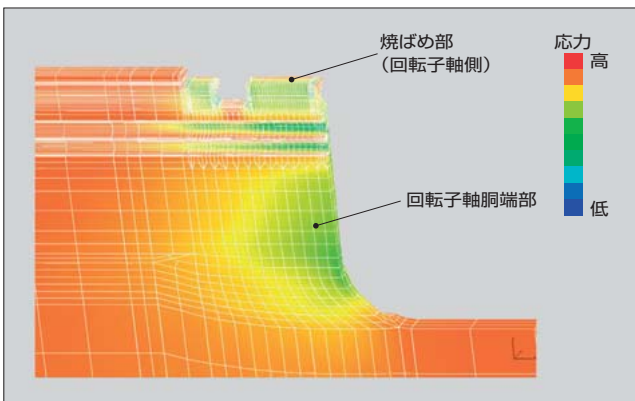


図10 回転子軸胴端部の応力分布解析の結果(応力評価部位)

返し応力に対する信頼性の検討を行った。

図9に保持リングの強度解析モデルを示す。保持リング焼きばめ部は、構造が複雑であるため強度解析は三次元モデルで行っている。また、応力の状態を正しく模擬するためにひずみと応力の非線形性を考慮し、保持リングと回転子との焼きばめ面は接触要素とした。図10に、回転子軸胴端部の強度解析の例として応力分布解析の結果を示す。

6 関連設備

6.1 クラッチの採用

発電機と蒸気タービンの間には、伸び差を吸収し自動着脱のできるクラッチを設置している。これにより、ガスタービンおよび蒸気タービンは、起動停止時の温度変化によって生じる熱膨張の差やスラスト荷重に対して独立した設計が可能となる。また、蒸気タービンとは関係なくガスタービンの起動・停止が可能であり、起動・停止時の損失が低減できる。

6.2 静止形周波数変換装置(SFC)の採用

ガスタービンの起動は、静止形周波数変換装置(SFC)により発電機を同期電動機として駆動させる方式である。このSFCはコンバータとインバータから構成され、ガスタービン起動昇速に必要な電圧・周波数を発電機固定子へ供給する。また、昇速中の発電機励磁電源は励磁装置から供給される。この方式を採用することにより、起動用電動機などが不要になり、軸系および全体配置をシンプルにしている。また、電気設備だけで構成しているため、保守が



図11 工場試験中の全含浸絶縁水素間接冷却タービン発電機

容易となる。

7 工場試験結果

2010年6月に、無負荷飽和特性試験、三相短絡特性試験、損失特性試験、温度上昇試験、三相突発短絡試験および過速度試験を実施し、各種性能を確認した。工場試験中の全含浸絶縁水素間接冷却タービン発電機を図11に示す。工場試験結果は、仕様を満足して設計値とよく一致し、良好な結果となっている。

8 あとがき

沖縄電力株式会社 吉の浦火力発電所1・2号機向け一軸式コンバインドサイクル発電設備用全含浸絶縁水素間接冷却タービン発電機について、その特徴と適用技術を中心に述べた。1号機は2012年5月からの試運転を経て、11月に営業運転が開始され、良好な運転状態にある。また、2号機は2013年5月に営業運転が開始される予定である。今後も市場ニーズに応じて技術開発を行い、高品質・高信頼性のタービン発電機を製作していく所存である。

参考文献

- (1) 池田忠司ほか. コンバインドサイクル発電設備. 富士時報. 2005, vol.78, no.2, p.116-120.
- (2) 前沢重男ほか. “創立60周年記念 火力原子力発電 最近の10年の歩み IV-3. タービン発電機”. 火力原子力発電. 2010, p.80-89.
- (3) 木村誠ほか. 全含浸絶縁水素冷却タービン発電機の完成. 電気学会回転機研究会. 2007, RM-07-43.



山崎 勝

大型回転機的设计・開発に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部川崎工場回転機部課長。



新倉 仁之

大型回転機の電気設計・開発に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部川崎工場回転機部主任。電気学会会員。



谷藤 怜

大型回転機の設計・開発に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部川崎工場回転機部。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。