## 250 MVA空気冷却式タービン発電機の開発

## **Development of a 250 MVA Air-Cooled Turbine Generator**

村松誠二郎 Seijirô Muramatsu 高橋和彦 Kazuhiko Takahashi 岩重健五 Kengo Iwashige



#### 発電機性能評価試験の様子

ステータコイルのスロット内芯線温度測定,ステータコアやコイルエンドの磁束密度測定,コア回りの電流密度測定など,さまざまな測定を行い,発電機各部の信頼性と,設計ツールの妥当性を検証した。

地球環境保護の点から,近年,高効率な発電機が 求められている。中でも,空気冷却式タービン発電機 は,低価格で,運転と保守が容易という利点がある反 面,水素冷却機と比較して大容量化と効率向上が難 しいことから,特に回転に伴う損失が大きい60 Hzでの 性能向上が望まれてきた。

日立製作所は,高効率な250 MVA 60 Hz空気冷却 式タービン発電機(インナクーラ方式)を開発した。通風 構造の最適化による冷却風量と機械損の低減,固定 子コイル素線配列最適化による電気損の低減や温度 の均一化をはじめ,さまざまな新技術を適用し, 250 MVA 60 Hz力率0.85の運転条件で,水素冷却機 に迫る高効率(98.8%)を実現した。この開発により,大 容量,高効率,かつ運転と保守が容易という利点を兼 ね備えた,従来の水素冷却機並みに高効率の空気冷 却機を誕生させた。

点から,高効率な発電機が世界中で注目を集めている。中でも,運転保守の容易な空気冷却式タービン発電機以下, 空冷機と言う、の高効率化への期待は,これまでも大きかった。 このようなニーズにこたえるため,日立製作所は,空冷機の

1

はじめに

近年,二酸化炭素の排出量削減や資源の有効利用の観

開発に注力してきた。2001年には250 MVA 50 Hz空冷機の1 号機(以下,先行機と言う。を完成させた。この発電機は,イ ンナクーラによる通風の最適化とステータコイル構造の最適化 により,50 Hz力率0.9の運転条件で効率98.8%を記録した<sup>1</sup>)。 工場での性能評価試験では1,000点を超えるセンサによって各 部性能を評価し,その信頼性を確認した<sup>2</sup>)。この計測により, さまざまな設計ツールの精度も向上した。

そして今回,従来の水素冷却機並みの効率を目標とした 250 MVA 60 Hz空冷機(以下,開発機と言う。を開発した。 開発機には,今後世界的に需要が多く見込まれる大型ガス タービンに接続することを想定し,力率0.85での運転とサイリ スタ始動を設計仕様に盛り込んだ。

ここでは,開発機に適用した技術と性能評価結果につい て述べる。

# 2 60 Hz空冷機の技術課題

高効率な空冷機を開発するうえでの最重要課題は,機械 損の低減である。空冷機の機械損は,その80%以上が通風 摩擦損である。通風摩擦損は一般的に回転数の3乗に比例 するため,60 Hz空冷機では機械損が全損失の半分近くにま で及ぶ。鉄損とステータコイル交流損も,50 Hz機と比較して 増加する。これらが,60 Hz地域で水素冷却機が主に用いら れてきた主要因であった。60 Hzで先行機をしのく効率を達成 するためには,これらの損失を最低限に抑える必要がある。

## 3 250 MVA 60 Hz空冷機の開発

開発機には,効率,信頼性,および保守性向上のために, さまざまな技術を適用した。それらの技術の主なものについて 以下に述べる。

#### 3.1 コンパクト設計

通風摩擦損の低減と,オーバスピード4,320 min (120%)までの軸振動を考慮し,先行機よりも約10%軸長を短くするなど,体格をコンパクト化した。

#### 3.2 通風の最適化

先行機同様,開発機でもインナクーラを採用した。インナ クーラ冷却方式発電機の構造を図1に示す。ステータコアの ダクト配列と,各部通風抵抗の最適化を図り,ステータコイル 温度の低減,軸方向温度分布の均一化を行った<sup>1)</sup>。通風改 善の結果,ステータコイルの温度上昇に余裕ができ,全体風 量を減らすことが可能になった。開発機には,従来のファンに 代えて低圧ファンを採用し,通風摩擦損を約20%低減した。



#### 図1 インナクーラの冷却方式の概要

インナクーラの冷却方式では,一つの通風ループに二つのクーラを持つ。空気の 一部は,メインクーラ ファン コイルエンド インナクーラ ステータコア エアギャッ プ ステータコア メインクーラと流れる。

### 3.3 ステータコイルの構造最適化

先行機同様,ステータコイル構造の最適化を図った。詳細 な損失計算ツールにより,トランスポジションピッチと素線配列の 最適化を図り,発生損失を最小にした(図2参照))<sup>3)4)</sup>。また, 上コイルと底コイルの熱伸び量が等しくなるように,異断面コイ ルを採用し,起動停止に対する信頼性を高めた。上・底コイ ルの熱伸び量が異なると,起動・停止のたびに熱応力が生じ, コイルの絶縁性能低下の原因となる。開発機は,ガスタービン への接続を想定し,DSQ 日間起動・停止)運転,WSQ 週間 起動・停止)運転に耐えられる設計とした。

#### 3.4 ステータコア回り構造の最適化

鉄損は、コア材質、コア質量、磁束密度およびコア回りの構



図2 ステータ温度計算のネットワークの概要 トランスポジションピッチと素線配列の最適化を図った。



図3 三次元磁界解析例

ステータコア回りの磁束分布と発生損失の詳細解析により,コア構造の最適化を 図った。

造に影響される。開発機では、メッシュで三次元磁界解析を行い、磁束分布と発生損失を求め、材質を含めたコア回り構造の最適化を図った(図3参照)。コア回り構造の最適化により、鉄損を従来構造よりた約15%低減した。

### 3.5 **ロータコイルの冷却性能向上**

ロータコイルの温度低減のために無視できないのが,ロータ コイルエンド部の冷却である。開発機では,ロータエンド部の通 風構造を改善し,ロータの寿命を決めるロータコイルの最高温 度上昇を低減した。

# 4 性能評価試験

## 4.1 **試験方法**

開発機では,先行機の温度測定の結果を反映させ,特に コイルの温度が高い個所に集中的に温度センサを配置した。 開発機のセンサ挿入位置を図4に示す。ステータコイルには 上・底コイル層間に挿入したRTD(測温抵抗体)65点に加え, スロット内とコイルエンドの芯線に合計42点の光温度計を設置 し,温度分布と発電機の寿命を決定する芯線の最高温度を 評価した。光温度計の挿入位置を図5に示す。ロータコイル には熱電対を92点設置し,芯線温度を測定した。

また,ステータコアとコイルエンドにサーチコイルを合計33点 設置し,詳細な磁束密度分布を測定した。コア回じ、エンドプ レートおよびカッパーシールド)にはロゴスキーコイルを6点設置 し,電流密度分布を測定した。ステータコアには51点の熱電 対を設置して詳細な温度分布を測定した。これらの磁束分 布,電流密度分布,および温度分布は,コア回りの発生損失 を詳細に求めるために必要となる。



注:略語説明 RTD(測温抵抗体)

#### 図4 計測点の配置

特に温度が高い個所にセンサを集中的に配置した。



図5 芯線の温度計測の概要(左)と温感部の外観(右) 光温度計をステータコイルに埋め込み,芯線温度を実測した。

### 4.2 試験結果

開発機の各種性能が許容値を満足し,力率0.85の運転条件で98.8%という高効率を達成した(表1参照)<sup>9</sup>。各位置の

#### 表1 発電機の主な仕様

力率0.85の運転条件における効率が98.8%と,高効率を達成した。

定格出力	250 MVA
定格回転速度	3,600 min <sup>-1</sup>
力率	0.85
極数	2
端子電圧	20 kV
短絡比	0.5
絶縁種別	F
温度上昇クラス	В
冷却方式	ステータ:空気間接
	ロータ:空気直接
効率	98.8%



注2:略語説明 pu(per-unit)

## 図6 銅損運転時のステータコイル温度分布

スロット内の温度均一化を実現した。



図7 カッパーシールドの電流密度測定例

カッパーシールドの電流密度を測定し,解析と突き合わせて検証した。

損失を詳細に分離測定することはできないので,温度や磁束 密度,電流密度を測定することによって,損失が計画値に 入っていることを確認した。

温度試験では、ステータコイルのRTD温度とロータコイルの 平均温度が制限値以下であることを確認した。ステータコイル とロータコイルの芯線温度も許容値以下に抑えられており、設 計値とよく一致していることを確認した。その例として、銅損運 転時のステータコイル芯線温度を図6に示す。

磁束密度とコア回り電流密度についても,実測結果を解析 と突き合わせて評価した。その例として,カッパーシールドの電 流密度測定結果を図7に示す。実測値と解析値はよく一致し ており,発電機の信頼性と設計ツールの妥当性を確認 した。

# 5 おわりに

ここでは,250 MVA 60 Hz空冷機の高効率,高信頼性を可能にした技術および性能評価結果について述べた。

力率0.85の運転条件で98.8%という効率は,世界でも類の ない高効率である<sup>2</sup>。今後,水素冷却機に置き換わるガスター ビノ用発電機として,普及が期待される。

#### 参考文献

- 1) 服部,外: インナクーラ冷却方式を適用した高効率タービン発電機の 高度設計手法,日立評論,84,2,177~180(2002.2)
- 2) 岡部,外:高信頼性発電機の開発と健全性評価,日立評論,85, 2,171~176(2003.2)
- 3) 服部,外:タービン発電機レーベル転位固定子巻線構造の最適化, 電気学会回転機研究会資料(2004.10)
- 4)高橋,外:タービン発電機の電機子巻線における転位方法と循環電 流損の検討,電気学会回転機研究会資料(2004.10)

#### 執筆者紹介

#### 村松誠二郎

2001年日立製作所入社,電力グループ 日立事業所 電力設 計部 所属 現在,タービン発電機の設計に従事

E-mail : seijiro\_muramatsu @ pis. hitachi. co. jp

#### 服部憲一



1992年日立製作所入社,電力グループ 日立事業所 電力設 計部 所属 現在,タービン発電機の設計,開発に従事 電気学会会員

E-mail : kenichi\_hattori @ pis. hitachi. co. jp

#### 高橋和彦



1989年日立製作所入社,日立研究所 情報制御第四研究部 所属 現在,大型回転電機の研究開発に従事 電気学会会員 E-mail: takahiko @ gm. hrl. hitachi. co. jp

#### 中原明仁



2002年日立製作所入社,日立研究所 情報制御第四研究部 所属 現在,大型回転電機の研究開発に従事 電気学会会員

E-mail : anakaha @ gm. hrl. hitachi. co. jp

#### 岩 重 健 五



1983年日立製作所入社,電力グループ電力・電機開発研究 所 ガスターピンプロジェクト 所属 現在,発電機冷却技術の研究開発に従事 工学博士 日本機械学会会員,可視化情報学会会員 E-mail:kengo\_iwashige @ pis.hitachi.co.jp