

水素冷却タービン発電機の大容量化

Hydrogen-Cooled, Turbine-Driven Generator with Increased Capacity

佐藤 理
SATO Osamu

津田 秀明
TSUDA Hideaki

風尾 幸彦
KAZAO Yukihiko

タービン発電機の冷却方式は、容量により空気冷却、水素冷却、水冷却の各方式が採用されているが、容量が大きくなるにつれて複雑なシステム構成となっている。一方、保守性、運転性、経済性の観点から、よりシンプルなシステム構成を求められることも多い。

当社ではこのような要求にこたえるため、検証試験や解析に基づいた設計の最適化により中容量機である水素冷却発電機の適用範囲を拡大し、コンパクトかつ高性能である 600 MVA 級水素冷却発電機を開発した。

One of the major trends in users' requirements for thermal power stations is toward simplicity, from the standpoint of easy maintenance, easy operation, and low investment and operating costs. One solution for generators is the use of a simpler cooling method.

Toshiba has succeeded in increasing the capacity of an indirectly hydrogen-cooled generator to the 600 MVA class, while achieving compact size and high performance.

1 まえがき

世界的に電力需要が増大するなか、経済性および環境負荷緩和の観点から、従来水素冷却や空気冷却のタービン発電機が適用されてきた中小容量火力発電所やコンバインドサイクル発電所において、単機容量が増大する傾向にある。一方その場合でも、システム構成を複雑にせず運用性向上を図る、という課題がある。これを裏返せば、同一単機容量でよりシンプルな構成を適用できるようにする、という課題でもある。言うまでもなくシンプルな構成の利点は、補機、配管およびその設置スペースの削減による経済性、運転性、保守性の向上である。

当社では上述の課題に対応し、主要機器の一つであるタービン発電機について、最新の解析技術とその検証試験を通じて設計の最適化を図ることにより、コンパクトであることと高性能とを両立させながら水素冷却および空気冷却発電機の適用範囲を拡大している。

今回、中容量帯に適用される水素冷却発電機について、その適用容量拡大開発の概要を述べる。

2 水素冷却発電機仕様

表1に、今回開発した水素冷却発電機の仕様の一例を示す。これは、1,500℃級次世代コンバインドサイクル発電所に適用できるものである。

表1. 水素冷却発電機の仕様

Sample specifications of hydrogen-cooled generator

容 量(MVA)	620	500
力 率	0.9	0.9
周 波 数(Hz)	50	60
回 転 数(rpm)	3,000	3,600
水 素 ガ ス 圧 (ゲージ, kPag)	410	410
絶 縁 種 別	F種	F種
温 度 上 昇	B種	B種
規 格	JEC/IEC	JEC/ANSI

JEC : 電気学会 電気規格調査会
IEC : International Electrotechnical Commission
ANSI : American National Standards Institute

3 開発の概要

3.1 設計方針

一般に発電機の出力 P は次式で表される。

$$P = K \cdot D_i^2 L \cdot n$$

ここで、 K : 出力係数(単位体積当たりの出力に相当)

D_i : 固定子鉄心内径 L : 固定子鉄心長

n : 回転数

この出力係数は冷却性能により定められるもので主として回転子の体格を決めるが、発電機設計の際水素ガス圧に対してほぼ一定の値を定めてきた。図1に発電機容量と出力係数の推移を示す。つまり、ある容量帯について水素ガス圧を定め、容量の増加に対してはそれに比例して回転子体格に相当する $D_i^2 L$ を大きくとる手法がとられる。より

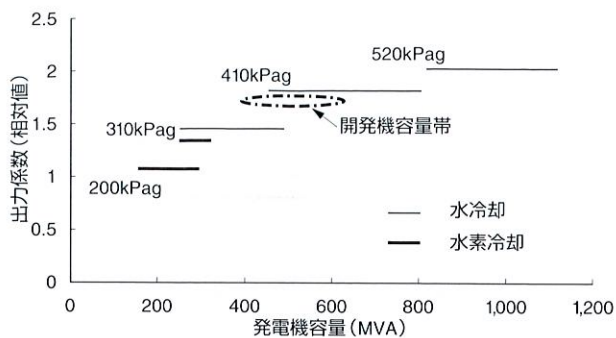


図1. 発電機出力係数の推移 発電機容量の増加とともに水素ガス圧を上げ出力係数を増加させている。

Variation of output coefficient

大きな容量帯になると水素ガス圧を上げることで出力係数を増加させている。

水素冷却発電機の大容量化に際しては、同容量の水冷却機と同様に水素ガス圧を410 kPagに上げ回転子のコンパクト化を図るとともに、固定子についてはこれまでの水素冷却発電機的设计・製造実績をベースに、さらに最新の解析技術や検証試験により通風冷却および固定子鉄心・コイル設計の最適化を図ることで、固定子体格の増加を低く抑えた設計を指向した。

3.2 開発の詳細

このような設計方針において解決すべき技術課題は次のとおりである。

- (1) 間接冷却固定子コイルの冷却強化
- (2) 機内全体の通風最適化
- (3) 体格増大に伴う回転子の動的設計、および固定子支持などの機械構造設計

上記の(3)については大型水冷却機で十分実績ある技術の適用範囲である。ここでは(1)および(2)の冷却技術の開発について述べる。

3.2.1 固定子コイルの冷却強化 発電機の出力係数を増加すれば、一般的な傾向として、電氣的損失が増加するため、絶縁材料で温度の制約を受けるコイル温度の上昇につながるるとともに、発電機効率を低下させることになる。この問題を同時に解決するため、まず固定子コイルに発生する損失を低減することから始めた。

そこで大容量の水素冷却発電機を設計するにあたり、電気設計と冷却設計とのインタフェースの統合を強化し、発生損失と冷却性能の関係からコイル温度と効率を最適にする設計ポイントを得るまで繰り返し設計を行なった。さらに固定子鉄心の通風ダクト配置の最適化を行い、必要最小の風量で効果的に冷却できるダクト配置を決定した。

このようにして設計した600 MVA級水素冷却タービン発電機について、運転時の固定子コイル温度が設計どおり

であることを確認するため、固定子の部分モデルを製作し、固定子コイル温度の検証試験を実施した。図2は固定子鉄心の部分モデルで、実寸大の電磁鋼板を実際と同じ条件で通風ダクトを形成しながら積層し、モデルコイルを挿入したものである。モデルコイル内部にはヒータを入れ、実運転状態における銅損分を発熱として与えた。また、この部分モデルを図3に示す装置の圧力タンクに入れ、実機の水素ガスと等価な冷却条件となる加圧冷媒ガスを充填した。さらにもう一つのタンクには冷媒ガス循環用の送風機と冷却器を入れ、これら二つのタンクを配管でつないで閉ループによる通風冷却の検証試験を実施した。

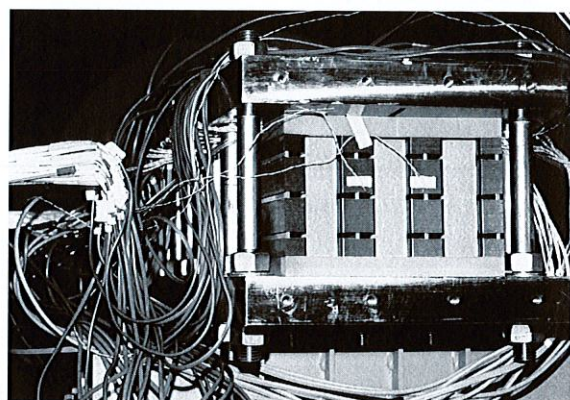


図2. 固定子部分モデル 部分モデルにより固定子鉄心内部の通風冷却を検証した。

Partial model of stator core

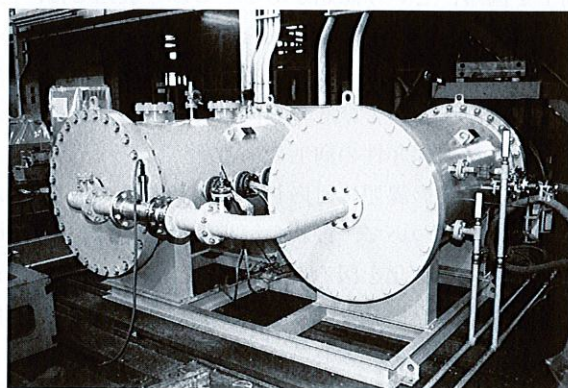


図3. 検証試験装置 固定子部分モデルを圧力タンク内に設置して閉ループで通風冷却の検証試験を実施した。

Test equipment for partial model of stator core

上述の検証試験に併せて固定子コイル周りの通風温度解析も実施した。図4は解析結果の一例で、エアギャップから固定子通風ダクトに入るガスの流速分布と、そのときの温度分布を表したものである。これらの実験と解析によ

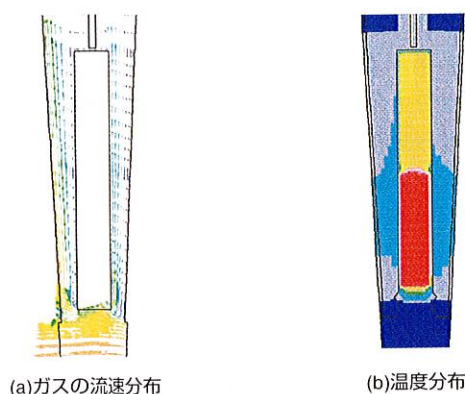


図4. 固定子コイル周りの冷却ガスの流れと温度分布解析 固定子コイル周りの冷却ガスの流れ(a)とその温度分布(b)を解析により求めた。

Gas velocity and temperature distribution around stator coil

り、実運転状態における固定子コイル温度が設計どおりの温度であることを確認した。

さらには鉄心各部やガス温度を調べてコイルから冷却ガスへの熱の経路を定量的に把握し、冷却ガスの種類や圧力、流量を変えて評価することにより固定子鉄心通風ダクトの熱伝達特性を求め、冷却性能評価の精度をさらに向上させた。

また、特に固定子鉄心ダクト内周側の入口・出口形状を改善することにより、冷却ガスが通過する際の圧力損失を大幅に低減して、通風ダクト部で十分な熱伝達性能を確保しつつ風量を低減した。

3.2.2 機内通風の最適化 固定子コイルの最高温度を抑制するもう一つの手段として、コイル長手方向の温度分布の平準化が挙げられる。

発電機内部の冷却ガスの通風経路は、クーラ出口から固定子鉄心通風ダクトのほか、回転子やエアギャップなどに分配される。固定子鉄心はさらに軸方向に複数のセクションに分割され、鉄心外周側から内周側へ冷却ガスを供給する給気セクションと、回転子内部を冷却した排気ガスと鉄心給気セクションから供給された冷却ガスが混合して鉄心内周側から外周側に排気される排気セクションとが、軸方向交互に並ぶ構造となる。

鉄心給気セクションの通風ダクトには、クーラで冷却された温度の低いガスが流れるが、排気セクションには給気セクションを冷却した後のガスと、回転子を冷却して排出されたガスとが混合されて入るため、給気セクションに比べて高い温度のガスが流れ、固定子コイルに温度分布がでやすくなる傾向にある。

そこで機内各部への冷却ガス風量配分の最適化を図り、固定子の給気・排気セクション間における固定子コイルの温度差を縮小する目的で機内通風検証モデルを製作した。これは600 MVA級水素冷却発電機の実規模モデルで、回

転子は内部冷却効果をコイル温度として検証するため通電可能なコイルとその冷却構造をもつ実機と同等の構造で製作し、固定子側は特に冷却ガスの流れを検証するため固定子鉄心とその通風ダクトを模擬した模擬鉄心を用いた。図5はこの発電機機内通風検証モデルの外観で、回転子に取り付けられるロータファンのほか、全体風量や回転子コイルの通電電流などをパラメータに、風量配分や回転子排気ガスによる固定子側の影響などに注目した試験を実施した。

この検証試験では、エアギャップ、固定子通風ダクトなど通風経路各部のガス温度および風量分布、圧力損失などの通風特性を確認した。その結果に基づき、固定子コイル温度分布を平準化するための機内各部の最適風量配分を決定した。

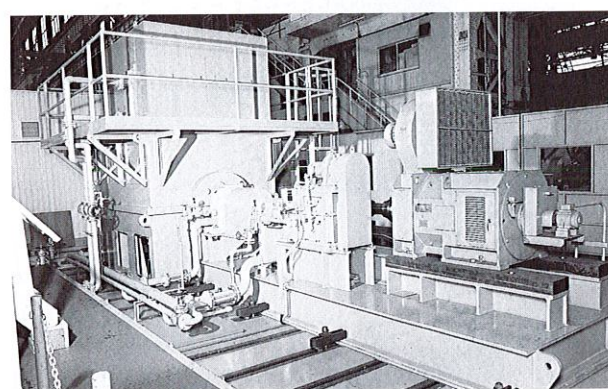


図5. 発電機の通風検証モデル 実規模の試験モデルにより発電機内部の通風配分の最適化を図った。

Verification test model for ventilation of generator

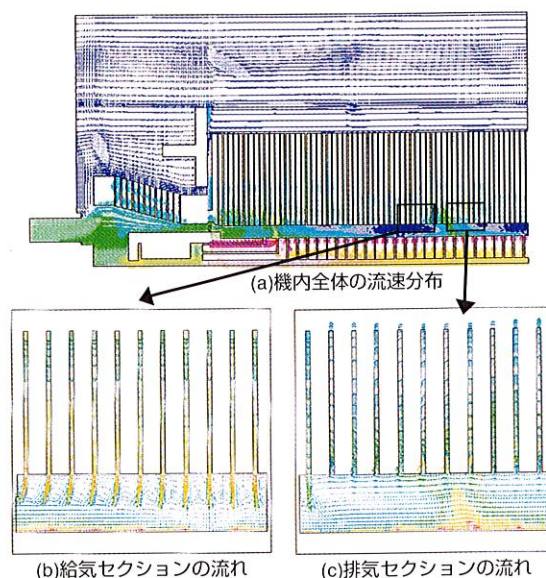


図6. 発電機内冷却ガスの流れ解析 三次元流れ解析により発電機内部の冷却ガスの流れを検証した。

Computational fluid analysis of cooling gas flow

また、この検証試験と併せて機内全体解析モデルによる流体・熱解析を実施した。図6はその解析結果の一例で、固定子と回転子におけるガスの流れを同時に解析することにより、特にエアギャップ部での旋回流れによる全体流れへの影響を考慮した解析を行なったものである。

これらの検証試験と解析により機内の冷却ガスの風量配分や回転子からの排気ガスの風量分布、固定子鉄心通風ダクトの風量分布をはじめ、各部を冷却ガスが通過する際の圧力損失を調べることができた。

また、併せて図7に示すようなロータファンとその周りの流れ解析も行い、流路形状や羽根形状の改善によるファン効率向上により、ファン動力の削減による発電機効率の

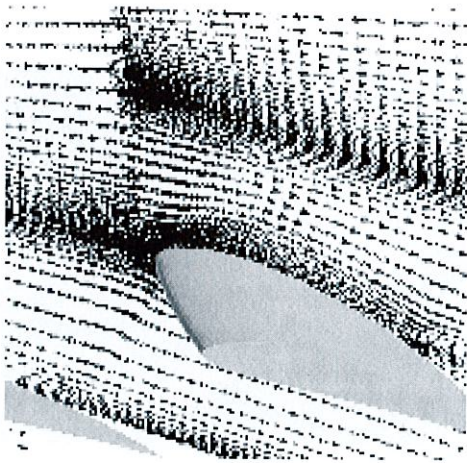


図7. ロータファン周りの流れ解析 流れ解析によりロータファンの性能向上を図った。

Computational fluid analysis of flow around rotor fan

向上に貢献した。

以上の結果水素冷却タービン発電機では、600 MVA級の大容量化を十分な余裕をもって実現し、併せてその出力係数と発電機効率の向上を図ることで、従来の水冷却機と比較しても十分置換えが可能な性能とコンパクト性を確保することができるようになった。

4 あとがき

以上、水素冷却タービン発電機の大容量化につき開発の概要を述べた。

今後とも水冷却発電機、空気冷却発電機を含めた豊富な開発、設計、製造、運転の経験を生かし、タービン発電機のよりいっそうの高性能・高信頼化を旨としていく所存である。



佐藤 理 SATO Osamu

電力システム社 火力事業部 火力プラント技術部参事。
火力発電所の電気系エンジニアリング業務に従事。電気学会会員。

Thermal Power Systems Div.



津田 秀明 TSUDA Hideaki

電力システム社 京浜事業所 発電機部主査。
タービン発電機の開発・設計に従事。電気学会会員。

Keihin Product Operations



風尾 幸彦 KAZAO Yukihiko

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 回転電機技術担当主査。
回転電気機械の研究・開発に従事。日本機械学会、電気学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center