回転機の最新技術

Recent Technologies for Rotating Machines

真下　明秀 Akihide Mashimo　　中山　昭伸 Akinobu Nakayama　　日和佐 寛道 Hiromichi Hiwasa

富士電機では，中規模火力発電プラント向けに世界最大容量クラスとなる型式定格 300 MVA 空気冷却タービン発電機の製作・出荷を完了した。大容量空気冷却発電機を実現するためには，詳細に機内の通風状態を把握する必要がある。このため，通風上重要な部位に対しては流れ解析を用い，その結果を反映した通風回路網計算にて全体通風への影響を把握し，冷却効率の向上を図った。また，風力発電用の 3,000 kW 級のダイレクト駆動大容量永久磁石発電機では，発熱部により近い場所で冷却する機内通風方式や回転子への磁石配置を工夫してコギングトルクの発生を抑えている。

For mid-sized thermal power plants, Fuji Electric has completely developed and shipped 300 MVA type rating air-cooled turbine generators, which are the world's largest capacity class. In order to realize a large-capacity air-cooled generator, the ventilation behavior inside the generator must be understood in detail. Therefore, computational fluid calculations of ventilation flow analysis were performed for important regions, and the cooling effect was sufficiently improved with the optimized entire ventilation based on ventilation network calculations that reflected those results. Also, for the 3,000 kW-class of direct-drive permanent magnet generators for wind power generation, the method for cooling the interior of the generator at locations closer to heat-generating parts and the arrangement of magnets on the rotor to reduce cogging torque were designed.

1　まえがき

回転機は電気エネルギーを機械エネルギーへ，またはその逆の機械エネルギーを電気エネルギーへ変換する機械である。その原理は 19 世紀半ばに発見され，成熟した機械ではあるが，さまざまな市場ニーズに対応するために，現在においても材料，設計技術，製造方法の改良が行われている。

近年，火力発電分野では中規模火力やコンバインドサイクル，地熱発電において経済性や保守性，運転性などを向上させた発電設備の市場ニーズが高まっている。富士電機では，水素冷却タービン発電機と比較して，水素ガス供給装置や水素ガス密封油装置を必要としない，保守性に優れた空気冷却タービン発電機の大容量化に取り組んできた。このほど，世界でも最大容量クラスとなる型式出力 300 MVA の空気冷却タービン発電機を設計製作し，工場試験を経て出荷を完了したので，本発電機に関する最新技術について紹介する。

また，温室効果ガス削減の観点から自然エネルギーに注目が集まっている。この一翼を担う風力発電に対し，風力用の永久磁石発電機の開発を行っており，2010 年度中に完成予定である試作機の内容についても紹介する。

2　大容量空気冷却タービン発電機

2. 1　仕様と設計

図 1 に型式出力 300 MVA 空気冷却タービン発電機の外観を，**表 1** に主な仕様を示す。

本発電機の設計には，富士電機の空気冷却タービン発電機の標準系列に基づいた信頼性のある技術をベースとして，大容量化のための最新技術を投入している。

(1)　発電機構造

発電機の構造は**図 2** に示すとおり，両端の軸受に支持された回転部分である回転子と，固定子，固定子フレームから成る。タービン発電機は高速回転であり，遠心力に対応するため軸方向に長い構造となる。

(2)　固定子構造

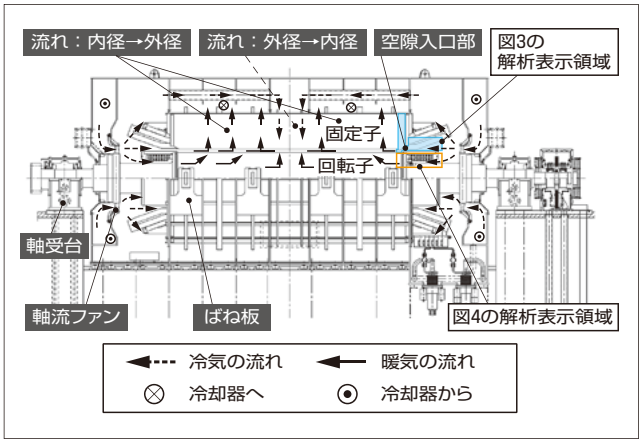
固定子は，固定子鉄心を固定子枠にばね板を介して弾性

図 1　300 MVA 空気冷却タービン発電機の外観

表 1　300 MVA 空気冷却タービン発電機の仕様

出　力		300 MVA
電　圧		16 kV
力　率		0.85
回転数		3,000 r/min
周波数		50 Hz
温度上昇		B クラス（IEC 60034-1）
冷媒温度		40 ℃
冷　却 方　式	固定子	空気間接
	回転子	半径方向空気直接

図 2　発電機断面と通風経路



支持し，鉄心の電磁振動が固定子枠や基礎へ伝達するのを抑制する構造である。大容量化に伴い鉄心長が拡大するので，ばね板の個数や支持位置などについて最適な設計を行っている。

(3)　回転子構造

回転子は，外径，軸長ともに富士電機の水素冷却方式を含めた実績の最大寸法に近い。軸受台には，メンテナンス性を重視したスタンド形を採用している。ベアリングスパンが長いため，危険速度や振動の評価を特に精査して設計に反映している。軸長の拡大に伴う加工時の軸たわみが起因となる 2 倍波サイクル振動の問題に対しては，大型の水素冷却発電機と同様の機械加工工程を採用するなどして 2 倍波サイクル成分振動の低減を図っている。

2. 2　通風・冷却

固定子巻線には間接冷却方式を，回転子巻線には導体の半径方向に通風路を設けた半径方向直接冷却方式を採用している。

通風経路は，**図 2** に示すように回転子両端の軸流ファンから各部に冷却空気を送り込み，固定子の冷却風の流れは軸方向中央部で外径側から内径側に，両端部では内径側から外径側へ流すようにしている。

これらの通風・冷却の設計には，富士電機の空気冷却タービン発電機の試作実験機や実機から得られたデータ，近年の流れ解析を適用した検証結果などを反映している。いくつかの例を次に述べる。

(1)　固定子通風経路の最適化

図 2 に示した固定子通風経路は，固定子の軸方向寸法の拡大による中央部の温度上昇を抑制し，軸方向の温度分布を均一化するものである。温度を均一化するためには，外径から冷却風を流す領域と内径から冷却風を流す領域の配分，および各部での風量・風速の最適化が必要である。これらの課題を解決するためには，冷却ダクトの配置だけではなく，風量配分に影響する種々のパラメータを把握する必要がある。その一つとして，固定子と回転子間の空隙（くうげき）入口の寸法と形状が挙げられる（**図 2**）。この空隙入口は，機内の全冷却風量のうち約半分が通過し，寸法や形状によって圧力損失が変化し，風量分布へ比較的大きな影響がある。一方，空隙距離や入口の形状は，電気的な仕様や鉄心端部の磁束集中低減などの観点や保持リング強度上の寸法から決定されるパラメータでもあり，電気的仕様と通風の最適化を両立させた設計が必要となる。

そこで，**図 3** に示すような流れ解析を用いて，空隙入口の寸法・形状と圧力損失との関係を把握し，通風回路網計算にその結果を組み込んで全体通風分布への影響を評価して最適化を図った。この回路網計算の妥当性は，これまでの風量分布測定データとの比較から確認した。

図 3　空隙入口部の流れ解析

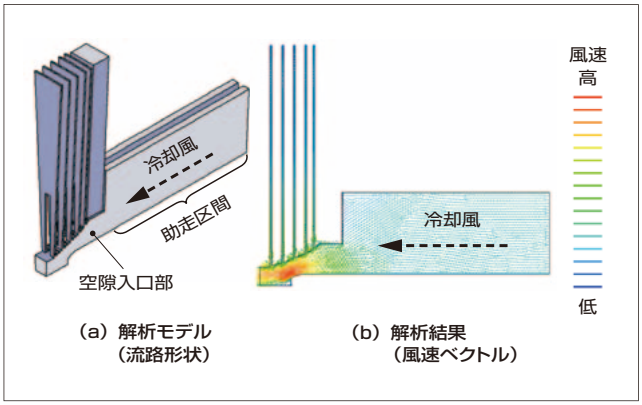
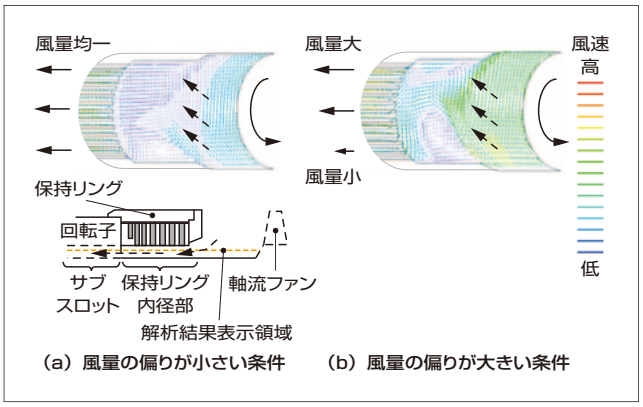


図 4　回転子保持リング内径部流れ解析



(2)　回転子の周方向風量分布最適化

軸流ファンから出た冷却風は，回転子コイルエンド内側の空間を通ってスロットの底に設けられているサブスロットと呼ばれる軸方向通風路に流入した後，各導体中を径方向に流れながら冷却して回転子外径に排気される。軸流ファンから出た冷却風は，回転子の回転とファンの翼角度によって回転子コイルエンド内側へ周方向に斜めに流入し，コイルエンド内側の構造物との干渉によって偏った分布となる場合がある[(1)]。この流れの偏りが大きいと，回転子導体へ流入する冷却風量が周方向において不均一となり，導体温度の分布も不均一なものとなる。この問題に対しては，コイルエンド内側空間の寸法やファン翼角度，流入風量などの因子と，流れの偏りの関係を流れ解析によって検証し，設計の最適化を図った。

図 4 に解析による検証の一例として，流れの偏りが小さ

図 5　固定子外観

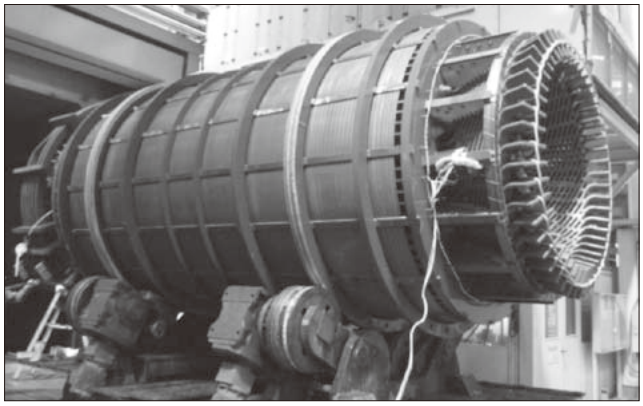


図 6　固定子鉄心ダクト風速測定結果

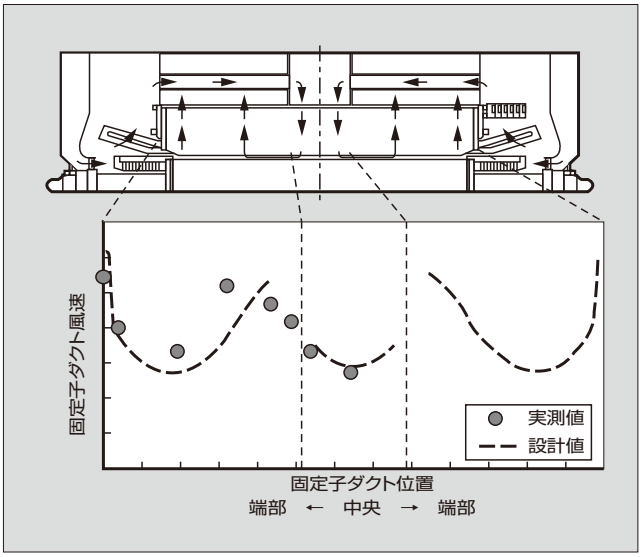
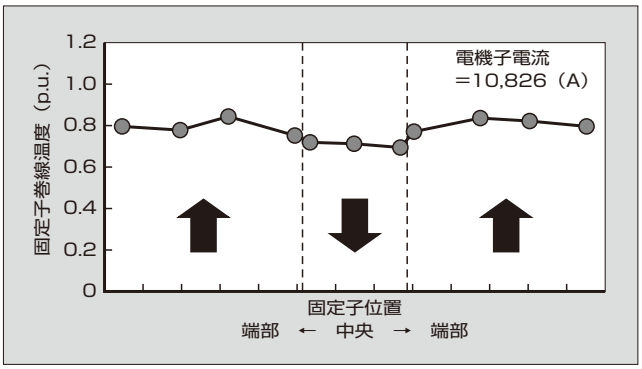


図 7　固定子巻線温度測定結果（銅損温度試験）



い条件のモデル（良い例）と，大きい条件のモデル（悪い例）での解析結果を示す。条件の違いにより流れの偏りが異なるのが分かる。回転子の通風に関しては実測が難しいことから，このような流れ解析を用いた検証により最適化が実現されている。

2. 3　固定子巻線全含浸絶縁の適用

固定子巻線の絶縁には全含浸絶縁方式を採用している。全含浸絶縁は固定子巻線と鉄心が一体で絶縁樹脂に含浸されることから，鉄心，巻線，くさびのすき間に樹脂が充塡（じゅうてん）できる。くさびや巻線の緩みを防止できるため，緩みにかかわるメンテナンスが低減できる。また，上述のとおり巻線と鉄心との間に空隙がないので，巻線から鉄心への熱伝達が良くなり，巻線単体で含浸する方式に比べて冷却性能が向上するなどの利点がある[(2)]。

タービン発電機全含浸システムには，信頼性を確保する観点から次の絶縁技術を採用している。

(a)　高耐熱性エポキシ樹脂
(b)　高含浸性集成マイカテープ
(c)　高耐電圧寿命対応の内部電界緩和層
(d)　高耐ヒートサイクル性対応の熱応力緩和層

全含浸工程においては，樹脂の粘度，硬化剤の配合比率などを厳しく管理するだけでなく，モニタリングシステムによって温度，真空度，加圧時の圧力，静電容量による樹脂の含浸状態を常時監視・制御している。**図 5** に，工場での全含浸工程完了後の固定子の外観を示す。

2. 4　工場試験結果

本発電機の工場試験では，巻線温度上昇や短絡比，リアクタンスなどの特性をいずれも満足し，**表 1** に示した定格条件における規約効率も 98.60% という良好な結果が得られた。

図 6 に，小型の風速計をダクト内に設置して実測した固定子鉄心ダクトの風速分布を示す。設計値に対して，ほぼ一致した結果が得られている。**図 7** に，銅損温度試験での固定子巻線温度測定結果を示す。軸方向の温度分布が均一化できており，巻線温度分布からも前述の通風冷却の最適化が達成されていることが確認できる。

等価温度上昇試験法による巻線温度上昇値は，固定子・回転子巻線ともに規格保証値（IEC 60034-1）を十分に満足した。

3　風力用大容量永久磁石発電機の開発

3. 1　開発仕様

風力発電システムの現在の主流は，風車の回転数を増速する増速機と，巻線形誘導発電機および励磁容量分の電力変換器から成るダブルフェッド方式である〔**図 8** (a)〕。この方式は，発電機と変換器の小型化によって価格面で有利である反面，増速機や発電機のブラシなどのメンテナンス部品が増加する。一方，増速機を介さないダイレクト駆動方式は，低速の永久磁石発電機と発電容量分の電力変換器（フルコンバータ）により構成されている〔**図 8** (b)〕。この方式の特徴は，システムが大型化する代わりにメンテナンス性が向上し，フルコンバータによって広い可変速範囲に対応できる。特に低風速領域での発電効率が向上するなど，運用上の利点が多い[(3)]。このほかにも，効率を重視しつつ機器の大型化を避けるために，増速機付きの永久磁石発電機システムもある。

富士電機で開発中のダイレクト駆動システムに適用する

図 8　風力発電システムの例

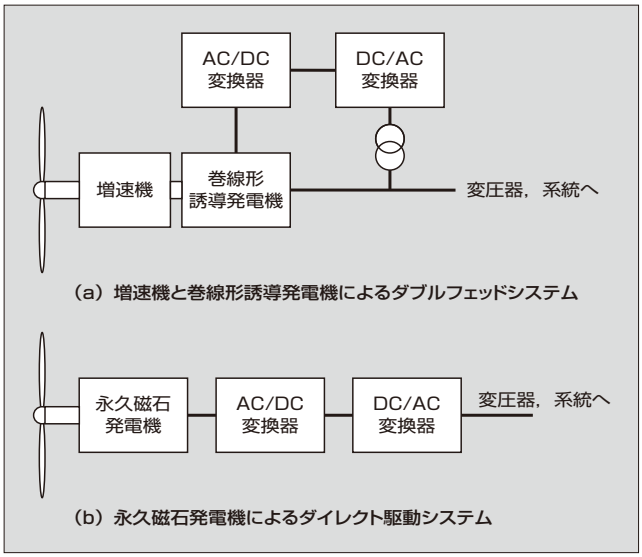
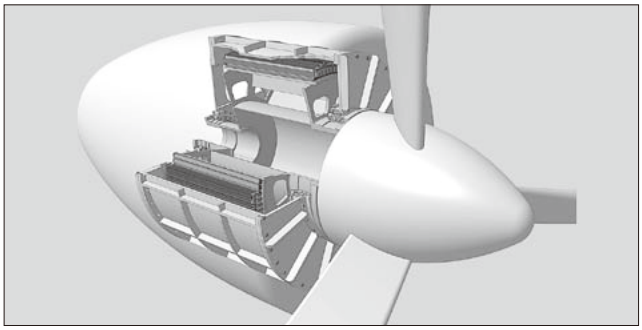


表 2　風力用の低速大容量永久磁石発電機の仕様

出　力	3,000 kW
電　圧	690 V
効　率	95%
回転数	15 r/min
温度上昇	F クラス（IEC 60034-1）
冷却方式	機内強制空冷

図 9　発電機断面図（風車搭載イメージ）



低速大容量永久磁石発電機の出力は，陸上設置の風力では最大クラスとなる 3,000 kW 級としている。主な開発仕様は**表 2** に示すとおりである。**図 9** は，発電機の三次元断面図である。

3. 2　通風・冷却

ダイレクト駆動用発電機の課題の一つに質量の低減がある。陸上の輸送やつり上げ時のクレーンの制限により，質量が決められている。小型・軽量化のためには発電機の冷却性能の向上が重要となる。

図10 に発電機内部の冷却風の通風路を示す。矢印が冷却風の流れる経路である。永久磁石発電機は，磁石を回転子の軸方向に連続的に並べるため，回転子に冷却ダクトを設けることが容易ではない。この場合，冷却風は回転子と

図 10　発電機内部通風路概略図

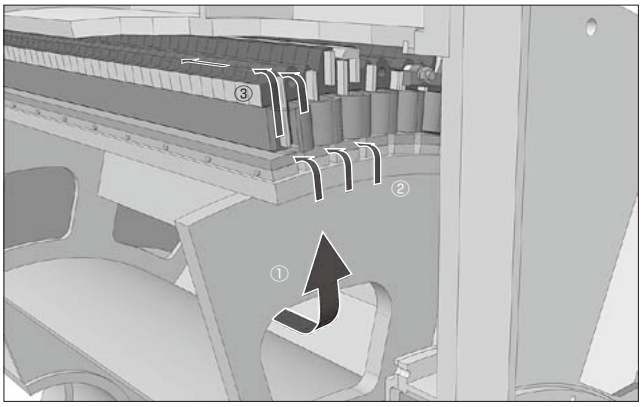
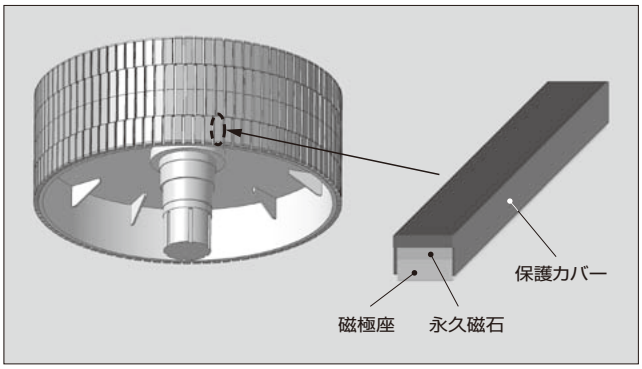


図 11　回転子磁石配置



固定子の間のギャップのみが流路となり，冷却効果が低い。そのため，フレームにフィンを設け，外気で冷却する外皮冷却方式が採用されることが多い。

今回は固定子鉄心とフレームの間に空間を設け，そこに風を流すことで固定子鉄心の外周が冷却できるようにした（**図10**③の流路）。発熱部により近い場所で冷却するため，外皮冷却よりも 30 ～ 40% 冷却性能が向上することを机上検討で確認している。

3. 3　構　造

次にダイレクト駆動用発電機の特徴的な構造の一部を紹介する。

(1)　巻線構成

巻線構造として採用している集中巻きは，小型の永久磁石電動機では頻繁に使用されている方法である。通常の方式に比べ，コイルエンド部の短縮が可能で，巻線損失と全長の短縮で質量低減に貢献する。

(2)　回転子形状

回転子に配置する磁石は，大型機の場合，膨大な数になる。このため着磁した磁石を一つずつ装着するのには多大な時間が必要である。

これを改善するため，磁石は無着磁のまま，いったん磁極座に装着し磁極座ごとに着磁する。この分割磁極をさらに軸方向に複数個並べて 1 極分の磁極を成すようにする。磁極座を段状に配置することでスキュー配置となり，コギングトルクの低減が可能であり，振動や騒音の低減に有効

である。分割磁極を4段とし，スキュー配置した例を**図11**に示す。

(3)　軸構造

軸は中空軸とし，メンテナンスのために風車側に人が渡れる構造としている。**図9**は回転軸の構造であるが，軸をナセル側に固定する固定軸方式についても検討している。

4　あとがき

回転機の最新技術として，従来機種では空気冷却タービン発電機の大容量化に適用した技術を，新機種では風力用永久磁石発電機の開発で適用した技術を紹介した。成熟機種といわれてはいるが，今後も新機種だけでなく従来機種に対しても最新技術を開発・適用して，市場ニーズにマッチした回転機を製作していく所存である。

参考文献

(1)　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資料. 2007, RM-07-43, p.61-66.

(2)　竹田政寛ほか. 大形回転機の全含浸絶縁技術の進歩. 富士時報. 1997, vol.70, no.9, p.484-488.

(3)　木村守. 大容量風力発電用発電機の特性比較. 電気学会誌. 2009, vol.129, no.5, p.288-290.

真下　明秀

回転機の開発に従事。現在，富士電機システムズ株式会社エネルギーソリューション本部グリーンエネルギーソリューション事業部川崎工場回転機部課長補佐。電気学会会員。

中山　昭伸

回転機絶縁の開発，タービン発電機の構造設計に従事。現在，富士電機システムズ株式会社エネルギーソリューション本部グリーンエネルギーソリューション事業部川崎工場回転機部主任。

日和佐 寛道

大型回転機の設計・開発に従事。現在，富士電機システムズ株式会社エネルギーソリューション本部グリーンエネルギーソリューション事業部川崎工場回転機部課長。電気学会会員。

e-Front runners

＊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。