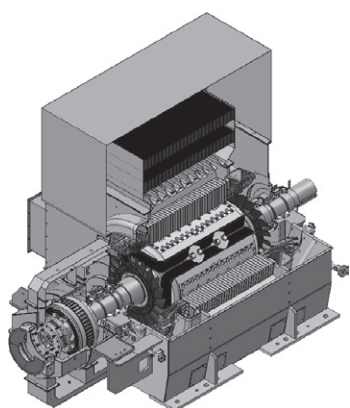


4極タービン発電機の改良

村井和也 Kazuya Murai
石橋太郎 Taro Ishibashi

キーワード 発電機, 高効率, 軽量, 突極, ソリッド, 損失, 絶縁

概要



4極タービン発電機試作機

当社は、タービン発電機に長年の経験と実績を持っており、国内外のお客様からご愛顧をいただいている。

タービン発電機は、一般に蒸気又はガスタービンで駆動され、産業用あるいは電力事業用に、常用・非常用又はピークカット用電源として広く使用されている。

当社の発電機製作範囲で、タービン発電機は4極機の採用が拡大方向にあり、競争力の向上を図るために、2014年度に回転子構造を円筒形から突極形とする開発を実施した。

以来2018年8月時点で32台を受注（内17台納入済み）しているが、更なる高出力・効率向上及び軽量化のため、絶縁・冷却・損失などの基礎技術を拡充し、従来の55MVAから70MVAの出力拡大の見込みが立った。

1 まえがき

当社の4極タービン発電機には円筒形回転子を採用してきたが、2014年に製品競争力の向上を図るため、突極形回転子を開発し、高効率・軽量化など大幅な性能向上を達成した。

今回の開発では、更なる改良のために基礎技術の拡充プロジェクトを「骨太開発」と称し、そこで培った基礎技術を基に試作機を製作し、技術の実機適用を確認した。本稿では、**突極形タービン発電機の概要・構造**などを紹介する。

2 開発概要

2.1 目的

試作機を製作・試験する目的は、以下のとおりである。

- (1) 基礎技術開発結果の実機適用が可能であることを確認
- (2) 実験・解析などで得られた結果が、実際の構造でも成り立つことを確認
- (3) 実際に実機を製作することで、製造上の問題を明らかにし、製品設計に反映

2.2 試作機定格

第1表に試作機の定格を示す。大容量化に関する基礎検討は、2014年の開発で確認している。今回は「骨太開発」で得られた結果で、製品として目的の性能が得られるかを確認するため、要望が多い出力帯でかつ各種試験を取り組みやすい定格としている。

2.3 試作機目標

試作機の開発目標は、現行機に対して体格縮小すなわち枠出力向上と高効率化を両立することを目

第1表 試作機定格

試作機の定格を示す。

項目	仕様
出力	22,125kVA
極数	4
電圧	11,000V
電流	1161A
周波数	50/60Hz
相数	3
力率	80%
耐熱クラス	155 (F)
温度上昇限度	130 (B)

標とし、「骨太開発」の要素技術を取り込んで設計した。

- (1) 体格縮小化（枠出力アップ） 現行機に対し、質量は15%削減，据え付け面積は14%削減
- (2) 高効率化 22MVAクラスの現行機の発電効率に対し，0.14ポイントアップの98.14%

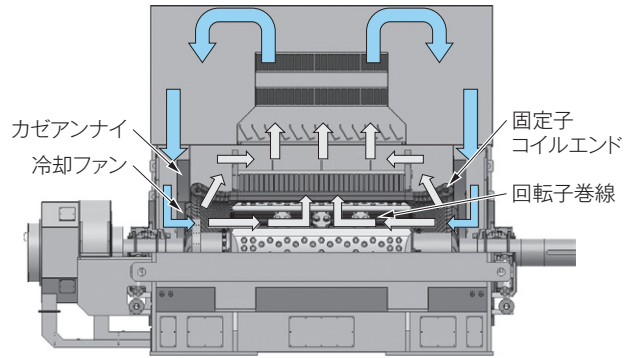
2.4 試作機構造

試作機には、「骨太開発」による要素技術開発の成果を以下のとおり取り込んだ。

2.4.1 冷却構造

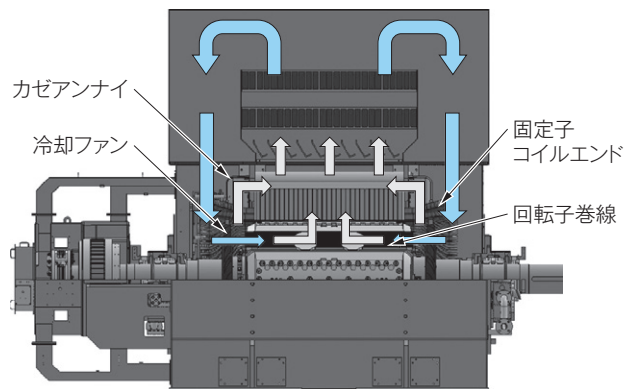
(1) 通風構造 **第1図**に発電機冷却通風の構造（従来機）を，**第2図**に発電機通風冷却構造（改良機）を示す。回転子巻線の両隣に設けた冷却ファンによって，発電機内部を冷却風が循環する。当社の従来構造は，冷却ファンの外周に設けたカゼアンナイで冷却風を整流しているが，試作機ではカゼアンナイを固定子コイルエンドの外周部に配置し，また冷却ファンを固定子コイルの内周部に配置した。この配置変更は，発電機フレームの軸方向長さの短縮，並びに冷却効率の向上を目的に行った。この構造を採用することによる風量変化は，事前シミュレーションでの予想どおりの結果であり，良好な冷却効果が得られた。なお，冷却ファンが固定子コイルと近接するため，空間距離を十分配慮し，放電が発生しない距離を確保している。

(2) 回転子冷却構造 突極形発電機回転子冷却の特有な事象として，コイルのホットポイント（高温



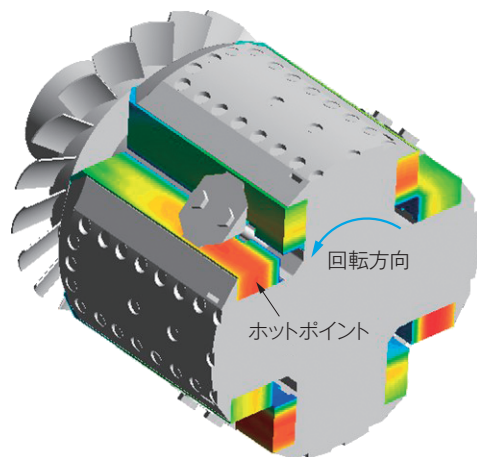
第1図 発電機冷却通風構造（従来機）

回転子巻線の両隣に設けたファンで発電機を冷却する。



第2図 発電機通風冷却構造（改良機）

従来構造に対して，ファンを回転子巻線に近づけ，固定子コイルエンド内側に設置している。



第3図 回転子コイルホットポイント（高温部）

突極形回転子は，回転方向に対して遅れ側のコイルは冷却風が当たりにくく，温度的に高くなる傾向にある。

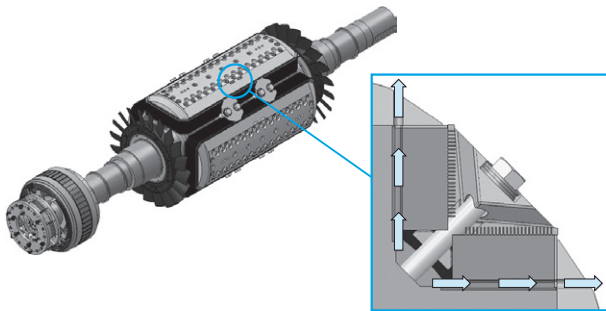
部）の存在がある。**第3図**に回転子コイルホットポイントを示す。突極形回転子は，回転方向に対し

て遅れ側コイルの中央部温度が高い傾向を示し、このホットポイント温度を下げることで発電機体格を決める上での課題となる。

骨太開発では、このホットポイント温度を下げるため回転子コイルに通風口を設けるとともに、コイルの許容温度を上げるため高耐熱の絶縁シートを採用した。

第4図に回転子コイルの通風口を示す。試作機では、通風口を設けることでホットポイントの温度を低減し、回転子コイル全体の温度も低減した。また、通風口内部に実際に冷却風が流れていることを確認するため、極小の風速プローブを取り付け、設計通りの風速であることを確認した。

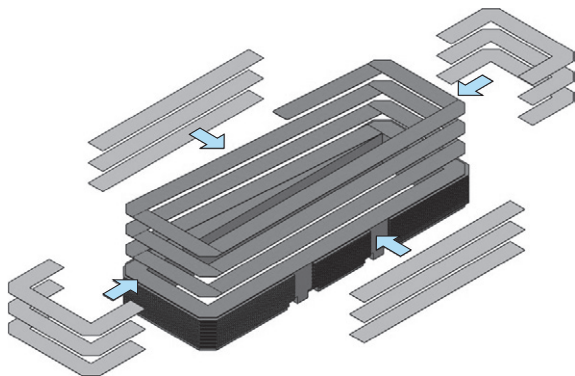
第5図に回転子コイルの積層構造を示す。回転子コイルはらせん状に積層したコイルの間に、レジンを含んだ薄厚の絶縁シートを挟み込んで、加熱プレス成型をしている。絶縁シートの耐熱性は、シー



第4図 回転子コイル通風口

温度の高くなるホットポイント部に冷却風が通るように通風口を設けている。

.....



第5図 回転子コイル積層構造

らせん状に積層したコイルの層間に絶縁シートを挟み込んで、通電加熱の上、加圧成形している。

ト単体の熱劣化試験で許容温度を確認した。

試作機試験では、回転子コイルに熱電対を埋め込み、ホットポイント温度が許容温度以下であることを確認した。

2.4.2 損失低減構造

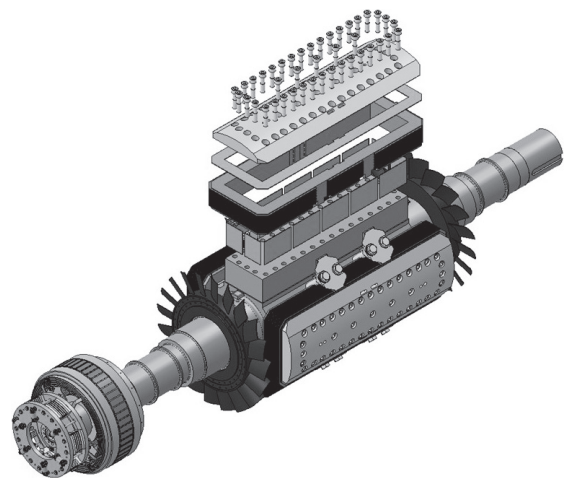
発電機の高効率化を実現するためには、発電機を構成する各部位の発生損失を正確に予測し、把握することが重要である。従来は類似構造の実測値に対し経験式を用いて傾向を確認し、損失予測を行っていたが、「骨太開発」では3次元有限要素法による解析を行うことで、損失の発生個所の特定及び低減対策を実施した。試作機では、従来構造に比べ大幅な損失低減を確認した。

2.4.3 新絶縁採用

(1) 固定子コイル絶縁 高効率化実現のため、発電機の絶縁について検討した。固定子コイルの主絶縁材料であるガラスクロス基材マイカテープには、従来と比較して薄厚かつ高強度の基材を新たに採用した。絶縁の厚みを低減することで、固定子スロット内の導体占積率が向上し、試作機評価では発電効率が向上した。また採用にあたり、絶縁耐久性について各規格に準拠した評価試験を行い、問題ないことを確認した。

2.4.4 回転子構造

第6図に突極形回転子の構造を示す。構造の大きな特長は、シャフトにはめ込んだコイルをポール



第6図 突極形回転子構造

突極形回転子の構造を示す。コイルをシャフトにはめ込み、ボールシューとボルトで固定保持する。



第7図 試作機試験

直流電動機を駆動機として各種試験を実施した。

シューによって支持することにある。ポールシューは、コイルはめ込み後に回転子外径側からボルトで締結する。このボルトはコイルに発生する大きな遠心力を負担するため、ボルトの静的許容応力を超過しないことはもちろんのこと、起動停止による疲労破壊を起こさないための検討が重要となる。

そこでFEM (Finite Element Method) 解析によって負荷を低減させる条件を検討した上で、実荷重計測を行って荷重を確認する一方、疲労試験を実施して強度を確認した。また強度要件を満たすように締結状態を管理することは、一般的なトルク法では難しいため、軸力管理による締結管理法を確立した。

さらに、締め付け方法をトルク指示から回転角指示に改善した。トルク指示による締め付けでは、摩擦係数のばらつきで規定の許容範囲に入るまで数回の締め直しが必要だが、回転角指示による方法ではその回数を減らすことができ、作業性の改善につながった。

2.5 試作機試験（構成）

第7図に試作機試験の様子を示す。試作機試験は、当社回転機システム工場内で750kW直流電動機を直結して回転試験を実施した。反直結側の軸端には、回転子のデータを収集するために60点を計測できる測定用スリップリングを取り付けた。また内部の温度や風速・圧力、磁束密度を測定するため

第2表 試作機試験結果

試作機の温度と効率を示す。

試験項目	試験結果
固定子温度	75K
回転子温度	67K
効率	98.14%

の各種センサを取り付け、主に発電機側面からケーブルを引き出した。

2.6 試験項目

通常の製品試験に試作機でしか確認できない項目を追加して試験を行った。追加試験項目は、以下のとおりである。

- (1) 零力率ヒートラン より実負荷運転に近い条件下で試験を行い、温度・振動・騒音・損失の測定を実施
- (2) 磁束測定 各部の磁束を測定し、周波数依存性・磁気飽和特性・電流依存性を確認
- (3) 定数測定 ダルトン-カメロン法 ($X_d' \cdot X_q'' \cdot X_2$)、三相突発短絡試験 ($X_d' \cdot X_d'' \cdot X_d' \cdot T_d'' \cdot T_a$) を行い各定数を測定
- (4) 単相短絡ヒートラン 固定子巻線の二相を短絡した状態で、電流を通電し温度試験を実施し、各部の影響を確認

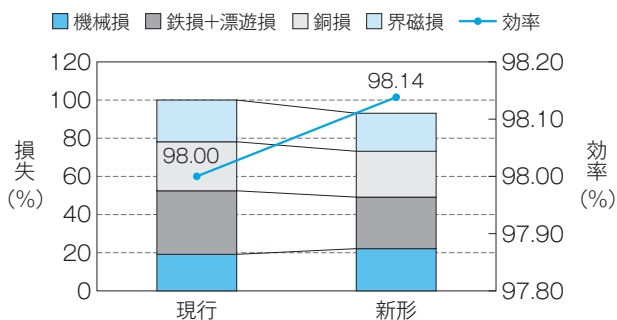
2.7 試験結果

第2表に試作機の試験結果を示す。従来機よりも体格を縮小しつつ、温度試験における巻線温度は目標どおりで、規格値も十分クリアしている。また効率も設計値どおりで、開発目標を達成している。そのほか、振動・騒音についても問題ない結果が得られた。

第8図に損失比較グラフを示す。従来機に対して鉄損と漂遊損を大幅に低減し、比較対象機に対して0.14ポイント向上した。

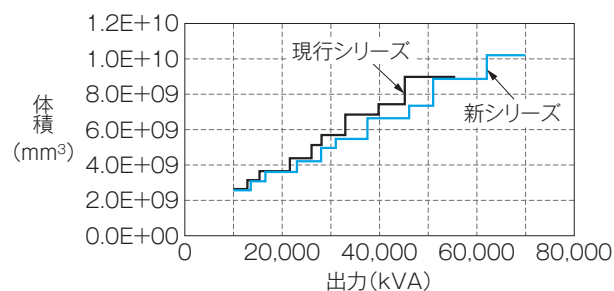
3 シリーズ設計化

基礎技術開発成果を取り込んだ試作機で所定の



第 8 図 損失比較グラフ

突極形発電機の当社での従来機と試作機の損失を比較する。鉄損と漂遊損の大幅な低減を達成した。



第 9 図 シリーズ設計見込み

当社従来機と今後リリースする新シリーズ機で、出力と電気体格の見込みを比較した。全出力範囲で体格縮小を見込む。

結果が得られたため、今後当社の4極タービン発電機シリーズの設計に反映し、さらにシリーズ全体で体格を縮小していく。第 9 図にシリーズ設計見込みを示す。

4 むすび

「骨太開発」で培った基礎技術を基に、4極突極形発電機の改良開発が完了した。この改良によって、現在55MVAを最大出力としているが、70MVAまで製作できる見込みが立った。

販売に向けたシリーズ化を実施し、さらに性能及び信頼性の高い製品を提供していく所存である。

- ・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《執筆者紹介》



村井和也
Kazuya Murai
回転機システム工場
回転機的设计・開発に従事



石橋太郎
Taro Ishibashi
発電事業部企画部
発電システムのエンジニアリング業務に従事