新系列 2 極空気冷却タービン発電機の測定技術

大久保 憲悦（おおくぼ　けんえつ）　　清野　純一（せいの　じゅんいち）

1　まえがき

新系列 2 極空気冷却タービン発電機の開発目標は，発電機利用率の向上と品質の確保であり，この両者を実現すべく新系列機には多くの改善が盛り込まれている。この改善の効果と品質を検証することは，今回の新系列機開発の最重要課題であった。このために最も確実な検証方法として出力 126 MVA の試作実験機を製作し，種々の試験を行い，検証する方法を選んだ。

126 MVA 試作実験機では，電気諸量を含め，温度，磁束，振動など 1,015 点の測定を行い，検証試験により得られる膨大な測定データは，新たに導入された多点自動計測システム装置により処理される。

本稿では試作実験機の主要部品に対する測定の概要，ならびに新たに開発した回転子温度測定装置および多点自動計測システム装置を紹介する。

2　測定項目と検証内容

前述したように 126 MVA 試作実験機では 1,015 点の測定が行われるが，そのうちの主要部品に対する測定項目と検証内容を**表 1** にまとめて示す。

試作実験機による検証は下記の観点に基づき実施した。

(1)　発電機利用率向上のための改善に伴い生じることが予想される問題の検証

(2)　2 極空気冷却タービン発電機の出力を最大 300 MVA まで拡大することに伴い生じることが予想される問題の検証

表 1　試作実験機の測定項目と検証内容

測定部位	測定項目	検証内容	測定センサ
固定子巻線	温　度	コイル層間温度，スロット部導体温度	埋込温度計，光温度計
		スロット部軸方向温度分布，渡り導体温度	熱電対
		コイルエンド部温度，コイルエンド頭部導体温度	熱電対，光温度計
	磁　束	スロット部およびエンド部漏れ磁束	磁束サーチコイル
	振　動	コイルエンドの振動，コイルエンド支持金具振動	光加速度計
	応　力	コイルエンド絶縁表面応力および支持金具応力	ひずみゲージ
固定子鉄心	温　度	鉄心中央部および端部温度，鉄心締付はり温度，冷却ダクト入口・出口空気温度	熱電対
	磁　束	中央部および端部の空げき，ヨーク部，歯部の磁束	磁束サーチコイル
	電　流	鉄心締付はりの循環電流	ロゴスキーコイル
	振　動	鉄心振動，鉄心支持ばね板振動	加速度計
回転子巻線	温　度	スロット部およびエンド部導体温度，入口・出口空気温度	特殊半導体センサ
プレスリング	温　度	プレスリング温度，コイルエンド支持金具温度	熱電対
	磁　束	プレスリングへの流入磁束	磁束サーチコイル
固定子枠	温　度	固定子コイルエンド周辺構造物温度	熱電対
	磁　束	固定子枠への漏れ磁束	磁束サーチコイル
冷却風	温　度	発電機各部空気温度	熱電対
	風量，風圧	発電機総風量，発電機各部風圧	風速計，風圧計
駆動側軸端	トルク	軸入力	トルクメータ

大久保 憲悦

大形回転機の測定技術の開発に従事。現在，（株）富士電機総合研究所電機技術研究所回転機グループ副主任研究員。

清野　純一

振動・騒音解析技術の開発に従事。現在，生産技術研究所第二開発部。

図１　固定子スロット部の磁束サーチコイル

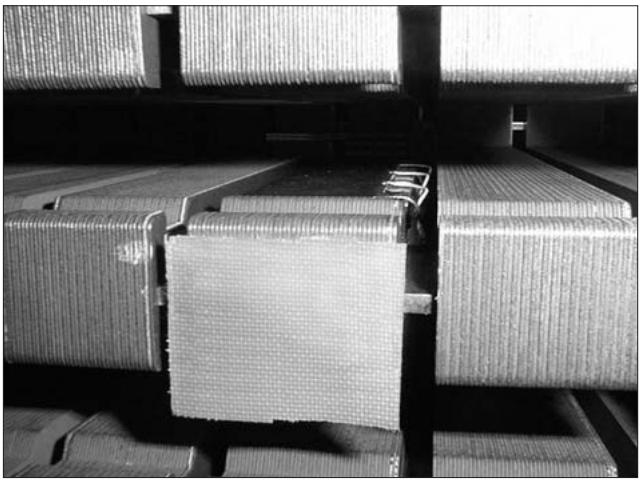


図２　固定子鉄心端歯部の磁束サーチコイル

(3)　２極空気冷却タービン発電機の限界を把握すると同時に，さらに改善すべき事項の検証

例えば，発電機の利用率を向上させれば，損失密度の増大による固定子巻線および回転子巻線の温度上昇の増大が予想される。試作実験機では，この対策として，幾つかの通風冷却改善がされており，その効果を検証する。

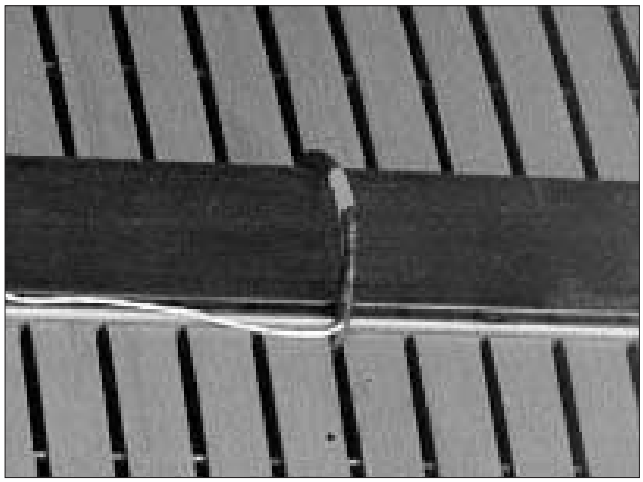
また，２極空気冷却タービン発電機の出力を 300 MVA まで拡大することを想定すると，やはり利用率の向上が必要となり，渦電流損失の増大による周辺構造物の温度上昇が懸念される。この渦電流損失による構造物の温度上昇を検証することも重要課題の一つである。

3　主要部品に対する測定

3.1　固定子巻線

固定子巻線に関しては，通常のコイル層間温度測定のほかに，①固定子スロット内の導体温度，②スロット内軸方向の温度分布，③コイルエンド部の絶縁表面温度，④コイルエンド頭部の接続部導体温度を測定した。また，固定子コイルのスロット内漏れ磁束を測定するサーチコイルも挿入した。**図１**に固定子スロット部の磁束サーチコイル取付け状態を示す。

図３　固定子鉄心はり電流測定用ロゴスキーコイル



3.2　固定子鉄心端歯部およびプレスリング

固定子鉄心端歯部およびプレスリングは，流入漏れ磁束により過熱が懸念される部位である。この漏れ磁束を測定すべく，歯先，中央，根元部およびプレスリングに，それぞれ磁束測定用サーチコイルを設けた。サーチコイルとしては，それぞれの部位における磁束の流入状況に応じて，法線方向流入磁束測定のための１方向コイルと，全方位形の３方向コイルとを使い分けた。**図２**に固定子鉄心端歯部の磁束サーチコイルの取付け状況を示す。上側が１方向コイル，下側が３方向コイルである。

3.3　固定子鉄心はり

試作実験機では，固定子鉄心ヨークの磁束密度を旧来より高く採っているため，ヨーク内の磁気飽和度が増し，外部に向けて漏れる磁束が，至近の構造物中に渦電流を誘起することが予想される。また，鉄心を外周部で固定する複数のはりは，その両端に位置するプレスリングにより短絡され，閉回路を構成するので，この部分には循環電流が流れることが想定される。この循環電流を測定すべく，非常に細密な線を多数回巻き付けたロゴスキーコイルを製作し鉄心はりに取り付けた。**図３**にロゴスキーコイルの取付け状態を示す。

4　回転子温度測定装置

タービン発電機では，一般に回転子巻線温度によりその体格が制限される。新系列機の開発に際しては，回転子巻線の通風冷却改善を検討し，三次元流れ解析によりその効果を確認した。今回の試作実験機による最重要検証課題は，これらの有効と判断された改善策を試作実験機に採用し，その効果を確認することであった。このため，回転子巻線およびその周辺の冷却風の温度分布を詳細に把握すべく，113 個の温度センサを取り付けた。

図４　回転子温度測定装置の測定原理

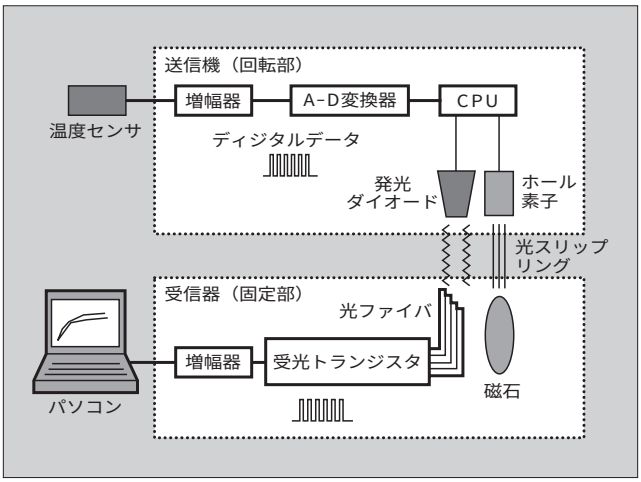
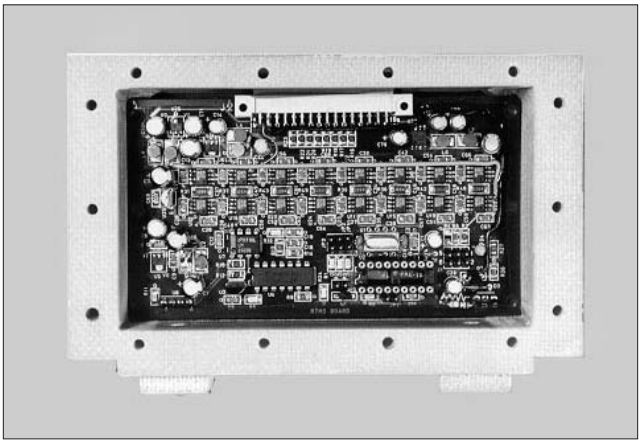


図５　送信機モジュール



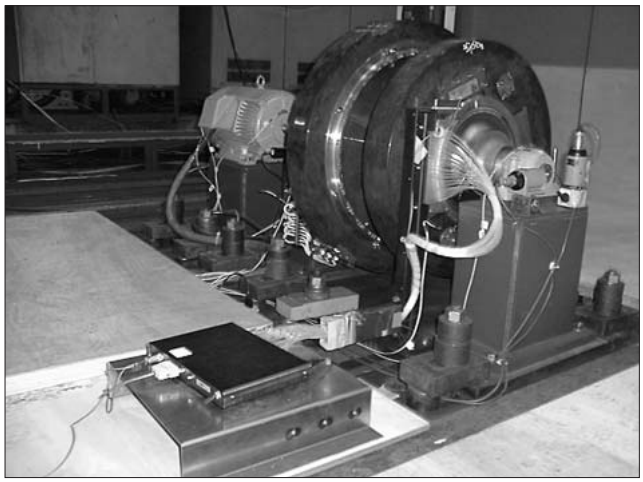
4.1　測定方法の開発

富士電機では，高速回転体温度測定の非接触伝送系として，従来は FM テレメータ方式を採用してきた。この方式は，温度センサの出力電圧を増幅し，周波数変調して外部に取り出すもので，電磁ノイズの渦巻く回転機中では有意な SN 比の確保が困難であった。

今回開発した温度測定方式は耐ノイズ性のきわめて高いものである。まず，温度センサには，大きな出力電圧を得ることのできるものを使用しているので，ノイズに埋もれることが少ない。また，データ伝送には光を使用しているので，やはりノイズに強い。富士電機では，このデータ伝送方式を光スリップリング方式と呼ぶことにした。**図４**にこの回転子温度測定装置の測定原理を示す。

温度センサの出力信号を受けた伝送部では，信号電流値がパルス符号変調され，発光ダイオードが明滅して外部に信号を発する。受光部では，周の一部に多数配置された光ファイバ束の切り口から光信号が入力され，復調して元の温度の値を知る。光送信は指向性が強く，光軸を適度に合わせることが非常に重要である。このため，回転子に設けたホール素子が，固定子に設けた磁石の磁場を検知した直後の一定時間を，送受光時としている。この方式の特徴は，温度データをディジタルに変換し，送信するために電磁ノイズに強く，またチャネル判別コードを用いて多チャネル信号を混乱なく受信できる点にある。

図６　耐遠心力試験の実験装置



4.2　送信機およびバッテリーモジュール

回転体には温度センサおよび送信機，バッテリーを取り付ける。送信機とバッテリーには，33,000 m/s^2 もの遠心力が加わるため，樹脂を充てんしたモジュール形式とした。**図５**に送信機モジュールの外観を示す。

バッテリーモジュールとしては，制御電圧を供給できる二次電池を使用し，充電による反復使用が可能なものとした。電池の耐遠心力は一般に把握されていない。遠心力方向に対する配置を変えたモジュールを数種試作し，良好な特性が得られるものを選定し採用した。なお，蓄積容量は試験手順を考慮して１充電あたり10時間とした。

4.3　受信器

受信器には受光トランジスタと増幅器が内蔵されており，RS-232C ケーブルでパーソナルコンピュータ（パソコン）と接続される。受信器は，送信機に対してデータ送信の開始と終了をリモートにて指示する。温度データはバイナリー形式で，一度に全チャネルデータを受信する。測定された温度諸量はパソコンに表示し，保存される。

4.4　高速回転試験

新しく開発した光スリップリング方式による回転子温度測定装置の遠心力耐力および測定精度，測定の安定性を検証するため，試作実験機と同一径の模擬回転子を製作した。**図６**に耐遠心力試験の実験装置を示す。この実験により，多チャネル信号が 3,600 r/min の高速回転時でも安定して精度よく伝送できることを確認した。

5　多点自動計測システム装置

試作実験機の測定点数は 1,015 点に及ぶため，多点自動計測システムの構築が不可欠であった。そこで，システム

表２　測定センサの総数と同時計測数

測定項目	測定センサ	総　数	同時計測数
温　　度	測温抵抗体	32	32
	熱電対	361	353
	光温度計	21	6
	特殊半導体センサ	113	16
電　　気	トルクメータなど	19	19
磁　　束	サーチコイル	194	62
振　　動	軸振動計	8	8
	加速度計	48	18
	光加速度計	12	6
応　　力	ひずみゲージ	75	16
はり電流	ロゴスキーコイル	4	4
風　　速	風速計	74	0
風　　圧	風圧計	41	0
部分放電	スロットセンサなど	13	0

図７　多点自動計測システム装置の外観

全体の制御動作と測定センサの特徴を十分に把握し，それらをリアルタイムで監視し，表示，記録する多点自動計測システム装置を構築した。

5.1　測定センサと同時計測

すべての測定センサ出力を同時に計測処理しようとすると，計測システム装置はいたずらに高価になる。そこで同時計測と分割計測とを必要性に応じて選択した。**表２**に測定センサの総数と同時計測数を示す。なお，測定センサ出力に変換を要するものは分割計測になる。

総数 1,015 に対して，同時計測数は 540 であり，残る 475 が分割計測である。**図７**に多点自動計測システム装置の外観を示す。

5.2　計測データの構成

データのなかには瞬時性を要しないものがある。同時計測データの 75 %を占める温度や，軸トルク，回転速度，電圧，電流，潤滑油量，冷却水量，軸振動などは，低速データとして収録し機器の処理能力を考え合わせて計測データのサンプリング周波数を 0.1 Hz（10秒に１回）にした。表示には数値表示と曲線による傾向表示の両様式がある。**図８**に低速データの監視画面を示す。低速データの表示画面は監視画面を含めて11画面から成り，用途に応じて使い分けられる。

図８　低速データの監視画面

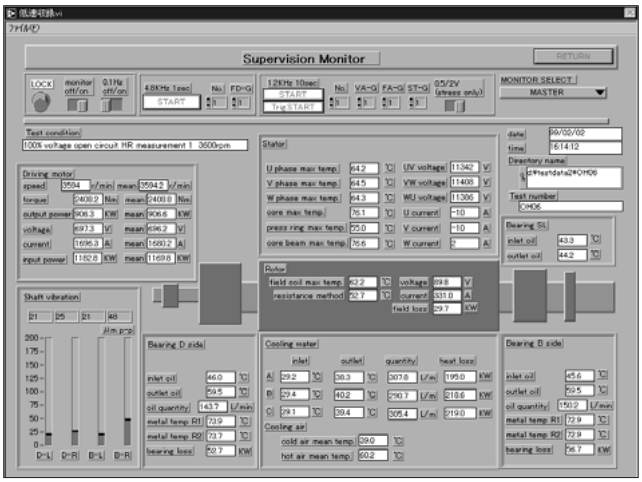
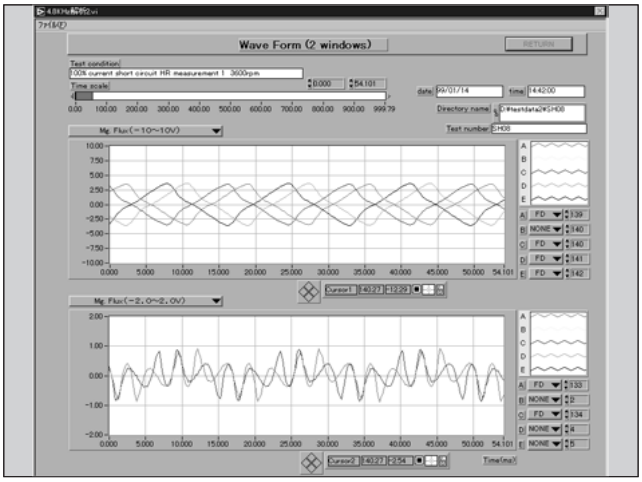


図９　高速データの磁束波形画面



磁束波形，振動波形，応力波形はいずれも高速データとして収録している。**図９**に磁束波形画面を示す。

磁束は，出現する周波数の上限を考慮して 4.8 kHz でのサンプリングとした。分割計測でも，重複して測定するセンサを設け，センサ間の位相判別が容易にできるようにしている。

振動は，基本周波数の10倍を正確に測定するため，サンプリング周波数を 1.2 kHz とした。波形を FFT（Fast Fourier Transform）にて周波数分析する機能も備えた。

応力は，短絡試験時に測定波形のノイズ除去のためひずみゲージのブリッジ電圧を切り換えて収録し，規定の計算式で応力計算する。サンプリング周波数は 1.2 kHz とした。発電機電流を同時に計測し，時間軸の同期処理を行い，短絡時の位相を確認できるようにしている。

5.3　多点自動計測システムの特徴

計測データとしては，低速データと高速データが混在しており，これらを安定して収録するために，機能をブロックに分割したことが，この多点自動計測システムの特徴である。測定データはすべてハードディスクに収録され，収録後，膨大なデータから必要とするデータを瞬時に呼び出せるようにしている。

低速ブロックは，低速データ収録と高速データ収録との収録指示をする機能を有し，高速データを収録しつつ，低速データにより各部の状況を把握する。

高速ブロックは，高速データの収録のみ扱う。

高速モニタブロックは，高速部の画面表示の負担を軽減し，高速ブロックを助ける。

遠方監視ブロックは，表示対象を１か所に限定し，ほかからの進入を防止する。

このようにブロックごとに分割すると，システムの統合運用が困難になるが，汎用および専用プログラムを適用限界極限まで活用することが可能になり，一貫した操作で扱える手法を確立して，計測の信頼性を向上させた。

6　あとがき

今回の試作実験機に適用した測定技術について概説した。得られた測定結果の評価については，本特集号の別稿にて詳しく記されているが，予測をほぼ裏付けるものであった。

測定技術の進歩には驚くべきものがある。各種センサは，感度，機能のほか，信号の伝送，処理において長足の進歩を遂げている。一方，測定対象も多様に変化している。大形回転機では，設計解析技術がますます精妙になるにつれ，今まで得られなかったデータを強く求められることが多い。今後とも研究を重ね，測定技術の向上に努めたい。

今回の測定技術の確立に，ご協力いただいた関係各位に誌面を借りてお礼を申し上げる。

参考文献

(1)　佐藤昭二ほか：２極空気冷却タービン発電機の新系列機の開発，富士時報，Vol.70，No.9，p.458-461（1997）

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。