

タービン発電機の点検工期を大幅に短縮できる ロボット検査技術

Robotic Inspection Technology Substantially Shortening Time Required for Turbine Generator Inspections

桑原 央明 KUWAHARA Hiroaki 松崎 晃大 MATSUZAKI Akihiro 伊藤 一郎 ITO Kazuo 新井 佑也 ARAI Yuya

発電所のタービン発電機（以下、発電機と略記）は、定期点検によって維持管理されており、点検前後の発電機の分解・組み立てに工期を要することから、稼働率向上のために点検工期の短縮のニーズが高まっている。点検工期の短縮には、発電機のローターを引き抜かないで内部の詳細点検を可能にする技術の導入が求められる。

東芝グループは、発電機の点検工期を短縮するため、点検ロボット、点検ロボットを搬送するステーション、各種検査の自動化、及び点検を計画・管理するための管理システムから構成されるロボット検査技術を開発した。これにより、分解・組み立てが簡略化でき、検査を自動化することで、点検工期を従来の1/2以下に短縮した。

Power plants in Japan and overseas are experiencing a pressing demand for improvement of operational efficiency by shortening the time required for periodic inspections of turbine generators, which currently entail disassembly and reassembly work, and prolonging the intervals between such inspections. A new technology is necessary to replace the conventional inspection method, in which a great deal of time and effort is expended in removing the rotor from the stator in order to perform a detailed inspection, followed by reassembly work.

The Toshiba Group has developed a robotic inspection technology for turbine generators that can automatically perform inspections without the need for rotor removal. This technology employs a system consisting of an inspection robot, an inspection robot station, and a management system. We have confirmed that the newly developed technology can shorten the inspection time to less than 50% compared with the conventional method.

1. まえがき

火力・原子力発電所に設置される発電機は、定期的な点検により維持管理される。発電機は、主にローターとステーターから構成されており、点検では、ローターとステーターの全ての箇所を検査することが求められる。ローターとステーターの隙間は狭いことに加えて突起などがあるため、従来は、発電機を分解してローターを引き抜く必要があり、検査の前後の分解・組み立てに、点検工期の70%以上を要していた。

発電機の稼働率を向上させるためには、点検工期の短縮及び点検間隔の延長が課題である。東芝グループは、点検作業の効率化のために、自動的に検査を行う点検ロボットの開発⁽¹⁾に取り組んでおり、この度、点検ロボット、点検ロボットを搬送するステーション、各種検査の自動化技術、及び点検を計画・管理する管理システムから成るロボット検査技術を開発した。この技術により、点検時にローターを引き抜く必要がなくなったことで分解・組み立てを簡略化でき、人手による検査を自動化したことで合わせて、点検工期全体を従来の1/2以下に短縮した(図1)。

ここでは、点検ロボット及びステーションの詳細と、管理

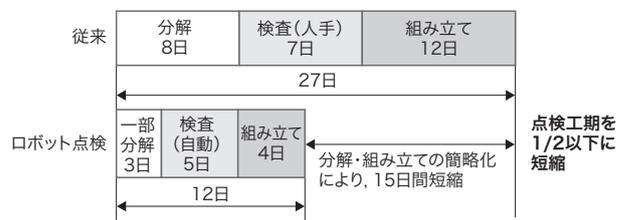


図1. ロボット検査技術の導入による点検工期の短縮

ロボット点検の導入により、点検前後の分解・組み立ての簡略化と、検査の自動化が実現できた。この結果、工期を従来の1/2以下に短縮した。

Comparison of inspection times required for conventional and robotic inspection methods

システムの概要について述べる。

2. ロボット検査技術の概要

発電機の内部構造を、図2に示す。ローターを引き抜かないで検査を実施するためには、点検ロボットは、ローターとステーターの間に入り込む必要がある。

発電機の稼働時には、ローターの温度上昇を抑えるために、発電機内に冷却ガスが流される。大型の発電機には、冷却性能を確保するために、冷却ガスと高温ガスの流れを

分離するセグリゲーティングバッフルが設置されている。これまでの技術では、ローターとステーターの間にあるセグリゲーティングバッフルなどの突起部が、点検ロボットの移動の障害になり、検査の必要な箇所にアクセスできなかった。

開発したロボット検査技術では、ステーションがローターの周方向における任意の場所に点検ロボットを搬送し、点検ロボットが突起を避けながらローターとステーターの間を回転軸方向に移動する。そのため、セグリゲーティングバッフルを持つ大型発電機でも必要な箇所にアクセス可能であり、ローターを引き抜く必要がない。

また、点検ロボットに搭載する検査ユニットを換装することにより、ローター及びステーターに対し、表1に示すよう

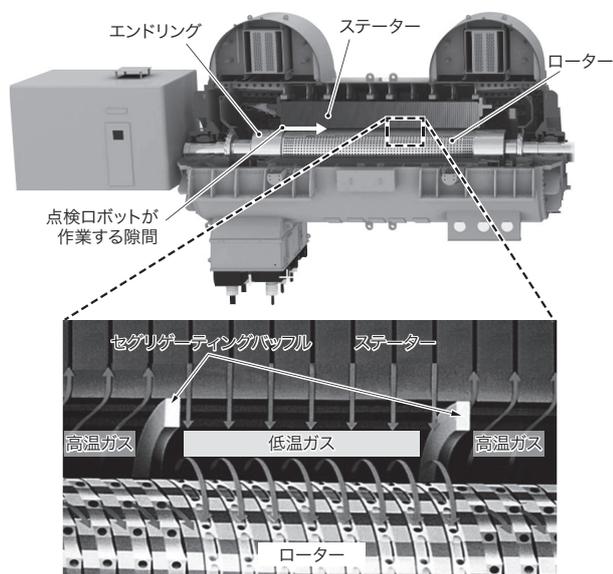


図2. 発電機の内部構造

ステーター側に等間隔で設置されたセグリゲーティングバッフルにより、ローターとステーターの間にガスの流れができる。

Internal structure of turbine generator

表1. 点検ロボットによる検査項目

List of items inspected using inspection robot

検査対象	検査方法	検査内容
ローター	表面 VT (映像)	傷・過熱痕
	通風孔	カメラ 通風孔の詰まり
	くさび	UT (超音波) プローブ 内部欠陥
ステーター	表面	VT(映像) 傷・過熱痕
	くさび	打音 ハンマー マイク くさびの緩み
	鉄心	EL CID (誘導電流) 検出コイル 漏れ磁束 絶縁破壊

VT: Visual Testing UT: Ultrasonic Testing
EL CID: Electromagnetic Core Imperfection Detection

な、様々な種類の検査を実施できる。更に、点検ロボットとステーションの動作は、管理システムが計画し、検査位置と検査結果はデータベースに保存される構成になっており、検査の自動化による点検作業の効率化に貢献する。

3. 点検ロボット

3.1 点検ロボットの構成

開発した点検ロボットの構成を図3に示す。点検ロボットは、点検ロボットを回転軸方向に移動させるクローラー、ローター面に躯体(くたい)を押し付けて姿勢を保持するアーム、前方と後方に取り付けた計5台のカメラ、及び検査ユニットから構成される。

点検ロボットは、クローラーによりローター上を回転軸方向に直進する。アームには、電気駆動するモーターアームと、空気圧駆動するシリンダーアームがある。万一故障して動力を喪失しても、点検ロボットが同じ位置にとどまるように、各アームには、ばねで押し付け力を発生させる仕組みを搭載している。点検ロボットの姿勢保持と、セグリゲーティングバッフルなど発電機内の突起回避のために、アームの展開・収納の動作と、押し付け力を制御する。また、シリンダーアームは、検査ユニットをステーター表面付近へ移動させる機能も備えている。以下では、点検ロボットの要素技術について述べる。

3.2 直進制御技術

点検ロボットは、指定量に従ってローター表面を回転軸方向に直進し、各種検査を行う。このとき、重力の影響で姿勢が傾くことがあるため、点検ロボットの直進制御技術を開発した。

ローターとステーターは同心軸上に設置されており、ステーターの鉄心には、くさびが一定間隔で回転軸方向に挿入されている。これらの幾何学的な関係を利用し、ステー

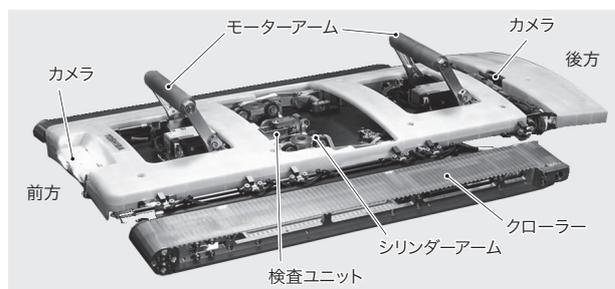


図3. 点検ロボットの構成

薄型構造であるため、セグリゲーティングバッフルとローターとの最小距離35 mmを通過できる。

Configuration of inspection robot

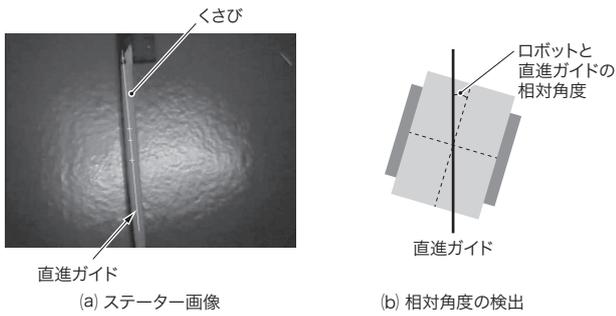


図4. ステーター画像を用いた点検ロボットの直進制御

画像処理により、ステーター画像の特徴から直進ガイドを作成し、点検ロボットを高精度に直進制御する。

Straight-line traveling control of inspection robot achieved by processing of stator images

ターの画像を認識して点検ロボットの角度を検出する。図4に、直進走行時のステーター画像処理の様子を示す。点検ロボットのカメラでステーター表面を撮像し、画像処理することで直進ガイドを得る。直進ガイドとロボットの相対角度を所定の値に収束させるように、左右のクローラーの速度差を変化させるフィードバック制御で、点検ロボットの直進を実現している。

3.3 アームの制御技術

点検ロボットの各アームは、走行時の姿勢を保持するために、ステーター側に押し付け力を発生させる。点検ロボットの周方向の位置によって、自重を支えるために必要な押し付け力は変化する。各アームの押し付け力は、展開しているアーム数、アームの角度、点検ロボットの周方向の位置によって調整する必要がある。そこで、ロボットの静力学モデルから、各アームに必要な目標押し付け力を算出し、これに追従させる押し付け力制御技術を開発した。

また、点検ロボットがアームを展開して走行する際、セグリゲーティングバッフルなどの突起部とアームが干渉するおそれがある。そこで、突起を検知して、アームの押し付け力を変えながら、展開・収納する障害物回避技術を開発した。図5に示すように、セグリゲーティングバッフルの位置にあるアームを収納し、ほかのアームの押し付け力を適切に制御しながら直進することで、突起を回避する。これにより、セグリゲーティングバッフルなどローターとステーターの間に突起のある大型発電機でも、任意の検査位置へのアクセスが可能になった。

4. ステーション

4.1 ステーションの構成

ステーションの構成を図6に示す。ステーションは、ロー

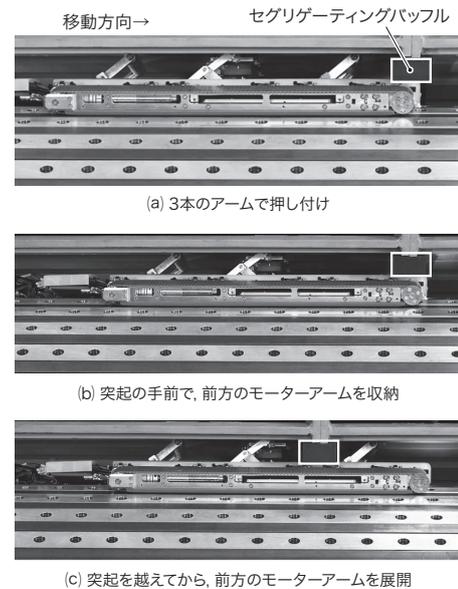


図5. 点検ロボットのセグリゲーティングバッフル回避方法

展開しているアーム数やロボットの姿勢に応じて押し付け力を変えながら直進することで、姿勢を保持したままセグリゲーティングバッフルを回避できる。

Method to avoid contact with segregating baffles

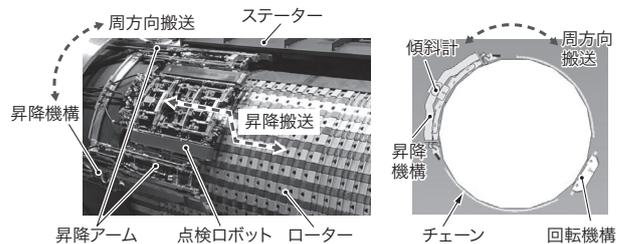


図6. ステーションの構成

回転機構と昇降機構をチェーンでつないでいるため、ローターの直径に合わせて、ステーションを柔軟に設置できる。

Configuration of inspection robot station

ターのエンドリング部分(図2)にあって周方向に移動する回転機構と、点検ロボットを把持する2本の昇降アーム、ローターの上に投入・回収する昇降機構から構成される。回転機構と昇降機構はチェーンで接続され、回転機構がローター上を移動する駆動力を、チェーンを介して昇降機構に伝達することで連動する。ステーションは、周方向の位置決めと点検ロボットの昇降動作により、点検ロボットを周方向の任意の位置に搬送する。

以下では、各要素技術について説明する。

4.2 周方向搬送技術

点検ロボットが検査位置に行き着くためには、ステーションが周方向の正確な位置に搬送する必要があり、周方向の

位置を高精度に計測することが重要である。また、位置決め用の制御周期に適した速さのサンプリングが求められる。

ステーションの周方向の位置は、回転機構にある駆動モーターの従動輪に設置したエンコーダーと、昇降機構に設置した傾斜計の、二つのセンサーを用いて計測する。一般に、エンコーダーによる計測は高速サンプリングで高い位置分解能が得られるが、今回は接触式での相対量の計測であるため、ローター表面とエンコーダーの間の滑りによって誤差が生じる。一方、傾斜計は、エンコーダーに比べ低速サンプリングではあるが、重力を利用した非接触式であるため、機械的な誤差要因の影響を受けにくい。そこで、エンコーダーと傾斜計を組み合わせ、誤差が生じにくく、かつ高速サンプリングが可能な計測方法を採用した。

この計測方法を利用して、ステーションの位置決め制御を行い、高精度な位置決めを実現した。

4.3 昇降搬送技術

ステーションが昇降アームで、ローターとステーターの間の狭い隙間に点検ロボットを投入するとき、点検ロボットの姿勢をローターの表面に沿うように保持する必要がある。

そこで、左右の昇降アームの姿勢から仮想平面の傾きを推定し、これをロボットの姿勢として、傾きをゼロにするように左右の昇降アームの速度差を変化させることで、点検ロボットの姿勢を制御している。

5. 管理システム

点検ロボットによる点検作業を自動で計画・管理する管理システムを、開発した。

管理システムは、発電機的设计情報や必要な検査項目の情報を基に、検査計画を策定する。検査計画に基づいて、点検ロボットとステーションに、移動や検査などの指示を出

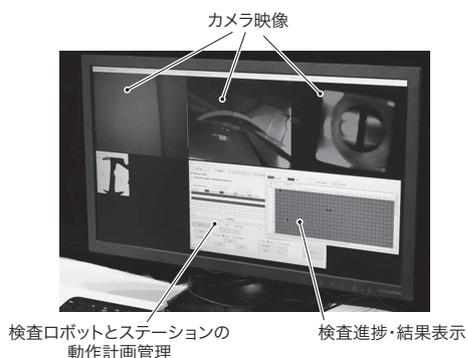


図7. 管理システムによる操作

点検ロボットの位置と検査結果を、リアルタイムで更新し、表示している。

Management system display showing operating conditions

し、作業中は、ロボットの位置や、検査の進捗・結果などをモニターに表示する(図7)。

また、点検データをデータベースにひも付けて保存し、検査成績を帳票として出力する。点検データは一括管理し、発電機の故障予兆診断への応用や継続的な点検プログラムの提案に活用する。

6. あとがき

発電機の点検工期を従来の1/2以下に短縮する、ロボット検査技術について述べた。

今後、この技術を活用した点検サービスを展開して点検工期を短縮するとともに、点検データを活用した故障予兆診断や適切な点検プログラムの作成により、点検間隔の延長に寄与することで、発電機点検の効率化に貢献していく。

文献

- (1) Tari, M. et al. Development of a capacitance measuring robot for the water-cooled stator winding of turbine generators. IEEE Transactions on Energy Conversion. 1999, 14, 4, p.1366-1371.



桑原 央明 KUWAHARA Hiroaki
生産技術センター 業務プロセス変革推進領域
メカトロニクスソリューション変革推進部
IEEE・電気学会会員
Mechatronics Solution Innovation Dept.



松崎 晃大 MATSUZAKI Akihiro
東芝エネルギーシステムズ(株)
パワーシステム事業部 京浜事業所 設計第二部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



伊藤 一郎 ITO Kazuo
東芝デベロップメントエンジニアリング(株)
インダストリアルシステムグループ
メカトロ&システムソリューション担当
Toshiba Development & Engineering Corp.



新井 佑也 ARAI Yuya
東芝ITコントロールシステム(株)
府中事業所 メカトロ・マイクロシステム部
Toshiba IT & Control Systems Corp.