

水車発電機の稼働率向上技術

Technologies to Enhance Operational Efficiency of Hydro Generators

高橋 友彰 TAKAHASHI Tomoaki 広瀬 晃彦 HIROSE Akihiko 川端 俊一 KAWABATA Shunichi

カーボンニュートラルの達成に向けて再生可能エネルギーが注目される中、水力発電は電力の安定供給と需給調整において重要な役割を果たしており、稼働率の向上が求められている。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、水車発電機の故障や点検・補修による停止期間を短くするために、“オンラインPDモニタリングシステム”、及び点検ロボット・楔(くさび)補修ロボットを開発している。前者は、発電機の主要部品である固定子コイルの部分放電を運転中に検出する“非接触PDセンサー”の開発により、既設水車発電機への設置を容易にした。後者は、水車発電機の回転子をつり出さなくても、内部点検と楔打音不良箇所の補修ができるようにした。これらの技術により、水車発電機の計画外停止を防ぐとともに、点検・補修に掛かる時間を最小限に抑え、稼働率向上に貢献できる。

With the introduction of renewable energy systems following recent trends in carbon neutrality initiatives, hydroelectric power generation is playing an important role in maintaining the balance of electricity demand in addition to ensuring a stable electricity supply. This has resulted in greater demand for enhanced hydro generator operational efficiency.

Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation has responded by developing technologies that shorten the suspension of hydro generator operations in the event of failure or during inspection and repair works. We have developed an online monitoring system to monitor partial discharge (PD) in the stator coil, which is a precursor to insulation deterioration, by using new non-contact PD sensors which facilitate installation on existing hydro generators currently in operation. We have also developed inspection robots to perform internal inspections of hydro generators, as well as repair robots to fix wedge defects detected by hammering tests. These technologies are expected to help minimize the risk of unscheduled outages as well as the time required for inspection and repair work, thereby enhancing hydro generator operational efficiency.

1. まえがき

世界的なカーボンニュートラルの流れの中で、水力発電は持続可能な再生可能エネルギーの一つとして再評価されている。特に、流れ込み式はベースロードとして、ダム式や揚水式は、供給力や調整力として、太陽光発電や風力発電など自然環境で出力が変動する再生可能エネルギーを補完する役割を担っている。2019年に卸電力市場などが、2024年には容量市場・需給調整市場が開設されたことにより、今後、ますます停止期間を減らし、設備の稼働率を高めるニーズが強くなっていく。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、このような状況を踏まえ、水車発電機の稼働率を向上させる技術の開発に取り組んでいる。ここでは、オンラインPDモニタリングシステムと点検・楔補修ロボット技術について述べる。

2. 稼働率向上の取り組み

水車発電機の稼働率を向上させる要素として、次の三つが挙げられる。

- (1) 計画外長期停止の削減
- (2) 適切な点検・補修の計画立案
- (3) 点検作業のための停止期間の短縮

これらを実現するために、水車発電機のオンラインPDモニタリングシステムと点検・楔補修ロボットを開発している。

水車発電機の計画外長期停止が発生する要因の一つに、固定子コイルの絶縁劣化による地絡がある。オンラインPDモニタリングシステムは、運転中の部分放電を常時監視し、地絡事故を未然に防ぐことで、計画外の長期停止リスクの低減を図る⁽¹⁾。更に、劣化状態を把握して将来の故障を予測することで、適切な点検・補修計画の立案が可能となる。

また、通常の点検では水車発電機の大規模な分解が必要になるため、分解・組立作業に時間が掛かる。点検・楔補修ロボットを適用することで、分解範囲を最小限に抑えられるので、点検作業期間の短縮が図れる。

図1に、オンラインPDモニタリングシステムの非接触PDセンサー及び点検・楔補修ロボットの水車発電機への適用例を示す。

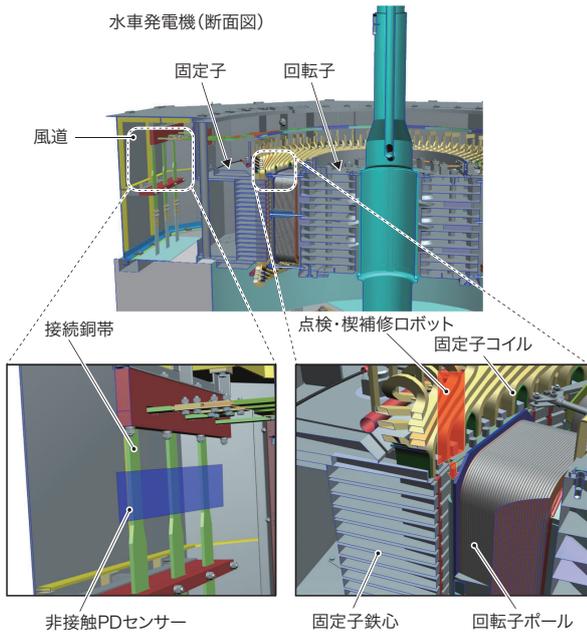


図1. 水車発電機への非接触PDセンサー及び点検・楔補修ロボットの適用箇所

非接触PDセンサーは、風道からアクセス可能な接続銅帯に沿うように設置する。また、点検・楔補修ロボットは、固定子と回転子間の隙間に挿入する。

Locations of non-contact PD sensor and inspection/repair robots in hydro generator

3. 水車発電機のオンラインPDモニタリングシステム

3.1 非接触PDセンサーの開発による設置期間短縮

近年のIoT (Internet of Things) 技術の進展により、発電所の監視プラットフォームとして、各種装置へのオンライン監視機器の導入が進んでいる。水車発電機の固定子で発生する部分放電を捉えるためには、検出器として部分放電センサーを設置する必要がある。従来のカプラー方式のオンライン部分放電センサーは、水車発電機の巻線へ直接接続するため、水車発電機カバー及び絶縁部の分解・再組立の際に長期停止が必要である。このため、実装コストや売電ロスが発生するほかに、設置工事に数週間掛かることが、システム導入の障壁となっていた。

当社は、浮遊容量結合で固定子コイルから高電圧線路に伝播する信号を検出する、非接触PDセンサーを開発した。非接触にしたことで、高電圧線路への直接接続が不要になり、水車発電機を分解せずに非接触PDセンサーを設置できる。

図2に、非接触PDセンサーの設置例を示す。非接触PDセンサーは樹脂と銅板で構成された平板形状であり、空間設計の柔軟性が高い。そのため、センサーに曲率を持たせたり、複数の非接触PDセンサーを1枚のプレートに統合したり

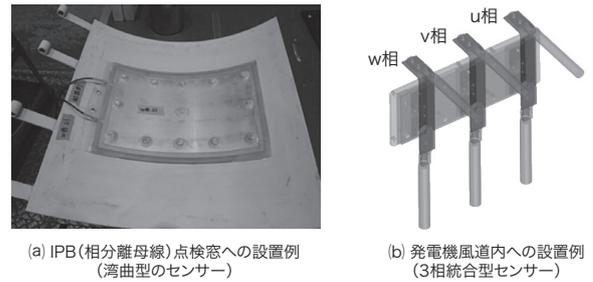


図2. 非接触PDセンサーの設置例

非接触PDセンサーは、湾曲状にしたり、3相分を1枚のプレートへ統合したりできるため、様々な場所に設置可能である。

Installation examples of non-contact PD sensors on hydro generator

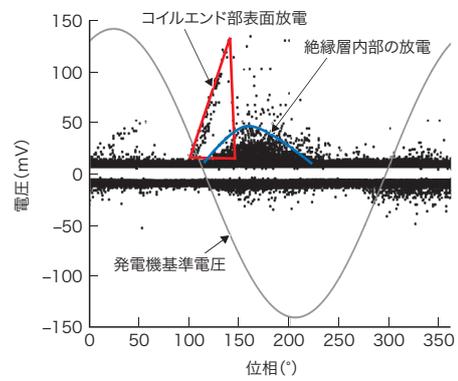


図3. 水車発電機運転時に記録されたPRPDパターンの例

コイルエンドの表面放電と絶縁層内の放電の特徴を確認した。

Example of phase-resolved PD (PRPD) pattern of hydro generator in operation measured by online PD monitoring system

することも可能で、省スペース化と設置の簡便性を向上させた。大規模な分解作業が不要になったことで、オンラインPDモニタリングシステムの設置期間を約2日まで短縮できる⁽²⁾。

3.2 固定子コイルの絶縁状態の評価

水車発電機の固定子から得られる部分放電信号は、放電電荷量 Q として観測される。最大放電電荷量 Q_{max} 、及び Q と放電発生位相 Φ の関係を示す位相分解部分放電 (PRPD: Phase-Resolved Partial Discharge) により、固定子コイルの絶縁状態を評価できる。

図3に、PRPDパターンの評価例を示す。これは、運転中の水車発電機に非接触PDセンサーを取り付け、オンラインPDモニタリングシステムで得たPRPDパターンである。放電発生位置と放電パターンの関係性から、コイルエンド部の表面放電と絶縁層内部の放電パターンの発生を確認した⁽²⁾。

図4は、図3と同じ水車発電機から固定子コイルをサンプリングし、従来用いられているオフライン計測装置でPRPDパターンを取得したものである。図4(a)にコイルエンド部

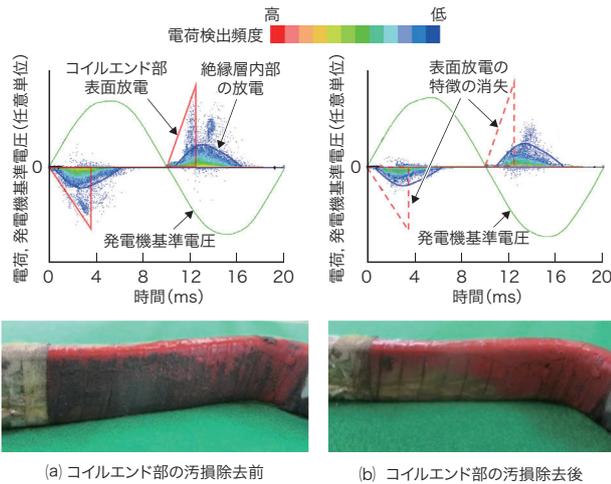


図4. コイルエンド部の汚損除去前後におけるPRPDパターンの比較
コイルエンド部の表面の汚損を除去することで、赤枠部分のPRPDパターンが消失しており、これが表面放電の特徴であることを確認した。
Comparison of PRPD patterns before and after contamination removal from coil end

の汚損洗浄前、図4(b)にコイルエンド部の汚損洗浄後のPRPDパターンを示す。汚損の洗浄前に比べて、洗浄後は表面放電の特徴が消失したことから、この表面放電は表面汚損で発生するパターンであることを確認した。

このように、絶縁に深刻な影響を与えるほかの部分放電現象（例えばスロット火花放電やコイルエンド異相間放電など）も、同様にPRPDパターンで分類が可能である。したがって、非接触PDセンサーを用いて運転中のPRPDパターンを常時監視することで、部分放電の発生位置や発生事由を特定し、早期に異常検知できる。

3.3 絶縁状態のトレンド監視

Q_{max} は、ある特定の頻度で生じる部分放電の強度を示す指標であり、その値が大きいほど、絶縁劣化が進行していることを示す。したがって、 Q_{max} のトレンドを経時的にモニタリングすることで、運転中に地絡事象に至るような固定子コイルの絶縁状態の変化を迅速に把握できる。図5に、水車発電機のフィールド検証で得た Q_{max} の経時変化を、オンラインPDモニタリングシステムのUI（ユーザーインターフェース）で表示した例を示す。

このオンラインPDモニタリングシステムは、既設の水車発電機にも数日間で容易に設置可能であり、設置のための停止期間を最小限に抑えられる。更に、PRPDパターンを含む様々な診断データを分析できる機能を備えており、水車発電機の固定子コイルの絶縁劣化を早期に発見し、事前に対策することで計画外停止期間を削減できる。

このように、設置期間の短縮と、計画外停止期間の削減

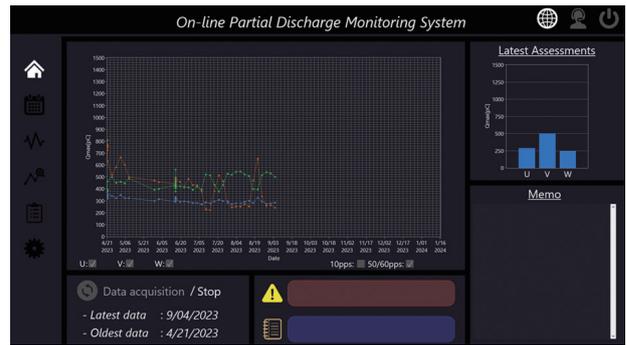


図5. オンラインPDモニタリングシステムのUI画面例

フィールド検証で得た Q_{max} を数か月間取得し、開発したUI画面で表示した例である。

Example of user interface (UI) display of online PD monitoring system

により、稼働率の向上を可能にする。

4. 水車発電機の点検・楔補修ロボット技術

4.1 水車発電機向けロボットの特徴

火力及び原子力発電向けのタービン発電機では、ロボットを使って、タービン発電機の回転子を引き抜かずに点検することで、点検期間を短縮できることが示されている^{(3), (4)}。一方、水車発電機では、固定子鉄心と回転子ポールの間（エアギャップ）が狭く、固定子内面の構造も異なるため、タービン発電機向けに開発した点検ロボットは適用できない。

そこで、当社は、火力及び原子力発電向け点検ロボットの構成機器を改良して薄型化し、水車発電機のエアギャップ内を走行できる点検ロボットを開発した。更に、点検で判明した楔の緩みを、回転子をつり出さない状態で補修する機能を搭載した楔補修ロボットも開発した⁽⁵⁾。点検ロボットと楔補修ロボットは、点検と補修を並行して作業できるようにするために、別々の構成とした。

4.2 点検ロボット

点検ロボットの構成を、図6に示す。点検ロボットは、磁力により固定子鉄心に吸着してクローラーで移動する。固定子表面の特徴点を画像処理で検出することにより、点検ロボットの姿勢と位置を制御し、点検箇所へ到達する。点検ロボットは、カメラによる固定子、回転子、固定子通風孔内の目視点検、及び楔の緩みの打音検査が可能である。楔の緩みは、ハンマーによる打音をマイクで集音し、その波形を分析することで良否を判定する。また、ロボットの制御装置は、運搬や設置作業に掛かる手間や時間を最小限にとどめるため、作業員1名で持ち運び可能なサイズとした。

4.3 楔補修ロボット

固定子の楔に緩みを確認した場合に、楔と鉄心の境目に

ある溝を覆うように補修材を塗布して、緩んだ楔を固着する楔補修作業を行うことがある。この作業を、回転子をつり出さずに実現する楔補修ロボットを開発した。

楔補修ロボットは、4.2節に記載した点検ロボットの走行機能に、補修材を塗布する機能を搭載した。補修材を補修箇所的一定の幅と厚さで塗布し、補修材が垂れないよう硬化させることで、回転子のつり出しを行わずに打音不良の楔を固着補修する。楔補修ロボットを自動制御することで、効率的に楔を補修できる。

図7に、楔補修ロボットによる固定子モックアップへの補修材の塗布例を示す。補修材の塗布により、水車発電機の固定子コイルを更新するまでの期間において、楔の脱落などのリスクを低減できる。

これらのように、エアギャップに進入して作業する点検・楔補修ロボットにより、回転子のつり出しを行わず、水車発電機の分解範囲を最小限にすることで点検作業期間を短縮

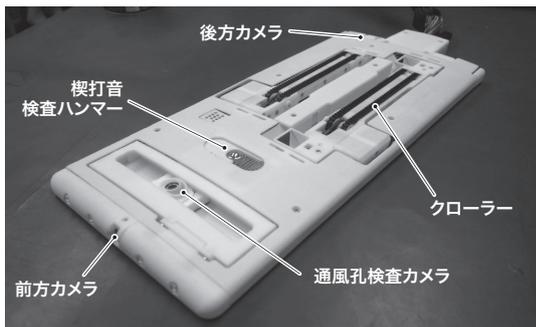


図6. 水車発電機向け点検ロボットの構成

点検ロボットは薄型で、エアギャップ内をクローラーで走行する。カメラによる撮影画像を基に自己位置の制御や、各種点検を行う。

Configuration of inspection robot

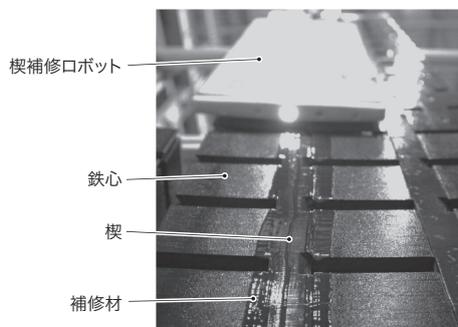


図7. 楔補修ロボットによる補修材塗布

固定子モックアップで、楔補修ロボットの走行と補修材塗布の機能を検証した。

Repair robot coating stator coil with repairing material

し、水車発電機の稼働率の向上を実現する。

5. あとがき

オンラインPDモニタリングシステムと点検・楔補修ロボットは、水力発電所の主要設備である水車発電機の計画外停止の削減、適切な点検・補修計画の立案、及び点検のための停止期間の短縮を図り、稼働率の向上を実現するために有効である。

今後も、設備の稼働率を高めるための様々な技術開発を継続し、電力の安定供給に貢献していく。

文献

- (1) 酒井正弘, 佐藤文生. 発電機のオンライン絶縁診断. 東芝レビュー. 2008, **63**, 4, p.42-45.
- (2) Takahashi, T. et al. "Application of Non-contact On-line Partial Discharge Monitoring System to Hydro Generator". CIGRE Paris Session 2024 Papers. 2024-08, 2024, A1-10865.
- (3) 片山 仁. タービン発電機向け精密点検ロボットの開発. 日本ガスタービン学会誌. 2020, **48**, 1, p.20-25.
- (4) 桑原 聡明, ほか. 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. 東芝レビュー. 2020, **75**, 6, p.52-55. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2020/06/75_06pdf/f03.pdf>. (参照 2024-10-15).
- (5) 川端俊一, ほか. “水車発電機を非分解で検査・補修するロボットの開発”. 第42回日本ロボット学会学術講演会予稿集. 大阪, 2024-09, 日本ロボット学会, 2024, RSJ2024AC3K2-02.



高橋 友彰 TAKAHASHI Tomoaki
東芝エネルギーシステムズ(株)
浜事業所 水力・発電機部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



広瀬 晃彦 HIROSE Akihiko
東芝エネルギーシステムズ(株)
パワーシステム事業部 水力プラント技術部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



川端 俊一 KAWABATA Shunichi
東芝エネルギーシステムズ(株)
エネルギーシステム技術開発センター 機械技術開発部
日本ロボット学会・日本保全学会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.