

# 発電機の稼働率向上に貢献する予防保全技術

川島 諒祐\*  
後藤 大智\*  
米倉 浩二\*

Preventive Maintenance Technology for Improving Operational Availability of Turbine Generator

Ryosuke Kawashima, Daichi Goto, Koji Yonekura

## 要 旨

自然エネルギーの発電規模が拡大する中、火力発電事業に対しては自然変動電源の補完等、電力の安定供給への貢献がより強く求められている。この背景の下、三菱電機は発電機の稼働率向上に貢献する次の2点の発電機予防保全技術開発を進めてきた。

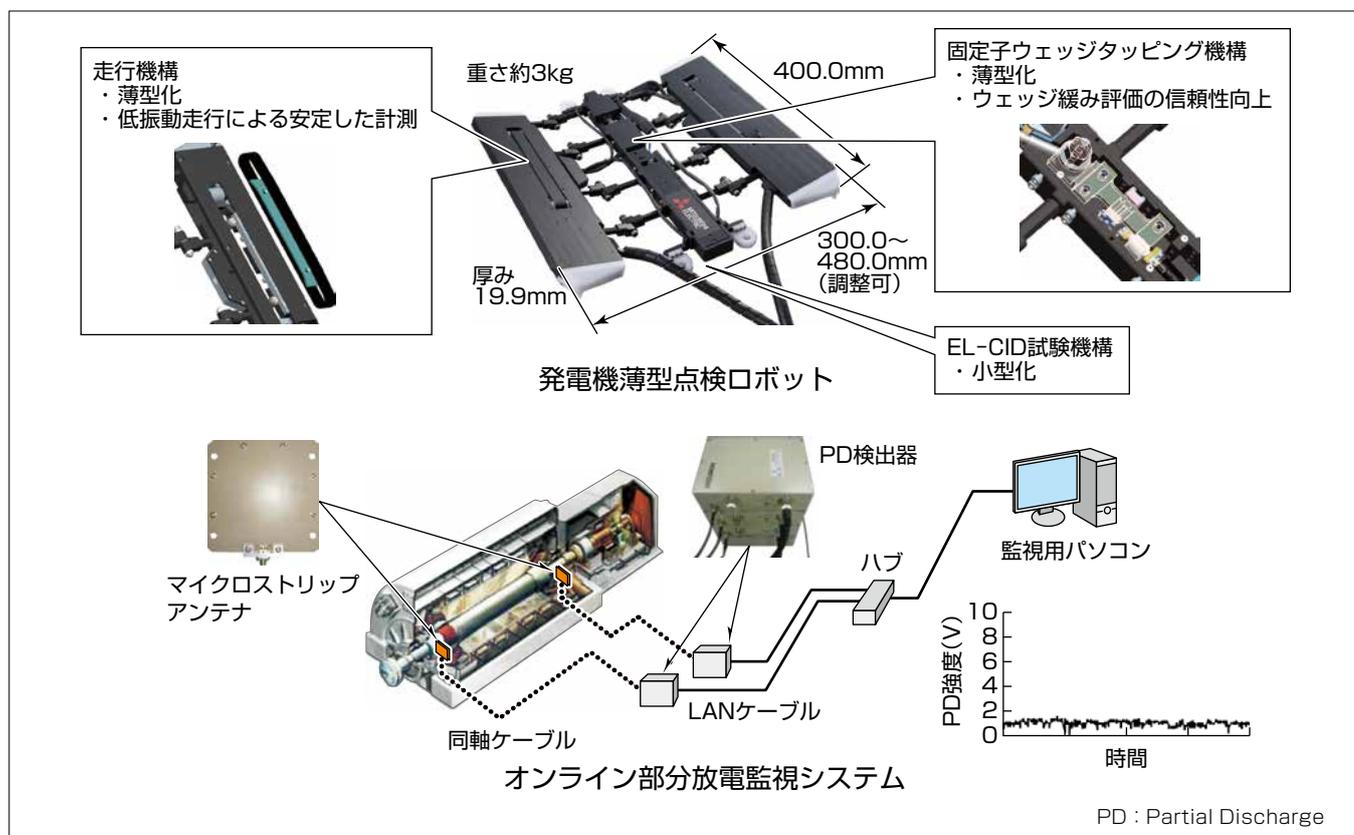
### (1) 発電機薄型点検ロボット

当社の発電機薄型点検ロボットは、独自の走行機構によって外形を薄型化し、点検カメラ、固定子ウェッジタッピング、固定子コア層間短絡診断試験の機能を搭載し、回転子挿入状態での機内点検を実現する。特に、発電機の重要点検項目である固定子ウェッジ点検では、独自機構の採用によって段階的な緩み検知を可能にし、健全性の評価精度向上を実現した。

### (2) オンライン部分放電監視システム

当社のオンライン部分放電監視システムは、固定子コイル絶縁で発生する部分放電の電磁波をオンラインで監視・計測し、長期間の運転で生じる経年劣化・異常の兆候を初期段階で検出する。このシステムは、電磁波検知用アンテナを発電機へ影響を及ぼさない高電位部から離れた場所に取り付けることで、タービン発電機の絶縁設計に悪影響を与えず、高い信頼性を実現している。また回転子を引き抜かず、短期間での設置工事を可能にしている。

当社はこれら発電機予防保全技術を積極的に展開することで、電力の安定供給・高稼働率の実現に貢献していく。



## 発電機薄型点検ロボットとオンライン部分放電監視システム

発電機薄型点検ロボットは独自の走行機構によって外形を薄型化し、点検カメラ、固定子ウェッジタッピング、固定子コア層間短絡診断(ELectromagnetic Core Imperfection Detection: EL-CID)試験の機能を搭載し、回転子挿入状態での機内点検を実現する。部分放電監視システムは、固定子コイル絶縁で発生する部分放電の電磁波をオンラインで監視・計測し、長期間の運転で生じる経年劣化・異常の兆候を初期段階で検出する。

## 1. ま え が き

2015年、COP(Conference Of the Parties)21で地球温暖化問題に取り組むための仕組みを示したパリ協定が採択された。同協定による約束草案では、温室効果ガスの削減目標が定められており、これを達成するために自然エネルギーを利用した発電システムの規模拡大や化石燃料の更なる高効率利用が急務となっている。一方で火力発電事業には自然変動電源の補完等、電力安定供給への貢献が求められており、高効率化、低炭素化と並んで発電設備の安定稼働が重要な課題となっている。これに応じるため火力発電プラントは運転体系を多様化させており、DSS(Daily Start and Stop)運転等のタービン発電機にとってより熱的・機械的な負荷が大きい運転が求められるケースが増加している。このような背景の下、当社では発電機の稼働率向上に貢献する予防保全技術開発を進めている。

本稿では、タービン発電機に関する予防保全技術のうち発電機薄型点検ロボット及びオンライン部分放電監視システムについて述べる。

## 2. 発電機固定子巻線の過酷な使用環境

タービン発電機(図1)の出力運転時で、固定子スロットに装填される固定子巻線は、高電圧、高温かつ電磁加振力等による振動が加わる環境下に置かれる。この環境下で、固定子巻線導体を被う主絶縁が劣化して絶縁破壊が起きると、発電機は固定子地絡によって運転停止に陥る。また固定子スロット内に固定子巻線を含むスロット内容物を強固に固定するために固定子ウェッジが使用されているが、この固定子ウェッジでも長期間の運転環境下で、熱や振動によって緩みが生じる可能性がある(図2)。固定子ウェッジ

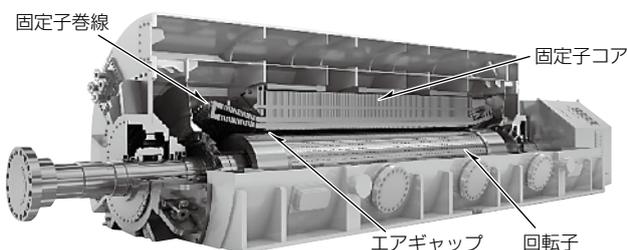


図1. タービン発電機の構造<sup>(1)</sup>

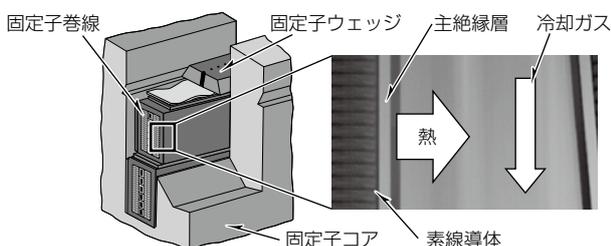


図2. 固定子巻線の周囲

の緩みが発生すると、固定子スロット内に隙が生じやすくなり、固定子スロット内構成物が固定子巻線から発生する電磁加振力によって繰り返し振動するフレットイングが起これる。このフレットイング振動も固定子巻線主絶縁の劣化を進行させ、最終的に絶縁破壊による地絡を引き起こすおそれがある。固定子巻線主絶縁及び固定子ウェッジは発電機の信頼性に大きく関わる主要部品であり、同部品の診断技術は発電機の信頼性を評価する上で重要である。

## 3. 発電機薄型点検ロボット

当社が開発した発電機薄型点検ロボットは、独自の機構によって薄型化と高機能化を実現している。近年はメンテナンス省力化の観点から、回転子引き抜き作業を行わずに高精度の点検を実現することが求められており、発電機薄型点検ロボットの活用によるメンテナンス計画の早期立案や、発電機の稼働率向上への貢献が期待される。

### 3.1 点検ロボットの構成と仕様

発電機薄型点検ロボットの構成を図3に示す。点検ロボットの仕様を表1に示す。最新型では独自の走行機構の適用によって、厚み寸法を従来機に比べて縮小した。これによって従来機では対応が困難であった発電機のエアギャップ(図1)が狭い機種(図4)にもロボット点検を適用することを可能にしている。

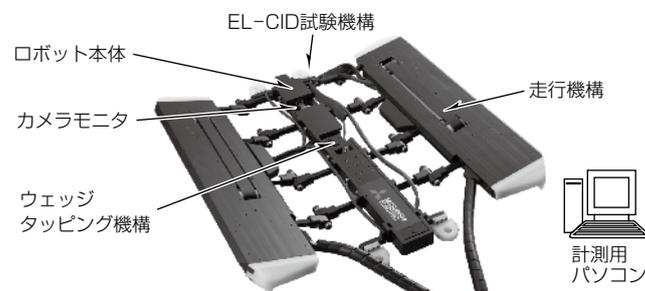


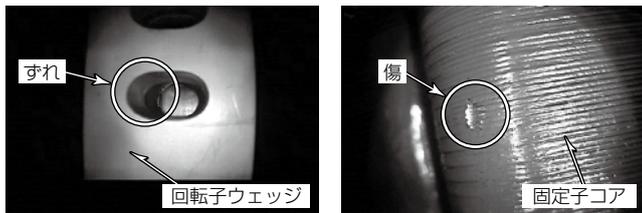
図3. 点検ロボットの構成<sup>(1)</sup>

表1. 点検ロボットの仕様

	従来	最新型
長さ(mm)	420.0	400.0
厚み(mm)	30.0	19.9
重さ(kg)	3.0	3.0



図4. 点検ロボットによるエアギャップへのアクセス



(a) 回転子通風孔 (b) 固定子コアの内径表面  
図5. 点検ロボットのカメラモニタ映像

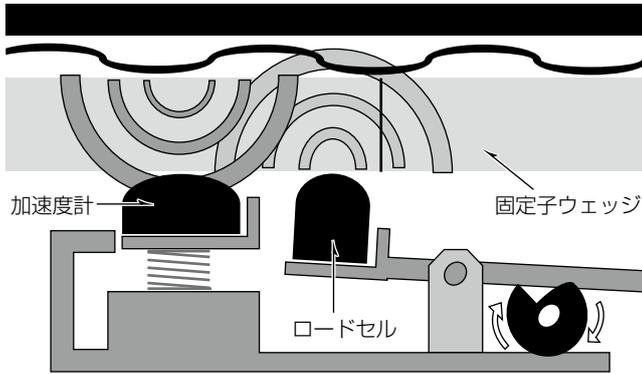


図6. 固定子ウェッジタッピング機構

### 3.2 カメラによる目視点検

図3に示すとおり、点検ロボットは高精細のカメラモニタを搭載しており、これによって固定子コア内径表面及び回転子表面の傷や過熱痕、固定子及び回転子のスロット内構成物のずれや摩耗粉の発生などの異常を検出することが可能である。図5(a)は回転子スロット内構成物の半径方向通風孔の位置ずれ、図5(b)は固定子コアの表面についた傷を点検ロボットのカメラモニタで捉えた画像である。

### 3.3 固定子ウェッジタッピング診断

図6に示すとおり、固定子ウェッジタッピング機構には加速度計を所定の力で固定子ウェッジに押し付けた状態を維持し、ウェッジ打撃時にシーソー構造の先に取り付けたロードセル打撃-振動の伝達特性を導出し、対象ウェッジの緩み程度を推定する手法を実装した。

従来の点検ロボットが固定子ウェッジの緩み程度を主に“tight”及び“loose”の2パターンで評価しているのに対し、最新型の点検ロボットは固定子ウェッジの緩み程度を5段階で評価可能である。これによってウェッジの“緩み始め”を精度良く評価することを実現した。また図7に示すように各固定子ウェッジの緩み程度をマッピングすることによって、対策を要するウェッジの位置や個数を視覚的に把握することも可能にしている。

### 3.4 固定子コアの層間短絡診断

固定子コアが絶縁損傷した際の層間短絡電流は過度の局部過熱を引き起こし、固定子コアの溶融を引き起こすおそれがある。

固定子コア層間短絡診断(EL-CID)試験では、固定子に多芯線を巻いて直流電流を流して固定子コアを励磁した状

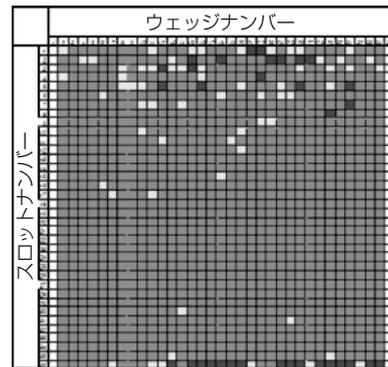


図7. ウェッジ緩み程度のマッピング

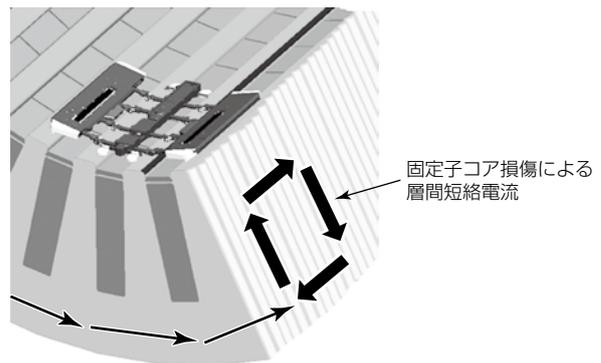


図8. 固定子コアの層間短絡診断

態で、ロボットに取り付けたチャック巻線によって短絡部の電流を検出する(図8)。この固定子コアの層間短絡診断結果に基づき、精密点検の実施要否や補修計画の効果的な立案を行う。

## 4. オンライン部分放電監視システム

タービン発電機の遠隔監視システムでは様々なパラメータが監視対象として考えられるが、主な監視対象の一つとして固定子巻線で発生する部分放電が挙げられる。当社のオンライン部分放電監視システムは、発電機内部の高電位部から離れた場所かつ回転子を引き抜かずにアクセス可能な部位に放電検知用のアンテナを設置する構成であることから、システム導入時の高信頼性化と短期間での設置工事を実現する。

### 4.1 システムの構成と仕様

オンライン部分放電監視システムの構成を図9に示す。部分放電(Partial Discharge: PD)発生時の電磁波(1.8GHz±10MHz)を発電機内に取り付けられたマイクロストリップアンテナで受信し、同軸ケーブルによって機外のPD検出器に伝達される。PD検出器でノイズ処理・A/D変換後、監視用パソコンでPD信号データを表示する<sup>(2)</sup>。

### 4.2 部分放電データの取得と評価

このオンライン部分放電計測システムで取得できるデータは、“部分放電強度のトレンド”と“部分放電の位相特性”の二つである<sup>(2)</sup>。

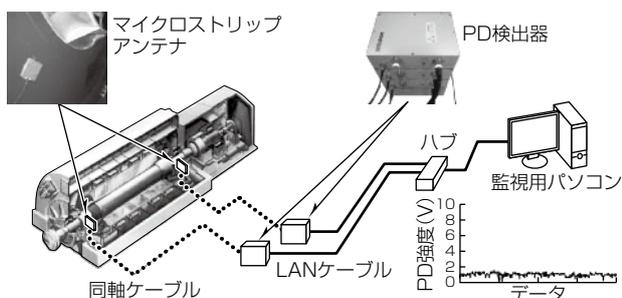


図9. オンライン部分放電監視システムの構成

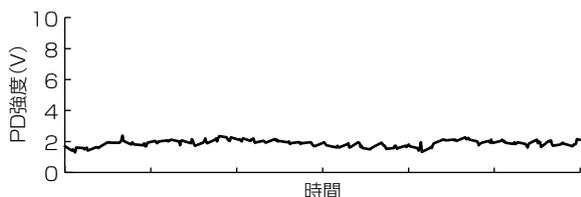


図10. 部分放電強度のトレンド

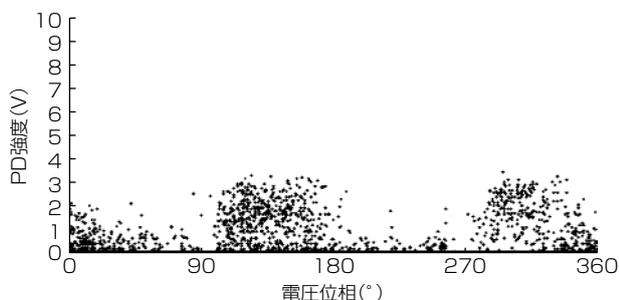


図11. 部分放電の位相特性<sup>(2)</sup>

#### 4. 2. 1 部分放電強度のトレンド

図10は部分放電強度のトレンドを示した例である。アンテナで受信した部分放電信号の強度を一定時間(例えば1時間について5秒間の計測を5回)ごとに時系列に従ってプロットする。長期間にわたって部分放電強度のトレンドを監視することで、部分放電が一定レベルにあるのか、又は上昇傾向にあるのかといった情報が得られる<sup>(2)</sup>。

#### 4. 2. 2 部分放電の位相特性

図11は部分放電の位相特性を示した例である。アンテナで受信した部分放電信号は強度と位相の情報を持っているので、一定時間に発せられる全ての信号をプロットすることで、位相特性が得られる。部分放電は主絶縁の損傷形態によって特徴的なパターンを示すため、その特徴を把握することで絶縁損傷の形態を把握できる。

#### 4. 3 実機での部分放電監視事例

既設のタービン発電機である海外A機で、予防保全技術が有効に活用された事例について述べる。海外A機では、部分放電計測開始初期では、部分放電強度は低レベルで安定していた。しかし、運転を継続していく中で、タービン側コイルエンド近傍に設置したアンテナで、初期値と比較

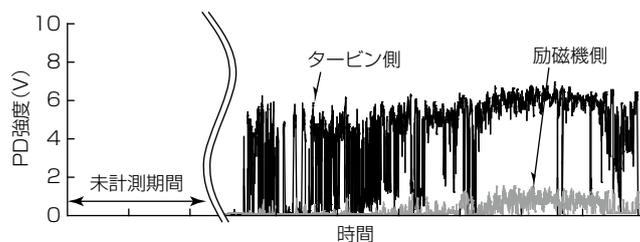


図12. 海外A機での部分放電強度トレンド監視結果

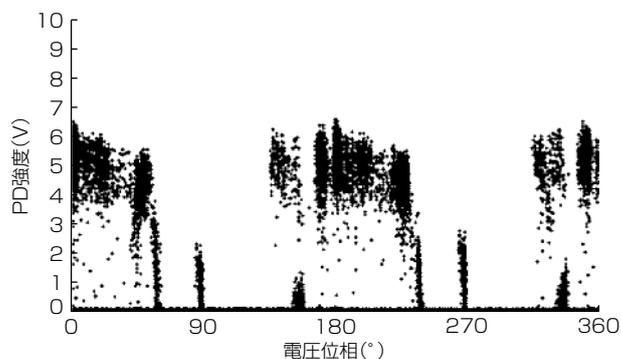


図13. 海外A機での部分放電の位相特性

して非常に大きな部分放電強度が継続して観測されるようになった。図12に海外A機の部分放電強度のトレンド監視結果の一部を、図13には同時期の部分放電位相特性を示す。海外A機では、図13のように空隙放電を示す部分放電位相パターンが確認された。このため、固定子巻線に何らかの空隙放電が増大する形態の不具合が生じている可能性が高いと判断し、発電機の運転を停止して固定子巻線の点検を実施した。その結果、固定子巻線タービン側端部及び固定子スロット内直線部で巻線間詰物の脱落や主絶縁の摩耗などが発見された。このように部分放電監視は固定子巻線の異常発生 of 早期発見及び重大事故の未然防止に対して有効である。

### 5. む す び

予防保全技術の一例としてタービン発電機用の薄型点検ロボットとオンライン部分放電監視システムについて述べた。今後は発電機の信頼性向上、運用の柔軟性向上などの要望が更に高まるものと予想されることから、当社は発電機点検用ロボットの回転子点検に関わる新機能搭載や部分放電を含む各種の発電機運転データから統合的に判断する異常兆候検知技術の開発を継続して進めている。

### 参 考 文 献

- (1) 楠本裕也：タービン発電機の予防保全技術，電気評論，103，No.3，7～10 (2018)
- (2) 佐古 浩，ほか：マイクロストリップアンテナによるタービン発電機のオンライン部分放電計測・評価，電気評論，98，No.9，23～28 (2013)