

オンラインガス分析による回転機固定子巻線の劣化診断

Online Gas Analysis for Deterioration Diagnosis of Rotating Machinery Stator Winding

中山 昭伸 NAKAYAMA, Akinobu

石井 佑一 ISHII, Yuichi

回転機の固定子巻線絶縁は、運転中の電気や機械、熱、環境などの複合ストレスによって経年劣化する。特に、固定子巻線の絶縁表面が劣化すると腐食性ガスが発生する。その結果、回転機内部の金属部品が破損し、突発的な事故になる場合がある。これを解決するため富士電機は、簡便な測定システムによって腐食性ガスを定量測定し、固定子巻線絶縁の表面の劣化度を判定する手法を確立した。このオンライン（運転中）ガス分析に従来のオフライン（停止中）の点検を組み合わせて、より多面的で緻密な評価診断が可能となり、絶縁劣化の状態をタイムリーかつ正確に把握することができる。

The stator winding insulation of rotating machines deteriorates over time due to the composite stress of the electrical, mechanical, thermal and environmental factors during operation. In particular, corrosive gases will be emitted when the insulating surface of the stator winding deteriorates. This can damage the metal parts inside rotating machines, potentially leading to a sudden accident. To solve this problem, Fuji Electric established a method that uses a simple measurement system to quantitatively measure corrosive gases and determine the degree of surface deterioration of stator winding insulation. Combining this online (during operation) gas analysis with conventional offline (during stoppage) inspections can perform more multifaceted and detailed assessments and diagnoses, allowing operators to quickly and accurately understand the state of insulation deterioration.

1 まえがき

発電機やモータなどの回転機の固定子巻線絶縁は、運転に伴う電気、機械、熱や環境の複合ストレスによって、経年とともに劣化する。特に、固定子巻線の絶縁表面が劣化すると、絶縁表面の部分放電によって O_3 （オゾン）や NO_x （窒素酸化物）などの腐食性ガスが発生する。さらに、 NO_x と空気中の水分とが結びついて HNO_3 （硝酸）が発生する。その結果、回転機の内部の金属部品が腐食して折れるなどの破損が生じる。この破損した部品が遠心力で飛散し、回転機の健全な主要部分に衝突することによって損壊などの突発的な事故へとつながる場合もある。

富士電機の回転機では、絶縁劣化が原因で発生した腐食性ガスによって損壊などの事故に至ったことはないものの、この種の不具合や事故を未然に防ぐ最適な保守・保全プランを提供できるようにするため、簡易的な測定システムを使って運転中に O_3 や NO_x を定量測定し、固定子巻線の絶縁表面の劣化度を推定する手法を確立した。

2 特徴と測定方法

(1) 特徴

図1に、回転機の一例として、発電機断面とその固定子巻線を示す。従来、定期点検時（定検）の診断や検査によって、回転機の不具合や劣化状態を把握していた。そのため、定検の間隔が長い場合や、定検の延伸があれば検査回数が減少し、不具合が把握できていない状態が長く続くことになる。

一方、オンライン（運転中）ガス分析による劣化診断では、次のような特徴がある。

(a) 運転中にいつでも測定ができる。

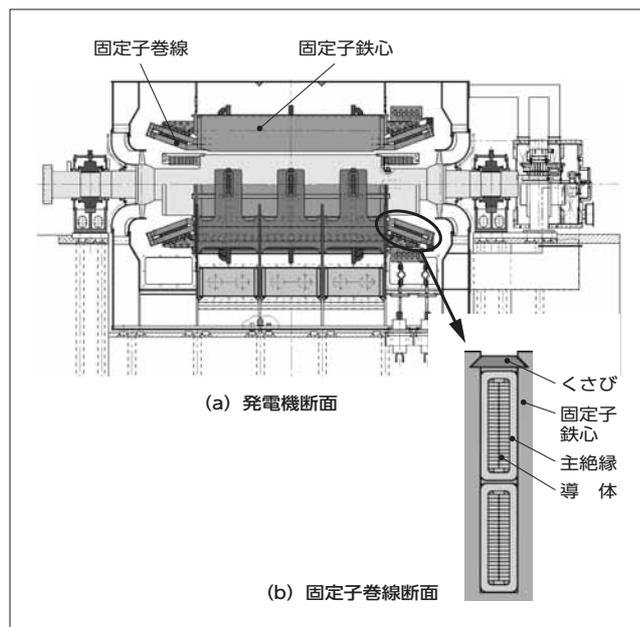


図1 発電機断面と固定子巻線

- (b) 従来のような絶縁診断のための、大きな器材や多くの人員は不要である。
- (c) 短時間（半日程度）で測定が完了できる。
- (d) O_3 と NO_x の定量測定から固定子巻線の絶縁表面の劣化度の評価ができる。
- (e) 停止時や定検時の精密診断や絶縁診断と組み合わせれば、より多面的で緻密な評価診断ができる。

(2) 測定方法

図2に、発電機でのオンラインガス分析の測定例を示す。回転機の運転中に固定子フレームのアクセスカバーを固定するねじを外したねじ穴から機内ガスを採取し、 O_3 や NO_x ガス検知管によってガス濃度を測定する。診断は、

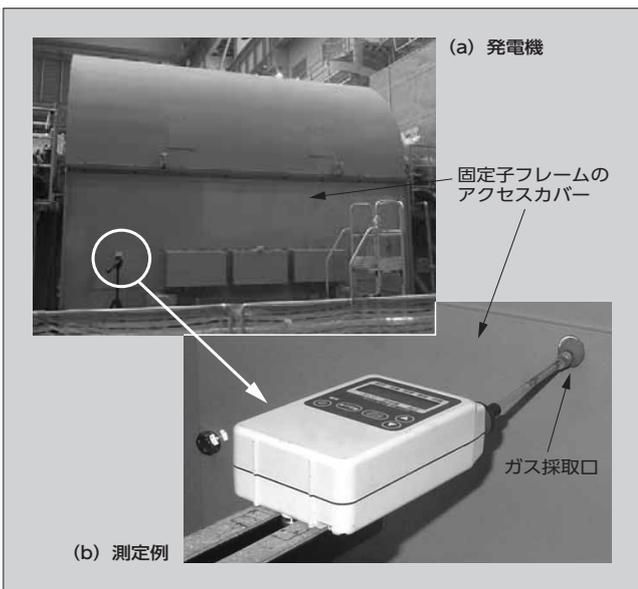


図2 発電機のオンラインガス分析の測定例

固定子巻線の絶縁表面の劣化度合いに応じて発生するガスの種類、濃度が変わるため、 O_3 、 NO_x ガスを測定することで、固定子巻線の絶縁表面の劣化度合いを評価する。

3 開発概要

運転中に、回転機の固定子巻線には少なからず部分放電が発生し、経年劣化によりその量は増加していく。まず、部分放電の測定値を基に、その時発生する O_3 と NO_x の濃度を求めた。

3.1 部分放電と発生ガスの関係

固定子バーコイル（固定子巻線を模した直線状のモデルコイル）を用いて、劣化に伴う部分放電発生と O_3 、 NO_x のガス濃度の関係を調査した⁽¹⁾。

表1に、未劣化のものと回転機の固定子巻線絶縁に疑似的に劣化損傷をさせた4種類のサンプルを示す。これらを用いて回転機のフレームを模擬した金属ケースにモデルバーを入れ、約 3 kV/mm の電界を加え、最大放電電荷量 Q_{max} を部分放電計測器で測定した。ガス検知管を使って1h電界を加え続けた後のケース内の O_3 と NO_x の濃度を

表1 サンプルの種類

モデルバー	備考
a ○未劣化	比較用試料
b ○固定子鉄心内におけるOCP*の浸食を想定 ○モデルバー表面のOCPが部分的に消失	—
c ○固定子鉄心内におけるOCPの浸食を想定 ○モデルバー表面のOCPが全周消失	—
d ○鉄心外（鉄心出口）におけるOCPの浸食を想定 ○モデルバー表面のOCPの一部が、全周消失	表面にOCP残部あり
e ○主絶縁層内部が劣化（ポイドや剥離）	OCP劣化による表面放電と比較

*OCP：外部コロナ防止層（OCP：Outer Corona Protection）

測定した。

図3、図4、図5に測定結果を示す。鉄心内のOCPが部分的に消失したモデルバー(b)と全周において全てのOCPが消失したモデルバー(c)の Q_{max} は比較的高い。また、モ

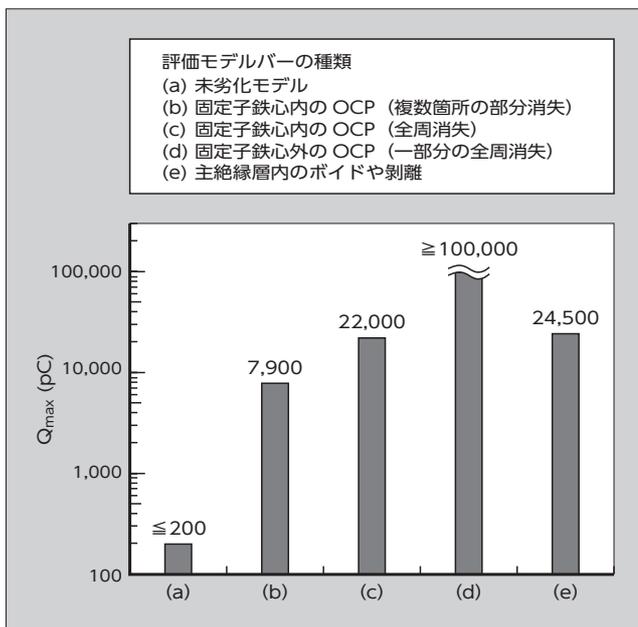


図3 モデルの種類と Q_{max}

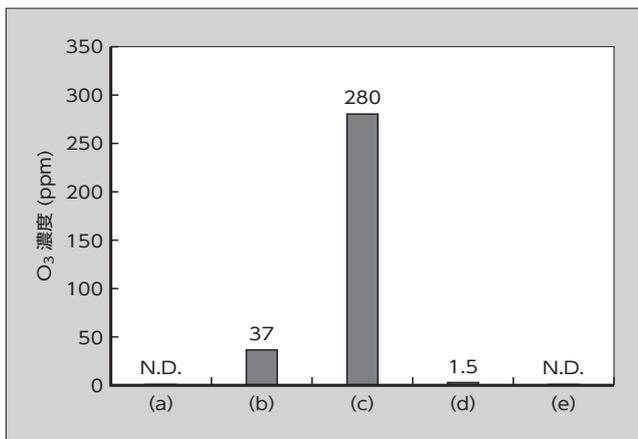


図4 モデルの種類と O_3 濃度

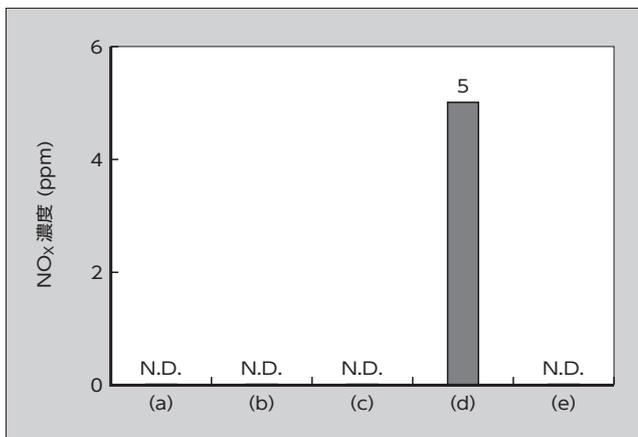


図5 モデルの種類と NO_x 濃度

デルバー(b)と(c)で、 O_3 が 37 ppm と 280 ppm と高い濃度であったが、 NO_x は検出限界以下であった。

また、鉄心出口を想定して OCP の一部が消失したモデル(d)では、 Q_{max} が 100,000 pC 以上と最も高い。 O_3 は 1.5 ppm と前述のモデルバー(b)や(c)に比べ少なく、代わりに 5 ppm の NO_x が検出された。また主絶縁層内部の劣化を想定したモデルバー(e)では、 Q_{max} は 24,500 pC と鉄心内の OCP を全面的に消失したモデルバー(c)の 22,000 pC と同程度であったが、 O_3 、 NO_x とともに検出限界以下であった。

これらのことから、 O_3 や NO_x の発生は、固定子バー表面における放電によるものが主であり、それぞれの発生量は、放電の発生部位と Q_{max} の大きさが関係しているといえる。

3.2 外部コロナ防止層 (OCP) の材質と発生ガスの関係

3.1 節において、OCP の劣化状態によって表面放電による最大放電電荷量とガスの発生量が変化することが分かった。

次に、OCP の基材の材料 (3 種: ポリエステル系、アラミド系、ガラス系) 依存性を調査した⁽²⁾。モデルバーを高温高周波課電試験装置により加速劣化させ、OCP の劣化に伴う浸食開始時間を計測した。続いて、OCP の浸食が進行したモデルバーをガラス管に入れ、約 3 kV/mm の電圧を印加し、片方から 100 ml/min の空気を流した際の、 O_3 濃度をガス検知管により測定した。

図 6 に、OCP 基材の違いによる浸食開始時間の測定結果を示す。浸食開始時間は、OCP の材質が、ポリエステル系では 100 h 程度と短く、アラミド系では 520 ~ 740 h 程度、ガラス系では 800 h 程度と最も長かった。また、各材質とも浸食開始時間は電界強度にあまり依存しないことが分かった。固定子巻線表面の OCP の放電劣化を抑制して、耐久性を確保するためには、使用する絶縁材料の選択が重要であることが分かった。

図 7 に、OCP の浸食が進行したモデルバーによる、浸食面積と発生ガス濃度の関係を調べた結果を示す。固定子

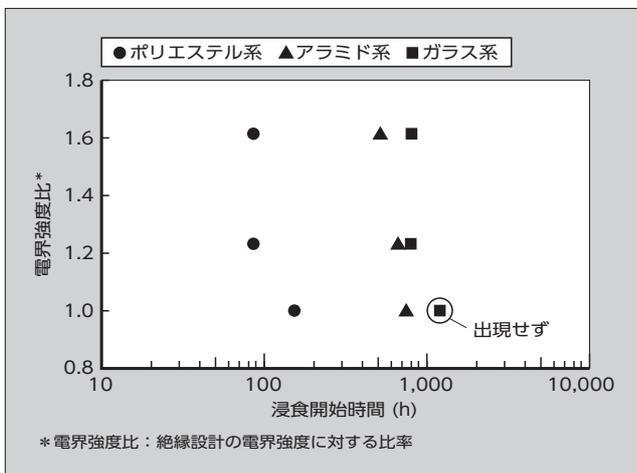


図 6 OCP 基材の違いによる浸食開始時間

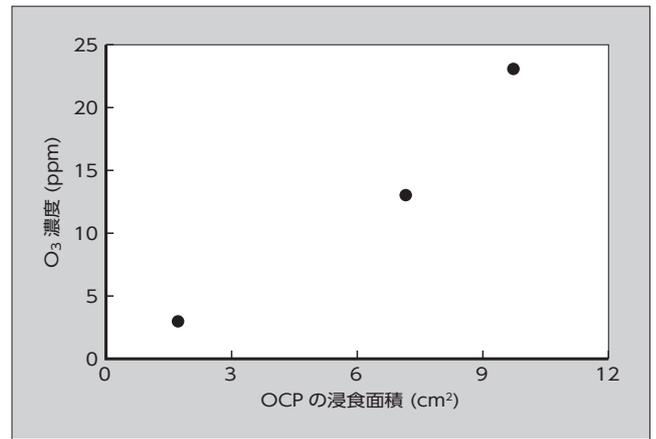


図 7 OCP の浸食面積と O_3 濃度の関係

巻線表面の OCP の浸食が進むと発生する O_3 の発生量が增加することが分かった。

これにより、OCP の浸食開始時間は、OCP 材質による影響が強く、その浸食面積が大きいほど、 O_3 ガスの発生量が多くなることが分かった。

4 適用事例

4.1 実機の測定

このオンラインガス分析の主な適用機は 3.3 kV 以上の空気冷却タービン発電機である。2017 年に運転時の測定を開始し、これまで、国内と国外の自社および他社発電機の診断を継続している。

測定結果の概要を表 2 に示す。測定対象には、新設の発電機から製造後 36 年経過した発電機も含まれている。新設の発電機を含む測定対象の 55% において O_3 と NO_x が検出限界以下となったので、固定子巻線表面の絶縁に問題がない状態であると判断している。

オンラインガス分析の測定推奨頻度を表 3 に示す。測定を継続してトレンド管理を行い、劣化の急変点を把握することが重要である。 O_3 と NO_x が検出された発電機に対しては、生成した HNO_3 による酸性雰囲気によって金属部品の腐食劣化などが懸念されるので半年ごとのオンライン

表 2 測定実績の概要

O_3 の検出	NO_x の検出	全測定数からの割合 (%)
未検出	未検出	55
≥ 0.1 ppm	未検出	27
≥ 0.1 ppm	≥ 0.05 ppm	18

表 3 測定の推奨頻度

腐食性ガスの検出有無		推奨頻度	備考
O_3	NO_x		
未検出	未検出	約1年ごと	—
検出	未検出	約1年ごと	—
検出	検出	約半年ごと	精密診断 (開放点検) や絶縁診断の推奨

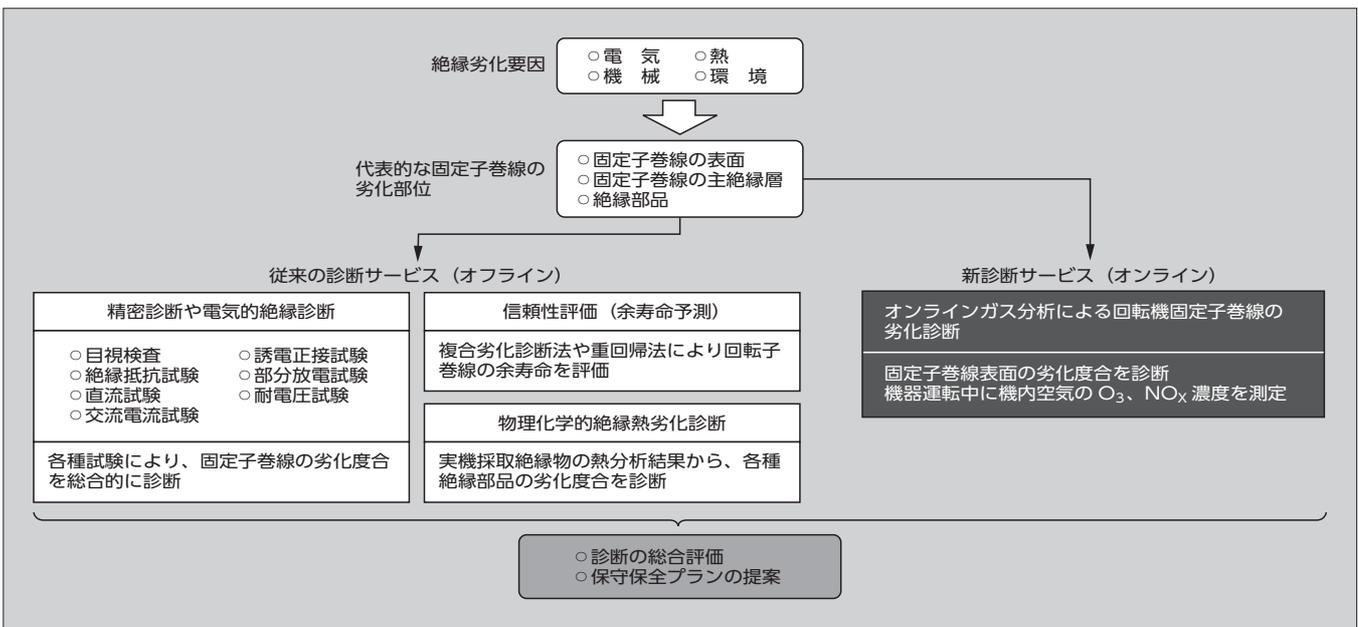


図8 オンラインガス分析と従来の診断サービスを組み合わせた固定子巻線の総合評価

分析を推奨している。さらに、劣化の大きさを把握するとともに健全性の根拠を得るため、次節で述べるようにオフライン（停止中）点検における精密診断や絶縁診断とオンライン分析と組み合わせることを推奨している。

4.2 オンラインとオフラインの組合せ

回転機の点検には、簡易点検と精密診断や電氣的絶縁診断を行う本格点検がある。図8に示すように、従来のオフライン診断サービスとこのオンラインガス分析を組み合わせることで総合評価を行えば、より多面的で緻密な評価診断ができる。絶縁劣化の状態をよりタイムリーにかつ正確に把握でき、補修や更新の判断根拠として扱うことができる。

5 あとがき

オンラインガス分析による回転機固定子巻線の劣化診断について述べた。

富士電機は定期的なオンライン分析による診断を推奨している。たとえ不具合がなくても、オンライン分析を継続することにより、巻線絶縁表面の健全性や劣化の起点を把握することもできる。劣化が認められる場合には劣化度の推移が把握でき、運用のリスクに関する一つの指標が得ら

れることになる。

今後は、オンラインガス分析の測定データと定検で得られる実際の劣化や損傷の状態とを結び付け、より効果的で精度の高い評価ができるように推進していく。

参考文献

- (1) 石井佑一ほか. 発電機固定子巻線の部分放電と発生ガス. 電気学会全国大会. 2-049, 2018.
- (2) 石井佑一ほか. 発電機固定子巻線における外部コロナ防止層の浸食と発生ガス. 電気学会全国大会. 2-053, 2019.



中山 昭伸

回転機絶縁の開発、タービン発電機の構造設計に従事。現在、富士電機株式会社発電プラント事業本部サービス統括部火力・地熱サービス技術部主任。



石井 佑一

回転機絶縁の開発に従事。現在、富士電機株式会社発電プラント事業本部川崎工場回転機部。電気学会会員。



*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。