

# 発電機のオンライン絶縁診断

Online Diagnosis of Insulation Condition of Generators

酒井 正弘      佐藤 文生

■ SAKAI Masahiro

■ SATO Fumio

発電機のメンテナンスコストを低減するために、運転しながら部分放電の発生傾向を把握し固定子巻線の絶縁状態を診断する、オンライン絶縁診断が広まりつつある。

東芝は、発電機のオンライン絶縁診断用として、部分放電検出センサを開発した。このセンサは、高電圧部に接触しないようにしたことで発電機の絶縁低下の懸念がなく、また、機外に設置するようにしたことで既設の発電機でも容易に使用できるという特長があり、発電機の保守管理の1アイテムとして、今後の活用を目指している。

Online partial discharge monitoring and diagnosis of the insulation condition of rotating machines can be expected to reduce their maintenance costs.

Toshiba has developed an online partial discharge sensor for such purposes. This sensor does not come into contact with a high-voltage conductor and is easily mounted on a generator. Online diagnosis of the insulation condition of generators shows promise as a component of generator maintenance.

## 1 まえがき

発電機や高圧電動機などの固定子巻線の絶縁は、長期にわたり機器が運転されるので、高電圧、発熱、電磁力による振動や、起動・停止に伴うヒートサイクルなどにより劣化する。そのため、発電機では、固定子巻線を数年ごとに定期的にメンテナンスし、20～30年ごとに巻線を取り替えながら運用している。

固定子巻線の絶縁状態の診断は、機器を停止させて定期的に実施されているが、規制緩和やメンテナンスコスト削減のため、定期検査の間隔を広げることが検討されている。定期検査の間隔が長期化したとき、次の定期検査までの絶縁状態を監視する方法として、運転状態で診断するオンライン絶縁診断が行われている。オンライン絶縁診断は、主に北米を中心とした海外で実施されているが、昨今、国内でも研究開発が進められ、実施された例もある。オンライン絶縁診断では、運転中の部分放電を検出して、この部分放電の経時変化を把握することで絶縁状態を診断する。

オンライン絶縁診断用の一部の検出センサは、設置に大がかりな工事が必要であったり、発電機の高電圧部に直接コンデンサを接続するので、電気絶縁性の低下が懸念される。

そこで東芝は、発電機外に設置し、高電圧部に非接触のオンライン絶縁診断用部分放電検出センサ（以下、オンライン部分放電検出センサと略記）を開発し、診断を実施している。

## 2 オンライン絶縁診断

一般的に、高電界中の固体絶縁材料の中に空げきが存在する場合、空げき部分で放電する部分放電が発生する。部分放電が発生しても周りの固体絶縁材料は絶縁性を保っているため、すぐに破壊してしまうことはないが、部分放電により固体絶縁材料の劣化が進み、最終的には絶縁破壊に至る。

発電機においても、固定子巻線の絶縁が運転中の電気熱、機械的な要因により劣化すると、絶縁層中の空げきやはく離などで部分放電が発生する。

部分放電が発生してもすぐには絶縁破壊に至らないように、発電機や高圧電動機の固定子の巻線では、ガラス繊維をテープ状に織ったガラステープや高分子フィルムに雲母（うんも：マイカ）の薄片をはり付けたマイカテープを導体に巻き回して、エポキシ樹脂などを含浸している。部分放電に強い雲母を用いることで長寿命化を図っているが、絶縁劣化度合いを把握し、補修などのメンテナンスをしながら運用している。

発電機の固定子巻線絶縁の劣化が進むと、部分放電が大きくなったり発生頻度が高くなっていく。この大きさや発生頻度の変化を運転しながら把握することで絶縁状態を診断するのが、オンライン絶縁診断である。

部分放電が発生すると、放電部分の電荷の移動により、商用周波数の電圧に数 mV～数 V 程度のパルス信号が重畳する。オンライン絶縁診断では、このパルス信号を検出する。

オンライン絶縁診断と発電機を停止して実施する従来のオフライン絶縁診断の比較を表 1 に示す。

表1. オンライン及びオフラインの絶縁診断比較

Comparison between online and offline insulation condition diagnosis

項目	特徴	
	オンライン絶縁診断	オフライン絶縁診断
コスト	低	高
診断方法	部分放電の経時変化	様々な特性を総合的に判断
診断対象機器の状態	実運転状態	停止状態
ノイズ	大 (信号とノイズの弁別が課題)	小

オフライン絶縁診断では、各種試験により詳細な診断ができるが、高電圧を印加するための電源や各種計測器が必要である。また、回転子を引き抜く必要がある場合があり、比較的成本がかかる。更に、停止状態で試験を実施するため、大気中、室温状態での絶縁評価となる。しかし、長年にわたり蓄積されたデータや、誘電正接特性、交流電流特性、成極指数、及び部分放電特性など様々なデータをもとに総合的に判断するので、詳細な診断が可能である。

一方、オンライン絶縁診断では、部分放電の計測だけであるため低コストである。部分放電の経時変化だけで診断するため、絶縁劣化の傾向があるかどうかを判定することになるが、温度や電磁力、巻線の電位分布など実運転状態での絶縁状態を把握できるというメリットがある。

実際の保守管理では、オンライン絶縁診断で傾向管理し、絶縁劣化の兆候が現れた場合は、オフライン診断で詳細に調査するということになる。

オンライン絶縁診断では、機器が系統に接続されている状態で部分放電信号を検出するために、ノイズとの弁別が課題であり、オンラインでの部分放電の検出に適したセンサや計測器、計測方法が必要となる。

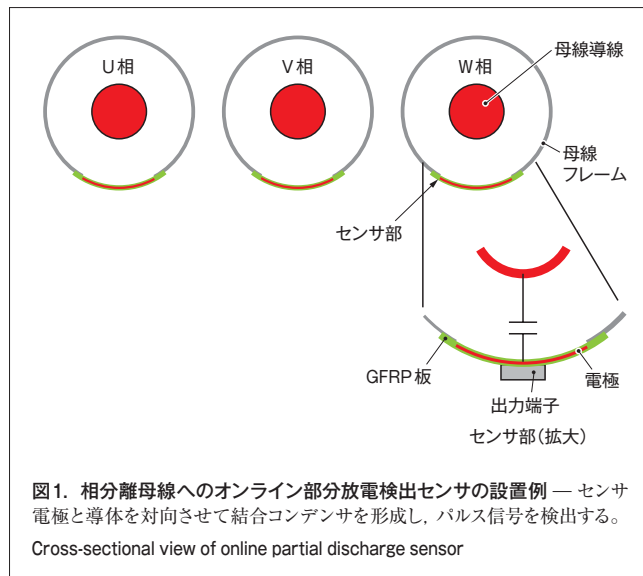
### 3 オンライン部分放電検出センサ

オンライン部分放電検出センサの開発ポイントは、次の二つとした。

- (1) 発電機外に容易に設置できるようにすること。
- (2) 高電圧部に非接触で、発電機の電気絶縁性能を低下させる懸念がないこと。

固定子巻線の絶縁劣化が問題になるのは10年～数十年運転した発電機であり、これらに設置することが望まれる。センサを機外の比較的容易な箇所を設置することで、設置コストを下げるができる。

そこで、発電機と主変圧器を結ぶ母線部に非接触センサを取り付けることを考案した。この発電機母線は、電力を送る導体を接地電位の母線フレームに収めた形状をしている。容量が大きい場合は各相に分離した相分離母線、容量が小さいものには三相の導体を一つのフレームに収めた三相一括母線



を用いることが多い。その母線のフレームには点検口が設けられており、通常はカバーでふさがれている。その点検口カバーをオンライン部分放電検出センサに置き換える構造とすることで、容易に設置できる(図1)。また、高電圧の母線導体に接触しないので、電気絶縁への影響が小さい。

開発したオンライン部分放電検出センサは、高電圧の導体に電極を対向させることで、導体と電極により形成される静電容量を結合コンデンサとして、部分放電によるパルス信号を検出する。検出用の電極は高電圧部とは非接触であり、相分離母線と同一面上に配置されているので、相分離母線の電気絶縁性能を低下させることがない。電極が万が一にも脱落して高電圧部に触れることがないように、電極は湾曲したガラス織



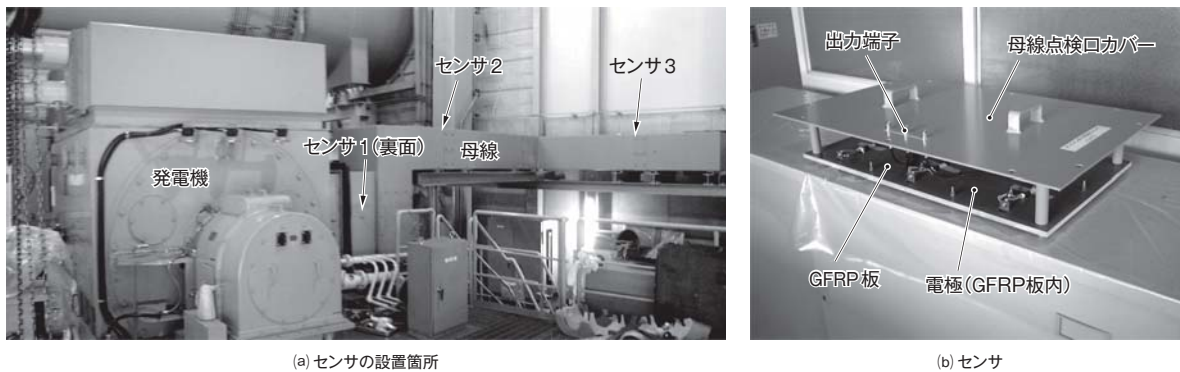


図3. 30 MW 空気冷却発電機へのオンライン部分放電検出センサの設置例 — 三相一括母線の3か所にセンサを設置した。  
Overview of online partial discharge sensors for 30 MW generator

維強化プラスチック (GFRP) の板の中に埋め込まれている。

156 MW 級の水素冷却発電機の相分離母線に設置した、オンライン部分放電検出センサの外観を図2に示す。

30 MW 級の空気冷却発電機の三相一括母線にオンライン部分放電検出センサを設置した例を図3に示す。三相一括母線では、母線フレームは箱型である。各相ごとの特性を検出するため、3枚の電極をGFRP板間に設置し、検出感度を高めるために点検口からつり下げようとした。この例では、電極と母線導体は必要な絶縁距離を保ち、電気絶縁性能を確保している。この発電機では、センサは3か所に設置した。

#### 4 部分放電のオンライン測定例

図4に示す構成で、発電機内で発生した部分放電パルス信号を検出し収集してオンライン絶縁診断を実施した。2か所以

上にオンライン部分放電検出センサを設置すれば、パルス信号の伝搬方向 (センサの検出時間差から求められる) により部分放電パルス信号とノイズを弁別できる。デジタルオシロスコープでパルス信号を検出し、パソコンで収集・分析した。

オンライン部分放電検出センサの出力波形の一例を図5に示す。この例では、センサ①、②、③の順にパルス信号を検出している。よって、パルス信号は発電機側から主変圧器に向かって伝搬しており、発電機内で発生した部分放電によるパルス信号である。このパルス信号を10サイクル分収集して、図6のような部分放電パターンを求めて絶縁状態を診断した。

部分放電パターンからその発生位相と大きさの関係、また、部分放電の大きさと発生頻度 (発生数) の関係などからその発生状況の傾向や発生部位 (絶縁劣化部位) を推定し、絶縁状態を診断する。この例では、部分放電パルスは位相 $0^\circ$ と $180^\circ$ の前後で発生しており、典型的な絶縁層内の空げきでの

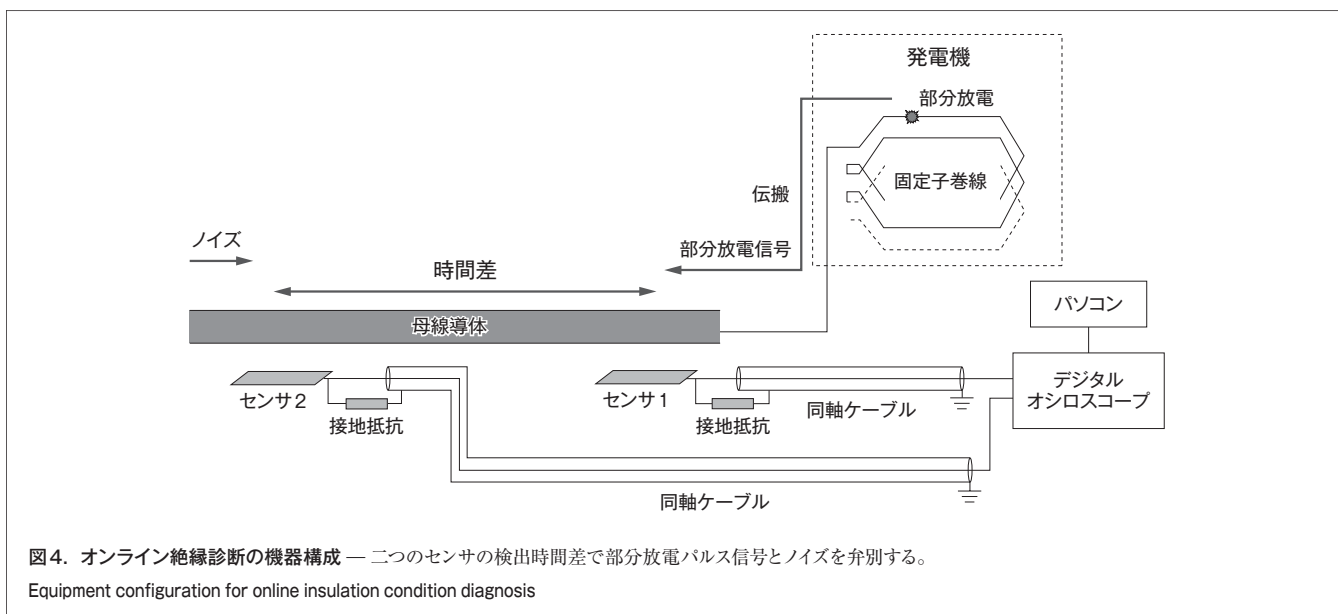


図4. オンライン絶縁診断の機器構成 — 二つのセンサの検出時間差で部分放電パルス信号とノイズを弁別する。  
Equipment configuration for online insulation condition diagnosis

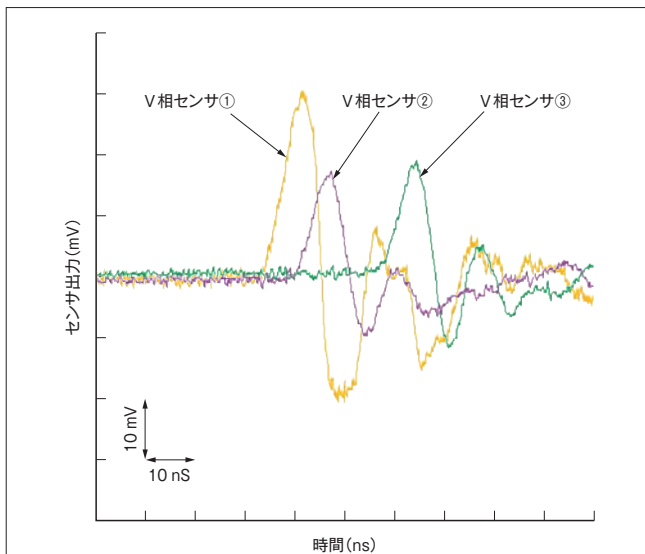


図5. オンライン部分放電検出センサの出力波形の一例 — センサの設置位置により異なる放電パルス信号の検出時間の差から信号の伝搬方向を調べ、信号とノイズを弁別する。

Example of output waveform from online partial discharge sensor

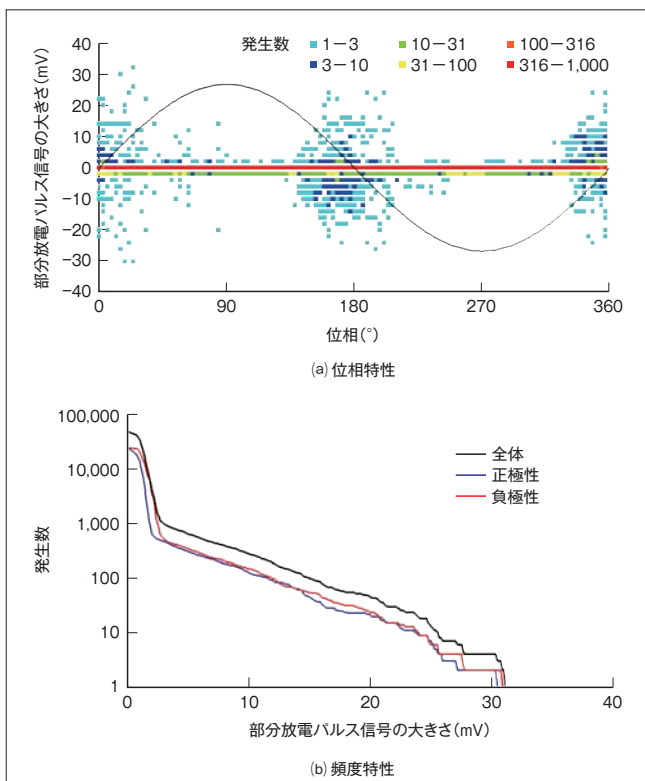


図6. 部分放電パターンの例 — 部分放電パターンから、絶縁劣化部位を推定できる。

Example of partial discharge pattern in online insulation condition diagnosis

部分放電の発生位相となっている。また、部分放電パルス信号を正・負極性ごとに大きさと発生頻度を求めることで、絶縁劣化部位を推定できる。この例では、正・負極性とも同様の分布であることから、絶縁層内の空げきでの部分放電が示唆される。空げきが高電圧導体近傍にある場合や接地電位である固定子鉄心側にある場合には、正極性と負極性の分布が大きく異なることが知られている。

これらの放電パターンを求めることで、絶縁劣化の部位を推定することが可能となり、補修計画の策定に役立つ情報が得られる。

## 5 あとがき

定期検査間隔の延長やメンテナンスコストの低減のため、国内でもオンライン絶縁診断のニーズが高まると考えられ、当社は、そのニーズに対応した発電機のオンライン部分放電検出センサを開発した。

このセンサは、機外に設置し、高電圧部に非接触であることから、設置が容易で電気絶縁特性を低下させないという特長がある。今後は、発電機の保守管理サービスの一環として展開していく。



酒井 正弘 SAKAI Masahiro

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 高機能・絶縁材料開発部主務。回転機及び超電導機器の絶縁技術・診断技術の開発に従事。電気学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



佐藤 文生 SATO Fumio

電力システム社 火力・水力事業部 火力改良保全技術部参事。火力電機設備の改良保全システムエンジニアリングに従事。電気学会会員。

Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.