

クラスタリングを適用した 部分放電とノイズの識別手法

Method for Identification of Partial Discharge and Noise Applying Clustering Technique

神谷 朋輝 KAMIYA Tomoki 豎山 智博 TATEYAMA Chihiro 中村 勇介 NAKAMURA Yusuke

電力機器は、固体絶縁物の欠陥に電界が集中し、故障原因の一つとなる部分放電が生じるおそれがある。そのため、センサーで部分放電を検出して機器の故障を予知する技術が求められているが、測定環境によってはノイズの影響が大きく、検出が困難という課題があった。

そこで、東芝インフラシステムズ(株)は、クラスタリングを適用してセンサー信号に含まれるパルス波形を分類し、パルス波形の位相の広がりも考慮することで、高ノイズ下でも部分放電を検出する手法を開発した。これにより、電力機器の様々な特性・設置環境に応じた最適な診断サービスが適用できる。

Power equipment failure can occur due to partial discharge caused by an electric field concentrated in defects of solid insulation materials used in equipment. Failure prediction technologies that use sensors to detect partial discharge are crucial for safe, stable equipment operation, however, detecting a weak partial discharge signal amidst noise in very noisy conditions is very difficult.

Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corporation has developed a method to identify a partial discharge signal from noise even in severely noisy environments by applying clustering techniques to classify pulse waveforms in sensor signals while taking into consideration phase broadening. This method caters to the demand for applying optimal diagnostic services according to power equipment characteristics and installation environments.

1. まえがき

我が国の電力機器には、設置から20年以上経過しているものが数多く存在している。電力機器の多くは、固体絶縁物を用いて高電圧部分と接地部分を電氣的に絶縁しているが、経年劣化に伴い絶縁物に欠陥が生じると、そこに電界が集中し、部分放電が発生する。この部分放電は、固体絶縁物の劣化を加速し、最終的には機器の故障につながるため、部分放電を事前に検出し、機器の故障を予知する技術の開発が求められている。しかし、部分放電が発する電氣的な信号は微小で、現場のノイズの影響を大きく受けるため、検出が困難という課題がある。

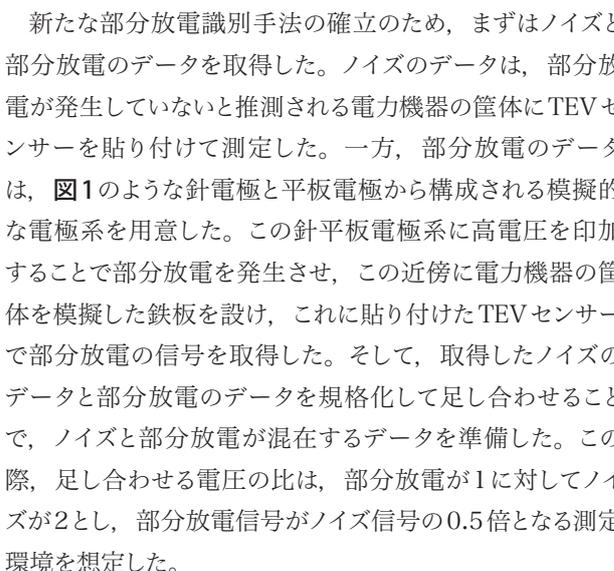
東芝インフラシステムズ(株)は、ノイズ発生下でも高感度で部分放電を検出する絶縁劣化診断技術の開発を進め⁽¹⁾、絶縁劣化診断サービスの適用拡大を目指している。

これまで、電力機器から発生する部分放電信号の取得には、TEV (Transient Earth Voltage) センサーを用いている。部分放電の発生時には筐体(きょうたい)表面の電位が過渡的に変化することが知られており⁽²⁾、この電位の変化を、盤に貼られたTEVセンサーで検出することにより、部分放電の発生を検出できる⁽³⁾。このTEVセンサーに関連する研究は、当社でも多くなされてきた⁽⁴⁾が、依然として、高ノ

イズ下での信号の識別には課題があった。

ここでは、部分放電の新たに定義した特徴量を適切に組み合わせることで、高ノイズ下でも部分放電を検出できる手法について述べる。

2. 試験方法

新たな部分放電識別手法の確立のため、まずはノイズと部分放電のデータを取得した。ノイズのデータは、部分放電が発生していないと推測される電力機器の筐体にTEVセンサーを貼り付けて測定した。一方、部分放電のデータは、のような針電極と平板電極から構成される模擬的な電極系を用意した。この針平板電極系に高電圧を印加することで部分放電を発生させ、この近傍に電力機器の筐体を模擬した鉄板を設け、これに貼り付けたTEVセンサーで部分放電の信号を取得した。そして、取得したノイズのデータと部分放電のデータを規格化して足し合わせることで、ノイズと部分放電が混在するデータを準備した。この際、足し合わせる電圧の比は、部分放電が1に対してノイズが2とし、部分放電信号がノイズ信号の0.5倍となる測定環境を想定した。

3. 解析手法

開発した部分放電とノイズの診断フローを図2に示す。まず初めに、取得したノイズと部分放電のデータの1s分(部分放電の発生頻度が少ない場合でも、部分放電を検出するのに十分な時間)について、位相をそろえて結合させ、結合した波形データから全てのパルス信号を検出した。ここでのパルス信号の定義は、およそ1 μs程度で急峻(きゅうしゅん)に変化する信号波形のことである。

次に、検出したパルス信号に対してクラスタリングを適用し、類似した形状のパルス信号を分類した。クラスタリング

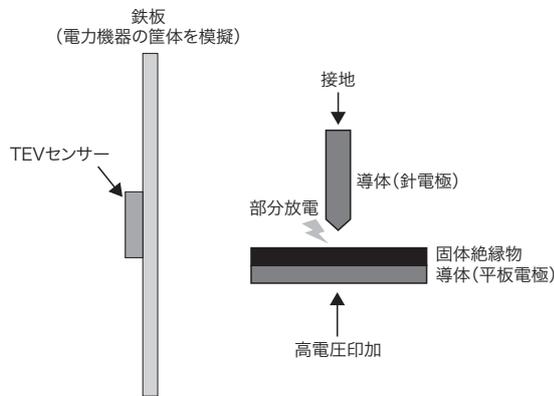


図1. 針平板電極系とTEVセンサーによる部分放電の試験系
針平板電極系で発生させた部分放電の信号をTEVセンサーで取得する。
Partial discharge test system using needle-flat plate electrode and transient earth voltage (TEV) sensor

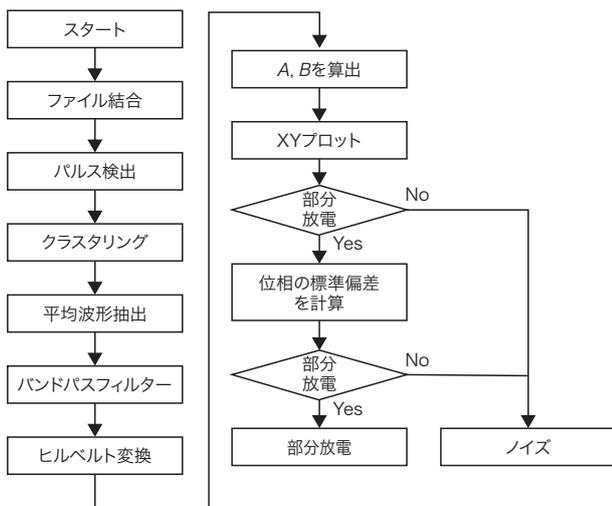


図2. 部分放電とノイズを識別する診断フロー
クラスタリングを適用することで、高ノイズ下でも部分放電を高精度に検出できる。
Diagnostic flowchart of identification of partial discharge and noise

は、データ間の類似度に基づいて、データをグループ分けする手法であり、ここではK-means手法⁽⁵⁾を用いた。そして、各クラスターの平均的な波形を導出し、平均の波形に対してバンドパスフィルターを適用して部分放電波形が持つ帯域⁽⁶⁾の信号を抽出した。バンドパスフィルターの帯域は、対象とする針平板電極系で発生する部分放電信号の周波数帯域を勘案して5 ~ 30 MHzとした。

更に、信号の瞬時周波数と瞬時振幅を捉えるヒルベルト変換⁽⁷⁾によって波形の包絡線(振幅の大きな周波数成分)を検出した(図3)。そして、ヒルベルト変換後の波形をピークの前で分割し、波形の前半部分の規格化した面積Aと後半部分の規格化した面積Bを算出し、 $X=A+B$, $Y=A/(A+B)$ から成る特徴量X, Yを定義した。このXとYの2次元プロット(以下、XYプロットと呼ぶ)において、図4で示す識別境界に従い、クラスターごとに部分放電とノイズの識別を実施した。両者の識別境界は、部分放電とノイズ単独でのデータから最適な直線を求めたものである。

図4に示すように、部分放電信号のクラスターは、その波形の特徴から、XとYが小さい領域にプロットされる。ノイズの典型的な波形と部分放電の典型的な波形を図5に示

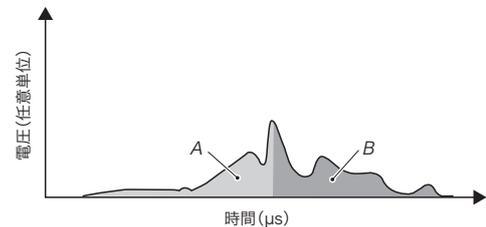


図3. ヒルベルト変換による波形処理
ヒルベルト変換で波形の包絡線を検出し、ピーク前後で分割した面積Aと面積Bを算出する。
Waveform processed by Hilbert transform

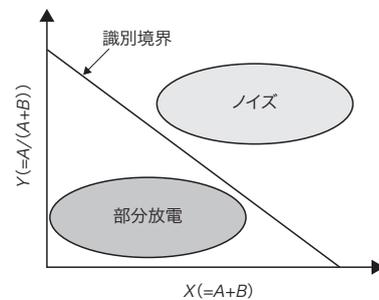


図4. XYプロットを用いた部分放電の識別
抽出した特徴量X, Yを2次元プロットし、部分放電とノイズの切り分けをクラスターごとに行う。
Identification of partial discharge using X-Y plot

す。ノイズは、ランダムに発生し、パルス幅が大きい傾向があるため、 X の値は大きくなる。一方、部分放電は、立ち上がりが急峻なので、 X の値が小さくなる。 Y は、パルス信号波形の波頭と波尾の比によって決まるパラメーターで、部分放電は、図5(b)のように、一般に波頭より波尾の方が長いことが知られているため⁽⁸⁾、 Y の値が小さくなる。そのため、部分放電の信号の X 、 Y はともに小さくなり、ノイズの X 、 Y はともに大きくなる。このため、図4に示す識別境界に従い、部分放電とノイズを識別できる。

検出精度を更に向上させるため、XYプロットで部分放電が疑われるクラスターに所属するパルス信号を持つ位相の広がりを示す標準偏差に着目した。この標準偏差が一定値(しきい値)以下であれば、そのクラスターは部分放電と判定した。このしきい値も、部分放電とノイズ単独でのデータから最適な値を求めている。これは、パルス信号が、ノイズであればランダムな位相で発生し、部分放電であれば決まった位相で発生する傾向があるためである。

4. 解析結果

2章で準備した部分放電とノイズを合成したデータを解析対象として、開発した手法の有効性を検証した。合成した

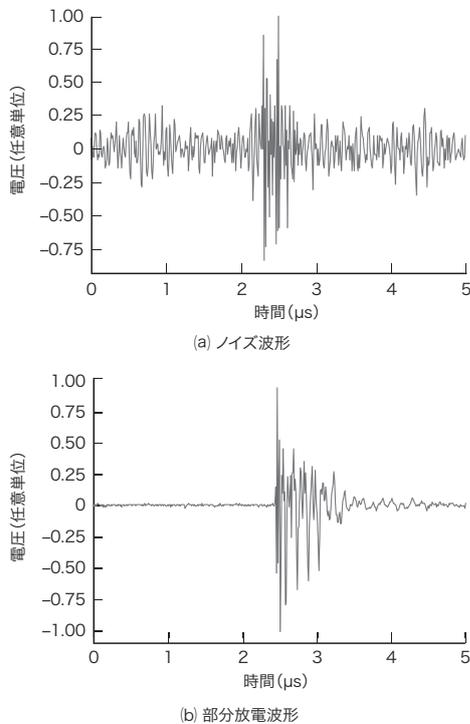


図5. ノイズと部分放電の波形例

それぞれの波形から、ノイズはランダムに発生していること、部分放電は急峻な立ち上がりを示すことが分かる。

Examples of noise and partial discharge waveforms

波形の例を図6に示す。この波形には部分放電のパルス信号とノイズのパルス信号が含まれているが、見た目では識別できないことが分かる。ここで、図2の診断フローを適用した結果を図7に示す。図2の診断フローによって最終的に

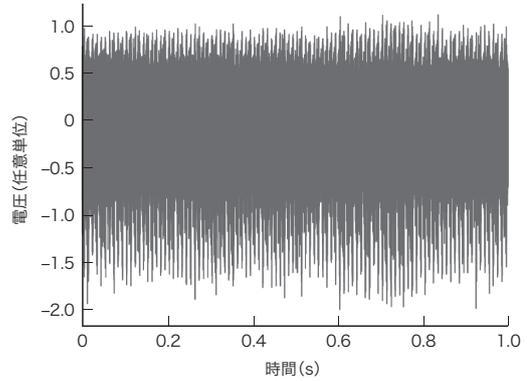


図6. 部分放電とノイズの合成波形例

見た目では、部分放電とノイズを識別できない。

Example of noise and partial discharge synthesized waveform

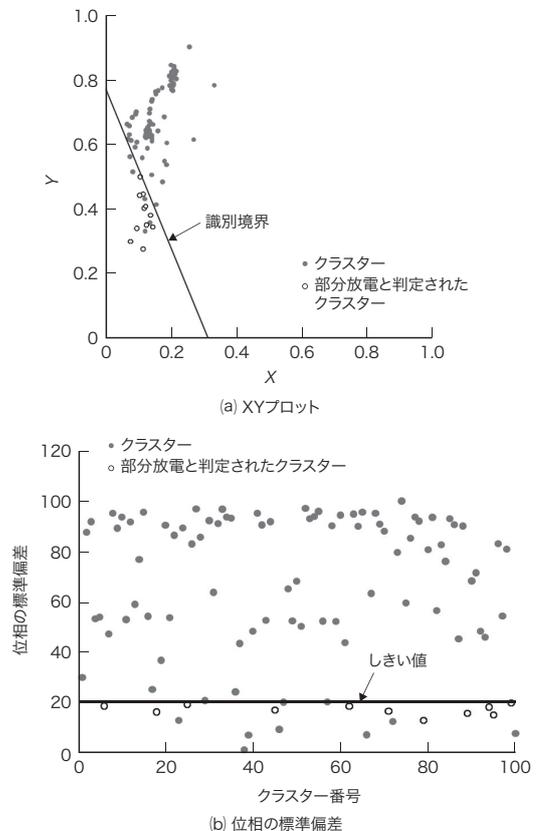


図7. 開発した手法による検出結果

部分放電のクラスターが複数検出されていることが分かる。

Results of identification of partial discharge obtained via new method

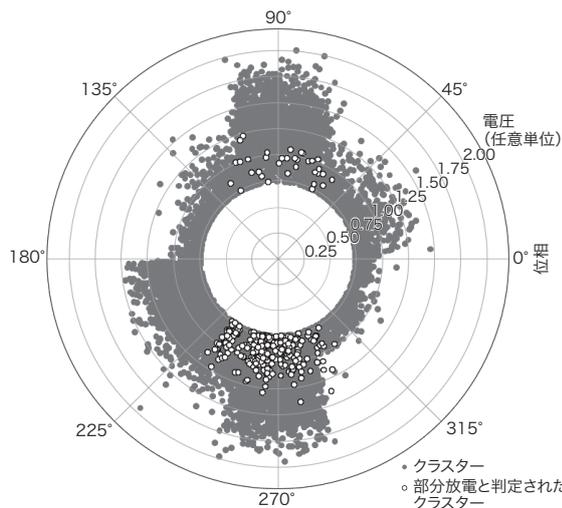


図8. 極座標プロットで示した検出結果
 位相が90°と270°付近で部分放電が発生していることが分かる。
 Results of identification of partial discharge shown by plots in polar coordinates

部分放電と判定されたクラスターを白抜ききのマーカーで表示してあり、部分放電と判定されるクラスターが複数存在していることが確認できる。

一つ一つのパルス信号の情報に対して、電源電圧を基準とする位相と規格化した電圧の大きさを極座標で示したのが図8である。90°付近と270°付近に部分放電と判定されたパルス信号が存在していることが分かる。このクラスターを分析すると、それぞれ異なった波形の特徴を持っており、開発した手法では、極性の異なる部分放電のパルス信号を別々のクラスターとして分類していることが明らかになった。仮に、ノイズが180°周期で発生する場合は、立ち上がりの極性は変わらないので同じクラスターに分類され、標準偏差が大きくなりノイズとして判定される。

5. あとがき

新たな絶縁劣化診断技術として、高ノイズ下で部分放電を検出する手法を開発した。開発した手法をノイズと部分放電のデータに適用し、部分放電信号に対して2倍のノイズが発生する環境下でも、正しい部分放電の判定ができることを示した。

この技術を新しい診断サービスとして提供することで、機器の特性や設置環境に応じた、最適な診断サービスの適用を拡大していく。

文献

- (1) 伴野幸造, 中村勇介. 機械学習を用いたスイッチギアの絶縁劣化診断技術, 東芝レビュー. 2019, **74**, 5, p.17-21. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2019/05/74_05pdf/a05.pdf>, (参照 2024-07-02).
- (2) Fujii, Y. et al. "Highly Sensitive Partial Discharge Detection by TEV Method under Severe Noise Conditions". 4th International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST2017). Xi'an, China, 2017-10, IEEE. 2017, p.783-786.
- (3) 吉積弘将, ほか. 過渡接地電圧法による部分放電信号の低周波成分伝搬メカニズムの考察. 電気学会論文誌A, 2019, **139**, 3, p.154-160.
- (4) 糸瀬晶彦, ほか. “高圧受変電設備内で生じた部分放電に伴う過渡接地電圧信号伝搬のFDTD解析”. 第47回電気電子絶縁材料システムシンポジウム, 岐阜, 2016-08, 電気学会, 2016, MVP-16.
- (5) MacQueen, J. "Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations", Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability Volume 1. Berkeley, CA, 1965-06, University of California. 1967, p.281-297.
- (6) 神谷朋輝, ほか. クラスタリングを用いた部分放電とノイズの識別手法. 電気学会研究会資料. DEI-24-001-012, p.53-56.
- (7) Bedrosian, E. A Product Theorem for Hilbert Transforms. Rand Corporation, 1962, RM-3439-PR, 12p.
- (8) Min, C. et al. "Improvement of Partial Discharge Signal Recognition for Power Cable Lines". Proceedings of 2023 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2023). Shimane, 2023-09, IEEE. 2023, p.10-13.



神谷 朋輝 KAMIYA Tomoki
 東芝インフラシステムズ(株)
 インフラシステム技術開発センター 産業システム・材料開発部
 電気学会会員
 Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



豎山 智博 TATEYAMA Chihiro
 東芝インフラシステムズ(株)
 インフラシステム技術開発センター 産業システム・材料開発部
 電気学会・応用物理学会会員
 Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



中村 勇介 NAKAMURA Yusuke
 東芝インフラシステムズ(株)
 インフラシステム技術開発センター 産業システム・材料開発部
 電気学会会員
 Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.