

機械学習を用いたスイッチギアの絶縁劣化診断技術

Insulation Deterioration Diagnosis Technique for Switchgears Using Machine Learning

伴野 幸造 BANNO Kozo 中村 勇介 NAKAMURA Yusuke

スイッチギアは、金属製の筐体（きょうたい）に開閉器を収納した装置の総称であり、高圧や特別高圧で受電し、施設内などに配電する役割を担う。スイッチギア内部の高圧部と接地部を絶縁する絶縁部が劣化し破損すると、停電などの重大事故を引き起こすおそれがあるため、絶縁部の劣化を診断する技術が求められている。

東芝インフラシステムズ（株）は、スイッチギアの固体絶縁物が劣化すると部分放電が発生することに着目し、部分放電信号と劣化により生じた欠陥との関係を機械学習することで、欠陥の部位と種類を推定して絶縁劣化を診断する技術を開発している。実験サンプルを用いた検証の結果、診断技術の有効性を確認した。

Switchgears are a key type of power supply equipment that contain circuit breakers in a metal casing. If a switchgear's insulation performance deteriorates due to aging, there is a possibility that failure of the switchgear might occur, resulting in a serious incident in the electric power system including a blackout. Demand has therefore been increasing in recent years for insulation deterioration diagnosis techniques for various types of switchgears, in order to eliminate the dependence on inspection work currently being carried out by a limited number of skilled engineers.

With this as a background, Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corporation is developing an insulation deterioration diagnosis technique for switchgears focusing on the phenomenon of partial discharge, which is a precursor of insulation deterioration in solid insulators. This technique makes it possible to perform a diagnosis based on the inference of locations and types of defects from the relationship between partial discharge signals and defects caused by insulation deterioration, by means of machine learning. We have confirmed the effectiveness of this technique through experiments using different types of samples.

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おり、スイッチギアもその一つである。スイッチギアの筐体内部では高圧充電部と接地部を電氣的に絶縁しており、長期間使用するうちに絶縁部が劣化して破損すると、最悪の場合、停電などの重大事故を引き起こす。これを避けるため、スイッチギアの絶縁劣化診断技術の確立が求められている。

スイッチギアは、部分放電が発生しないように絶縁設計されているが、使用状況（過電圧、振動、温度、環境など）によっては、固体絶縁物が時間経過とともに劣化し、空隙などの欠陥を生じることがある。欠陥部の電界強度が強いと、部分放電が発生する。固体絶縁物は、部分放電により侵食され更に劣化するため、時間経過に伴い絶縁破壊に至る。

東芝インフラシステムズ（株）は、全ての絶縁方式のスイッチギアに適用できる絶縁劣化診断技術⁽¹⁾の開発を進めている。部分放電信号の検出にはTEV（Transient Earth Voltage）センサーを用いており、測定時にスイッチギアの筐体に

設置して、使用できることが特徴である。部分放電信号の測定や、その分析による欠陥種の識別、放電箇所の劣化状態の推定など、一連の技術を統合することで、将来、部分放電信号に基づいた絶縁劣化診断サービスを提供することを目指している。

ここでは、部分放電信号による欠陥種の識別技術、及び放電箇所の劣化状態推定技術の開発に向けた取り組みについて述べる。

2. スwitchギアの絶縁劣化診断プロセス

スイッチギアの例として、主要箇所の絶縁部に固体絶縁物を用いる固体絶縁スイッチギア⁽²⁾の構造を図1に示す。

固体絶縁物の欠陥は、その発生部位（内部／外部）により危険度が異なる。固体絶縁物外部の欠陥は場合によってはメンテナンスにより状態の復旧が可能であるが、内部の欠陥のメンテナンスは一般に不可能であり、放置すると部分放電に起因する劣化が進行して、いずれは絶縁破壊に至る。したがって、欠陥の発生部位により、取るべき対策は異なる。

図2にスイッチギアの絶縁劣化診断フローを示す。欠陥

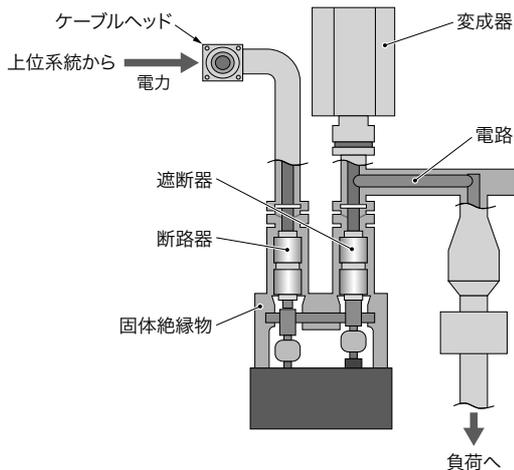


図1. 固体絶縁スイッチギアの構造

ケーブルヘッドから取り込まれた電力は、電路を通り、接続される負荷へ配電される。

Structure of solid-insulated switchgear

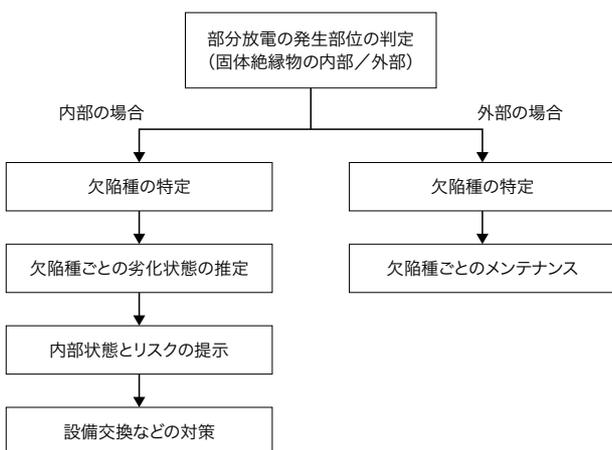


図2. スイッチギアの絶縁劣化診断フロー

固体絶縁物内部の欠陥は、外部に比べて危険度が高いため、劣化状態推定が必要である。

Flow of diagnostic processes for switchgear

の発生部位が固体絶縁物外部の場合には必要なメンテナンスを実施する一方、内部の場合には欠陥種ごとの劣化状態の推定ステップに進み、内部状態とリスクを把握した上で対策を決める。設備交換などの対策を実施することにより、重大事故を未然に防ぐことができる。

部分放電信号の性状（大きさ、頻度、発生位相など）は、部分放電が発生した箇所の状態（材料、形状、表面状態、空隙中のガスの種類や圧力など）に依存する。そのため、部分放電信号の性状から、その発生箇所を特定できる可能性がある。また、劣化の進行によって、放電箇所の内部状

態が変われば、これに伴い部分放電信号も変化するので、劣化進行の様子を把握できる。

部分放電信号の性状を分析して欠陥種を識別することは、これまで取り組まれてきたが、熟練技術者の技能や経験に頼ることが多く、識別できるデータの量にも限界があった。これらを解決するために、次世代の診断技術として、機械学習の適用を検討した。更には、欠陥種の識別だけでなく、部分放電などによる固体絶縁物の劣化状態の推定に有用な情報が得られることを確認した。

3. 欠陥種の識別

3.1 従来の識別方法

スイッチギアに生じる部分放電は、印加される電源電圧の位相と関連があることが知られている。欠陥種の識別には、一定期間の部分放電信号に対して、印加される電源電圧の部分放電発生時の位相 Φ を横軸、部分放電の電荷量 q を縦軸とする散布図である Φ - q プロットや、その軸を量子化し、各軸に対応する発生頻度 n を表現する Φ - q - n パターンによる可視化手法が用いられている⁽³⁾。

図3に電源電圧と部分放電信号の例を、図4に Φ - q - n パターンの例を示す。図4は、色が濃いほど発生頻度 n が高いことを示している。一般に、 Φ - q - n パターンは欠陥種に依存して出現傾向が異なるため、その欠陥種を識別できると考えられている。

3.2 ニューラルネットワークを用いた欠陥種の自動識別

図4に示すような Φ - q - n パターンは、画像と同様に扱うことができる。そこで、画像認識の分野で広く用いられているニューラルネットワークの一種であるCNN (Convolution-

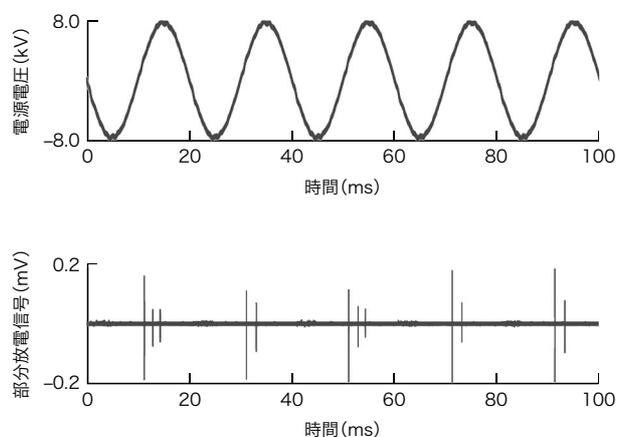


図3. 電源電圧と部分放電信号の位相の関係

部分放電信号は、電源電圧の特定の位相で出現する傾向がある。

Relationship between applied voltage and partial discharge signal

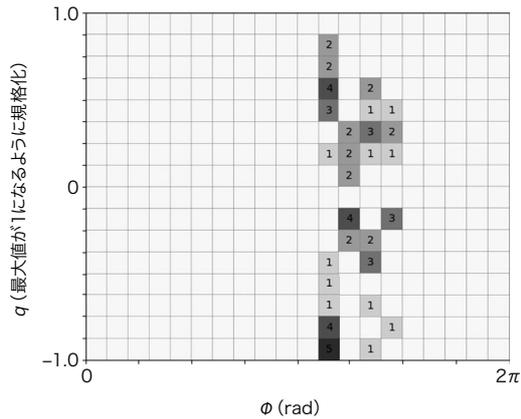


図4. ϕ - q - n パターンの例

ϕ - q - n パターンは欠陥種によって異なるので、画像と捉えてCNNで認識することで、欠陥種を識別できる。

Example of phase (ϕ)-discharge magnitude (q)-discharge frequency (n) pattern

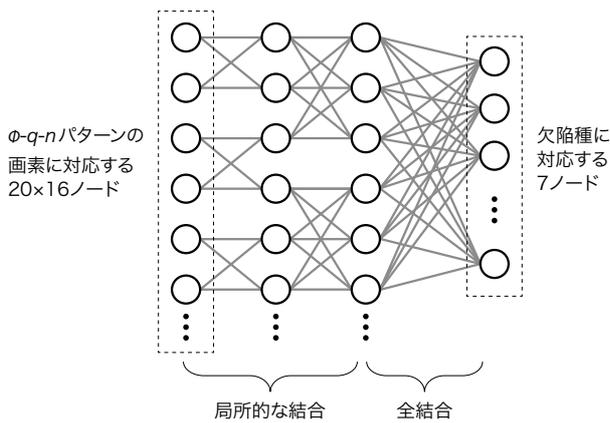


図5. 欠陥種の識別に用いたCNNの模式図

CNNは、脳の視覚野を模した構造を持ち、画像認識タスクに対して高い性能を発揮する。

Schematic diagram of convolutional neural network (CNN) to recognize defect types

al Neural Network) を用いて、識別器を構築した(図5)。全結合型のネットワーク構成とは異なり、CNNは局所的な結合構造を持つ。入力 20×16 画素の ϕ - q - n パターン、出力は欠陥種ごとのスコア(数値)であり、スコアが最大となるものを欠陥種の推定結果とする。

3.3 実験サンプルによる検証

7種類の欠陥種を模擬した実験サンプルを作成し、それぞれの部分放電信号の ϕ - q - n パターンを用いて識別器の学習と精度検証を実施した。7種類の欠陥種とその原因になった現象を表1に示す。また、識別結果の混同行列を表2に示す。全体の識別正解率(=混同行列の対角成分の和/混

表1. 部分放電の発生が想定される部位と欠陥種

List of locations and types of defects causing partial discharge

部位	欠陥種	現象
内部	巻線部	変成器などの巻線内部で発生する放電
	ボイド	固体絶縁物内の空隙で発生する放電
	1次2次間	1次・2次巻線の間で発生する放電
	剥離	導体と固体絶縁物の接着不良による放電
外部	針平板	金属異物などの混入により発生する放電
	沿面	平板状の固体絶縁物表面で発生する放電
	接地層	固体絶縁物表面の導電性塗料の損傷部で発生する放電

表2. 欠陥種の識別結果の混同行列

Confusion matrix of recognized deterioration degrees

項目	実際の欠陥種							
	内部				外部			
	巻線部	ボイド	1次2次間	剥離	針平板	沿面	接地層	
識別器による識別頻度	内部	巻線部	120	0	0	0	2	0
	ボイド	38	134	0	0	0	3	0
	1次2次間	0	0	157	0	0	3	0
	剥離	0	0	0	147	0	2	0
	外部	針平板	0	0	0	121	4	0
	沿面	0	0	0	0	140	0	
	接地層	0	0	0	0	0	129	
識別正解率 (%)		75.9	100	100	100	90.9	100	

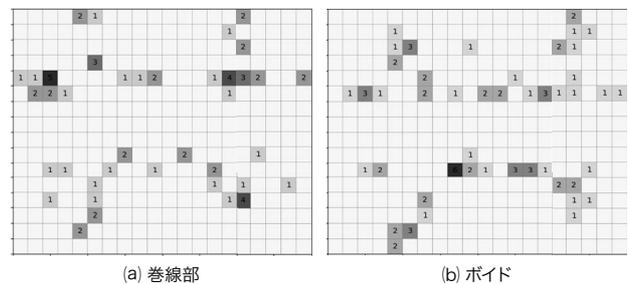


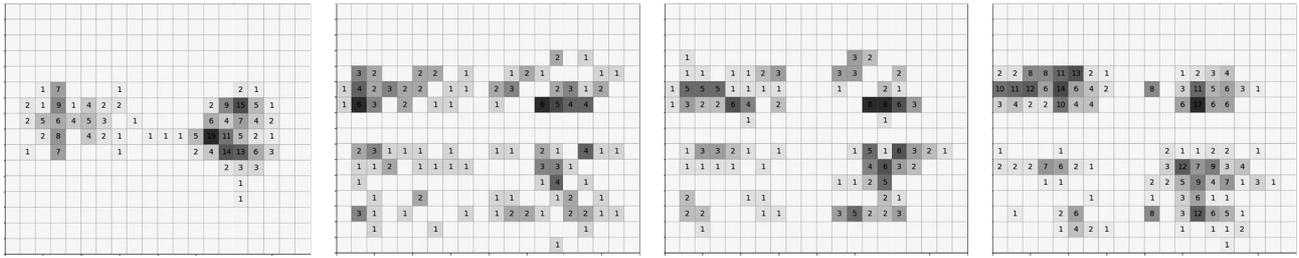
図6. 巻線部とボイドの ϕ - q - n パターン

巻線部とボイドの ϕ - q - n パターンが類似しているため、識別が困難である。

ϕ - q - n patterns of coil and void models

同行列の全成分の和)は94.8%となった。内訳を確認すると、欠陥部位が内部か外部かの識別率(=1-(外部での放電を内部での放電と誤識別した混同行列の成分の和)/(混同行列の全成分の和))は99.0%であり、実用的な水準に近いと考えられる。

一方、同じ固体絶縁物内部の欠陥である巻線部とボイド(絶縁物の中にできる金属に接していない空隙)を誤識別するケースが目立った。図6に巻線部とボイドの ϕ - q - n パターンの例を示す。この例では、二つの ϕ - q - n パターンが



試験時間

図7. 加速劣化試験における Φ - q - n パターンの変化

時間経過に伴い、 Φ - q - n パターンが変化していくことが確認できる。

Time-varying Φ - q - n patterns during accelerated deterioration test

類似しており、識別が困難であることが分かる。これは、巻線部とボイドは、両者とも放電箇所が固体絶縁物で囲まれており、類似した構造をしているためと考えられる。

以上の結果より、欠陥部位の識別については自動化の見通しが得られた。一方で同じ固体絶縁物内部の放電である巻線部とボイドの識別については、 Φ - q - n パターンによる識別は困難と考えられる。識別器の精度向上に加え、 Φ - q - n パターン以外の情報も用いた詳細な検査など、診断サービス全体としての識別精度の向上も含めて検討していく。

4. 劣化状態推定

4.1 クラスタリングを用いた劣化に伴う Φ - q - n パターンの遷移のモデル化

劣化の進行が想定される固体絶縁物内部の放電のうち、まずは代表例として巻線部を選択し、変成器などの巻線部を模擬した複数の巻線サンプルを加速劣化させ、絶縁破壊に至るまでのデータを収集した。図7に加速劣化試験における Φ - q - n パターンの遷移の例を示す。

部分放電の出現傾向は、放電箇所周辺の内部状態に依存する。そのため、 Φ - q - n パターンが類似しているものは、放電箇所の内部状態も類似している可能性が高いと考えられる。劣化に伴う放電箇所の内部状態の変化を推察するため、クラスタリング手法を用いて Φ - q - n パターンが類似しているものをグルーピングし、その遷移関係を確認した。図8にクラスターごとの平均的な Φ - q - n パターンとその遷移関係を示す。今回の実験サンプルでは、クラスター4、5、6を経て絶縁破壊に至るという傾向が見られた。

4.2 Φ - q - n パターンの遷移と物理現象に関する考察

図8の劣化に伴う遷移では、破壊に至る経路は様々であった。部分放電は、放電箇所の初期の内部状態が多様であり、またその状態の遷移も多様であることから、劣化に

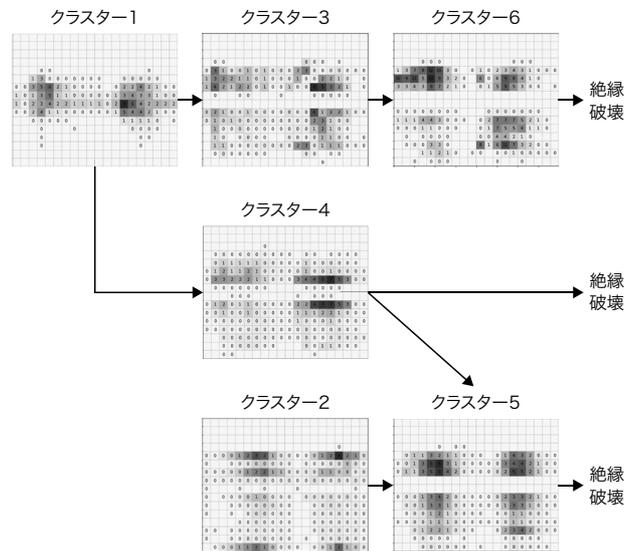


図8. クラスターごとの平均的な Φ - q - n パターンとその遷移関係

類似したパターンのデータをまとめて6クラスターに分類し、これらの遷移傾向と絶縁破壊を関連付けた。

Changes in average Φ - q - n pattern for each cluster

伴う Φ - q - n パターンの遷移も複雑になるものと考えられる。

Φ - q - n パターンの遷移に注目すると、絶縁破壊に近づくにつれて、左右の放電パターンの非対称性が増大する傾向が見られる。図9に推定した放電箇所の内部状態を示す。一般に、放電箇所の空隙が固体絶縁物に囲まれている劣化初期(図9(a))は、電源電圧の正極性と負極性で発生した部分放電がほぼ対称であるのに対し、被覆が侵食され、導体が露出している劣化後期(図9(b))は、どちらかの極性で発生した部分放電の強度が強くなり、頻度も高いと考えられる。これらのことから、左右の非対称性が見られるクラスターでは、放電箇所の導体が露出し、劣化が進行しているものと推察される。

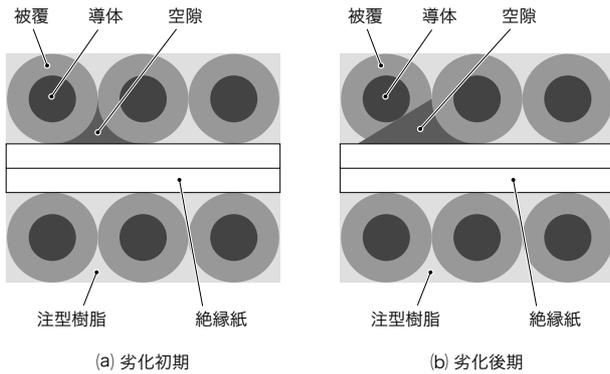


図9. 推定した放電箇所の内部状態

劣化が進行すると被覆が侵食され、導体が露出すると考えられる。

Change in internal insulation condition

今後、各クラスターにおける内部状態を確認し、劣化に伴う物理現象を確認するとともに、絶縁破壊直前のクラスターの状態における詳細な変化の分析を実施していく。その結果を基に、劣化状態を推定するアルゴリズムを構築し、推定技術の確立を目指す。

5. あとがき

次世代の絶縁劣化診断技術として、機械学習を用いた欠陥種識別、及び劣化状態推定技術について、実験サンプルでの検証の結果を示しながら有効性と課題を述べた。次のステップとして、実験サンプルではなく実機での検証が挙げられる。特に、実環境で環境ノイズなどの外乱要因が存在しても、正しく識別できるロバスト性の確保は今後の課題である。

当社では、これらの診断サービスとして、クラウド環境によるオンライン常時監視・自動診断についても併せて検討している。サービスをオンライン化することで、問題の早期発見、早期診断を実現するとともに、収集したデータをフィードバックすることによる診断精度の向上も期待できる。迅速な診断が可能なオンライン診断と、詳細な診断が可能な現地でのオフライン診断を組み合わせ、顧客にとって最適な診断サービスの提供を目指す。

文献

- (1) Fujii, Y. et al. "Highly sensitive partial discharge detection by TEV method under severe noise conditions". Proceedings of 2017 4th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST). Xi'an, China, 2017-10, IEEE, 2017, p.783-786.
- (2) 竹井義博, ほか. 72/84 kV 固体絶縁スイッチギヤ. 東芝レビュー. 2014, 69, 7, p.48-51.
- (3) 古森郁尊, ほか. 部分放電発生位相角分布によるパターン認識を応用した絶縁劣化診断および寿命推定. 電気学会論文誌A. 1993, 113, 8, p.586-593.



伴野 幸造 BANNO Kozo

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 システム制御・ネットワーク開発部
情報処理学会会員
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.