

保守業務省力化に向けた 受配電設備の音診断技術

*Acoustic - Based Diagnostic Technology for Labor - Saving
Maintenance of Power Distribution Equipment*

甲斐孝幸*
Takayuki Kai
江戸貴広*
Takahiro Edo
小林武尊*
Takeru Kobayashi

山口信一†
Shinichi Yamaguchi
ウィシャーン ゴードン‡
Gordon Wichern
ルルー ジョナトン‡
Jonathan Le Roux

*三菱電機㈱ 先端技術総合研究所

†同研究所(博士(工学))

‡Mitsubishi Electric Research Laboratories (Ph.D.)

要 旨

工場や施設の稼働に不可欠な電力設備には安全性、信頼性が求められるが、近年の保守人材の減少によって、持続的な運用が難しくなることが懸念されており、保守業務を省力化するスマート保安の実現が急務である。特に、電力設備の安全性を確保するために必要な遮断器では、機器の信頼性を保ちつつ、点検時間を短縮可能な診断技術が求められている。三菱電機は、遮断器の開閉時の動作音を解析し、点検時間の短縮や、異常兆候の早期検出を期待できる遮断器の動作音診断技術を提案した。

1. ま え が き

近年、保安人材の不足といった課題を背景に、経済産業省は、IoT(Internet of Things)やAI等の新技術を活用して設備の状態を的確に把握し、安全性と効率性の両立を図る“スマート保安”を推進している⁽¹⁾。三菱電機でも受配電設備の常時遠隔監視を行い、異常兆候検知や余寿命診断を実現するスマート保安の取組みを進めており⁽²⁾、受配電設備向けスマート保安サービスの提供を2025年4月から開始している。

受電設備で、真空遮断器は電力供給の信頼性を支える重要な機器である(図1)。真空遮断器が故障した場合、停電や事故の波及によって工場や施設の運転停止を引き起こして、大きな損害をもたらすおそれがある。このため、従来、点検やメンテナンスを通じて、その健全性を維持してきた。真空遮断器の故障要因の中でも、操作装置に起因するものは一定の割合を占めることが知られており、操作装置の点検やメンテナンスには相応の労力を要する。そのため、真空遮断器の操作装置に対しても、スマート保安化が求められている。操作装置内部の操作機構は複数の機構部品が連動して動作する複雑な構造であるため、内部の動作状態を直接観測することは容易ではない。従来、このような状態確認には、接点信号、内部のアクチュエーターの駆動電流、機構部品の変位など複数のセンサーを用いた確認が行われてきた。しかし、これらをそのままスマート保安での状態監視に適用しようとする、センサーの設置コストや、真空遮断器が搭載されている盤内スペースの制約といった課題があり、既設設備への適用は困難であった。

本稿では、これらの課題解決のため、真空遮断器の動作時に発生する音響信号だけを用いて、真空遮断器の動作を担う操作装置の特性を診断する技術について述べる。音響信号は、操作装置内部の機構部品の動作を非接触で一括して取得可能であるため、既設設備にも適用しやすいという利点を持つ。動作時に取得した音響信号から、操作装置内部の機構部品の動作の代表的なイベントを検出し、その検出時間の変化に着目することで、操作装置の状態変化を評価できる。



図1-受配電設備及び真空遮断器

2. 真空遮断器用操作装置

真空遮断器の操作装置内の機構は、図2に示すように、ばね操作機構及び電磁操作機構の2種類がある。電磁操作機構は、電磁アクチュエーターによって真空接点を直接開閉するシンプルな構造であるため、駆動電流を用いた診断技術を既に開発している⁽³⁾。一方、ばね操作機構は、投入及び開極動作の過程で、電磁石、ラッチ機構、ばね、リンク機構といった複数の機構部品が順次動作する方式である。ばね操作機構は電磁操作機構に比べて小容量の電源で動作可能であることから、真空遮断器で広く採用されている。

ばね操作機構は経年劣化に伴う機構部品の潤滑状態の変化などによって、各機構部品の動作タイミングが変化すると考えられる。特に、機構動作のトリガーとなるラッチ解除に関与する機構の損耗や、潤滑剤の劣化、異物の混入などは、動作遅延や動作不能といった重大なトラブルにつながる可能性がある。しかし、こうしたばね操作機構での各部品の動作状態を詳細に把握するためには、部品ごとにセンサーを設置する必要がある、実用上の課題になっていた。これらの課題を踏まえて、ばね操作機構の複雑な動作を、少数センサーで把握可能な音響信号に着目した。

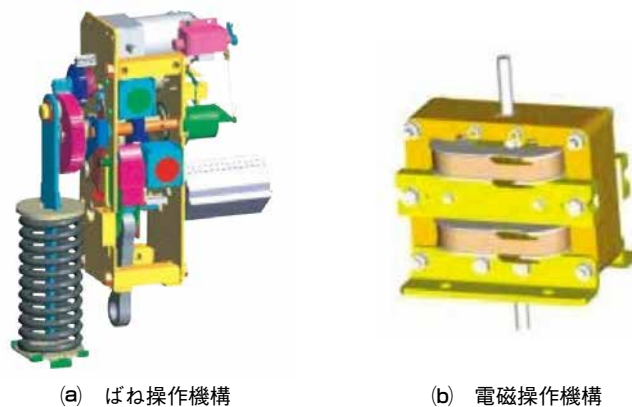


図2-真空遮断器の操作機構の種類

3. 音響信号による動作イベント検出方法

この章では、音響信号による動作イベント検出方法について述べる。

3.1 動作イベント検出の基本原理

ばね操作機構では、機構部品が順次動作する過程で、部品同士の接触や衝突が複数回発生する。この際に生じる音響信号の変化を検出することで、機構動作の状態を知ることができると考えた。音響センサーは非接触で設置可能であり、設置自由度が高いため、既設設備にも容易に適用可能である点に着目した。

遮断器動作時に取得される音響信号は、各機構部品間で発生する複数の接触音が短時間に連続して生じる非定常信号である。このような信号では、短時間のうちに含まれる周波数成分が大きく変化する。そこで、この手法では、音響信号に短時間フーリエ変換(STFT)を行い、スペクトルの時間変化が急峻(きゅうしゅん)な時刻を検出することで、機構内部での各動作イベントを抽出する手法を用いた。式(1)に示す特徴量 $SF(t)$ を用いて、各動作イベントの検出に用いる特徴量波形を生成する。

$$SF(t) = \sum_{f=0}^L K_f H(X_{t,f} - X_{t-1,f}) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $X_{t,f}$ は時刻 t での周波数 f のスペクトルを表す。 L は周波数成分のデータ長である。 $H(x)$ は式(2)に示す関数であり、 K_f は重み付け用のテーブルである。

$$H(x) = \frac{x + |x|}{2} \dots\dots\dots (2)$$

この手法で用いる特徴量 $SF(t)$ は、短時間フーリエ変換の結果に基づいて、隣接する時間ステップ間でのスペクトル強度の時間変化を周波数方向に積算した量である。このため、機構部品同士の衝突などで、新しい周波数成分が発生した場合には、その発生タイミングが強調される。とりわけ、機構部品同士の衝突音は、短時間で音圧が立ち上がる特徴を持つことから、この特徴量を用いることで、各動作イベントを明確に抽出できる。 $H(x)$ はスペクトルの時間変化に対して、音の立ち上がりを強調する関数である。スペクトルの時間変化が正の場合はそのまま出力し、負(減衰)になる場合には、0を出力する。これによって、残響などの減衰成分の影響を低減することが可能になる。また、重み付け関数 K_f は狙いとする動作イベントを更に強く強調するためのテーブルであり、動作イベントごとに事前に設定している。特に動作イベントごとに特有の周波数成分を特定し、その周波数成分の変化が強調されるよう工夫している。

3.2 動作イベント検出の流れと例

図3に、ここまで述べた音響信号によるばね操作機構の動作イベント検出の一連の流れと、その結果例を示す。遮断器の動作によって発生した音響信号に対して、短時間フーリエ変換を適用した。式(1)に示した特徴量を算出した後、特徴量波形に対してピーク検出を行うことで動作イベントを抽出している。図3内に示した特徴量波形は、一つの動作イベントを検出するための特徴量波形の一例である。実際には動作イベントごとに対応する特徴量波形をそれぞれ生成し、それらに基づいて各動作イベントを検出している。

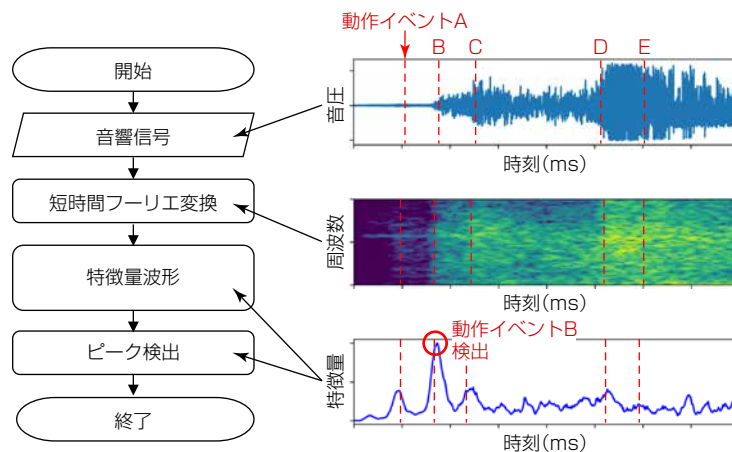


図3-動作イベント検出の流れと例

4. 評価結果

実際に、遮断器の投入動作時の動作イベントについて、音響信号に対して提案手法を適用して得られた検出結果と、各種センサーから取得した参照信号に基づく検出結果との比較を行った。参照信号は、駆動電流、操作機構の変位、主接点信号などから構成されて、しきい値判定又は変化率が最大点になる時間の検出アルゴリズムを作成し、動作イベントA～Eの発生時刻を決定した。ここで、参照信号に基づく検出結果にも僅かに誤差が含まれるが、各動作イベントの検出で社内での実績があり、それぞれに適したセンサーを選定しているため、参照信号を基準に音響信号の検出精度を評価した。試験は、ばね操作機構を搭載した三菱電機製真空遮断器を対象に多数回の開閉を行いながら、各センサーの信号を同時に計測した。

図4に示す散布図は、縦軸が音響信号からの検出時刻、横軸が参照信号からの検出時刻を示している。各プロットは操作機構内で生じる動作イベントA～Eに対応している。プロットが直線近傍に分布しており、音響信号からの検出結果は、参照信号とmsオーダーで一致していることが確認できた。

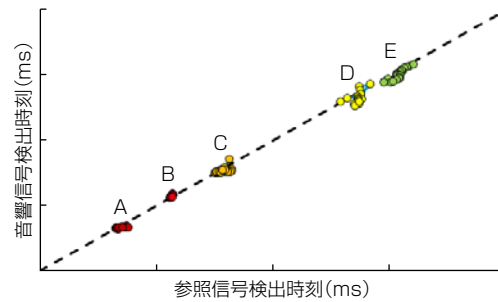


図4-動作音信号からの動作イベント検出結果と参照信号との比較

5. む す び

真空遮断器の操作装置が発する音響信号に着目し、内部機構の動作イベントを音響信号だけから検出する診断技術を述べた。提案手法を用いた解析によって、複数の動作イベントをmsオーダーの精度で抽出できることを確認した。提案手法は、非接触で設置可能な音響センサーだけで構成できて、既設設備にも適用しやすい。真空遮断器のスマート保安やCBM(Condition Based Maintenance)の実現に向けた、状態監視手段の一つとして有効である。

今後は、実フィールドでのノイズや設置条件による影響について検証を進めて、他機種・他製品への横展開も含めて活用範囲を拡大する。

参 考 文 献

- (1) 経済産業省：電気主任技術者制度について（2023）
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/hoan_seido/pdf/014_01_00.pdf
- (2) 小鶴 進：受配電設備向けスマート保安実現への取組み，三菱電機技報，**98**，No.6，4-01～4-04（2024）
- (3) 矢野知孝，ほか：電磁操作方式真空遮断器の機構CBM機能の開発，電気学会論文誌B，**136**，No.2，192～197（2016）