



振動音響方式によるタップ切換器の新診断方法 – 最初の結果と実適用例

M. FOATA, R. BEAUCHEMIN
Reinhausen Canada Inc.
Canada

K. VIERECK, A. SAVELIEV, H. HOCHMUTH
Maschinenfabrik Reinhausen GmbH
Germany

要旨

負荷時タップ切換器（OLTC）の基本動作原理は、真空バルブまたは油中で接点を機械的に切り換えることにある。OLTC の動作中に生じる音響ノイズと振動パターンには、切換動作中の機械的、電気的なイベントのほとんどが反映される。その結果、このような振動音響パターンから、OLTC 動作に関する相当量の情報を取り出すことができる。本論文では、OLTC に関する振動音響測定結果を解析し、可視化し、解釈するための新手法を紹介する。

最初に、この新手法の主な特長について簡単に述べるが、具体的には、測定手法、すなわちウェーブレット変換とパターン認識技術の各手法を通じたシグネチャー処理についてである。これらの手法に特有な利点は、最初の測定から切換開閉器の詳細な検証が可能になるということである。タップ切換器のメーカーが持つ設計情報や切換シーケンス等の情報を織り込むことで、全てのイベントについて予め定められたタイミング許容差を適用することができ、これにより切換開閉器の正常動作／異常動作を判定することが可能となる。単純な測定だけですべての動作が見られるため、傾向分析や統計比較を行わずに診断を行うことができる。単にタイミングのずれが認識できるだけでなく、予期される音響イベントの有無から、何らかのシステム異常も認識可能である。

次に、長期にわたる経年シミュレーション試験の実験結果を示す。ここで示すのは、様々な要素のすべてについて、その多くの切換動作により累加された摩耗が、明確かつ一貫性のある形で切換シーケンス上の時間的なずれに反映されるということである。また低温の影響についても考察し、この手法が、一般に変圧器の通常の動作温度範囲となる、幅広い温度範囲での診断が可能なることを示す。

最後に現場での事例を通じ、この新アルゴリズムに組み込まれた機能、すなわち切換シーケンスや許容可能なタイミングのずれについての OLTC メーカーの知識をアルゴリズムに組み込むことで、最初の測定から直ちに診断が可能になるということを示す。

キーワード

負荷時タップ切換器、OLTC、振動、音響、診断、変圧器

m.foata@ca.reinhausen.com

1. はじめに

負荷時タップ切替器（OLTC）の基本動作原理は、真空バルブまたは油中で接点を機械的に切り換えることにある。OLTC の動作中に生じる音響ノイズと振動のパターンには、切替動作中の機械的、電気的なイベントのほとんどが反映される。その結果、このような振動音響パターンから、OLTC 動作に関する相当量の情報を取り出すことができる。

振動音響法による診断の可能性が OLTC について最初に実証されたのは参考文献[1]によってであり、その後、その他の何名かの研究者により同様のことが確認されている（最近の参考文献は[2-6]）。これらの実験におけるデータ処理の進め方や測定用のセンサー、解釈の方針は大きく異なっていたものの、これらすべての研究における共通の結論は以下の2点である。

1. 振動音響診断の可能性を十分に引き出すためには、対象となる特定の OLTC 形式について、その動作原理をある程度深く理解していなければならない。
2. 劣化や異常は音響イベントの振幅とタイミングの両方に現れるが、タイミングはセンサーの種類や取り付け方法、場所の影響を受けないため、振幅よりもタイミングのずれを解釈する方が明らかに容易である。

本論文は、OLTC 切替動作の詳細な切替シーケンスを振動音響測定により抽出し、これを、正常な状態や異常な状態に関する OLTC メーカーの知識に基づいて決定され組み込まれた判定基準と比較するという、新しい解釈アルゴリズムを提案するものである。このプロセスにおいて、この方法が、保守計画に利用する場合として、多くの切替動作を通じて累加された通常の摩耗が検出できることを実証する。最後に、外的な影響となる動作温度が非常に低い場合の限界についても簡単に考察し、さらに実際の事例を挙げて、単一の測定だけで診断が可能なこの新アルゴリズムの能力を説明する。

2. 振動音響信号の測定

2.1 振動センサー

OLTC の振動信号は市販の広帯域加速度センサーで測定可能である。この測定によるアナログ信号の帯域幅は約 100kHz が上限である。油中の音は波長が短い（100kHz で約 15mm）ためビーム状になることから、これより高い周波数での測定には意味がないものと考えられる。すなわち、測定はセンサーの位置に敏感で、無用な影響を受けやすい。

信号取得デバイスへの加速度センサーの接続には、アンプ内蔵圧電式（IEPE）加速度センサーのインタフェースを使用する。IEPE は EMI（電磁干渉）に強く、またケーブル長の影響を受けにくいいため、信号品質の向上が図れる。

2.2 センサーの配置

加速度センサーを取り付ける最適な場所は OLTC のヘッドカバーと考えられるが、変圧器が通電されている時には、これはほとんど不可能である。次善の場所は、OLTC に近い変圧器タンクの側面である。この場所は、タップ選択器や副切替器が測定対象となる場合には更に好適である。センサー位置の選定にあたっては、回転中のモーターやオイルポンプ、ファン等による音響的な外乱の可能性を考慮することも重要である。

センサーを変圧器に固定する方法には以下のものがある。

- ・ 磁石付きアダプター
- ・ 接着式アダプター
- ・ ネジ止め式アダプター

OLTCヘッドカバーへの取り付けには一般にネジが使われる。良好な音響結合が望まれることから、ネジ止め式のアダプターが最適である。次に適しているのは接着式のアダプターで、これは望ましい位置にネジがない場合に使われる。ただしその欠点は、音響結合がわずかに影響を受けることと、接着部位の表面処理が必要なため取り付けに時間がかかることである。磁石式のアダプターは音響結合が不十分なほか、数kHzのあ

たりで強い共振が生じるため、データ処理の面で不利である。

2.3 データ取得システム

データ取得とデータ処理には、信号取得カードと信号処理モジュールを組み込んだトランジェントレコーダを使用する。アナログフィルターの使用による信号スペクトラムの低下と1 MS/sのサンプルレートとの組み合わせにより、良好なアンチエイリアス特性が得られる。このデバイスは、同時に4チャンネルの測定が可能である。

また、電流クランプ信号の入力用として、低サンプルレートのチャンネルも使う。

3. データの前処理

3.1 時間周波数解析

OLTCの振動音響測定における標準的なアプローチは包絡線の解析である[1]。しかし、その場合は信号の周波数成分に関する有用な情報が失われてしまう。この情報は時間周波数分解により得ることができ、振動信号は時間領域と周波数領域の両方で同時に表現される。予期されるものも予期されないものも含む全ての音響イベント、ならびに、生じる可能性のある加速度センサーの位置エラーが「可視化」される。

油中での金属部品同士の衝突は、ステップ関数に似た音響信号（または振動信号）を生成する。この信号は理論的にはあらゆる周波数成分を含んでいるが、この連続スペクトラムは、ぶつかり合う部品自体の機械的共振により、また、（OLTC内の絶縁油や金属部品、プラスチック部品等の）極めて不均質な媒体の中を伝搬することにより乱されてしまう。さらに加速度センサーの取り付け部分の品質やセンサー自体の周波数応答も、このスペクトラムに影響を与える要因となる。いずれの場合も信号の広帯域性は維持され、狭帯域信号は含まれない。

時間領域と周波数領域の同時表現は連続ウェーブレット変換（CWT）により得られる。CWTフィルターバンクの特性は、上述の信号特性を考慮して選択される。

時間領域の分解能は解析対象の周波数が高くなるほど高解像度になる。加速度センサーの高周波数帯域での周波数応答は理想的なものではないが、このことは大きな欠点にはならず、むしろ本モデルのようにタイミング検出を重視するような場合には明確な利点となりうる。そのため、狭帯域での測定よりも、広帯域での測定の方が適切である。

伝達関数の長さは、フィルターバンクの品質と計算速度との妥協点として決められる。期待される、最高条件下におけるこの信号の信号対雑音比（SNR）は約 70dB である。今回開発したフィルターバンク自体の SNR は約 100dB であり、入力信号の SNR を低下させることはない。

3.2 時間-周波数ダイアグラムの解釈

典型的な振動音響 OLTC 測定の結果を図 1 に示す。この図の横軸は時間、縦軸は周波数を示しており、信号レベル(強さ)は色で表現されている。この図から、信号対雑音比は約 70dB であることが分かる。また、タップ切換器及び切換開閉器（DS）の動作を明確に識別することができる。

図 1 は通電された変圧器での測定を示している。変圧器が出すブーンというハム音や、副切換器のアーク放電、さらには 50Hz の外乱も容易に認識できる。

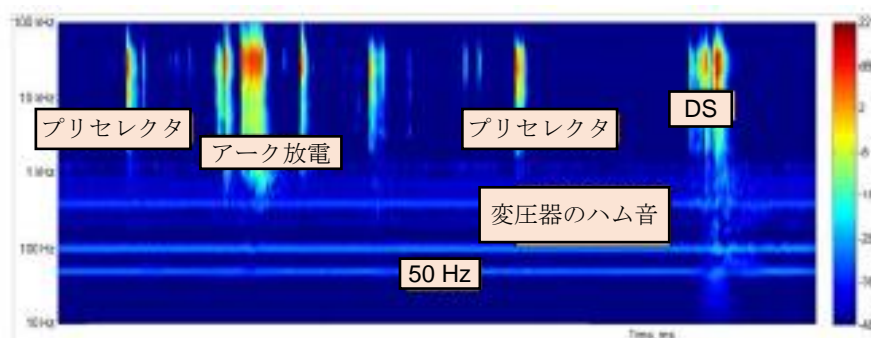


図 1：稼働中の変圧器における OLTC 動作の時間-周波数図

4. 切換開閉器の解析

4.1 データの準備

切換開閉器の動作時の信号構造はさらに複雑である（図2の一番上の図を参照）。原信号がもともと広帯域であり、その振動は様々な経路でセンサーに到達するため、信号の主情報はその包絡線に含まれている[1]。切換開閉器の高速動作シーケンスを分析してその特性を明らかにするためには、1 ms 未満の時間分解能が必要である。低周波数成分の分析では十分な時間分解能が得られないため、信号の評価は高周波数帯域についてのみ行うのが適切である。実際には、数 kHz を超える周波数範囲内の信号電力成分を利用して包絡線を生成する。得られた曲線の信号対雑音比を改善するため、信号の選択的フィルタリングを行うことも可能と考えられる。包絡線曲線の一例を図2に示す（一番下の図の緑の曲線）。次に緑色の包絡線の信号を平滑フィルターに通すことで、青色のカーブで示すような、より明確なシグネチャーが得られる。一般に、切換開閉器を開く時に発生する音は停止状態から始まるため、機構部が最大速度での移動から急に停止する切換終了時の音よりもはるかに小さい。切換開閉器の切換時に生じる振動信号の振幅は数桁にわたる範囲内に分散する。そのため、信号レベルは対数スケール（dB）で表現される。このアルゴリズムは、背景雑音のしきい値を計算し（赤の線）、多重解像度解析を用いて有意なピーク（赤の十字で示す）を特定する。

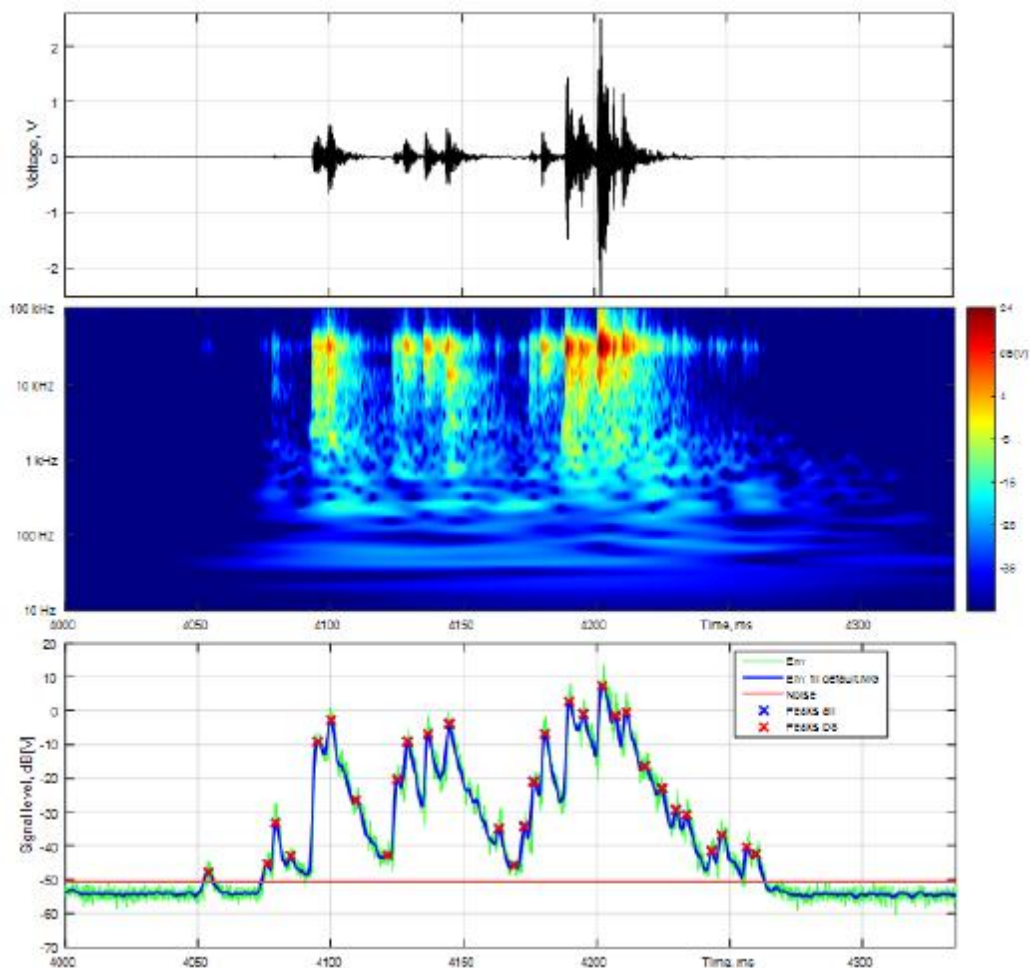


図2：切換開閉器動作における、加速度センサーからの生信号（一番上）、時間-周波数図（中央）、及び得られた包絡線（一番下）

図3の一番上のグラフに、別形式の切換開閉器の内部接点機構による電気的な参考動作パターン（接点の開閉タイミングパターン）を示す。この図は、切換開閉器が動作している間の各電気接点イベントから音響シグネチャーへの正確なマッピングを示している。稼働中の変圧器では切換開閉器の接点イベントを記録できないため、この図は、工場内のテストベンチで記録されたものである。このプロセスから、一般には10~20

件の関連する機械的、電氣的イベントを音響シグネチャー上で特定でき、特定された各イベントは、パターン認識の基準として使用される。

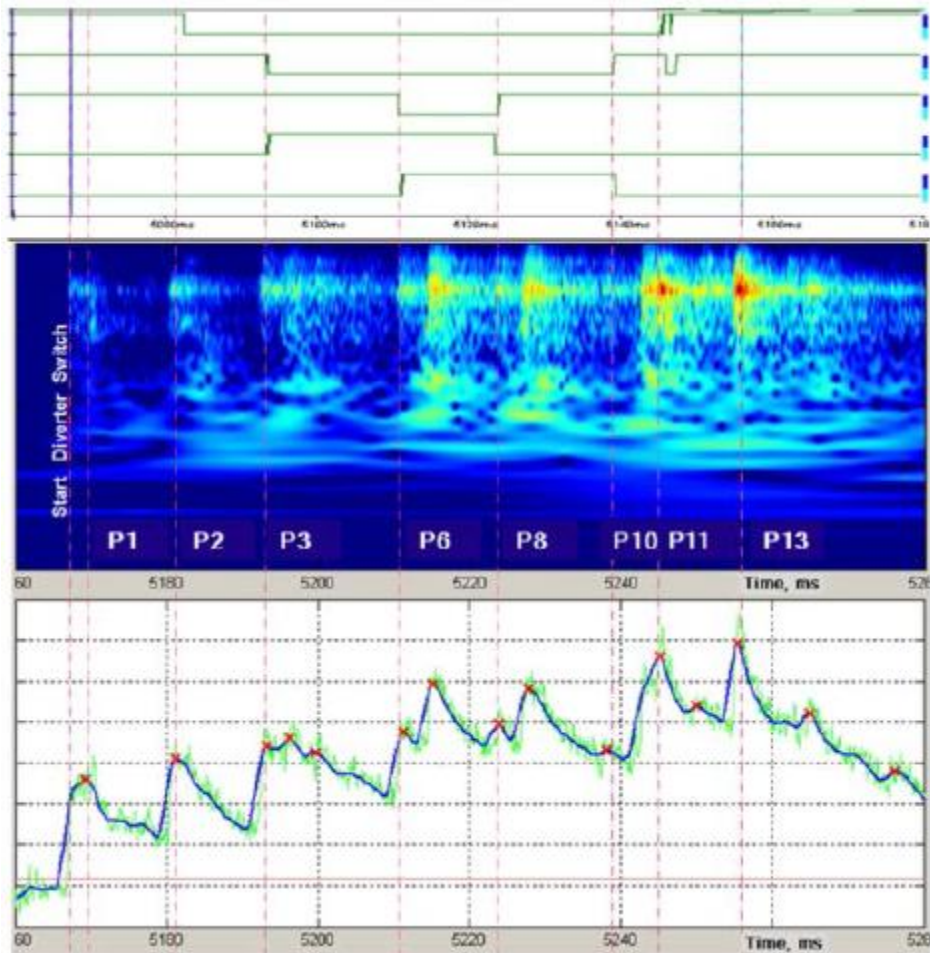


図 3： 切換開閉器動作における、接点の開（ブレイク）から閉（メイク）までの電氣的時間基準（一番上）、時間-周波数図（中央）、及び得られた包絡線（一番下）

4.2 切換イベントの認識

音響信号包絡線上のピークは音響イベントを示しており、それぞれのイベントは OLTC 内の機械的イベントに対応している。音響信号の各最大点は音響イベントを示しており、これらはそれぞれ OLTC 内の機械的イベントに何らかの関係がある。この関係は、OLTC の特殊試験によって裏付けされた OLTC の製造上の知識を通じて決定できる。各音響イベントは対応する電氣的イベント（接点の開閉等）を直接的に表現するものではないが、各イベントは相互に何らかの関係を持つことが多い。たとえば接点を開いた時、何らかの音が直接発生することはないが、作動機構からの音は発生する。機械的、電氣的なイベントのすべてが音響イベントとして表現されるわけではない。大きな音が出た時、小さな音が消されてしまう場合がある。

新品の OLTC であっても、製造時の許容差があることから、すべてが同じ音響パターンを有するとは限らない。また、OLTC 切換時の偶数、奇数の方向による差異が認められることもある。ただし、切換シーケンスが許容範囲内にある限り、これは問題として捉えるべきではない。本アルゴリズムでは重要なイベントの特定が可能であり、それらの特性は基準として保存される。研究対象となった OLTC での測定結果は、それぞれ基準値との比較が行われる。このような手順で得られた結果を図 4 に示す。これらの曲線から、基準曲線との差が明らかになる。基準とする各 OLTC に対して、認識された各ピーク値の位置をその許容差と比較することができる。

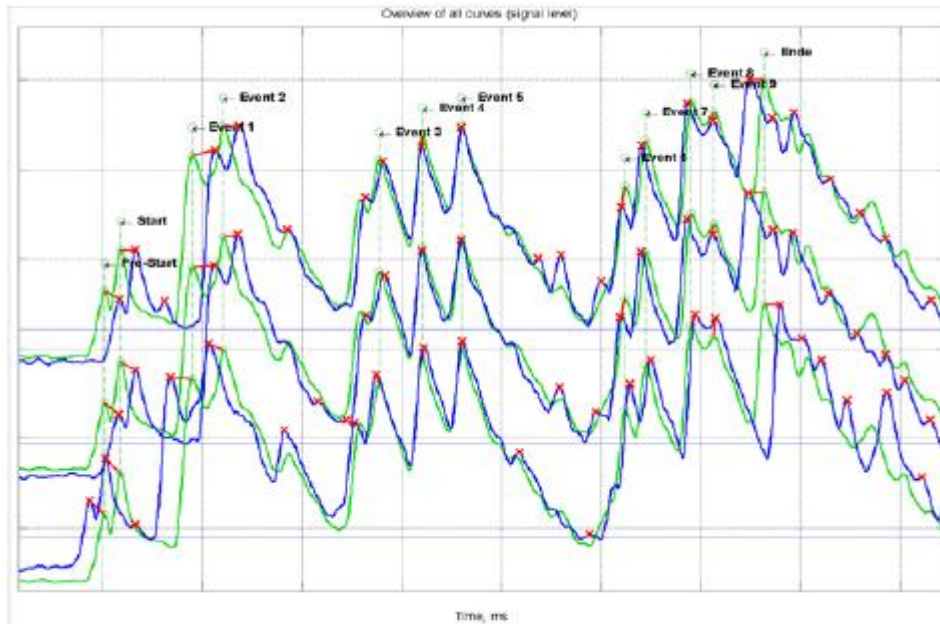


図 4： 包絡線（青の曲線）と基準値（緑の曲線）とのマッチング

4.3 低温の影響

変電所環境での実用上、変圧器が通電されていない場合には周囲温度が音響信号の品質に大きく影響する。変圧器が運転中の場合は、切換開閉器の油温とタップ選択器の周辺油温が測定品質に影響する。広い温度範囲で信号品質がどのように変化するか見るため、温度による音響シグネチャーの変化を図 5 に示す。本アルゴリズムには再マッピング機能があるため、 -10°C までの油温ではパターン認識の修正は不要と考えられる。 -15°C よりも低い温度の場合も測定自体は可能だが、音響イベントの評価のためには各温度に応じた基準データが必要となる。したがって、これらの偏差をより正確に解釈するためには、各測定データに測定時の油温の記録（油温スタンプ）が含まなければならない。

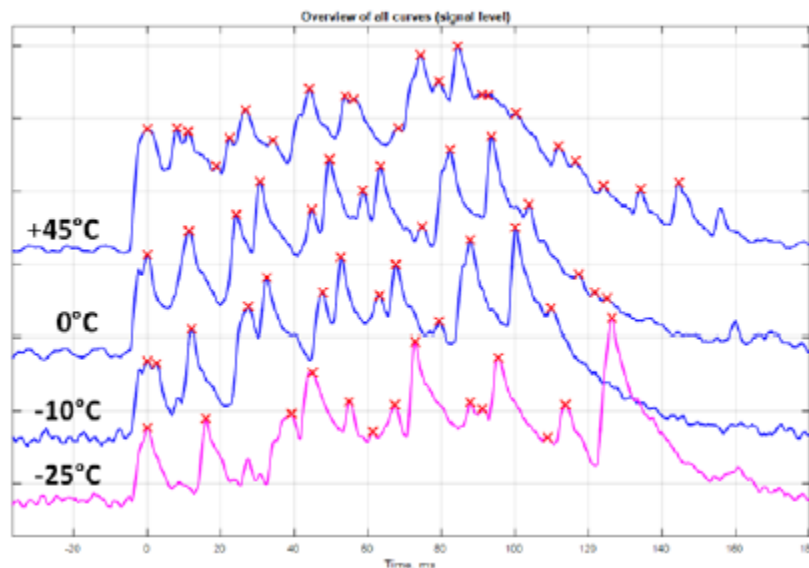


図 5： 切換開閉器の動作時間に対する油温の影響

5. OLTC の切換シーケンスと経年劣化

OLTC にはいくつもの接点があり、様々な電流と電圧で切換が行われる。切換接点でのアーク放電は接点の摩耗につながる。特に油中式の OLTC では接点の摩耗が相当に激しく、通常の動作中に数 mm にも達する場合がある。そのため、摩耗により生じる、数 ms にも及ぶ切換シーケンスの変化も予想される。さらに、接点でのアーク放電により生じる熱分解や固形物で絶縁油が汚染され、その結果、切換開閉器の摩擦が増加する。図 6 は、200,000 回の電流切換試験を行ったときの油中式 OLTC の音響シグネチャーの変化を示している。

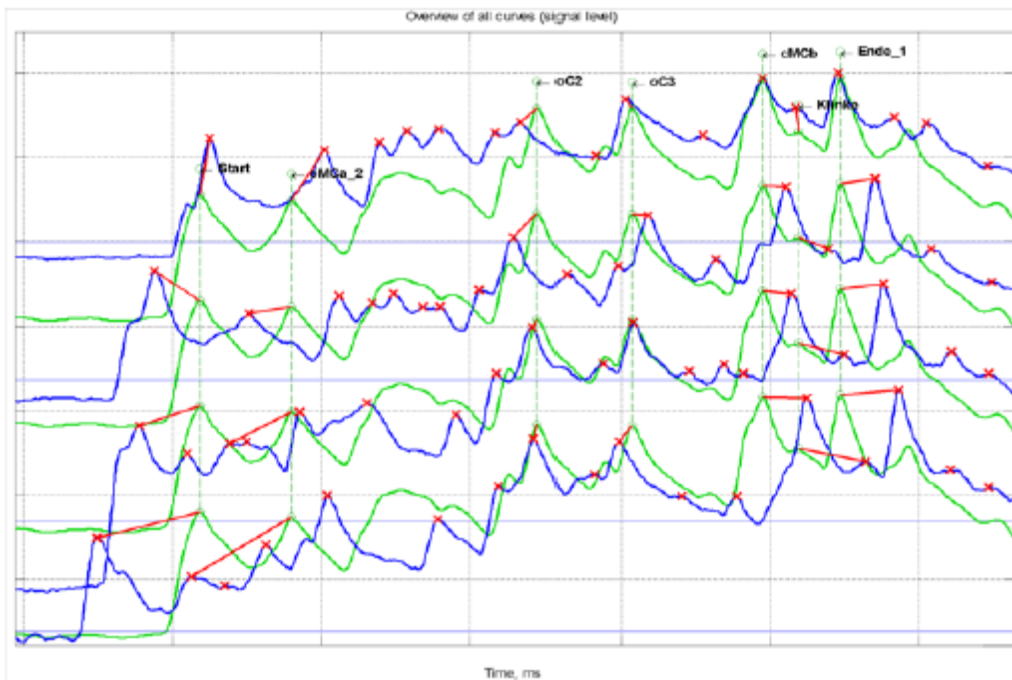


図 6：油中式 OLTC の試験カーブ（青）と基準カーブ（緑）。
動作回数の増加に応じた音響シグネチャーの変化を上から順に示す。

図 6 で観察された音響イベントを OLTC の機械的イベントに対応付け、電気的イベントと共に示したものが図 7 である。グラフ上の各点は、数回の測定による平均値を示している。この評価によれば、負荷切換動作開始後の切換シーケンスに有意な変化が見られ、これは絶縁油の初期汚染が原因である。それ以降の動作では、接点が連続的に摩耗していくため、切換時間は安定的に変化する。試験に供した OLTC は、主接点 (MC) にはアーク放電が発生しないように設計されていた。そのため、機械的動作の開始から MC (oMC) が開くまでの時間と MC (cMC) が他端で閉じてから動きが止まるまでの時間は、ならし運転の期間中は変化し、それ以降はほぼ一定の値となっている (図 7a)。OLTC の動作は遅くなっていく (図 7b、oMCa-cMCb)。電気的測定データと音響イベントとの間には強い相関が観測されている (図 7b、図 7c)。個々の負荷が異なること、またそのため接点ごとの摩耗量が異なることから、2 つのイベント間の時間差も OLTC の経年とともに短くなる場合がある (図 7c、oC2-oC3)。

ここで、変圧器の負荷条件が異なること、さらに循環電流による負荷も加わることから、これらの 2 つのパラメータ間の関係に応じて摩耗パターンも異なってくるということに注意が必要である。

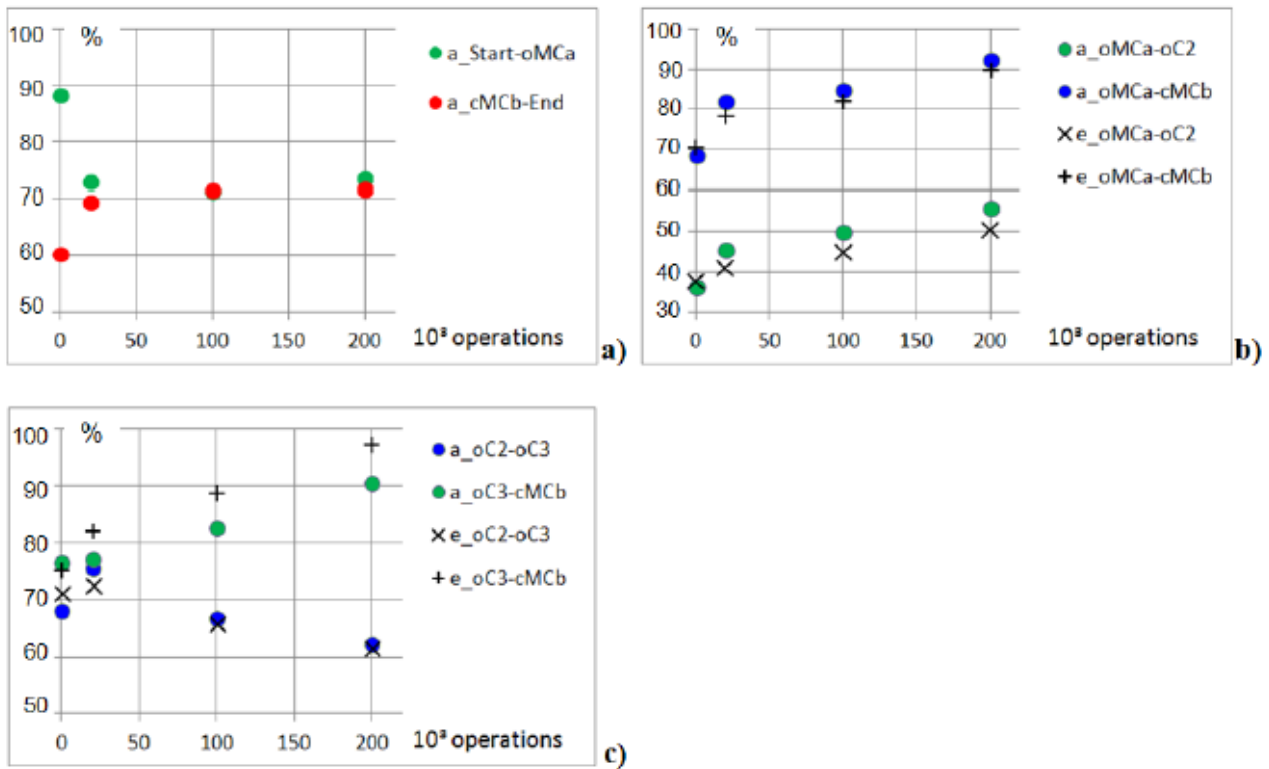


図 7： イベント間の時間差に着目した音響イベント (a_xx)、及び電氣的イベント (e_xx) との比較

6. 現場での事例

従来、数多くの調査で用いられてきた診断方針は、長期的な傾向を分析したり、多数の同形を統計的に比較したりするというものであった。これらの方法は、所与の OLTC について、その動作原理や詳細な設計基準の深い知識が容易には得られない場合に利用可能な唯一の手段である。これらの「ブラックボックス」的なアプローチのほかに、本論文で提案した手法による現場での測定によっても、最初の 1 回だけの測定で、本アルゴリズムの診断能力を現実的な実際のケースで確認することが可能となった。本セクションでは、この特長についての詳しい事例とともに、そのプロセスを説明する。

図 8 に、通電中の変圧器の現場測定から得られた、抵抗式真空バルブ負荷時タップ切換器の典型的な切換開閉器の音響包絡線 (青の曲線) を示す。ここには同形式の別個体から得られた基準シグネチャー (緑の曲線) も重ね合わせているが、この基準データは本アルゴリズムに組み込まれており、サンプルシグネチャー上で主な切換イベントを検出し、特定する上で重要な役割を果たすものである。この特定の OLTC 形式では、最大 16 件の音響イベントを切換シーケンスの (診断用に意味のある) 各メインステップに関連付けることができる。これには、各接点 (主接点、抵抗接点) の開閉、切換開閉器の動作、ラッチ、機械的停止等が含まれる。

測定曲線と基準曲線間には明らかなずれが見られるが、これらは既に述べたいくつかの要因、たとえば温度変化、センサーの位置、材料や製造上の通常の許容差、さらには考えられる設計変更等から予想されるものである。強力なアルゴリズムはこの種のばらつきにうまく対処できるものでなければならないが、これは、本論文で提案する手法においては、イベント識別の確実性を高めることにより達成可能である。その際には、通常、多くのイベントはその判定を待たず捨てられることになるが、その一方で高いレベルの冗長性を考慮し、切換開閉器の複雑な機械的動作シーケンスをしっかりと解釈できるよう、十分なデータを残しておく。本アルゴリズムによるこの事例では、図に示したとおり、6 件のイベントが高い確実性で自動的に特定されている。これら 6 件のイベントに対し、設計情報や OLTC メーカーの経験に基づくいくつかの判定基準を適用することで、切換開閉動作プロセスを詳細に検証できる。さらに本アルゴリズムの自動モード以外のモードでは、十分な知識のあるユーザーから最小限のガイダンスを受けることで上記以外のイベントの識別も可能

である。

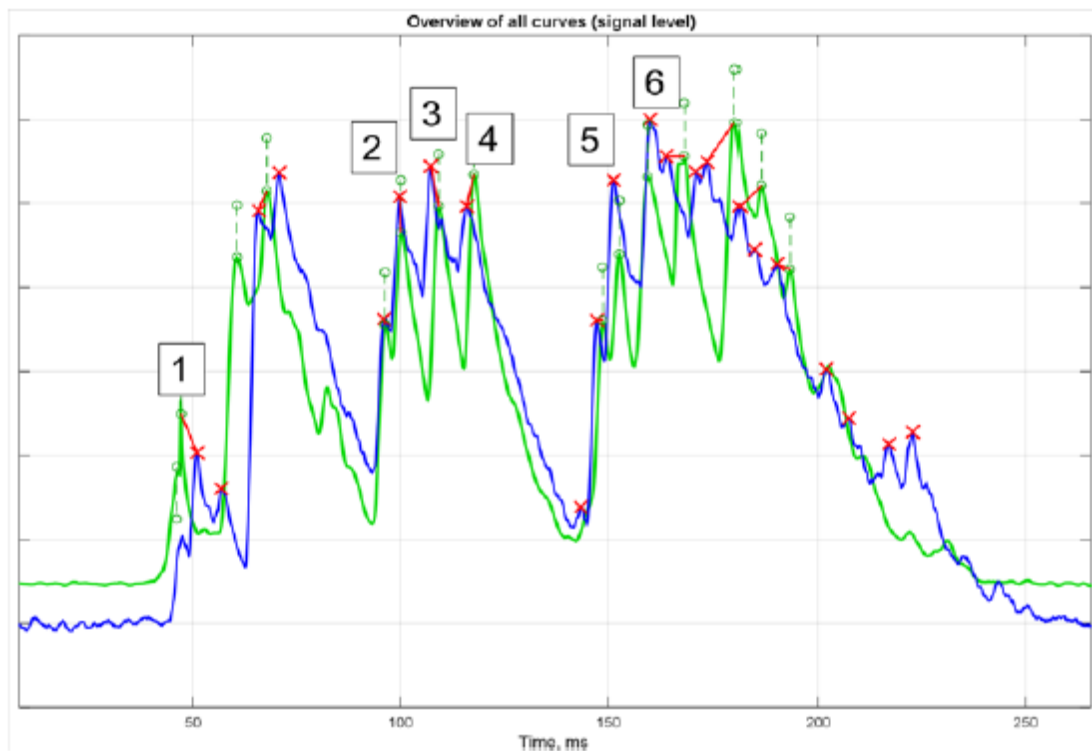


図 8： 実運用中の負荷時タップ切換器 VACUTAP による切換開閉器の解析事例

7. 結論

振動音響法は OLTC の状態を評価するための容易で時間の節約が可能な方法であり、そのため、ここ数十年にわたり多くの研究者チームから大いに注目を集めてきた。これまでに提案された各手法は、音響シグネチャーの時間的なずれを解釈するために傾向分析や統計手法を使う「ブラックボックス」モデルに大きく依存してきた。しかし、このようなブラックボックスモデルを使いながら実用的で信頼性の高い診断を可能にするためには、多くのデータと労力が必要である。

本論文では、OLTC の動作や設計に関する OLTC メーカーの深い知識を組み込むことで従来のブラックボックスモデルにつきものの多くの限界を効率的に取り除くことができる、新しいアルゴリズムを提案した。この新アルゴリズムの最も興味深い特長は、最初の 1 回の測定結果だけで所与の OLTC 個体の詳細な検証が可能なこと、また、切換シーケンスにおける個々のイベントについてこれまでにない詳細な内容が得られることにある。これを達成するため、本論文で提案した手法ではイベントタイムシーケンスの検出と解釈を最適化している。

参考文献一覧

- [1] T. Bengtsson et al., M. Foata et al. "Acoustic Diagnosis of Tap Changers" (Paper No 12-101, CIGRÉ Session, 1996).
- [2] R. Vilaithong et al. "On-Line Tap-Changer Diagnosis Based on Acoustic Technique" (Paper S3-5, Mat Post 07 - 3rd European Conference on HV and MV Substation Equipment, Lyon, 2007).
- [3] D. McPhail "Condition Analysis and Assessment of On-Load Tap-Changer Acoustic Monitoring Principles and Techniques" (Proceedings of Energy 21C Conference, Melbourne, 2009).
- [4] L. Allard et al., M. Foata et al. "Vibro-Acoustic Diagnostic : Contributing to an Optimized On-Load Tap Changer (OLTC) Maintenance Strategy" (Paper No A2-202, CIGRÉ Session, 2010).
- [5] A. Cichon et al. "Characteristic of Acoustic Signals Generated by Operation of On-Load Tap-Changers" (Optical and Acoustical Methods in Science and Technology, Vol. 120, No 4, 2011).
- [6] M. Gauvin et al. "Field Experience with Tap-Changer and Bushing Monitoring" (Paper PS1-O-9, CIGRÉ

SC A2 & D1 Joint Colloquium, Kyoto, 2011).