

電気設備診断技術の開発と診断装置の製品化

Development of Diagnostic Technologies for Electrical Facilities and Portable Instruments Utilizing These Techniques

小田 将広 ODA Masahiro JFE アドバンテック 商品技術開発センター 商品技術開発部技術開発グループ長・博士(工学)
 瀧上 芳樹 FUCHIGAMI Yoshiki JFE アドバンテック 計測診断事業部 東京営業グループ長
 澤邊 祐樹 SAWABE Yuki JFE アドバンテック 商品技術開発センター 商品技術開発部第二機器開発グループ

要旨

電力設備の活線下状態監視技術として、絶縁破壊の前駆現象となる部分放電を検知するために、AE (Acoustic emission) および超音波を利用する診断技術を開発し、その技術を実装したポータブル診断器を開発した。AE は地中設備のケーブル端末、断路器などを対象とし、模擬試験体や現場劣化撤去材での部分放電試験を実施し、絶縁部材での部分放電時に発生する AE の特徴を調査した。その結果に基づいて膨大な数の実機検証を行ない、診断技術が実機適用可能であることを実証した。超音波は、従前からあった独自技術である周期性に着目した解析を小型軽量の診断器に実装し、作業性の向上と現場診断とを両立させた。

Abstract:

Detecting partial discharge as a precursor phenomenon of breakdown is effective for insulation deterioration monitoring of electrical facilities. JFE Advantech developed techniques based on two types of acoustic wave, Acoustic Emission (AE) and ultrasound, for diagnosing the electrical facilities in operation. The diagnostic technique with AE has been applied to power distribution facilities such as cable terminals, molded buses, multi-circuit switches, etc. The developed AE diagnosis technique was verified by a field verification with a large number of AE measurements of actual facilities. The ultrasound emitted from the corona discharge has a specific cycle, which is effective for distinguishing between signals from the partial discharge and background noises. JFE Advantech has packaged this unique technique into a portable, small and light-weight hardware which satisfies both of improvement of operability and diagnosis reliability at the actual field.

1. はじめに

製鉄所はもとより、生活環境内にある各種社会インフラにおいて、電力の安定供給は必要不可欠のものとなっている。産業活動や日常生活を支える電気を送配電する電力設備は、生活環境のあらゆる領域に配置され、膨大な数の設備が運用されている。電力はシステムのネットワークが構築されており、一部の異常が全体の機能低下をもたらす恐れがあり、これらの電力設備の保全や状態監視は、電力の安定供給の面から非常に重要であると言える。

送配電の最終部分には、電力ケーブル接続部や端末部、断路器、高圧分岐回路といった端末機器や配電盤内機器、遮断器などの設備がある。これらは、需要家に電力を供給する最終部分に位置しており、高い信頼性が要求されている。その一方、設備状態の点検のための設備の停止、すなわち停電は、電力供給という性格上頻繁になすことができない。そのため、活線下での診断技術が必要とされている。

JFE アドバンテックでは、活線下での電力設備の状態監視・診断として、絶縁破壊の前駆現象である部分放電に着目し、部分放電に伴う現象を検知することで劣化を把握する診断手法と、それをういたポータブル診断器の開発に取り組んだ。

2. 活線下の電力設備診断 —部分放電による劣化検知—

部分放電とは、絶縁材料の内部欠陥や表面の汚損などによって生じる微小な放電で、最終的な絶縁破壊に至る前の劣化の初期段階に生じる現象である。代表的な絶縁材料である有機絶縁材料の場合、部分放電が発生すると絶縁材料が直接的に侵食されるだけでなく、放電により生成したオゾン、活性酸素等により、物理的、化学的な劣化が進行し、最終的に絶縁破壊に至る¹⁾。

一方、絶縁材料において部分放電が発生すると、以下のような副次的な事象が生じる。

- (1) 電氣的パルスの発生
- (2) 電磁波の放出
- (3) 物体内部を伝播する弾性波の放出
- (4) 非可聴音の超音波の放出
- (5) 可聴音の音響や振動の発生
- (6) 絶縁物の分解

すなわち、これらの物理現象を捕捉することで、部分放電の発生を検知することができる。ここで、どの物理現象を介して部分放電を検知するかによって、検知可能な部分放電のレベル、外乱ノイズとの弁別、センサーから部分放電発生箇所までの検知距離などの部分放電検知性、さらには検出装置の規模が異なる。そのため、状態を把握する設備やその環境、状態監視レベルに応じた検知技術を選ぶことが重要である。

上記物理現象の中で、現場において比較的容易に、かつ高い信頼性で部分放電を検知することができる技術として、当社のシーズ技術である

- ・ AE (Acoustic emission)
- ・ 超音波

に着目した。

AE による診断は、3章で述べるようにセンサーを対象物に接触させる必要があることから電気設備ではセンサー設置場所の制約があるものの、絶縁体表面のみならず、絶縁体内部、機器内部等で生じる部分放電も簡便な装置で検出可能であり、AE の発生周期の解析も容易であるという特長がある²⁾。

一方、部分放電に伴う超音波が外部に放出されるのは、部分放電事象が外部に露出して発生している場合である。そのため、絶縁体内部や機器内部での部分放電は超音波では検知できない。しかし、AE とは異なり、対象物から遠隔・非接触で部分放電を検知ことができ、また AE と同様発生周期の解析も容易であるという特長がある³⁾。

3. AE を用いた地中機器絶縁劣化検知技術の開発

3.1 AE とは

部分放電において生じる物理現象のうち、数十キロヘルツ～数メガヘルツの周波数帯域において物体中を伝播する弾性波を AE (Acoustic emission) と呼ぶ。AE は部分放電だけでなく、材料の疲労亀裂進展・破断、面接触・摺動などの事象によっても発生し、固体・液体中を伝播する。微小な損傷に対する感度が高いという特長を持っており、一般の産業分野では、耐圧容器の健全性診断、石油備蓄タンクの底板腐食診断⁴⁾、低速回転軸受の診断⁵⁾ など、さまざまな産業分野における設備診断に活用されている。

一方、電力設備に対しては、ケーブル端末・ブッシング⁶⁾などのケーブル部材や断路器等の絶縁部材内部や界面での欠陥や、油入り変圧器⁷⁾、ガス絶縁開閉装置内部の異常の

検知などに利用されている。

3.2 地中設備の状態監視

近年、電力を送る送電線を地中に埋設する地中化が、都市部を中心に進められている。これら地中設備においては、各設備に接続する電力ケーブルの端末部や接続部にエチレンプロピレン (EP) ゴム材料が多用されてきている。地中化の推進に伴い、長期間稼働中の設備が増加しつつあり、劣化の進行を原因とする設備事故の増大が懸念されている。

部材の更新には停電を伴うことから、これらの部材の経年劣化に対しては計画的に更新を進めることが必要である。しかし、さまざまな温度・湿度などの環境にさらされている個体は、経過年数と劣化状況に明確な相関があるとは限らないため、個々の部材に対する活線下での劣化診断が不可欠となる。しかし、活線中に絶縁ゴム部材の絶縁劣化診断を行なう技術はいまだ確立していなかった。

そのため、当社では、上記のようなニーズを有していた東京電力 (株) 殿と共同で、地中設備のケーブル端末部・接続部の診断に対する AE の適用性検討を実施した^{2,8,9)}。

検討は以下の二段階に分けて実施した。

- (1) 第一ステップで、模擬欠陥を設けた試験体による部分放電試験により AE での部分放電検知性を検証した。
- (2) 第二ステップで、稼働中の実機及び現場撤去部材について AE 測定を実施し、手法の有効性を評価した。

これらにより AE による設備診断の現場適用が可能であることが明らかとなり、現場で簡便に AE 診断を実施するための診断器の開発に着手、その有効性を確認した。

3.3 模擬損傷試験体による部分放電試験

AE による設備診断を実施するうえでは、まず実形状の部材において部分放電時に発生する AE の挙動を明確しておく必要がある。そこで、模擬欠陥を設けた試験体や現場撤去した部材に対して、高電圧を印加する部分放電試験を実施した。

3.3.1 供試体

供試体としては、顧客の引込口に使用される高圧キャビネット内で3個ある開閉器同士をつなぐ導体として使用している EP ゴムモールド母線の実設備撤去材を用いた。3相のうち、中央の相の EP ゴム内部に部分放電が発生するように、ゴム部材の表面直下にピンホールの模擬欠陥を作成し、部材を組み立て、3相組み合わせの試験体とした。図1に模擬欠陥位置と、AE センサーを用いた AE 測定箇所を示す。

3.3.2 測定装置

測定装置は交流高電圧印可装置、部分放電検出装置、AE 測定装置からなる。図2に測定ブロック図を示す。

AE 測定装置としては、AE センサー、プリアンプ、汎用の AE 計測器とデジタルオシロスコープを用い、AE 波形を記録して、後解析に用いた。

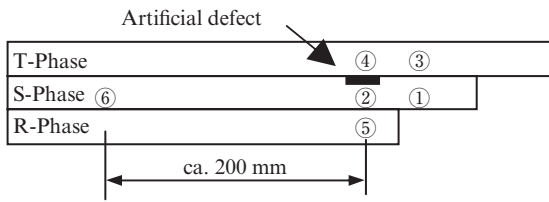


図1 模擬欠陥位置とセンサー設置位置 (①～⑥)

Fig. 1 Position of artificial defect and acoustic emission (AE) measurement (①～⑥)

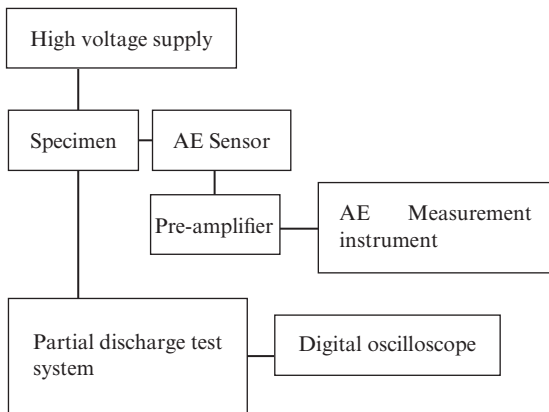


図2 部分放電試験機器構成

Fig. 2 Experimental system of partial discharge (PD) test

供試体の表面電位は接地されているため、AEセンサーは、絶縁手袋を用いて、手で保持しながら、グリスをカプラントとして用いて供試体に接触させた。

3.3.3 実験結果

(1) AE 振幅

供試体に直流高電圧を印可すると、部分放電が発生した。印可電圧を変化させ、部分放電検出装置で部分放電電荷量を測定するとともに、AE 波形の振幅を求めた。

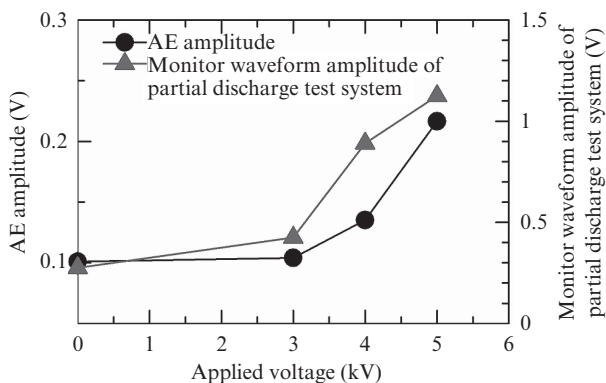


図3 直流印加試験における AE 振幅と部分放電電荷量の関係⁹⁾

Fig. 3 Relationship between acoustic emission (AE) amplitude and partial discharge during direct current (DC) high voltage supply tests⁹⁾

これらの関係を図3に示す。印加電圧の上昇とともに部分放電電荷量は増大するが、AE 振幅も同様に増大している結果が得られた⁹⁾。したがって、部分放電に伴い発生する AE の振幅は、生じた部分放電の大きさ、すなわち部分放電電荷量と強い相関関係を持つことが確認できた。したがって、測定した AE の振幅から部分放電の程度を推測できるといえ、同一部材を定点観測すれば劣化進行の評価が可能であると考えられる。

(2) AE の周期性

実稼働の電力設備と同じように、交流 50 Hz の高電圧を印可して、AE の発生状況を調査した。この場合、印可電圧は一定とし、部分放電が安定して発生する状況とし、AE センサーは図1に示す①～⑥に順次移動させ、測定を行なった。AE 検波波形を図4に示す。

ほとんどの場所で明瞭な周期性が見られ、その周期は 0.01 秒 (100 Hz) であり、電源周波数の 2 倍に一致した⁹⁾。部分放電は欠陥に生じる電位が或る閾値を超えると発生するため、交流電圧下では基本的に 1 サイクルに 2 回、部分放電が集中的に発生する。このことから、測定された AE 波形は部分放電に起因するものであるといえ、換言すれば、部分放電に伴い発生する AE もまた基本的に電源周波数の 2 倍の周期性を持つということである。なお、部分放電の発生形態によっては、片極のみで部分放電が生じる場合もあり、この時は電源周波数と同じ周期で AE が発生する。

図4からは、周期性の他に、模擬欠陥直近の①、②で最

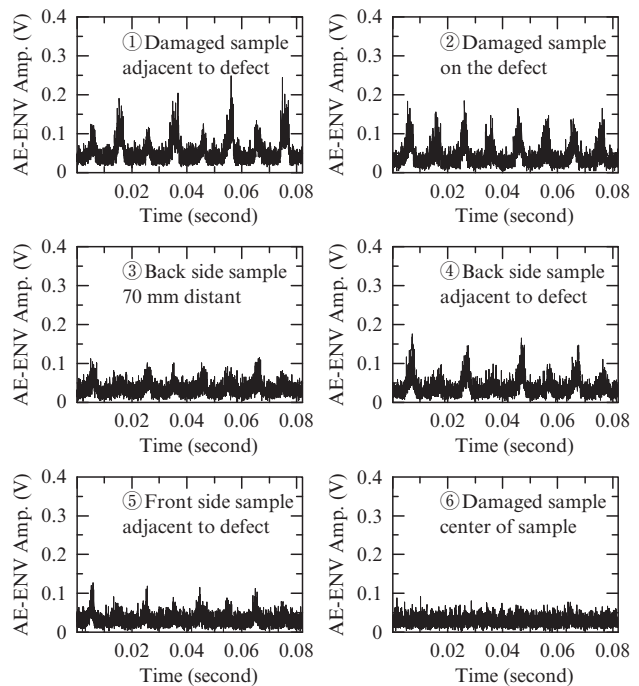


図4 各測定場所での AE 検波波形⁹⁾

Fig. 4 Acoustic emission envelope (AE-ENV) waveforms at each sensor position⁹⁾

も大きな振幅が測定され、模擬欠陥から離れるにつれ振幅が低下する様子が観察された。これは、ゴム部材内をAEが伝搬する距離が長くなるにつれ、AEが減衰していると考えられ、このことから、測定したAEが部分放電に伴うAEであると言える。

モールド母線の他、終端絶縁材料、絶縁柱、高圧分岐装置端末（ロードブレイクエルボ）など、さまざまな試験体を用いた基礎試験の結果、絶縁ゴム部材内部の欠陥により50 pC程度の部分放電が生じれば、AEにより検知可能であり、発生周期や測定場所による振幅変化を利用することでより信頼性のある診断が可能であることが明らかとなった。

さらに、運転中に絶縁破壊した部材に隣接して設置されていた同種部材を撤去し、部分放電試験を実施した。30～60 pCの部分放電が発生するとともに、電源周波数の2倍周期で発生する部分放電パルス波形とそれに同期して発生するAEが検知された⁸⁾。したがって、実環境で劣化した部材での部分放電の発生をAEで検知可能であることを確認できた。

3.4 実フィールドでの適用性検証

3.3節に述べた試験で、実環境劣化による部分放電の発生をAEで検知できる可能性が得られたため、実稼働中の実機について活線下でAEを測定し、実環境でのAE測定の適否の検証、および事例蓄積による診断技術としての妥当性検証を行なった。

さまざまな敷設条件、敷設年月、製造年月にある2000ヶ所以上の稼働中の設備に対し、AEを測定し、適用性検証を実施した。その結果、30ヶ所の部材において電源周波数ないし、その2倍の周期性を持つAEが検出された⁷⁾。図5に検出したAE波形及びFFT（高速フーリエ変換）による周

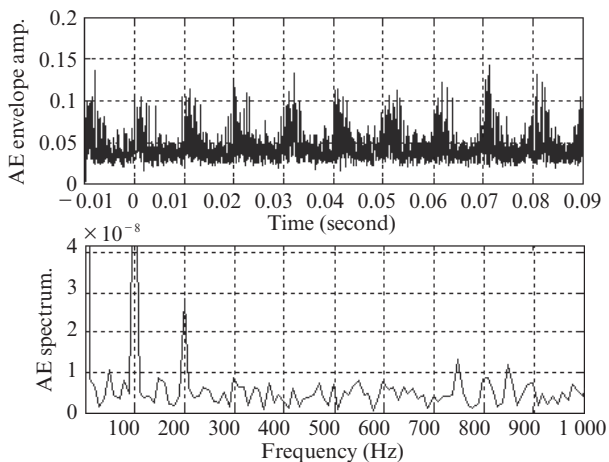


図5 実環境活線下で測定されたAE検波波形（上）とその周期解析結果（下）¹⁰⁾

Fig. 5 Typical results of acoustic emission (AE) measurement for actual equipment under operation (Upper: AE envelope waveform; Lower: its frequency analyzed spectrum)¹⁰⁾

期解析結果の例¹⁰⁾を示す。部分放電試験の結果と同様に電源周波数の2倍周期でAEが顕著に発生している様子が見られる。

これらのことから、実配電設備においても活線下のAE測定による部分放電検知により設備劣化状態を検知できることが検証できた。

なお、これらの開発・検証活動について、東京電力（株）殿と共同で第五十回澁澤賞（日本電気協会）を受賞した。

3.5 AEによる配電設備診断適用範囲の拡大

一連の実環境測定の中で、AEによる部分放電診断の適用範囲を拡大するために、これまでのEPゴム部材以外の部材についても測定を実施し、適用性を検証した。その結果として、AEによる部分放電診断が適用できると判断できた部材は以下ようになる²⁾。

- ・地中機器
 - 供給用配電箱：終端接続部（EPゴム材）
 - モールド製断路器（MDS）電極、MDS母線（エポキシ樹脂材）
 - 多回路開閉器：終端接続部（EPゴム材）
 - 多回路電極（エポキシ樹脂材）
 - 高圧分岐装置：ロードブレイクエルボ（EPゴム材）
 - 地上用変圧器：ロードブレイクエルボ（EPゴム材）
- ・架空機器
 - 柱上用変圧器：コンパクト変圧器一次ヒューズホルダー（エポキシ樹脂材＋金属材）
 - 架空用接続体：内部絶縁筒（EPゴム材）
 - 架空用避雷器：内部ギャップ（磁器材＋金属材）

3.6 ポータブルAE診断器の開発

AEによる部分放電検知を現場活用していくために、簡便かつ確実にAE診断を行なうことができる可搬型の診断装置を開発した。2005年に初代モデルであるAE絶縁劣化診断装置AE-210をリリース¹¹⁾し、配電設備の診断に利用していただいていたが、2012年には、初代モデルの特長をそのままに、さらなる小型化と軽量化を図ったポータブル診断器AE-210 SEを開発した。写真1にその外観写真を示す。

現場での作業性を重視した設計コンセプトは以下とした。

- (1) プリアンプ内蔵のセンサーヘッドユニットの導入
- (2) カラー液晶による周期解析結果のその場表示
- (3) バッテリー駆動
- (4) 可搬性に優れたコンパクトなサイズ・重量
- (5) 極力操作の少ない簡便な操作性

特に、センサーヘッドは高圧用絶縁手袋着用下での使用と狭隘部でのセンサー取り付け性を考慮し、現場からの測定作業性の意見に基づいて寸法を決定した。写真2にAE-210を用いた現場でのAE測定状況例（MDS電極）¹⁰⁾を示す。

診断器本体は、微小なAEを感度良く測定する測定回路、



写真1 AE絶縁劣化診断装置 AE-210SEの外観

Photo 1 Photo of acoustic emission (AE) insulation deterioration diagnostic system "AE-210SE"

写真2 現場でのAE測定状況例¹⁰⁾Photo 2 Typical acoustic emission (AE) measurement situation at an actual field¹⁰⁾

測定した波形をAD変換しデジタル信号化して、信号処理するデジタル回路、測定結果を視認性よく表示するカラー液晶部、測定した波形や診断値を記録するメモリーカード部から構成される。信号処理部では、AE波形の検波処理とFFTによる周期解析を組み合わせて、部分放電特有の電源周波数同期成分を抽出している。

従来、デジタルオシロスコープによる波形観察では、波形形状に明確に周期性が表れない場合はAEによる部分放電検知の判断が困難な場合があったが、現場で周期解析を行なうことで、部分放電成分の認知性を大幅に向上させることが可能となったとともに、周期解析結果から電源周波数に同期する成分強度を数値表示することで、誰でも容易に部分放電に伴うAEの検知有無を判断することができるようになった。

4. 超音波コロナ放電チェッカーの開発

部分放電が絶縁体の表面で生じるコロナ放電、沿面放電では、部分放電に伴い可聴域～超音波領域(数十キロヘルツ)

の音響も同時に周囲の空間に放射される。そこで、音響を測定してこれらの部分放電事象を検知することが可能である。

ここで、対象となる配電設備が設置されている空間では、数キロヘルツ以下の音響が存在することが多い³⁾。そこで、外乱ノイズの少ない帯域である40kHzの超音波を利用する。前述のAEと異なり、センサーを接触させる必要がなく、非接触で診断できるところが超音波を利用した診断技術の利点である。

また、AEと同様に、部分放電に伴い発生する超音波の発生周期も電源周波数に同期することが知られている³⁾。このことを利用して、同じ超音波帯域であっても、外乱ノイズと部分放電に伴う超音波とを弁別することができる。

4.1 コロナ放電チェッカー MK-720の開発

超音波を用いたポータブル放電検知器は、すでに多種多様な製品が存在する。また、前述したように部分放電に伴い発生する超音波の周期が電源周波数に同期することも既知の見解である。ところが、両者を一体化した測定器は、これまで当社のコロナ放電検知器 MK-710 しか存在していなかった。

一方、MK-710 開発時のハードウェア技術では、小型化に限界があったため、さらなる小型化・軽量化による利便性向上を開発コンセプトとして、後継モデルとなるコロナ放電チェッカー MK-720 の開発を行なった。その主な特長は以下のようなものになる。

- (1) 超音波の周期解析から、部分放電に起因する超音波成分のみを抽出
- (2) ボタン一つで測定を開始する簡便な操作性
- (3) 内蔵する信号処理用プロセッサの高速FFTによるリアルタイム処理
- (4) 小型・軽量かつバッテリー駆動
- (5) パラボラを用いた集音による感度・指向性の向上
- (6) 受信した超音波の波形データ記憶
- (7) 独自のロジック（電源周波数に同期した周期成分強度の全体に対する比＝放電成分比率）による測定結果の数値化

コロナ放電チェッカー MK-720 の外観を**写真3**に、また、MK-720 の使用状況例を**写真4**に示す。

4.2 MK-720 による部分放電検知事例

MK-720 での部分放電検知事例として、特別高圧設備である275kV 断路器における事例を示す。断路器から3m以上離れた箇所からMK-720で測定を行なった結果、ほとんどの箇所部分放電発生指標としている放電成分比率が1～3%程度であったが、ある箇所では9%とやや高めの数値を示した。

MK-720 は波形を記録するとともに、その波形の周期解析結果も記録する。得られた各周期成分の全体強度に対する



写真3 コロナ放電チェッカー「MK-720」の外観
Photo 3 Photo of corona discharge checker "MK-720"



写真4 コロナ放電チェッカー「MK-720」使用状況例
Photo 4 Typical measurement situation using corona discharge checker "MK-720"

比率を図6¹²⁾に示す。それぞれの横軸は、グラフ化の際に電源周波数で除して無次元化している。すなわち、横軸=1は電源周波数相当である。

周期解析結果から、電源周波数とその整数倍の高調波成分が明瞭に見られており、当該部位でコロナ放電が生じていると考えられる。

この事例の部分放電発生の原因は、がいしの汚れであり、降雨により汚れが落とされれば収まる状況と推定された。

5. おわりに

電力設備の信頼性向上と効率的な保全のために、活線下で状態診断を行なう技術として、AE及び超音波を測定して部分放電を検知する手法に基づく診断技術と、それを実装したポータブル診断器を開発した。

AEでは、多数の実機検証を経て、従来は困難であったEPゴム部材をはじめとする電力設備の状態診断を可能とした。今後は、電力システムのより上工程となる送変電設備の診

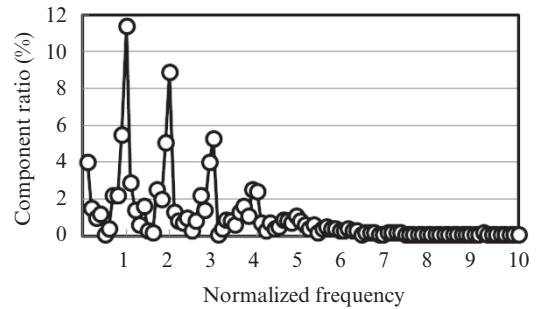


図6 275 kV 断路器から放出された超音波の周期解析結果¹²⁾
Fig. 6 Frequency spectrum of ultrasonic wave emitted from insulator of 275 kV disconnecter¹²⁾

断へと適用範囲を拡大することが期待できる。

超音波に関しては、従来技術をベースに、可搬性、操作性に優れた診断器を開発した。今後は、より高感度、より広範囲へと診断性能をレベルアップさせ、一層効率的かつ信頼性のある保全技術への革新を図っていきたいと考える。

参考文献

- 1) 電気学会. 部分放電劣化. 電気学会技術報告(II部). 1974, no. 164, p. 17.
- 2) 日下則宏, 小田将広. AE法を用いた配電機器の異常診断技術. 平成21年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集. 2009, p. 41-17-41-18.
- 3) 末長清佳. 部分放電検出装置を利用した音響による変電設備の絶縁劣化診断技術の開発. 火力原子力発電. 1999, vol. 50, no. 513, p. 703-710.
- 4) 前田守彦. AE法による地上タンクの保安全管理. 非破壊検査. 2007, vol. 56, no. 5, p. 220-224.
- 5) 小田将広, 吉良耕一, 岡本謙. 低速回転軸がり軸受診断技術の開発と実設備検証結果. 日本機械学会第11回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集. 2012, p. 69-72.
- 6) 宇都宮清司, 倉石隆志, 高橋俊裕, 鈴木寛. 電力用ブッシングの内部絶縁異常に対するAE信号測定の適用性検討. 平成21年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集. 2009, p. 41-11-41-12.
- 7) 電気学会. 油入変圧器保守診断技術の最新動向. 電気学会技術報告. 2010, no. 1191.
- 8) 武田憲二郎, 柴田隆之, 小田将広. 現場でのAEセンサによるEPラバー絶縁材の部分放電検出試験と今後の劣化診断への適用可能性. 平成14年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集(分冊B). 2002, no. 354, p. 224-225.
- 9) 谷内春香, 日下則宏, 小田将広. 地中埋設線関連電力設備劣化診断(部分放電検知)へのAE法の適用. 電気現場技術. 2005, vol. 44, no. 512, p. 41-47.
- 10) 小田将広. 部分放電の測定による活線下電力設備診断技術とポータブル診断器. 電気現場技術. 2012, vol. 51, no. 603, p. 12-17.
- 11) AE絶縁劣化診断装置「AE-210」. JFE技報. 2011, no. 27, p. 65-66.
- 12) 内田洋之, 澤邊祐樹, 持田武志, 友定良仁. 超音波を利用したコロナ放電チェッカーの開発. 電気学会第44回電気電子絶縁材料システムシンポジウム予稿集. 2013, p. 123-124.



小田 将広



淵上 芳樹



澤邊 祐樹