

真空遮断器を対象とした部分放電検知の劣化診断技術の開発

朝倉 匡俊^{a)}・岸本 惠修^{b)}・三宅 琢磨^{c)}・迫田 達也^{d)}
壺岐 祐典^{e)}・前田 健作^{e)}

Development of Diagnostic Technique of Insulation Deterioration for Vacuum Circuit Breaker by Partial Discharge Detection

Masatoshi ASAKURA, Keisyu KISHIMOTO, Takuma MIYAKE, Tatsuya SAKODA
Yusuke IKI, Kensaku MAEDA

Abstract

A lot of vacuum circuit breakers (VCBs) have been installed for a period of high economic growth. Such VCBs are desired to be used until their application limit while maintenance cost should be reduced. Therefore, to realize the diagnostic technique which can be applicable even under the operating condition is important. In this study, partial discharges (PDs) occurred on the insulation material surface of a VCB were detected using an electromagnetic wave (EM) sensor. Characteristics of the detected EM waves were investigated. Based on the results, we made a prototype model with an analyzing program utilizing a LabVIEW.

Keywords: Electromagnetic wave sensor, Partial discharge, Vacuum circuit breaker

1. はじめに

過電流や地絡、短絡電流を瞬時に遮断する真空遮断器(VCB: Vacuum Circuit Breaker)は、事故の拡大を抑える他、電力供給の信頼性の確保を担っている。一般的に、真空遮断器は配電盤(キュービクル)内に格納されており、点検時以外に扉を開けることはほとんどない。そのため、設置環境が塩害地域であったり、高温、高湿度で結露しやすい環境、腐食性ガスや塵埃の付着が多い場所においては、絶縁部の汚損及び劣化による絶縁不良が起こる。すなわち、VCBの絶縁フレームに汚損物の堆積や結露が進行することで絶縁フレームの表面抵抗が低下し、部分放電(PD: Partial Discharge)が発生する¹⁾。同放電が進展することにより、最終的にトラッキング破壊に至る。

ところで、高度情報化においては良質な電気の安定的な供給が強く求められている。その一方で、2016年4月からの電力小売り全面自由化が解禁され、多数の特定規模電気事業者の新規参入も始まっている。(2016年4月1日現在で小売電気事業として280件が登録済)その中で、競争社会を勝ち抜くためには、電力設備の維持、管理、運用、

監視などにかかるコスト削減が要請されている。最近では、高度成長期に大量に導入された電気設備が寿命を迎えてきているが、中には寿命年数を超えて使用されているものもある。これらの電気設備は、外見上は問題が見られないものでも、使用年数に応じて劣化が進行している可能性がある。これに対して、寿命年数に達していないものでも、設置環境が過酷な場所であれば、直ぐに故障してしまう可能性もあり、様々な要因で電気設備の寿命は変化する。このように劣化が進行する機器の監視、保守、診断、寿命を評価する手法の一つに、PD検出技術がある²⁾。

絶縁破壊の前兆現象であるPDは、絶縁体中の異物やボイド、もしくは絶縁体表面の汚損などにより発生し、振動、音、光、熱、ガスの分解、電磁波、突発電流などの現象を引き起こすため、これらの現象を測定することで劣化の有無を判断することができる。発生初期のPDの放電電荷量が例え小さくとも、継続して発生することにより絶縁体が侵食され、最終的には絶縁破壊に至る。そのため、PD計測は機器の絶縁状態を判定するのに有効な手段である³⁾。本研究では、PD発生の際に二次的に発生する振動、音、光、ガスの分解、突発電流、電磁波の中でも特に電磁波に着目して、VCBが収納されているキュービクル外からPD計測を行い、VCBの劣化診断を行うことを目指している。

本報では、電磁波センサを用いたPD検知による絶縁劣化診断技術の開発のため、模擬電極を用いた基礎検討に加え、診断装置で使用予定のアンテナ特性の評価、診断装置

a)宮崎大学工学研究科電気電子工学専攻大学院生
b)宮崎大学工学研究科工学専攻エネルギー系コース
c)宮崎大学工学部技術職員
d)宮崎大学工学教育研究部電気システム工学科教授
e)旭化成 EIC ソリューションズ株式会社

を構成する上での問題点及び問題点解決方法の検討、以上を踏まえた診断用プログラムも含めた VCB 用絶縁劣化診断装置のプロトタイプ開発に関して述べる。

2. 電磁波検出に用いるアンテナ比較

VCB 用劣化診断装置を構成する上で、使用するアンテナの選定は重要である。今回用いた 2 種類のアンテナを図 1 に示す。図 1(a)のアンテナ(第一電波工業社製、Model: RHM-8B、以降はアンテナ A と記す)は全体長が 1.78 m と長く、材質が金属であったため、工場内や変電所内で使用するには不向きであった。そこで、図 1(b)のアンテナ(Watson 社製、Model: W-881、以降はアンテナ B と示す)を取り入れ、同アンテナの特性を確認した。なお、新アンテナは全体長が 0.41 m とこれまでのアンテナの約 4分の1の長さであり、材質も非金属であるため採用した。また、両アンテナともモノポールアンテナである。



(a) アンテナ A (RHM-8B).



(b) アンテナ B (W-881).

図 1. 本実験で用いた 2 種類のアンテナ.

2.1 実験方法

図 2 に実験装置の概要を示す。商用周波である 60 Hz の交流電圧 0.9~1.4 kV を図 3 に示す模擬放電電極に印加した。模擬放電電極は真鍮で作製されており、電極形状は針対平板電極である。さらに平板電極は厚さ 1 mm のガラスで覆われている。模擬放電電極はキュービクル(横幅 900 mm、奥行き 840 mm、高さ 1150 mm、鉄板厚 2.3 mm)内に配置されている。放電により発生した放電電流は、高周波 CT(Current Transformer)センサ(PRODYNE Technologies 社製、Model: I-125-1HF)で検出した。放電により発生した放射電磁波は、前述した 2 種類のアンテナで検出した。放射電磁波と放電電流は、オシロスコープ(YOKOGAWA 社製、Model: DLM2034)にてサンプリング速度 62.5 GS/s で取得した。また、放射電磁波検出時には、CT センサにて検出された放電電流をトリガとして利用し、放電電流が発生した瞬間の放射電磁波を検出した。

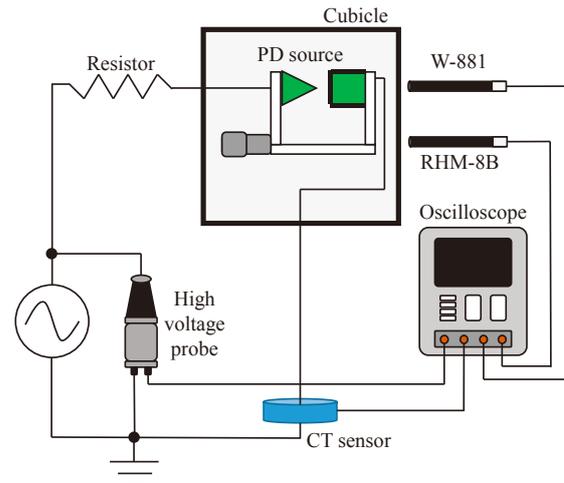


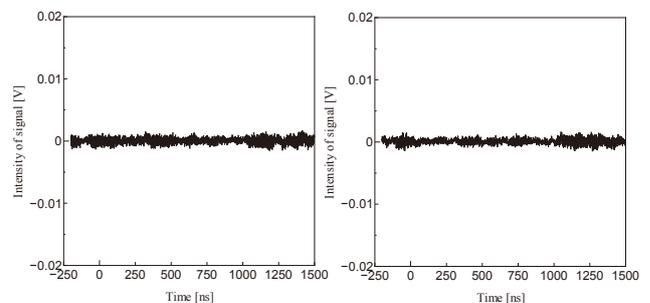
図 2. 実験装置の概要.



図 3. 模擬放電電極.

2.2 実験結果及び考察

図 4 に両アンテナで検出した無放電時の信号波形を示す。さらに、図 4 の信号波形を FFT(Fast Fourier Transform)処理した波形を図 5 に示す。図 4 より、無放電時に検出された信号強度の平均値は 0.001 V 程度とかなり低いことが確認された。また、図 5 より、無放電時に検出された信号波形の周波数特性は、0~100 MHz まで様々に分布していることが確認された。一般的に、無放電時(環境ノイズ)は、特定の周波数成分を持たないため、図 5 のような結果が得られたと考えられる。



(a) アンテナ A の場合. (b) アンテナ B の場合.

図 4. 無放電時の信号波形.

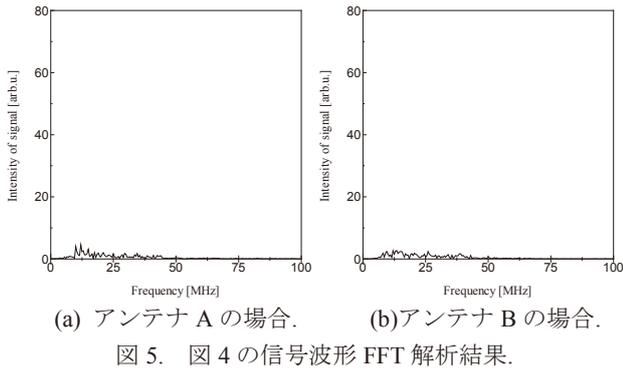


図 5. 図 4 の信号波形 FFT 解析結果.

図 6 に放電電荷量 130 pC 発生時に検出された信号波形を示す。さらに、図 6 の信号波形を FFT 処理した波形を図 7 に示す。図 6 より、アンテナ A では最大約 0.015 V の信号を、アンテナ B では最大約 0.010 V の信号を検出していることが確認された。無放電時と比較すると、検出波形に明らかな異なる点が見られた。このことより、図 6 の波形では、部分放電により発生した放射電磁波を検出していると判断した。また、図 7 より、アンテナ A では 10~40 MHz 付近の周波数成分を、アンテナ B では 10~20 MHz、40 MHz 付近の周波数成分が確認された。これも、無放電時と比較すると、明らかに周波数成分が大きいことが確認された。このことより、部分放電により発生する放射電磁波には、20 MHz、40 MHz 付近の周波数成分が含まれていることが確認された。以上の結果より、無放電時の信号強度との信号強度比較及び、10~40 MHz 付近の周波数成分強度に着目することで、部分放電検出の可能性が示唆された。

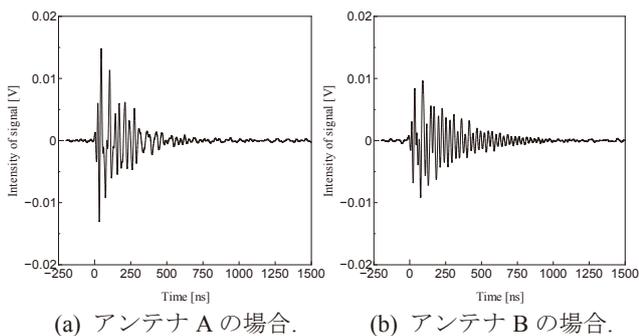


図 6. 放電電荷量 130 pC 時の信号波形.

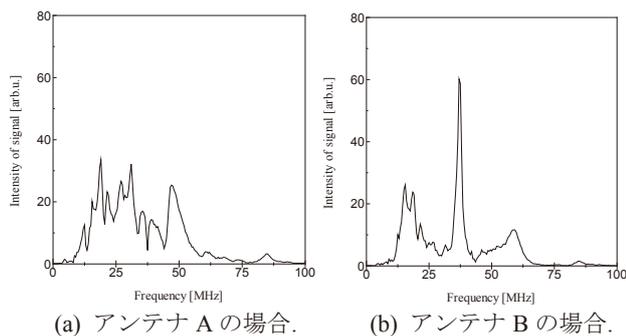


図 7. 図 6 の信号波形 FFT 解析結果.

図 8 に、アンテナ A とアンテナ B における放電電荷量と電磁波信号強度の関係を示す。両アンテナを比較すると、どちらも線形性を確認できるが、同じ放電電荷量に対する電磁波信号強度は、アンテナ A の方が高いことが確認された。この原因は、アンテナ A とアンテナ B の周波数帯域幅の違いだと考えられる。アンテナ A の周波数帯域幅は 7~50 MHz であるのに対して、アンテナ B の周波数帯域幅は 25~1900 MHz である。図 7 より、部分放電により発生する放射電磁波には、10~40 MHz 付近の周波数成分が含まれていることが明らかになっているため、アンテナ B では 10 MHz 付近の周波数成分が周波数帯域幅の範囲外であることが分かる。従って、アンテナ A の方が、同じ放電電荷量に対する電磁波信号強度が高くなったと考えられる。

しかし、前述したように、アンテナ A はアンテナ長が長く、アンテナ部も金属でできているため、実フィールドでの使用は適さない。一方でアンテナ B は、電磁波信号強度としてはアンテナ B に劣るが、アンプによる増幅を行うことで電磁波信号強度の問題は解決でき、且つアンテナ長がアンテナ A の約 1/4 程度で、アンテナ部が非金属であることを考慮して、VCB 用劣化診断装置に用いるアンテナは、アンテナ B が適していると判断した。

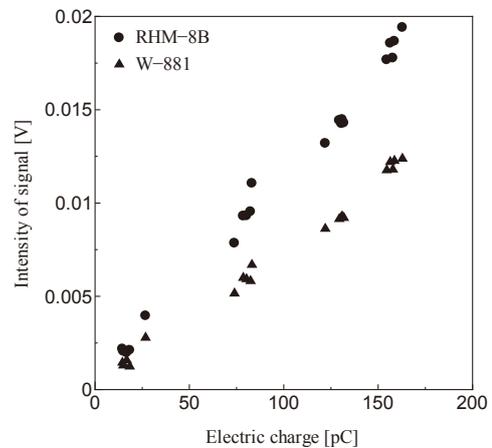


図 8. 放電電荷量と電磁波信号強度の関係

3. アンテナからの出力信号の処理

開発する劣化診断装置は、小型かつ持ち運びが可能であることを前提としているため、オシロスコープなどの大型の測定装置類は使用できない。そこで、測定装置類を PC のプログラム上で構成する方法を採用した。PC 上で測定装置を構成するためのプログラムとしては LabVIEW(Laboratory Virtual Instrumentation Engineering, National instruments 社製)を使用した。LabVIEW はグラフィック型言語によってプログラムすることができ、主に計測用に用いられる。LabVIEW にて測定装置を構成することで、オシロスコープなどを使用しなくても波形表示や波形解析、PC への直接データ保存などが可能となる。さら

に、測定装置がすべて PC 上で動作するため、外部電源も不要となり、測定環境に電源がない場所でも測定可能であることもメリットである。しかし、LabVIEW を使用する際は、アンテナからの電気信号を取得する際にインピーダンスマッチングに留意する必要がある。LabVIEW を使用することで、オシロスコープが PC に置き換わるが、アンテナからの電気信号を PC に直接取り込むことはできないため、アンテナと PC の間に A/D(Analog to Digital)コンバータを配する。しかし、アンテナの出力インピーダンスは 50Ω で、A/D コンバータの入力インピーダンスは $1 \text{ M}\Omega$ であり、インピーダンスが不整合となる。そのため、図 9 のような歪みが測定波形に含まれる。これを解決するために、インピーダンス整合器(Tektronix 社製、Model: 011-0049-02)を用いた。インピーダンス整合器を使用することで、出力される信号強度が約 50%低下するが、整合器の後にアンプを追加して信号の出力低下を解消した。

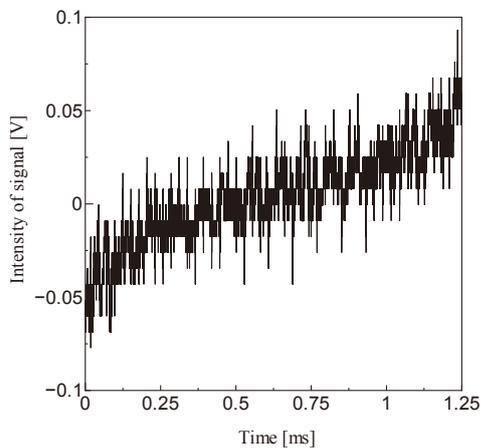


図 9. インピーダンスマッチングが不整合の状態.

4. VCB 用絶縁劣化診断装置のプロトタイプ

VCB 用絶縁劣化診断装置のプロト機を作製した。このプロト機の特徴は、測定から解析まで 1 台の PC で行うことができることにある。さらに、測定毎にデータを保存し、以前測定した結果と比較できる傾向管理機能も搭載することとした。プロト機の構成は、前章で述べた W-881 アンテナ、アンプ(COSMOWAVE 社製、Model: LNA631-WS、20 dB 増幅可能)、アンプ電源(アンプ電源用充電池及び DC-DC コンバータを含む)、インピーダンス整合器、A/D コンバータ(National Instruments 社製、Model: USB-5133)、LabVIEW 搭載の PC である。プロト機の劣化診断アルゴリズムを図 10 に示す。劣化診断は、環境測定、簡易診断、精密診断の 3 つのモードがある。それぞれのモードでは、測定の目的や保存するデータの種類が異なる。いずれの測定モードにおいても、放電による放射電磁波検出感度の向上を目的として、デジタルバンドパスフィルタ処理などの処理プログラムを付与した。

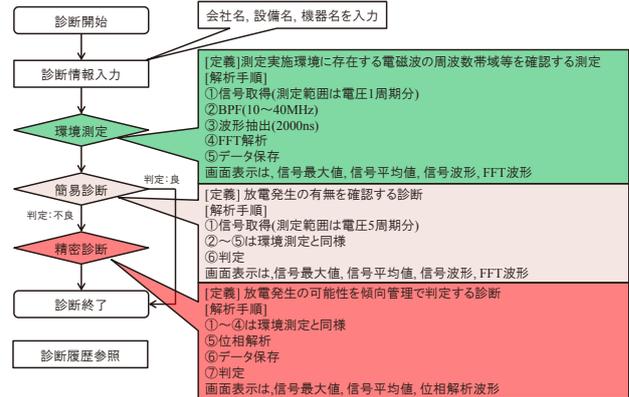


図 10. プロト機の劣化診断アルゴリズム.

環境測定の目的は、測定場の電磁ノイズ信号の検出及び電磁ノイズ信号の周波数解析である。ここでは、電圧 1 周期分の信号波形、信号波形の FFT 解析波形、信号波形の最大値、信号波形の平均値を測定画面上に表示し、取得日時、信号波形の最大値、信号波形の平均値、FFT 解析波形を保存する。1 回の測定に要する時間は約 30 秒である。

簡易診断の目的は、放電の有無を検知することである。簡易診断では、交流周波の 5 周期分の信号波形、信号波形の FFT 解析波形、信号波形の最大値、信号波形の平均値を測定画面上に表示し、取得日時、信号波形の最大値、信号波形の平均値を保存する。放電発生有無の判定基準は、環境測定で測定された信号強度と、簡易診断で検出された信号強度の強度差に加え、簡易診断で検出された信号波形の周波数成分を環境測定時と比較し、10~40 MHz の周波数帯域において顕著な周波数成分が存在するか否かで判定する。なお、信号波形を FFT 解析する際、5 周期分全てを FFT 解析すると、放電による信号波形が占める割合が低くなってしまい、正確な周波数成分が得られない。そのため、信号検出の際に、トリガ検出時の前後 1000 ns の波形を抽出することで、解析の際に不要な信号波形(放電による信号が含まれていない波形)を除くことができる。さらに、デジタルバンドパスフィルタにより、放電による周波数成分以外の強度を抑えることができる。以上の 2 つの処理により、10~40 MHz の周波数帯域において環境ノイズ SN=2 以上の確保でき、明確な放電信号の検出が可能である。簡易診断の結果、放電が発生している可能性が高いと判定された場合、次の精密診断に移行する。

精密診断の目的は、簡易診断において放電可能性が認められる場合に、より詳しく測定を行い、検出した波形が放電による一過性のものか否かなどを傾向管理で判断することである。精密診断では、信号波形の位相情報、信号波形の最大値、信号波形の平均値を測定画面上に表示し、取得日時、信号波形の最大値、信号波形の平均値、位相情報を保存する。

4.1 実験方法

前述した劣化診断アルゴリズム及び測定装置類を用いたプロト機においてPD検知試験を行い、放電を正確に検出可能かの確認実験を行った。図11に実験装置の概要を示す。商用周波である60 Hzの交流電圧1.3~1.8 kVを図3に示す模擬放電電極に印加した。模擬放電電極はキュービクル内中央に配置されている。放電により発生した放電電流は、高周波CTセンサで検出し、オシロスコープで観測した。図11の網かけされている部分がプロト機部分である。電磁波の検出及び解析にはこのプロト機を用いて測定を行った。

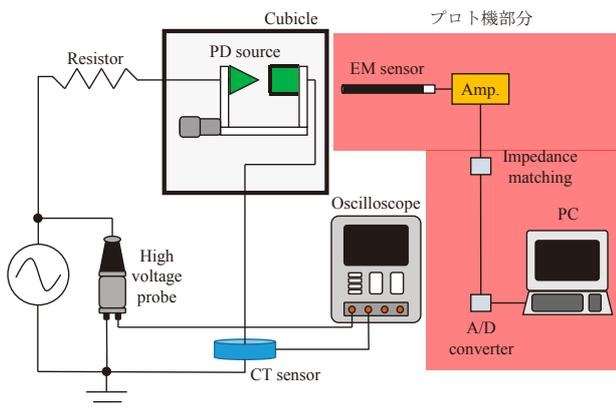


図11. 実験装置の概要.

4.2 実験結果及び考察

図12にプロト機における環境測定結果を示す。環境測定は、無放電時に測定を行っている。同図より、無放電時には特徴的な信号強度は確認されなかった。この時の平均ノイズ最大強度は、0.0136 Vであった。また、FFT解析結果より、特徴的な周波数成分は確認されなかった。

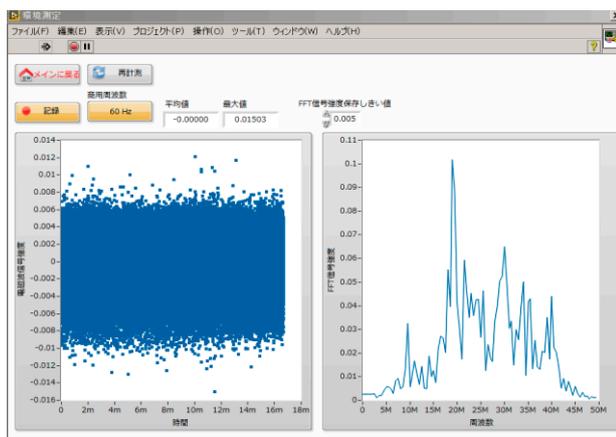


図12. 環境測定の結果.

図13に放電電荷量約50 pC発生時の簡易診断結果を示す。同図より、環境測定時には見られなかった信号強度が確認された。簡易診断時に検出された信号の平均値は0.1269 Vであり、無放電時と比べて約10倍になっていることが確認

された。また、FFT解析結果より、無放電時には見られなかった20 MHz、40 MHzの周波数成分が顕著に現れていることが確認された。この結果は、前章にて行った実験結果とも一致している。

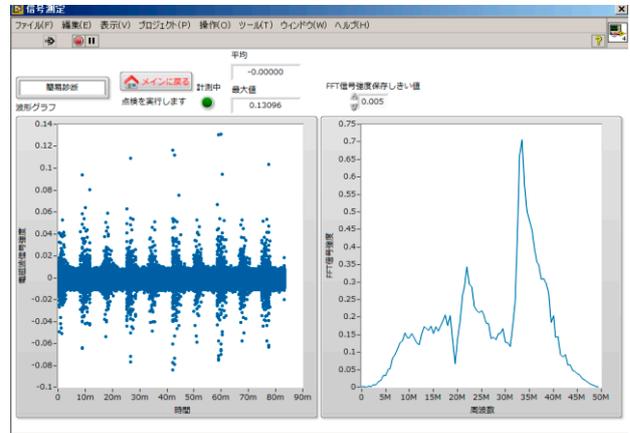


図13. 簡易診断の結果.

図14に放電電荷量約50 pC発生時の精密診断結果を示す。同図より、検出された信号が約8 ms間隔で発生していることが確認された。これは、印加電圧である交流電圧60 Hz(周期16.67 ms)の半周期毎で発生していることが推定できる⁴⁾。

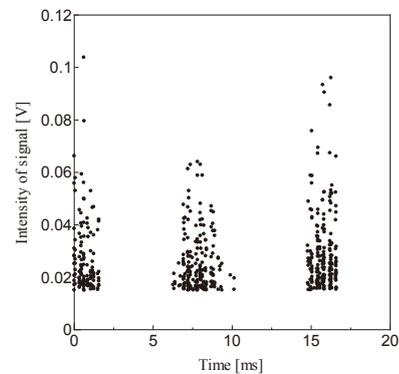


図14. 精密診断の結果.

以上の結果より、簡易診断及び精密診断にて検出されている信号が、PDにより発生している放射電磁波であることが確認でき、プロト機において放電電荷量約50 pCのPDを検出できていると判断できる。

5. 結論

本報では、電磁波センサを用いたPD検知による絶縁劣化診断技術の開発のため、模擬電極を用いた基礎検討に加え、診断装置に使用するアンテナの比較、診断装置を構成する上での問題点及び問題点解決方法の検討、以上を踏まえたVCB用絶縁劣化診断装置のプロト機開発を行った。アンテナは材質が非金属である上、アンテナ長も長くはないも

のを選定し、放電による放射電磁波の検出に問題がないことを確認した。VCB用絶縁劣化診断装置で、LabVIEWを利用した絶縁劣化の傾向を把握するための処理プログラムを有するプロト機は、放電電荷量約50 pC発生時のPDによる放射電磁波の検出が可能であることを明らかにした。

参考文献

- 1) 電気学会 編: 電気設備の診断技術 改訂版, オーム社, 2003.
- 2) 電気協同研究会 編: 劣化診断マニュアル, 電気書院, 1991.
- 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, Vol.50, no. 513, p.703-710, 1999.
- 4) 電気学会電気規格調査会: JEC-0401 部分放電測定, 電気書院, 1991.