

UHF法で測定された電磁波第一波の振幅比に基づく GIS絶縁異常の診断

正員 大塚 信也 (九州工大) 学生員 竹中 賢司 (九州工大)
 学生員 小迫 雅裕 (九州工大) 正員 趙 孟佑 (九州工大)
 正員 松久 孝司 (高岳製作所) 正員 匹田 政幸 (九州工大)

Insulation Diagnosis of GIS Based on Amplitude Ratio of First Incoming PD-induced Electromagnetic Wave Measured by UHF Method

Shinya Ohtsuka, Member, Kenji Takenaka, Student Member, Masahiro Kozako, Student Member,
 Mengu Cho, Member, Takashi Matsuhisa*, Member and Masayuki Hikita, Member
 (Kyushu Institute of Technology, * Takaoka Electric Mfg Co., Ltd.)

This paper describes insulation diagnosis of SF₆ gas insulated switchgears (GIS) by detecting partial discharge (PD)-induced electromagnetic (EM) waves using UHF method. Sensitively detecting PD signals is effective to prevent breakdown in GIS because PD is a pre-breakdown phenomenon. Breakdown in SF₆ gas under nonuniform field takes place when PD type proceeds from streamer to leader discharge. Therefore, breakdown prediction becomes possible by discriminating PD type, that is, by detecting generation of leader discharge. An amplitude of PD-induced EM wave depends on the time derivative of PD current. Experimental results revealed that the time derivative in rising part of PD current for streamer discharge is almost same as that for leader one while that in the falling part is quite different. Thus, one can recognize the generation of leader discharge by noting the ratio of the EM wave magnitude of the positive peak value to the negative one of the first incoming EM wave.

In this study, an attempt was made to discriminate leader and streamer-type discharges on the basis of the amplitude ratio of first incoming EM wave measured with UHF sensors. Furthermore, we investigated effects of trigger level of a digital oscilloscope in the measurement of the EM wave and UHF sensor position on detection sensitivity and discrimination probability of PD type while changing the SF₆ gas pressure and the applied ac voltage. As a result, it was found that leader discharge can be discriminated from streamer one with a probability as high as 70% using a criterion of amplitude ratio of first incoming EM wave $V_{p+} / V_{p-} = 0.7$. When $V_{p+} / V_{p-} = 0.8$ is used as criterion, the discrimination probability increases as high as 80%.

キーワード : GIS, UHF法, 絶縁診断, 部分放電, 放射電磁波, 第一波振幅比

Keywords : GIS, UHF method, Insulation diagnosis, Partial discharge, Induced EM wave, Amplitude ratio of first incoming EM wave

1. まえがき

ガス絶縁開閉装置 (GIS) は、変電機器の小型化、高信頼性を可能とするため現在幅広く使用されている⁽¹⁾。この絶縁媒体ガスとして使用されているSF₆ガスの絶縁特性は、強い電界依存性を有するため、金属異物などの混入により電界不平等部が存在すると、その箇所の部分放電 (PD) が発生し、最終的には全路破壊に至る恐れがある。SF₆ガス中の絶縁破壊特性は、電界利用率とともにガス圧力にも強く依存するが、部分放電を経て破壊に至る場合、ストリーマ放電からリーダ放電に転移して、全路破壊に至ることがわかっている⁽²⁾。従って、このような不平等電界下では、部分放電信号を早期に精度よく検出することで、全路破壊を未然に防止することができることになる。

このような観点から、部分放電信号検出によるGISの異常診断に関する研究が行われている⁽³⁻⁹⁾。筆者らはこれまで、PDにより放射される電磁波および超音波信号をGIS外部や

内部に取り付けた各種センサを用いて測定し、PD検出手法および各信号の伝搬特性を調べると共にPDの発生源の位置標定や発生原因 (欠陥種・異物種同定) を検討している⁽¹⁰⁻¹³⁾。

本研究は、UHF法に基づき測定したPD放射電磁波信号からGISの絶縁異常診断を行うもので、具体的には絶縁破壊に至る過程で出現するリーダ放電をストリーマ放電と識別し、危険度を予測しようとするものである。これらの放電電流波形の時間変化は異なるため、その違いに起因する電磁波波形の特徴 (電磁波第一波の振幅値) に着目し、放電形態を識別することを試みた。

本論文では、モデルGISの高圧導体に針電極を設置して部分放電を発生させ、まず、ガス圧力および印加電圧を変化させて発生する部分放電形態を詳細に調べた。その後、UHF法に基づき電磁波測定により部分放電形態の識別を検討し、同時に測定した電流波形に基づきその識別結果の妥当性を議論した。更に、電磁波測定において問題になると思われる測定器 (デジタルオシロスコープ) のトリガレベル

並びに判定率のセンサ位置依存性を検討した。

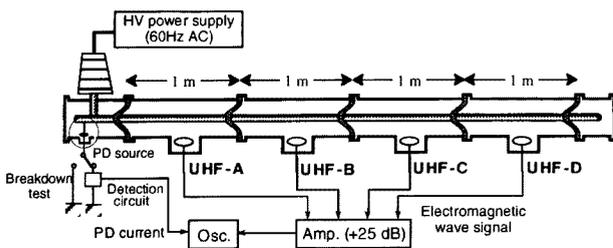
2. 実験装置と方法

(2.1) 実験装置 図1 (a)に実験装置の構成を示す⁽¹⁾。同装置は全長約5 mで、GISの母線部を模擬した構造となっており、高圧導体HVC(外径8 cm)、タンク(内径20 cm)、および5つのコーンタイプのスペーサから構成されている。スペーサで隔離された中央4つのガス区画には、それぞれ直径6 cmの円盤状のUHFセンサ(UHF-A~D)⁽¹⁾が設置されている。各センサ間の距離は1 mで、この後説明するPD発生源である針-平板電極(図1 (b))とUHF-Aセンサとの距離は113 cmである。なお、各ガス区画は、SF₆ガスで大気圧以上に加圧されている。プッシング直下のガス区画には、PD発生源として異物を模擬したステンレス製の針電極(先端曲率半径 $R_{tip} = 0.5$ mm)が高圧導体に取り付けられている。また、これに対向して平板電極がギャップ長10 mmで設置されている。この平板電極は、部分放電測定時にはインピーダンスマッチング回路を介して接地され、PD電流を測定できる。このように、本装置はPD電流およびUHF法に基づくPD放射電磁波を同時に測定できる構成となっている。

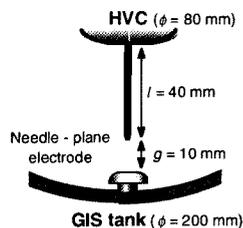
(2.2) 実験方法 PD開始電圧 V_{PD} および絶縁破壊電圧 V_B は、針電極が設置されているガス区画内をガス圧力0.1~0.4 MPaのSF₆ガスで満たし、交流高電圧(60 Hz)を印加して測定した。PD電流は、PDの発生により平板電極に流れる電流をインピーダンスマッチング回路を通し、一方、その放射電磁波はUHFセンサの出力信号をアンプで25 dB増幅した後、両波形データをデジタルオシロスコープ(ソニー・テクトロニクス社製、TDS684B、1.5 GHz・5 GS/s)で同時に測定して記録保存した。

3. 実験結果

(3.1) 部分放電電流波形に基づく放電形態の分類 図



(a) Model GIS and measurement system of PD signals



(b) PD source (needle to plane electrode)

図1 実験装置の構成
Fig. 1. Experimental setup.

2に、図1に示した本実験系(針対平板電極)の部分放電開始電圧 V_{PD} および絶縁破壊電圧 V_B のガス圧力依存性を示す。本特性は、不平等電界下のSF₆ガス中で一般に観測されるもので、 V_B のガス圧力に対する非線形特性(N字型特性)が認められる。以下で行う部分放電形態の検討は、図中のシンボル×で示される点で破壊に寄与する正極性PDを対象として実施した。即ち、ガス圧力条件として、N字型特性のピーク近傍の0.15、0.175および0.2 MPaの3点、印加電圧条件として、正極性 V_{PD} の120%の点と V_B の70%と80%の点および各ガス圧力共通の30 kVrmsの4点である。測定の結果、正極性PD電流波形には、大別すると図3 (a)~(e)に示される5つの形態が存在することがわかった。図3(a)と(e)は、典型的なストリーマ放電とリーダ放電の電流波形と類似するものである⁽⁴⁾。図3(b)と(c)は、(a)の電流パルスが複数重畳されたものと考えられ、(b)の放電2は2つ、(c)の放電3はそれ以上重なり合ったものと定義した。一方、図3(d)は、(e)の最も大きな放電(主パルス)の前の小さな放電が観測されていない急峻な単発パルスと定義した。

図3で定義した各放電形態の出現割合の印加電圧依存性を、各ガス圧力で測定した結果を図4にまとめる。どのガス圧力においても、印加電圧が増加するにつれて放電1~3の出現割合は低下し、一方の放電4、5の出現割合は増加する傾向が明らかに認められた。また、ガス圧力が増加するほど放電4、5の出現割合が大きくなるのがわかる。従って、この結果と図3の電流波形から、放電1~3はストリーマタイプの放電であり放電4、5はリーダタイプの放電であることが推測される。そこで以下では、リーダ放電の検出として、放電1~3と放電4、5を識別することを目的とする。

(3.2) PD電流波形に基づくストリーマ放電とリーダ放電の定義 図3の各放電形態の電流波形を比較すると、放電1~3と放電4、5は電流波形の立ち上がり時間の違いで特徴づけられる。そこで、波形の微少な振動等を考慮して、電流波形の立ち上がり時間 t_r と立ち下がり時間 t_f 、およびその時間変化 i_r' と i_f' をそれぞれ図5のように定義する。なお、PD電流波形のピーク値 I_p は一定ではないため、放電形態の

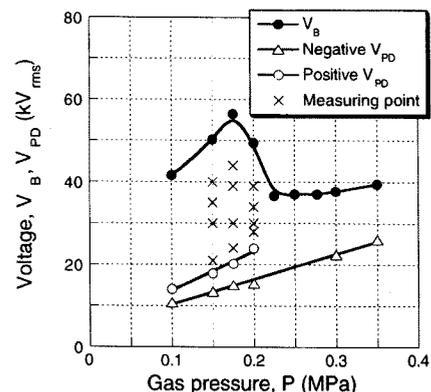


図2 本実験系の絶縁破壊電圧 V_B および部分放電開始電圧 V_{PD} のガス圧力依存性
Fig. 2. Gas pressure dependence of breakdown and PD inception voltages for the electrode system in Fig. 1.

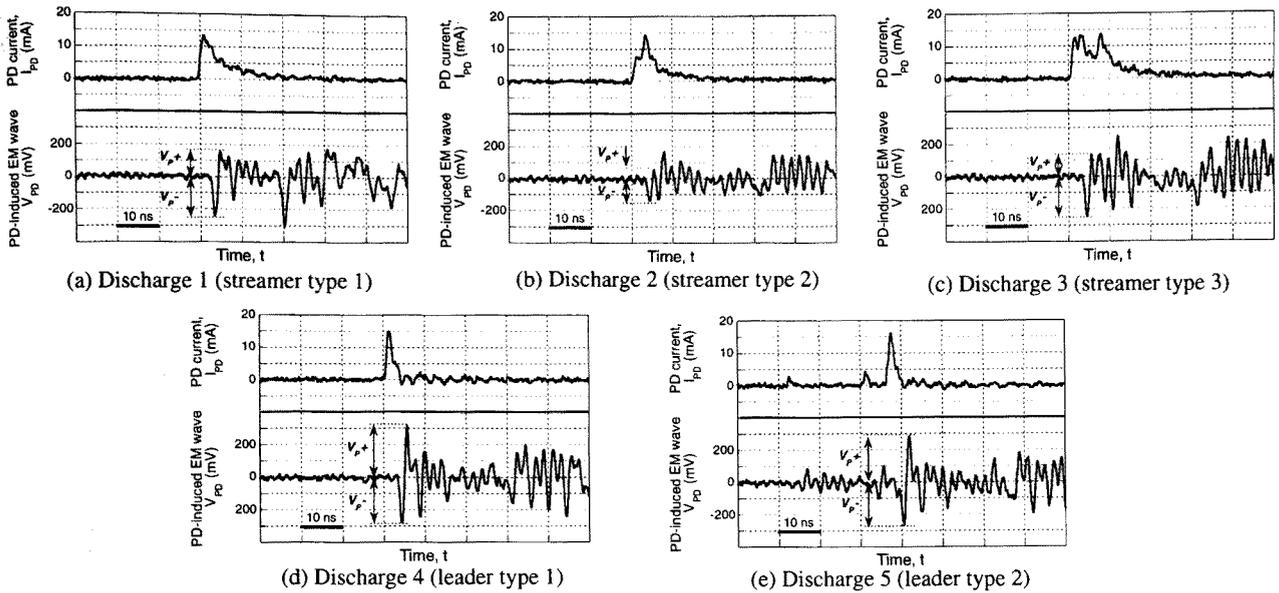


図3 正極性PD電流波形に基づく部分放電形態の定義とUHFセンサで測定した対応する各電磁波波形

Fig. 3. Definition of PD type based on positive PD current waveform and its induced electromagnetic wave measured by UHF sensor.

比較は各波形の t_f の絶対値を比較するのではなく、 t_r と t_f の比を取ることにした。

図6に、代表して放電1と放電5の電流波形の t_r/t_f の比率と個数分布の関係を示す。同図に示されるように、放電1と放電5は t_r/t_f の比に基づきほぼ放電形態が区別できることがわかる。この結果、電流変化の違いを反映した電磁波波形の情報を抽出することで、放電形態を原理的に識別できることがわかる。

放射電磁波の振幅は、電流の時間変化に比例することが知られている⁽¹⁵⁾。図7に示すように、本実験結果のPD電流波形の立ち上がり立ち下りの各電流変化率と対応する放射電磁波の振幅 V_p の関係をまとめると、 V_p は電流変化率に比例していることが認められた。但し、図7において、PD電流の立ち下りに対する V_p の傾きは、立ち上がりに対するものより大きい、これは、電流変化率の定義に起因するものである。即ち、図3に示すように、立ち下り部は立ち上がりのように直線的に変化していないため、その電流変

化は実際より小さく定義されているためである。なお、電磁波波形の振幅 V_p は第一到達波(但し、図3(e)のように複数のPDが発生している場合は、主パルスに対応するもの)を対象とした。これは、図3に示されるように、第一到達波以降の信号は、GIS構造(端部や分岐、スパーサ)による反射等の影響を受けて複雑な波形となっており、単純に電流変化率に依存した振幅とならないためである⁽¹³⁾。

4. 考察

上述のように、ストリーマ放電とリーダ放電は、両者のPD電流波形の特徴である立ち上がり立ち下りの時間の比 t_r/t_f に基づき区別できることが示唆された。また、電流変化率と電磁波第一波の振幅は比例関係にあることが認められた。そこで以下では、このようなPD電流の時間変化に基づく電磁波波形の特徴を利用して電磁波振幅 V_p の情報から放電形態の識別を試みる。

以下では、まず、電流の時間変化と電磁波第一波の振幅

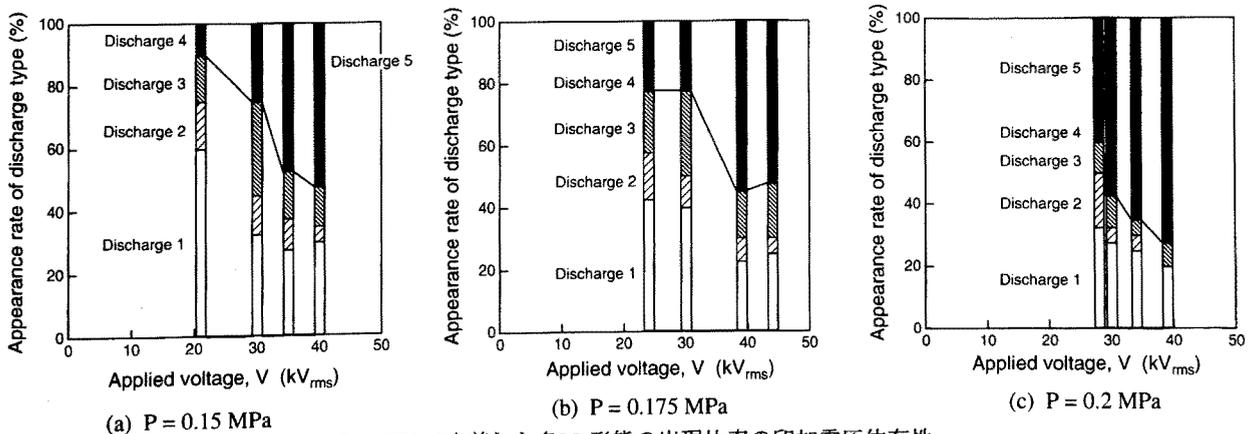


図4 図3で定義した各PD形態の出現比率の印加電圧依存性

Fig. 4. Applied voltage dependence of appearance rate of each PD type defined in Fig. 3.

比の関係をFD-TD (Finite-Difference Time-Domain) 法⁽¹⁶⁾を用いて明らかにし、識別のための判定基準を定める。次に、決定した基準値を用いて、これまで示したPD電流信号にトリガをかけて測定した電磁波データを対象に放電形態識別の判定率を検討する。最後に、実器に適用する場合と同様に、電磁波信号にトリガをかけて測定した電磁波データの判定率を検討する。その際、問題となるトリガレベルおよびセンサ位置の依存性を検討する。

〈4・1〉 FD-TD法による電磁波第一波の振幅比に基づくリーダ放電識別の判定基準決定 図8に、図1の実験回路をFD-TD法(「MAGNA/TDM」、CRC総合研究所)に基づき電磁波第一波の振幅を検討するための解析モデルを示す。同図に示されるように、本モデルは解析の簡単化のため、ブッシングやハンドホール、スペーサ等を無視した単純な同軸構造である。なお、高圧導体およびGISタンクの寸法は実験に用いたGISと一致させている。放電源および測定点は実験回路と同位置とした。分割セルは波長の1/10以下にすることが望ましいため⁽¹⁶⁾、1 GHzの波長(30 cm)を考慮して、1セルの寸法を2 cm×1 cm×1 cm(x×y×z軸)とした。計算の時間刻みは、Courantの安定条件⁽¹⁶⁾より20 psとした。

一例として、図9(a)と(b)に解析に用いた入力電流波形と解析結果である出力電磁波波形をそれぞれ示す。同図に示したSタイプとLタイプの電流波形(立ち上がり)と立ち下がり

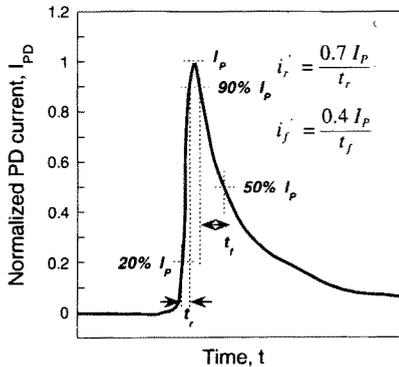


図5 PD電流波形の立ち上がり時間および時間変化率の定義

Fig. 5. Definition of rising and falling time and its derivative of PD current pulse.

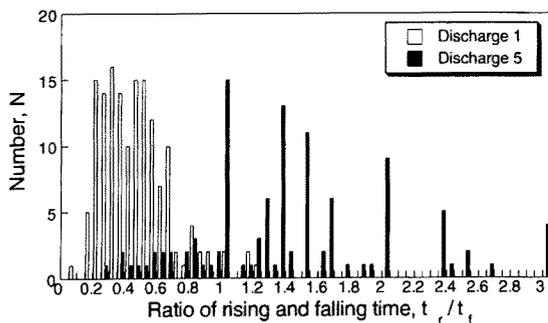


図6 放電1と放電5の立ち上がりおよび立ち下がり時間の比率に基づく個数分布

Fig. 6. Number distribution of Discharge 1 and 5 based on the ratio of rising time to falling time of PD current waveform.

の電流変化率 R_i は0.1と0.5)に対する電磁波第一波の振幅比は、それぞれ0.29、0.69である。このように、入力電流の立ち上がり)と立ち下がり)の時間変化率を変化させて求めた電流変化率 R_i と電磁波第一波の振幅比 V_{p+}/V_{p-} の関係を図10にまとめる。同図から明らかなように、 V_{p+}/V_{p-} は R_i に比例して増加することがわかる。ここで、図6の結果を考慮してリーダ放電検出の判定基準を定める。図6の分布は、 t_r と t_f の定義により変化する(例えば、 t_f を I_p の90%から30%へ低下するまでの時間と定義すると、分布は t_r/t_f の小さい方へシフトする)が、放電1と5は、 t_r/t_f が0.3~1.2において混在しているものの、 $t_r/t_f = 0.9$ 付近で2つの領域に分離できることがわかる。図10に示した電流変化率 R_i と t_r/t_f の関係は、図5に示した t_r と t_f の定義より次式で与えられる。

$$R_i = \frac{4}{7} \frac{t_r}{t_f} = 0.57 \frac{t_r}{t_f} \quad (1)$$

従って、(1)式より、 $t_r/t_f = 0.9$ に対応する電流変化率 R_i を求めると0.51が得られる。そこで、図10から $R_i = 0.51$ に対する V_{p+}/V_{p-} を求めると0.7となる。即ち、この結果は、ストリーマ放電とリーダ放電は V_{p+}/V_{p-} が0.7を閾値として区別できることを表している。よって以下では、 $V_{p+}/V_{p-} = 0.7$ を判定基準として用い、放電形態の識別を試みる。

〈4・2〉 電流トリガにより測定された結果に対する V_{p+}/V_{p-} の閾値に基づくリーダ放電発生判定 図11(a)と(b)にそれぞれ代表して、0.175 MPa (印加電圧21 kV_{rms})と0.2 MPa (印加電圧34 kV_{rms})で測定された電磁波第一波の振幅比 V_{p+}/V_{p-} でまとめた各放電形態と、波線で示したリーダ放電識別の判定基準0.7との関係を示す。同図から明らかなように、放電1~3の「白シンボル」と放電4、5の「黒シンボル」は、 $V_{p+}/V_{p-} = 0.7$ でほぼ区別できていることがわかる。即ち、電磁波第一波振幅比を0.7より大きいかどうかでストリーマ放電とリーダ放電を識別できることを表している。なお、この閾値を越えた白シンボルならびに同図では示されていないが閾値以下の黒シンボルが判定誤差の要因となる。

絶縁破壊に導くリーダ放電の検出率を中心に考え、リー

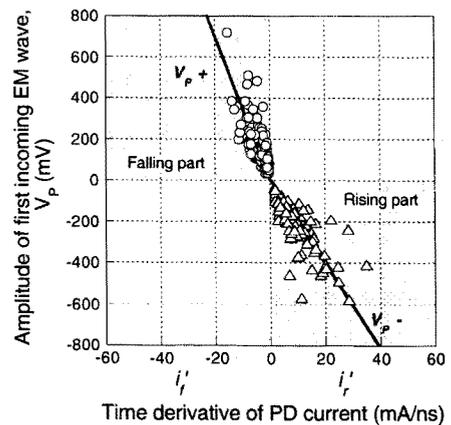


図7 PD電流波形の立ち上がりおよび立ち下がり)の時間変化とその放射電磁波第一波の振幅 V_p の関係

Fig. 7. Relationship between time derivation of PD current and amplitude of the first incoming EM wave.

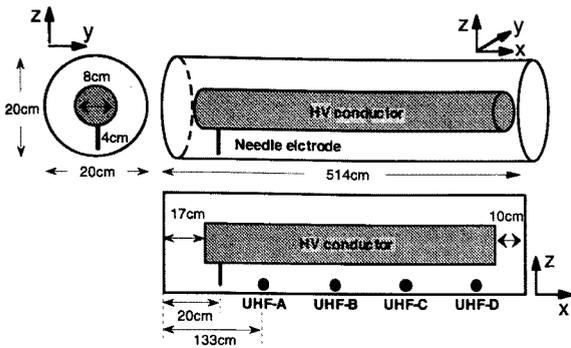


図8 FD-TD解析モデル

Fig. 8. Analysis model for FD-TD method.

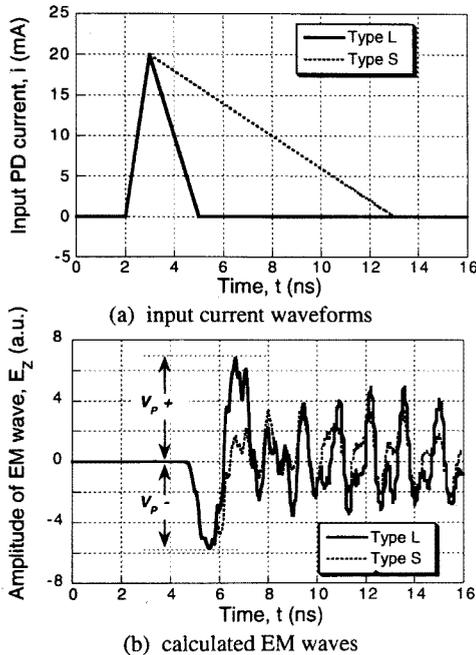


図9 FD-TD法による放射電磁波の解析結果の一例

Fig. 9. An example of calculated EM waves by FD-TD method.

ダ放電を正しく判別した「正判定率」を P_C 、リーダ放電を誤ってストリーマ放電と判定した「誤判定率」を P_F として式(2)、(3)のように定義する(ストリーマ放電に対する正判定率は $1-P_F$ 、誤判定率は $1-P_C$ となる)。更に、ストリーマ放電とリーダ放電をそれぞれ正しく判定した「総合判定率」を P_T とし、式(4)で定義する。

$$P_C = \frac{R_p = 0.7 \text{ 以上でリーダ放電である個数}}{R_p = 0.7 \text{ 以上の総個数}} \times 100 (\%) \quad (2)$$

$$P_F = \frac{R_p = 0.7 \text{ 以下でリーダ放電である個数}}{R_p = 0.7 \text{ 以下の総個数}} \times 100 (\%) \quad (3)$$

$$P_T = \frac{\text{正しく判定された個数}}{\text{総個数}} \times 100 (\%) \quad (4)$$

ここで重要なことは、 P_C と P_T は大きく、 P_F は小さくあるべきであるが、特に P_F がゼロにできるだけ近いことが安全サイドの診断という点で極めて重要である。

図12に、ガス圧力をパラメータとして判定基準0.7における各判定率と印加電圧の関係をまとめて示す。誤判定率 P_F は、印加電圧が高い場合に僅かに発生しているが殆どゼロ

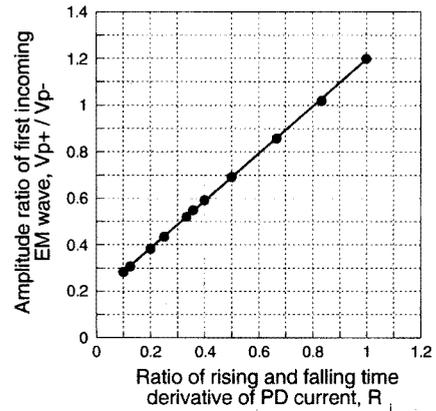


図10 FD-TD法により求めた電流変化率と電磁波第一波の振幅比の関係

Fig. 10. Relationship between current derivative and amplitude ratio of first incoming EM wave calculated from FD-TD method.

である。一方、正判定率 P_C および総合判定率 P_T は、低い印加電圧において P_C は30~40%を示すことがあるが、印加電圧が高くなると P_C と P_T は共に70~90%を示すことがわかる。この結果は、判定基準0.7によりストリーマ放電とリーダ放電をほぼ誤判定なしに70%以上の確率で識別できることを示している。なお、図11の結果から、判定基準を黒シンボルの分布の下限である0.8まで増加させると、誤判定率は印加電圧に依存してゼロより増加し最大20%の値を示すものの、 P_C と P_T は判定基準0.7の場合より上昇し、80%以上(ほぼ90%)の確率で判定できることが示された。

〈4.3〉電磁波トリガによる測定時の問題の検討

(1)電磁波トリガレベル 図13に、0.2 MPaで測定した最小電荷量感度の電磁波トリガレベル依存性を、印加電圧をパラメータとして示す。ここで電荷量とは、図3に示されるような電流波形の時間積分から求めたもので、放電5のように複数のパルスから構成される場合は、最も電流ピーク値の大きなパルスを対象とした。同図から、トリガレベルを高くするほど最小の検出電荷量は上昇する、即ち検出感度

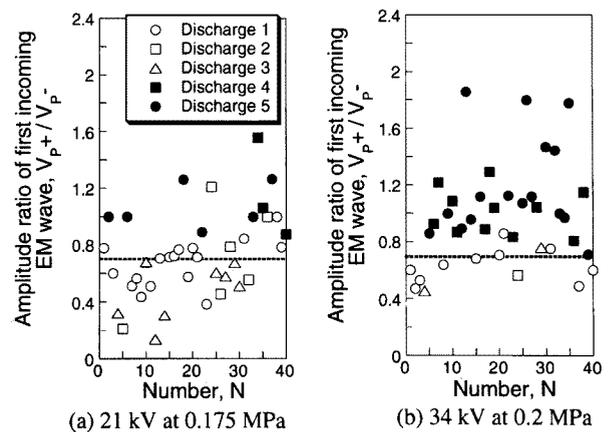


図11 PD電流にトリガをかけて測定した電磁波第一波の振幅比と放電形態の関係

Fig. 11. Relationship between amplitude ratio of first incoming EM wave and PD types measured by triggering PD current.

が低下することがわかる。他方、印加電圧が高くなると検出電荷量は小さくなっている。これは、図4に示されるように、発生する部分放電形態が電荷量の大きな放電1~3から小さな放電4~5へ変化しているためである(図3に示された各放電形態の電荷量は、それぞれ84.2、78.6、135.1、31.8、30.9 pCであり、放電1~3のストリーマ放電では放電4~5のリーダ放電の2倍以上である)。但し、これは、印加電圧が V_b の80%までの結果であり、印加電圧を更に破壊近傍まで上昇させていくと、リーダの進展によりPD電流の波高値は顕著に大きくなり、それに伴って電荷量は増加していくものと思われる。なお、本実験でのバックグラウンドノイズは約15 mVであり、トリガレベルをこの約7倍の100 mVとしたときの検出電荷量は15~30 pCである。

(2) 判定率のセンサ位置依存性 図14に、一例としてセンサAの電磁波信号にトリガをかけ(トリガレベル100 mV)、電磁波第一波の振幅比 V_{p+}/V_{p-} を100回測定した結果を示す。なお、各放電形態は、同時に測定した電流波形により確認している。同図に示されるように、電磁波トリガにより測定した結果においても、図11と同様に V_{p+}/V_{p-} の比率0.7に基づき放電1~3と放電4、5は識別できることがわかる。そこで、判定基準0.7として電磁波トリガにより測定した結

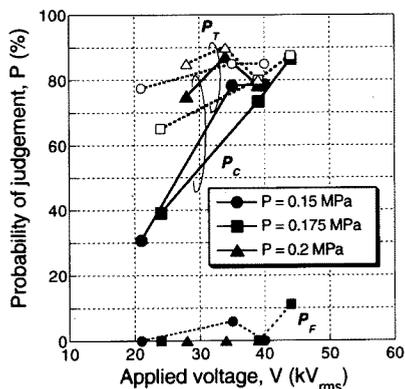


図12 放電形態判定率の印加電圧依存性 (PD電流トリガ)
Fig. 12. Applied voltage dependence of probability of each judgement (trigger by PD current).

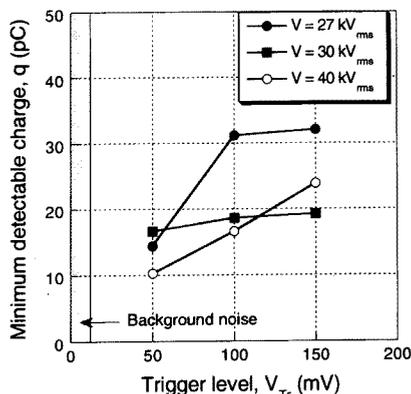


図13 電磁波トリガレベルと検出されたPD電流電荷量の関係 (0.2 MPa)
Fig. 13. Relationship of minimum detectable electric charge and trigger level for measurements of EM waves (0.2 MPa).

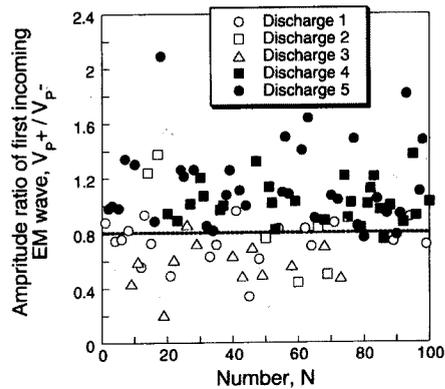
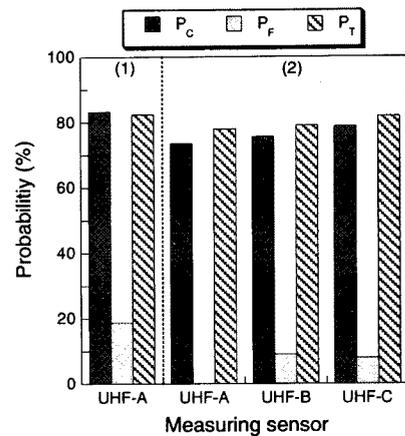


図14 電磁波信号にトリガをかけて測定した電磁波第一波の振幅比と放電形態の関係 (30 kV at 0.2 MPa, $V_{Tr} = 100$ mV)
Fig. 14. Relationship between amplitude ratio of first incoming EM wave and PD types measured by triggering EM wave.



Measurements triggered by (1) PD current and (2) EM wave
図15 判定率のセンサ位置依存性 (1)PD電流および(2)電磁波信号にトリガをかけて測定した結果
Fig. 15. UHF sensor position dependence of probability of each judgement.

果の各判定率のセンサ位置依存性を図15に示す。同図中(1)は比較のために示した電流トリガによる結果である。電磁波トリガの場合(図中(2))、電流トリガの場合と比較して正判定率 P_c と総合判定率 P_T 、ならびに誤判定率 P_F は共に若干低下しているが、 P_c と P_T の結果が示すように、リーダ放電とストリーマ放電は70%以上の確率で識別できることがわかる。他方、センサ位置による各判定率を比較すると、顕著な差はほとんど見られないが、センサ位置が放電源から離れるほど、即ちスペーサ通過枚数が増加するに連れ、各判定率は若干の増加を示した。但し、PDパルスがスペーサを通過する際にはその高周波成分は反射されるために透過時にはその峻度ならびにピーク値は減少することになり^(12,17)、各センサで測定された電磁波第一波の振幅 V_{p+} と V_{p-} は共にスペーサを通過するにつれて低下(センサCでは平均してセンサAの20%程度低下)している。なお、判定基準を0.8とした場合には、4.2節の電流トリガの結果と同様に P_c ならびに P_T は上昇し、80%以上の判定確率となった。

以上のように、PD電流波形の変化に着目してPD形態の変化を電磁波第一波の振幅比により70~80%以上の高確率で

識別できることが実験により示されたが、実器適用に際しては、PD発生源・位置の影響ならびにGISタンク寸法と形状による電磁波伝搬中の波面の変歪、減衰、反射等に関する更に詳細な検討を行う必要がある。

5. むすび

本研究では、UHFセンサを用いた部分放電放射電磁波測定の到達第一波の振幅比に基づき部分放電形態の識別を試みた。その結果、ストリーマ放電とリーダ放電は、電磁波第一波の振幅比を0.7の判定基準で区別することで70%以上(振幅比0.8では80%以上)の確率で識別できることを実験により示した。今後は、更に複雑なL字やT字等の分岐を持つGIS母線に本手法を適用して異常診断を検討していく予定である。卒業研究の一部として本実験に協力いただいた柴田慎吾氏(現高田工業所)、國武義高氏に記して感謝する。

(平成13年10月22日受付、平成14年1月11日再受付)

文 献

- (1) 電気学会技術報告:「SF₆の地球環境負荷と混合・SF₆代替ガス絶縁」、No.841 (2001)
- (2) L.Niemeyer and F.Pinnkamp: "Leader Discharges in SF₆", *Journal of Physics D*, Vol.16 No.6 pp.1031-1045 (1983)
- (3) B.F.Hampton and R.J.Meats: "Diagnostic measurements at UHF in gas insulated substations", *IEE proceedings*, Vol.135, Pt.C, No.2, pp.137-144 (1988)
- (4) A.G.Sellars, O.Farish and M.M.Peterson: "UHF Detection of Leader Discharge in SF₆", *IEEE Trans. on DEI*, Vol.2, No.1, pp.143-154 (1995)
- (5) H.Okubo, T.Kato, N.Hayakawa and M.Hikita: "Temporal Development of Partial Discharge and Its Application to Breakdown Prediction in SF₆ GIS", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.13, No.2, pp.440-445 (1998)
- (6) 加藤達朗、遠藤壱将:「UHF法によるGIS絶縁異常診断システムの開発」、*電気学会論文誌B*, Vol.119-B, No.4, pp.458-463 (1999)
- (7) 渡辺弘行、戸田恒雄、鈴木浩文、加藤敬一、松尾幸蔵:「GIS用部分放電検出センサの検出特性」、*電気学会論文誌B*, Vol.116-B, No.10, pp.1246-1251 (1996)
- (8) 武藤浩隆、土井雅史、藤井治久、亀井光仁:「GIS中部分放電による電磁波のモード分離と共振特性」、*電気学会論文誌B*, Vol.118-B, No.12, pp.1406-1414 (1998)
- (9) M.D.Judd and O.Farish: "Transfer Function for UHF Partial Discharge Signal in GIS", *Proc. of 11th International Symposium on High Voltage Engineering*, Vol.5, pp.74-77 (1999)
- (10) 小迫雅裕、大塚信也、澤井浩司、匹田政幸:「GIS中の超音波伝搬特性とそれに基づく新しい部分放電発生位置標定」、*電気学会論文誌B*, Vol.121-B, No.5, pp.677-682 (2001)
- (11) S.Ohtsuka, K.Takenaka and M.Hikita: "Frequency Spectrum Characteristics of PD Electromagnetic Waves in GIS Measured by UHF Sensors", *Proc. of 1999 Japan-Korea Joint Symposium on ED & HVE*, pp.269-272 (1999)
- (12) 竹中賢司、國武義高、小迫雅裕、大塚信也、澤井浩司、匹田政幸:「GISの異常診断を目的とした内部センサによる部分放電放射電磁波伝搬特性の検討」、*平成13年度電気学会全国大会講演論文集*, No.6-205 (2001)
- (13) 國武義高、小迫雅裕、大塚信也、匹田政幸:「GIS中における部分放電模擬パルス波形と放射電磁波第一波の振幅比の関係」、*平成13年度電気学会電力・エネルギー部門大会論文集(分冊B)*, pp.314-315 (2001)
- (14) S.Nagara, Z.H.Tian and M.Hikita: "Study on Partial Discharge and Breakdown Characteristics of SF₆ Gas and Its Mixtures Using Electrical and Optical Techniques", *Proc. of IWHV*, Vol.1, pp.91-96 (1999)
- (15) 電気学会 電磁波雑音のタイムドメイン計測技術調査専門委員会編:「電磁波雑音のタイムドメイン計測技術」、コロナ社, pp.16-19 (1995)
- (16) 宇野享:「FDTD法による電磁界およびアンテナ解析」、コロナ社, pp.50-57 (1998)
- (17) 小川明栄、水野和宏、宮崎明延、野嶋健一、若林誠二、村瀬洋:「GISにおける部分放電パルスの伝搬特性の検討—コーン型スパーサによる影響—」、*平成7年度電気学会電力・エネルギー部門大会*, pp.769-770 (1995)

大塚 信也 (正員) 1971年1月16日生。94年3月九州大学工学部電気工学科卒業。96年3月九州大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。98年12月九州大学大学院システム情報科学研究科電気電子システム工学専攻博士課程修了。96年4月～98年12月日本学術振興会特別研究員。99年1月日本学術振興会特別研究員PD。同年2月日本学術振興会特別研究員PDを辞退した後、九州工業大学工学部助手、現在に至る。主として、SF₆およびPFC混合ガスの絶縁特性、GISの絶縁診断を目的とした部分放電計測技術、および超伝導工学に関する研究に従事。博士(工学)。低温工学協会、放電学会会員。



竹中 賢司 (学生員) 1976年10月27日生。99年3月九州工業大学工学部電気工学科卒業。2001年3月同大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程修了。同年4月株式会社関電工入社、現在に至る。主として、部分放電放射電磁波によるGISの絶縁異常診断に関する研究に従事。



小迫 雅裕 (学生員) 1974年8月13日生。97年3月九州工業大学工学部電気工学科卒業。99年3月同大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程修了。同年4月同大学院博士後期課程進学、現在に至る。主として、部分放電測定によるGISの絶縁異常診断技術の確立に関する研究に従事。平成11年度電気学会論文発表賞Bおよび平成13年電気学会全国大会優秀論文発表賞受賞。



趙 孟佑 (正員) 1962年12月19日生。1985年東京大学工学部航空学科卒業。87年同大学院修士課程修了。92年2月マサチューセッツ工科大学大学院博士課程修了。92年2月神戸大学大学院自然科学研究科助手。95年7月国際宇宙大学(フランス)助手を経て96年8月九州工業大学工学部講師。97年同助教授。高電圧宇宙機と電離層プラズマの相互作用に関する研究。ガス放電現象のシミュレーションとレーザ応用に関する研究に従事。Ph.D.。日本航空宇宙学会、アメリカ航空宇宙学会、アメリカ地球物理学連合会員。



松久 孝司 (正員) 1955年3月29日生。79年3月京都大学工学部電子工学科卒業。同年4月高岳製作所入社、現在に至る。主にガス遮断器の開発設計に従事。技術士(電気・電子部門)。



匹田 政幸 (正員) 1953年10月23日生。82年3月名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年4月同大学助手、89年同講師、92年同助教授を経て、96年4月より九州工業大学工学部電気工学科教授、現在に至る。工学博士。主として、エネルギー機器の高性能化に関する研究に従事。85年8月～87年7月MIT高電圧研究所客員研究員。95年電気学会論文賞、96年電気学会進歩賞。応用物理学会会員、IEEE会員。

