SF₆ガス中における部分放電電流パルス波形の 電圧位相依存性とその周波数特性

正 員 大久保 仁 (名古屋大)
 学生員 加 藤 達 朗 (名古屋大)
 学生員 鈴 木 淳 史 (名古屋大)
 学生員 吉 田 昌 展 (名古屋大)
 正 員 早 川 直 樹 (名古屋大)
 正 員 匹 田 政 幸 (名古屋大)

Voltage Phase Dependence of Partial Discharge Current Pulse Waveform in SF₆ Gas and Its Frequency Characteristics

Hitoshi Okubo, Member, Tatsuro Kato, Student Member, Atsushi Suzuki, Student Member,
 Masanobu Yoshida, Student Member, Naoki Hayakawa, Member, Masayuki Hikita, Member (Nagoya University)

We investigated the diagnosis of insulation performance in SF₆ gas insulated apparatus like GIS. We performed time-resolved partial discharge (PD) measurements in SF₆ gas using a matching circuit and a digital oscilloscope for a needle-plane electrode arrangement to investigate the frequency component of PD current pulse. We also measured phase-resolved frequency characteristics of PD pulse in SF₆ gas using a spectrum analyzer. The experimental results revealed that PD pulse waveform differed depending on the voltage phase angle even when the magnitude of applied voltage and gas pressure were constant. This means that the frequency component of PD pulses differed depending on the polarity and the phase of applied ac voltage.

Consequently, we pointed out the necessity to select an appropriate frequency range for PD measurement depending on the frequency component of PD pulse.

キーワード：部分放電, SF₆ガス, 電流パルス波形, 電圧位相依存性, 周波数特性

1. ま え が き

SF₆ガス絶縁開閉装置 (GIS) は、現代社会を根底から支える電気エネルギー供給の中心的機器として種々の社会的要請に依えており、その適用は年々飛躍的に拡大している。また、UHV (1000kV) GIS^[1], 500kV直流GIS^[2]などの新しい技術開発が次々と行われており、これらの新技術は、将来にわたって大きく適用が拡大することが予想されている。このような状況の中で、GISを含む電力機器に対して高精度の測定技術および縁診断技術の最近の発展は著しい^[3-6]。例えば、GISの部分放電 (PD) 測定において、固体中の極微小異常発見に対する X 線照射による感度の大幅向上^[4]や、測定周波数に UHF帯域を使用して S/N比の向上など、大きな成果が上がっている^[5, 6]。

しかし、従来は外部ノイズとの関連や測定系の制約などから測定周波数が決定されており、PD現象のメカニズムを

反映するPD電流パルス波形に立ち入った検討は少ないのが現状である^[7]。すなわち、これまではPDメカニズムに基づいた測定法や校正法が導入されることが少なく、したがってPD検出法や校正法の違いにより、測定されたPD特性に変化が生じる可能性があった^[8]。しかし、PDパルスの周波数特性など、放電パルスのメカニズムに基づいた測定技術や外部ノイズの抑制・識別技術などは、現象が複雑なことや高度な測定技術を必要とすることから、依然として多くの課題が残されている。

以上のような背景にもとづき、筆者らはGIS内部のPD診断を目指したコンピュータ処理によるPD計測・診断システムの開発および絶縁診断の基礎となるPD現象の解明について総合的に検討を行ってきた^[9-14]。これまでに、PD開始から絶縁破壊に至るまでのPD特性の定量的な解析^[10]や絶縁破壊予知^[11, 12]およびPD発生媒質の違いによるパルスの周波数成分の違い^[13, 14]に関して検討してきた。

本論文では、高速パルス測定技術によって得られたPD電流パルスの印加交流電圧の位相特性に関して検討を行う。その結果に基づき、PD発生に対する電圧位相および極性の違いに対応するパルスの周波数成分を考慮した測定法の必要性を明らかにする。

2. 実験回路および実験方法

SF_6 ガス中におけるPD電流パルス波形の測定回路を図1に示す。電極として、ステンレス製、針先端曲率半径 $R=500\mu\text{m}$ の針対平板電極を用いた。この針電極に、交流電圧を印加して大気圧 SF_6 ガス中でPDを発生させた。平板電極に流れる電流パルスを図1(b)に示す整合回路を通して高速オシロスコープ（サンプリング速度 10GS/s 、アナログバンド幅 750MHz ）およびスペクトラムアナライザ（測定帯域 $100\text{Hz} \sim 26.5\text{GHz}$ ）により測定した^[13]。

図1 実験回路
Fig.1 Experimental circuit.

SF_6 ガス中におけるPDパルス波形は数ns以下の立ち上がりであるので、測定システム全体の周波数応答および整合性などが非常に重要な問題となる。本測定では図1(b)に示す整合回路を用いて反射などの影響を抑え、PD電流パルスの測定を行った。この整合回路はPD電流パルスを抵抗を用いて電圧に変換し、アンプを用いてインピーダンスを 50Ω に変換しインピーダンスマッチングを行っている。この回路は反射の影響を抑え、 1GHz までの周波数応答を確認している^[13]。

ここで、PD電流パルス波形の印加交流電圧の位相に対する変化を調査するため、計測機器のゲート機能を駆使して測定を行った。図1(c)に示すように、印加電圧波形をPulse generatorに入力して交流波形に同期したゲート信号を作成する。このゲート信号は印加電圧の任意の位相、任意の幅で出力することが可能である。このゲート信号を高速オシロスコープに入力することにより、その間に発生したPD電流パルス波形を記録することが可能である。本測定では、図1(c)に示すように 30° 幅のゲート信号を用い、一周 360° を12の位相領域（①～⑫）に分割し、PD電流パルス測定を行った。

3. 部分放電電流パルス波形の印加電圧位相特性

図2に、先端曲率半径 $R=500\mu\text{m}$ 、ギャップ長 $g=10\text{mm}$ 、印加交流電圧 $V_a=25\text{kVrms}$ の条件下において大気圧 SF_6 ガス中における種々の印加電圧位相で発生したのPDパルス波形を示す。図2(a)～(d)より、PDパルス波高値だけでなく、立ち上がり時間などのPDパルス波形そのものも極性および電圧位相によって変化していることがわかる。

図2 SF_6 ガス中における種々の電圧位相でのPDパルス波形
Fig.2 PD pulse waveform observed in SF_6 gas at various voltage phase regions. $R=500\mu\text{m}$, $g=10\text{mm}$, $V_a=25\text{kVrms}$.

次に、図3および図4に、図2の測定条件において観測した立ち上がり時間 T_f およびパルス波高値 h の電圧位相特性を示す。ただし、図3および図4の●および縦棒はそれぞれ各電圧位相領域において50回PDパルスを測定したときの平均値および標準偏差を示す。同図から、正サイクルにおいては、PD開始位相付近におけるパルスの立ち上がり時間 T_f が小さいことがわかる。この原因として、PD開始位相付近の領域では、直前の負サイクルに発生した逆極性の空間電荷がギャップ間に蓄積しているため電子なだれの進展を促進していることが考えられる。このため、この領域では h が大きい値であるにもかかわらず T_f が短くなっているものと考えられる。

図5にPDパルスの放電電荷量 q 、立ち上がり時間 T_f 、立ち上がりの電流増加率 di/dt 、PDパルス波高値 h 、PDパルスの発生頻度 n を示す。電流増加率 di/dt は h/T_f で定義した。また、 q および n はPD計測装置を用いて測定した。ここで示す q 、 n は位相分解コンピュータ計測から求められるパラメータであるが、 T_f 、 di/dt 、 h の電圧位相依存性は従来の計測法では求められていない新しいパラメータである。

図3 SF₆ガス中PDパルスの立ち上がり時間の電圧位相特性
Fig.3 Voltage phase characteristics of rise time of PD pulse in SF₆ gas. $R=500\mu\text{m}$, $g=10\text{mm}$, $V_a=25\text{kVrms}$.

図4 SF₆ガス中PDパルス波高値の電圧位相特性
Fig.4 Voltage phase characteristics of pulse height of PD pulse in SF₆ gas. $R=500\mu\text{m}$, $g=10\text{mm}$, $V_a=25\text{kVrms}$.

中でも、 di/dt は電子なだれの進展を直接的に示しており、PDメカニズムをPD電流パルスの特性として表すパラメータの一つである。この di/dt および立ち上がり時間 T_f に関して、PD開始位相付近の領域①、②においては直前の負サイクルで発生した逆極性の空間電荷が蓄積しているため電子なだれの進展を促進していることが考えられる。このため領域①、②では h が大きいにもかかわらず、 T_f が短くなっている。

一方、 V_a がピーク付近の電圧位相領域④では q や h が小さいにもかかわらず T_f が長くなっているため、 di/dt が小さい。本来、領域④では V_a の瞬時値が大きいので、電子なだれの進展速度やそれに伴う電流増加率 di/dt が大きくなると予想される。しかしながら、この領域では di/dt は $2 \times 10^6 [\text{A/s}]$ と相対的に小さな値となっている。この原因としては、(1)領域①、②で発生したPD電流パルスによる正の空間電荷が蓄積し、電子なだれの進展を妨げていること、(2) V_a がピーク付近の電圧位相領域では電圧瞬時値が高いためにストリーマからリーダへの転移が起り、PDメカニズムそのものが他の領域とは異なっていることなどが考えられる^[15,16]。

このように、PD電流パルス波形は媒質の種類や印加電圧の大きさだけでなく、印加電圧の極性や位相などによっても変化することが明らかになった。このことは本来のPD電流パルスの持つ周波数成分を十分に考慮に入れた計測をするべきであり、計測する電圧位相や放電形態などを十分に考慮したPD測定・診断が必要であることを示唆している。

図5 SF₆ガス中のPD電流パルスの電圧位相依存性
Fig.5 Voltage phase dependence of PD pulses characteristics in SF₆ gas. $R=500\mu\text{m}$, $g=10\text{mm}$, $V_a=25\text{kVrms}$.

4. 部分放電パルス波形の周波数成分

<4.1> SF_6 ガス中の部分放電パルスの周波数成分 前章で示したように、PDパルス波形は印加電圧の極性や位相などが異なると変化することを明らかにした。本章では、それらのPDパルスが持つ周波数成分を調べ、PD測定の際に与える影響について検討する。

図2に示した SF_6 ガス中のPDパルス波形にFFTをかけることで得られた周波数スペクトラムを図6(a)および(b)に示す。同図(a)は正の、(b)は負のPDパルス周波数スペクトラムを示している。両図より、 SF_6 ガス中のゲイン $G(f)$ も周波数 f の増加とともに減少しており、 $G(f)$ の減少率である $|dG/df|$ は緩やかであることがわかる。この結果は、 SF_6 ガス中の立ち上がり時間 T_f が非常に短いことと対応している。

また、PDパルス波形は各電圧位相によって異なるため、PDパルスの $|dG/df|$ も電圧位相ごとに異なったものとなる。このため、各位相間における $G(f)$ の大小関係も周波数によって変化する。図(b)を例に取ると、 $f < 80\text{MHz}$ においては領域⑦の方が領域⑩より $G(f)$ が大きい、 $f > 80\text{MHz}$ においては大小関係が逆転していることがわかる。

図6 種々の電圧位相での SF_6 ガス中PDパルスのFFTスペクトラム (窓関数：方形窓(幅20ns))

Fig.6 FFT spectrum of PD pulses in SF_6 gas at various voltage phase regions. $R=500\mu\text{m}$, $g=10\text{mm}$, $V_a=25\text{kVrms}$. Window function : Rectangular (Width 20ns)

<4.2> PD測定に及ぼすPDパルスの周波数成分の影響

本節ではPDパルスの持つ周波数成分がPD測定の際に及ぼす影響について検討する。表1に SF_6 ガス中の異なる電圧位相に対する $G(f)$ を示す。前節で示したように、 $|dG/df|$ は印加電圧の位相や極性によって異なるため、それに対応するスペクトラムゲインの差 $G(10)-G(50)$ 、 $G(10)-G(200)$ も位相によって異なる。このため、表1に示すように、各電圧位相間のPDスペクトラムの大小関係が周波数に依存して変化する。このことは、各種PD特性はPD測定を行う周波数によって変化することを示している。以上のことから、正確なPD測定を行うためにはPDパルスの持つ波形およびその周波数成分を考慮に入れることが必要不可欠であることが明らかとなった。

表1 SF_6 ガス中のPD周波数スペクトラムのゲイン
Table 1 Frequency spectrum gain of PD pulse in SF_6 gas.

polarity	Phase	$G(10)$ [dBm]	$G(50)$ [dBm]	$G(200)$ [dBm]	$G(10)-G(50)$ [dB]	$G(10)-G(200)$ [dB]
positive	①	-13	-16	-21	3	8
	④	-25	-30	-37	5	12
negative	⑦	-29	-35	-43	6	14
	⑩	-33	-36	-38	3	5

5. 部分放電電流パルスの周波数／位相特性

発生したPD電流パルス信号を平板電極から整合回路を通してスペクトラムアナライザを用いて計測することにより、PDパルスの周波数特性を調査した。なお、再現性のある結果を得るために、測定はスペクトラムアナライザのMAX HOLD機能を30秒間連続して行った。図7に、 SF_6 ガス中における $V_a=25\text{kVrms}$ のときのPD電流の周波数スペクトラムを示す。同図より、 SF_6 ガス中のPDスペクトラムは1GHzに対しても高い利得を維持していることがわかり、数百MHz帯域における周波数特性は図6の周波数に対する減衰と類似している。このことよりPD電流波形の持つ周波数成分と、スペクトラムアナライザによるPD周波数スペクトルとがほぼ一致することが判明した。

図7 SF_6 ガス中のPDの周波数スペクトラム
Fig.7 Frequency spectrum of PD current in SF_6 gas. $R=500\mu\text{m}$, $g=10\text{mm}$, $V_a=25\text{kVrms}$.

次に、スペクトラムアナライザにより任意の周波数で同調させ、交流波形に同期させた位相スペクトラムを測定した。ここで、スペクトラムアナライザの測定周波数を10M～1000MHzと同調させ、また交流1サイクルに同期させて、PDによるスペクトラムの最大値を30秒間連続測定した。例として図8に、同調周波数が(a)10MHzおよび(b)300MHzにおける交流1サイクル分のPD電流パルスの位相スペクトラムを示す。同図において、同調周波数が増加すると電流パルスのゲインが減少していること、さらに、電圧位相が異なるとゲインの減衰率が若干異なっていることもわかる。

さらに、図9に測定周波数を10～1000MHzと変化した場合における位相分解したPD電流の周波数/位相スペクトラム特性を示す。図9は、図7のスペクトラムをさらに電圧位相で分解しており、各位相および周波数に対するゲインを示している。同図より、PD発生位相の違いによりスペクトラムが大きく異なっていることがわかる。この条件下では、負サイクルの信号は約500MHzで検出感度以下となっている。正のサイクルでは、ピーク付近のPD信号は300MHzぐらいで検出されなくなっているが、位相が45°および135°付近では信号が大きく減衰が緩やかであるために1GHz付近の高周波帯域で測定しても、この位相には信号が検出されることになる。すなわち、測定周波数が違うと各位相に対してPD特性は異なったように測定される結果となりうる。

(a) 同調周波数10MHz

(b) 同調周波数300MHz

図8 PD電流パルスの電圧位相スペクトラム
Fig.8 Voltage phase spectrum of PD current pulse.
R=500μm, g=10mm, V_a=25kVrms.

図9 SF₆ガス中におけるPDゲインの周波数/位相依存性
Fig.9 Power spectra of PD current as functions of voltage phase and frequency in SF₆ gas.
R=500μm, g=10mm, V_a=25kVrms.

以上のように、このような周波数や電圧位相の違いに対するPDスペクトラムの変化を十分に考慮したPD計測・診断が必要であることを示唆している。

6. あとがき

本論文では、交流電圧印加下においてSF₆ガス中における単一PD電流パルス波形の計測により、PDの発生する印加電圧の極性だけでなく電圧位相が異なるとPDパルス波形の立ち上がり時間およびパルス波高値なども異なることを明らかにした。この原因として、印加電圧の瞬時値が異なることおよびPD発生による空間電荷の影響によりPD位相特性が変化していると考えられる。

また、PD波形の変化に基づいてPDパルスの周波数成分も電圧位相の違いにより変化しており、測定周波数の違いによりPD位相特性が変化することを指摘した。すなわち、正確なPD測定を行うためにはPDパルスの持つ波形や周波数成分を十分に考慮に入れる必要があることを明らかにした。さらに、放電メカニズムに基づいた測定周波数の選択やPD測定方法の必要性を明らかにしており、これらは今後のPD計測への方向付けとなるとと思われる。

(平成8年1月29日受付、同年7月1日再受付)

文献

- [1] 宮下, 亀井, 前川: 「1000kV GIS部分放電試験」, 電気学会開閉保護・高電圧合同研究会, SP-94-81, HV-94-152, 1994
- [2] 吉田, 浅野, 山地, 中越, 三瓶, 畑野, 伊吹, 仲西: 「実規模DC-GISモデルにおけるスパーサ帯電と金属粒子の絶縁特性に及ぼす影響」, 電気学会論文誌B, Vol.115, No.11, pp.1343-1351, 1995
- [3] R.Baumgärtner, B.Fruth, W.Lanz and K.Pettersson: "Partial Discharge - Part X: PD in Gas-Insulated Substations - Measurement and Practical Considerations", IEEE Elect. Insul. Magazine, Vol.8, No.1, pp.16-27, 1992
- [4] N.Fujimoto, S.Rizzetto and J.M.Braun: "Partial Discharge - Part XV: Improved PD Testing of Solid Dielectrics using X-ray Induced Discharge Initiation", IEEE Elect. Insul. Magazine, Vol.8, No.6, pp.33-41, 1992
- [5] R.Kurrer, K.Feser and T.Krauss: "Antenna Theory of Flat Sensors for Partial Discharge Detection at Ultra-High-Frequencies in GIS", 9th International Symposium on High Voltage Engineering, No.5615, 1995
- [6] G.Wanninger: "Antennas as Coupling Devices for UHF Diagnostics in GIS", 9th International Symposium on High Voltage Engineering, Vol.5, No.5625, 1995
- [7] A.G.Sellers, O.Farish, M.M.Peterson: "UHF Detection of Leader Discharge in SF₆", IEEE Trans. on Dielectrics and Elect. Insul., Vol.2, No.1, pp.143-154, 1995
- [8] A.G.Sellers, S.J.MacGregor and O.Farish: "Calibrating the UHF Technique of Partial Discharge Detection using a PD simulator", IEEE Trans. on Dielectrics and Elect. Insul., Vol.2, No.1, pp.46-53, 1995
- [9] M.Hikita, T.Kato and H.Okubo: "Partial Discharge Measurements in SF₆ and Air Using Phase-Resolved Pulse-Height Analysis", IEEE Trans. on Dielectrics and Elect. Insul., Vol.1, No.2, pp.276-283, 1994
- [10] 加藤達朗, 早川直樹, 匹田政幸, 大久保仁: 「SF₆ガス中における部分放電現象のコンピュータ計測とGIS内の絶縁破壊予知」, 電気学会論文誌B, Vol.115-B, No.4, pp.424-429, 1994
- [11] 加藤達朗, 早川直樹, 匹田政幸, 大久保仁: 「部分放電特性の推移に基づくGIS内絶縁破壊予知」, 電気学会論文誌B, Vol.115-B, No.10, pp.1193-1198, 1994
- [12] H.Okubo, A.Suzuki, T.Kato, N.Hayakawa, M.Hikita: "Frequency Component of Current Pulse Waveform in Partial Discharge Measurement", 9th International Symposium on High Voltage Engineering, Vol.5, No.5634, 1995
- [13] 匹田政幸, 鈴木淳史, 加藤達朗, 早川直樹, 大久保仁: 「部分放電特性のコンピュータ計測と周波数依存性」, 電気学会論文誌B, Vol.115-B, No.10, pp.1215-1220, 1994
- [14] T.Kato, N.Hayakawa, M.Hikita, H.Okubo: "Breakdown Prediction in SF₆ Gas Viewed from Transition of Partial Discharge Characteristics", 11th International Conference on Gas Discharge and Their Applications, Vol.1, pp.280-283, 1995
- [15] L.Niemeyer, L.Ullrich and N.Wiegart: "The Mechanism of Leader Breakdown in Electronegative Gases", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol.24, No.2, pp.309-324, 1989
- [16] R.J.Van Brunt: "Mechanisms for Inception of DC and 60-Hz AC corona in SF₆", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol.17, No.2, pp.106-120, 1982

大久保仁

(正員) 1948年10月29日生まれ。73年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程修了。同年4月(株)東芝入社。高電圧技術開発に従事。76年7月～78年2月ドイツ・アーヘン工科大学高電圧研究所およびミュンヘン工科大学高電圧研究所客員研究員。89年7月名古屋大学工学部電気学科助教授, 91年4月同教授, 現在に至る。工学博士。IEEE, VDE会員。

加藤 達朗

(学生員) 1969年3月11日生まれ。96年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程修了。同年4月日立製作所入社, 現在に至る。工学博士。在学時はGIS内の部分放電計測に関する研究に従事。

鈴木 淳史

(学生員) 1972年2月2日生まれ。96年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程修了。同年4月中部電力(株)入社, 現在に至る。在学時は部分放電計測に関する研究に従事。

吉田 昌展

(学生員) 1973年3月10日生まれ。95年3月名城大学理工学部電気電子工学科卒業。同年4月名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程入学, 現在に至る。GISにおける部分放電計測に関する研究に従事。

早川 直樹

(正員) 1962年9月9日生まれ。90年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程満了。同年4月同大学助手, 96年4月名古屋大学理工科学総合研究センター助教授, 現在に至る。工学博士。超電導送電, 環境調和型エネルギーシステムに関する研究に従事。96年電気学会論文賞。IEEE, エネルギー・資源学会会員。

匹田 政幸

(正員) 1953年10月23日生まれ。82年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程修了。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。応用物理学会会員。