実規模GILにおける部分放電の発生と 電磁波の放射・伝搬特性

学生員 吉 田 昌 展 (名古屋大)
学生員 星 野 俊 弘 (名古屋大)
正 員 宮 崎 明 延 (中部電力)

学生員 高 橋 俊 裕 (名古屋大)
正 員 匹 田 政 幸 (九州工業大)
正 員 大久保 仁 (名古屋大)

Generation of Partial Discharge Current Pulse and its Radiation / Propagation Characteristics of Electromagnetic Wave in GIL

Masanobu Yoshida, Student Member, Toshihiro Takahashi, Student Member,
Toshihiro Hoshino, Student Member, (Nagoya University),
Masayuki Hikita, Member (Kyushu Institute of Technology),
Akinobu Miyazaki, Member (Chubu Electric Power Co., Inc.), Hitoshi Okubo, Member (Nagoya University)

We observed current pulse waveforms of partial discharge (PD) in 275kV full scale 168m length gas insulated transmission line (GIL). We also investigated voltage phase dependency and frequency characteristics of electromagnetic wave emitted from PD. From these results, we discussed mutual relationship between PD current waveform and emitted electromagnetic wave characteristics. Furthermore, we discussed the propagation characteristics of PD signal in long GIL.

In this paper, we described the generation, propagation and detection characteristics of PD signal in GIL and finally, we could estimate the attenuation rate of the PD signal in long GIL.

キーワード：GIL，部分放電，電流波形，電磁波スペクトラム，伝搬特性

1. まえがき

近年，電力需要の増大に伴い，超高压275kV SF₆ガス絶縁送電線（GIL）の導入が進められている^[1]。GIL内部に，金属異物の混入・導体およびシース表面の傷等の欠陥が存在すると部分放電（PD）が発生する。PDは最終的に絶縁破壊に至る可能性があることから，GILの絶縁健全性確認として絶縁破壊の先駆現象であるPDを検出することは有効である^[2]。とりわけ，機器の運転状態である交流電圧下におけるPDの発生特性を検出することは，外部ノイズとPD信号の識別，欠陥種の識別といった観点から極めて有効なPD検出方法であると考えられる^[2]。しかしながら長距離GIL内部におけるPDの発生特性およびPD信号の放射・伝搬特性について実験的に検討された例は少ない。このような状況の中で，長距離高電圧GILの絶縁外部診断技術の確立のために，実規模GILモデルを用いてGIL内部の欠陥におけるPDの発生特性，およびPD信号の伝搬・検出特性について調査する必要がある。

今回，275kV 実規模単相GIL試験線内部に模擬的に欠陥を作製し，欠陥から発生するPDの電流波形を測定した。他方で，GILシースに取り付けられたPD測定用の高周波センサを用いてPDの交流位相に対する検出特性をゼロスパン測定し，両者の結果から，PD電流パルス波形と，それによって放射される電磁波の相関について検討した。さらに，これらの結果を通して，長距離275kV 実規模単相GIL内部におけるPD信号の伝搬特性についても検討したので報告する。

2. 実験回路および実験方法

実験には図1に示す275kV実規模長距離単相GIL（タンク内径460mm，高電圧導体外径170mm，線路長168m）を用いた^[1]。GIL内部の金属異物を模擬するために，GIL内部の高圧導体端部に混入金属異物を模擬して，針先端曲率半径500μm，長さ20mmのステンレス製針電極を取り付け，ギャップ長30mmの針-平板電極を形成した。この電極系に所定の交流高電圧を印加し，空气中ならびにSF₆ガス中でPDを発生させた。

図1 実規模GILモデル
Fig. 1 Full-scale GIL model.

図2 GILおよび実験回路

図2は168mGILの構成と、PD発生源の針電極系ならびにGIL長さ方向に取り付けた高周波センサ（UHF内部センサ）の位置a～g、およびPD信号の測定回路を示している。PD発生源は図中の最右端コーン型スペーサとGIL端によって仕切られるガス区画であり、同領域の気体の種類と圧力を変化させた（SF₆ガス：圧力0.15MPa、0.4MPa、空気：大気圧）。なお、GIL一般部はSF₆ガス0.44MPa一定とした。また、印加電圧は各周囲媒体条件下で安定してPDを発生させるために、大気圧空气中で15kVrms、SF₆ガス圧力0.15MPa中、および0.4MPa中で58kVrmsそれぞれ一定とした。

PD発生源において針電極から平板に流れる単一のPD電流パルス波形を周波数応答1GHzを示す整合回路を通して、高速デジタルオシロスコープ（5GS/s、300MHz）によって観測した。PDの発生によって放射される電磁波の測定はPD測定用のUHF内部センサによって行った。今回、UHF内部センサの出力にスペクトラムアナライザ（アナログバンド幅100Hz～8GHz）を接続し、PD信号の交流波形に同期した位相スペクトラム測定（ゼロスパン測定）を行った^[3]。UHF内部センサはGILシース上の7箇所（図2中a～g）に設置しており、測定場所を変えることによってPD発生源からGIL長さ方向への距離に対するPD信号の減衰特性について検討することができる。なお、UHF内部センサは直径250mmの容量結合型平板電極であり、1.5GHzの高周波領域にまで検出感度を有している。また、UHF内部センサは検出感度を最も良くするために^[4]、GIL円筒側面に対して平板電極と同一方向に設置してある。

3. 部分放電電流波形の測定

3.1 空气中およびSF₆ガス中における部分放電電流波形

GILにおけるPD検出の諸特性を検討するにあたり、まずGIL内で発生するPD電流パルスの特性を詳細に求める必要がある。図3に空气中およびSF₆ガス中における単一のPD電流波形を示す。(a)は空气中、印加電圧15kVrmsにおける測定結果、(b)はSF₆ガス圧力0.15MPa、58kVrms、(c)はSF₆ガス圧力0.4MPa、58kVrmsにおける電流波形の代表例である。なお、左側の波形は印加交流電圧の正の位相ピーク(90°)、右側は負の位相ピーク(270°)の電流波形を示している。図3より、空气中とSF₆ガス中ではPD電流波形が大きく異なることがわかる。特に空气中・正の位相ピークにおける電流波形は波高値が高く、その形状が異なる。これは、今回の電極系においてSF₆ガ中正極性のPDがストリーマコロナであるのに対し、空气中の正極性PDが、ほっす状コロナに進展しているためであると考えられる^[5]。

各条件におけるPD電流波形の立ち上がり時間、およびパルス幅に注目すると、空气中PDは正極性で立ち上がり時間、パルス幅ともに数十nsを示し、負極性では立ち上がり時間約5ns、パルス幅は約25nsを示しているのに対して、SF₆ガス中PDは立ち上がり時間が約0.9～1.1ns、パルス幅は約1.3～1.5ns程度であり、SF₆ガス中におけるPDパルスは空气中に比べて非常に急峻であることがわかる。これらの結果から、SF₆ガス中のPD信号は空气中に比べて高い周波数成分を有することが明らかであり、これまでのGISを対象として求められてきた報告結果とほぼ一致している^[6,7]。

ここで図3の(b)および(c)を比較すると、印加電圧が同じであるにも関わらず圧力の高い(c)SF₆ガス圧力0.4MPaの方が(b)0.15MPaよりも波高値が大きく観測されている。今回の実験系において、0.15MPaおよび0.4MPaはそれぞれコロナ安定化作用が効果的に作用する圧力領域、および作用しない圧力領域

図3 GIL中で発生する部分放電電流波形の測定

Fig.3 PD current waveforms for different condition.

に相当している。したがって、コロナ安定化作用が働く0.15MPaでは、部分放電によって発生した正極性イオンが針先近傍の電界を緩和する働きがあるために^[8]、個々のPDの進展が抑制され、この結果として0.4MPaにおけるPDよりも波高値が小さくなったものと考えられる。

3.2 SF₆ガス中部分放電電流パルス波形の電圧位相依存性

実機器に交流電圧が印加されている場合、PD波形が印加電圧の位相によって変化することが知られている^[2,3,9]。表1に今回GILを用いて得られたSF₆ガス圧力0.15MPaおよび0.4MPaにおけるPD電流波形の各要素の電圧位相依存性を平均値で示す。SF₆ガス圧力0.15MPaの結果に注目すると、印加電圧のピーク(90°)におけるPDの波高値が一番高く、印加電圧瞬時値の等しい60°と120°では同程度の波高値を有することがわかる。すなわち、各位相において発生するパルスの波高値は印加電圧の瞬時値に依存しており、印加電圧の瞬時値が高いほどパルスの波高値が大きい。

表1 部分放電電流波形の印加電圧位相特性

Table1 PD waveform characteristics for different phase of applied voltage.

	SF ₆ gas pressure : 0.15 MPa				0.4 MPa	
	60°	90°	120°	270°	90°	270°
Pulse height [mA]	0.310	0.446	0.340	0.413	0.999	1.47
Pulse width [ns]	1.54	1.50	1.56	1.28	1.35	1.29
Rise time [ns]	1.08	1.12	1.06	0.898	1.00	0.960
di/dt [mA/ns]	0.239	0.334	0.271	0.378	0.810	1.29

正と負の半サイクルを比較すると、立ち上がり時間、およびパルス幅は正の半サイクルでそれぞれ約1.1ns、1.5ns程度であるのに対し、負の半サイクルでは約0.9ns、1.3nsを示しており、負極性PDの方がパルス幅が短いことがわかる。すなわち負の半サイクルにおいて発生するPDの方が正の半サイクルにおいて発生するPDよりも高い周波数成分を有することが示唆される。

4. 部分放電信号の交流位相スペクトラム測定

4.1 部分放電信号の位相スペクトラム特性 図4は(a)空気中および、(b)SF₆ガス圧力0.15MPaにおいてPDを発生させた場合の針電極直下の平板電極におけるゼロスパン測定結果を示したものである。スペクトラムアナライザの同調周波数は30MHz、および1000MHzである。図4(a)(b)より、空气中PDは正/負極性の利得差が大きいのに対し、SF₆ガス中では正/負極性差が小さくなっており、3章で示したPD電流波形測定結果と対応している。空气中PDおよびSF₆ガス中PDとも、正の半サイクルではPD信号の利得は印加電圧の瞬時値にほぼ依存しており、印加電圧の瞬時値が高いほどスペクトラムの利得が大きく観測される傾向にある。この特性はPD電流パルスの波高値が位相依存性を示すことに対応している。一方、負極性PDは印加電圧の瞬時値に関係なく利得がほぼ一定となる傾向があり、印加電圧の極性によって位相スペクトラム特性が異なることがわかる。

このような極性による違いはPDの発生メカニズムが異なることに起因していると考えられる。すなわち、正極性PDはSF₆分子や残存負イオンから脱離した電子が初期電子となり高電界領域に向かって電子なだれ発生し、さらにストリーマへと進展するのに対して、負極性PDの場合は陰極から放出された

(a) Air, Applied voltage : 15kV_{rms} (b) SF₆ gas pressure : 0.15MPa, Applied voltage : 58kV_{rms}

図4 空気中およびSF₆ガス中部分放電の位相スペクトラム特性

Fig.4 Power spectra of PD signal - applied voltage phase characteristics for different frequency in air and SF₆ gas.

電子が初期電子となり低電界領域に向かって放電が進展し、最終的に電子が分子に付着することによって放電が停止すると考えられる。このような負極性PDは、トリチェリパルスとして知られており、規則的なパルス波形および発生周期を示すことが特徴であり^[9,10]、実験結果と一致する。

4.2 部分放電信号の周波数特性 図4(a)において位相スペクトラムの周波数特性に注目すると、空气中PDでは同調周波数を上昇させるにしたがい利得が急激に低下していることがわかる。同調周波数30MHzと1000MHzとを比較すると、PD信号の利得は30dB以上低下している。一方、図4(b)から、SF₆ガス中のPDは空气中に比べて周波数上昇に対する利得低下量が小さく、30MHzから1000MHzの同調周波数の変化に対して、利得低下量は10dB以下である。この結果は、SF₆ガス中のPDが空气中PDよりも高い周波数成分にまで大きな利得を有していることに起因している。

図5はSF₆ガス0.15MPaにおけるゼロスパン測定結果を基に、負の半サイクルでの利得と、印加電圧の瞬時値に対応して安定的に発生するスペクトラムの最大利得(Envelope)の差の周波数依存性を示したものである。図5より、正/負サイクルの利得差($G_{\text{neg}} - G_{\text{pos}}$)は低周波領域では負の値をとり、正極性利得が大きく観測されるが、周波数の上昇と共に $G_{\text{neg}} - G_{\text{pos}}$ は小さくなり、1000MHzでは大小関係が逆転している。この結果は正極性PDよりも負極性のPDの方が、高い周波数成分にまで大きな利得を有していることを表している。これは、前章におけ

る電流パルス測定の結果、SF₆ガス中の負極性PDの方が正極性PDよりもパルス幅が狭く、高い周波数成分にまで信号成分を有している事に対応している。

以上のように、ゼロスパン測定によって求められるPDスペクトラムから、PD電磁波信号はその基である電流パルスに起因することがわかる。交流電圧の正と負の半波ではPD機構が異なり、PD特性は電圧位相によっても変化する。このため、部分放電の発生が一定であっても測定周波数の選定によっては図5に示したとおり、正/負極性の特性が実際とは異なってしまう可能性がある。このことは、PDメカニズムに立脚した周波数選定を行って部分放電測定を行うことが重要であることを示している。

5. 部分放電信号の各周波数成分の伝搬特性

以上のPD発生特性の測定結果に基づいて、GILの長さ方向に配置したUHF内部センサa～gにスペクトラムアナライザを接続しゼロスパン測定を行い、その結果からPD信号の各周波数成分の伝搬特性について検討する。図6に58kVrms印加時のSF₆ガス圧力0.4MPaにおけるPD信号をUHF内部センサa(PD源からの距離1.2m)、f(PD源からの距離112.2m)、g(PD源からの距離169.5m)においてゼロスパン測定した結果を示す。なお、図6では各UHF内部センサに対して、同調周波数を300MHzとして測定した。図6より、センサa→f→gとPD源から遠ざかるにしたがって、負のピーク付近の利得は次第に小さくなるがわかる。

図7はUHF内部センサa (PD源からの距離1.2m)を用いて測定した位相スペクトラム特性のうち、265°～275°の電圧位相範囲で観測される利得の平均値を基準(0dB)とした場合に対する各センサb～gにおける位相範囲265°～275°の平均利得の減衰量を示している。同図には同調周波数50MHz、300MHz、400MHzにおける結果を示している。同図よりPD信号の周波数成分50MHzと400MHzを比較すると、伝搬距離100mに対して、50MHz成分は約3dBの利得の低下が見られるのに対し400MHzでは11dB以上もの減衰が確認できる。PD信号の距離に対する減衰量を直線近似すると、100mの伝搬に対して、50MHz、300MHz、400MHzの信号成分の減衰量はそれぞれ0.72dB、4.5dB、12.2dBと得られる。

図8にPD電磁波利得の各周波数成分の100mの伝搬に対する減衰量を示す。この結果、高い周波数成分ほど距離に対する減衰が大きいことがわかる。これは、GILを同軸導波管と見立てた場合、(i)同軸線路固有の減衰定数に起因する信号の減衰率、(ii)GIL内部のスペーサ、導体接合部、およびGILタンクのペローズ、などのインピーダンス不整合部における信号の反射、(iii)絶縁フランジ部などのGILタンク開口部における電磁波信号の漏洩、などが周波数依存性を示すことに起因していると考えられる。一般には、GIL内部のスペーサ部において信号の利得が大きく減衰すると考えられることから^[11,12]、各スペーサあたりにおける信号の減衰量を計算した結果、周波数300MHzにおいてポスト型スペーサ1個あたりの減衰量は約0.14～0.24dB、コーン型スペーサでは0.8～1.1dBに相当する事がわかった。すなわち、電磁波の伝搬時、コーン型スペーサを通過する場合はポスト型に比べdB量で4～6倍の損失が発生していることが明らかになった。

図5 正・負部分放電利得の差 ($G_{\text{neg}} - G_{\text{pos}}$) の周波数依存性
Fig.5 Gain difference between positive and negative PD as a function of detecting frequency.
(SF₆ gas pressure : 0.15MPa, Applied voltage : 58kVrms)

図6 部分放電信号の伝搬特性 (300MHz)
Fig.6 Detection characteristics of PD signal. (300MHz)
(SF₆ gas pressure : 0.4MPa, Applied voltage : 58kV_{rms})

図7 部分放電信号の各周波数成分の伝搬特性
Fig.7 Attenuation characteristics of PD signal as a function of propagation distance from PD source for different frequency
(SF₆ gas pressure : 0.4MPa, Applied voltage : 58kV_{rms})

図8 PD信号の各周波数成分の距離に対する減衰量
Fig.8 Attenuation of PD signal for different frequency
(SF₆ gas pressure : 0.4MPa, Applied voltage : 58kV_{rms})

6. あとがき

線路長168mの275kV実規模単相GILモデルを用いてGIL内部におけるPD信号の放射特性および伝搬特性について検討した。はじめに、PD電流波形の絶縁媒質による違い、および発生電圧位相に対する変化について検討した。この結果、PD電磁波信号はその基である電流パルスに起因することがわかった。交流電圧の正と負の半波ではPD機構が異なり、PD特性は電圧位相によっても変化する。このため、部分放電の発生が一定であっても、測定周波数の選定によっては正/負極性の特性が実際とは異なって得られる可能性があり、PDメカニズムに立脚した周波数選定を行って部分放電測定を行うことが重要である。さらに、GILの長さ方向に設置したUHF内部センサ対し、位相スペクトラム測定を行った結果から、GIL内部のPD信号の伝搬距離に対する減衰特性について検討した。この結果、スパーサを含めた100mの伝搬に対する50MHz、300MHz、400MHzの信号成分の減衰量は、それぞれ0.72dB、4.5dB、12.2dBであり高い周波数成分ほど減衰量大きいことを実験的に明らかにした。これは、同軸線路固有の減衰定数、インピーダンス不整合部におけるPD信号の反射、GIL開口部における電磁波の漏洩などの諸要素が周波数依存であることに起因すると考えられる。

最後に、本研究は中部電力(株)、三菱電機(株)、住友電気工業(株)、古河電気工業(株)の関係の方々の多大なる御協力の下に行われました。さらに測定にあたっては、名古屋大学工学部、清水雅仁氏、西口博史氏他関係者の御協力を頂きました。ここに深甚なる感謝を表します。

(平成9年1月22日受付、同年4月2日再受付)

【参考文献】

- [1] I. Murasawa, et al., : "Development of Long-distance 275kV Gas Insulated Transmission Line (GIL)", 11th International Conference on Gas Discharges and Their Applications., pp. I-326 - 329, 1995.
- [2] M. Hikita, et al., : "Partial Discharge Measurements in SF₆ and Air using Phase-resolved Pulse-height Analysis", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1 No. 2, pp.276-283, 1994.
- [3] A.G. Sellars, et al., : "UHF Detection of Leader Discharges in SF₆", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2 No. 1, pp.143-154, 1995.
- [4] M. D. Judd, et al., : "The Excitation of UHF Signals by Partial Discharges in GIS", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 3 No. 2, pp.213-228, 1996.
- [5] G. Vettese, et al., : "Ultrahigh Frequency Study of PD Pulses", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 273-276, 1994.
- [6] M. Hikita, et al., : "Phase Dependence of Partial Discharge Current Pulse Waveform and Its Frequency Characteristics in SF₆ Gas", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 103-106, 1996.
- [7] J. S. Pearson, et al., : "A Continuous UHF Monitor for Gas-insulated Substations", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 26, No. 3, pp.469-478, 1991.
- [8] O. Farish, et al., : "Prebreakdown Corona Processes in SF₆ and SF₆/N₂ Mixture", 3rd International Symposium on High Voltage Engineering, No. 31.15, 1979.
- [9] 細川 : "コロナ放電機構と最近の研究動向" 電気学会論文誌A, Vol. 111-A, No. 5, pp.370-375, 1991.
- [10] Jianfen Liu, et al., : "Simulation of Corona Discharge - Negative Corona in SF₆", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 1, No. 3, pp.520-529, 1994.
- [11] 小川,他: "GISにおける部分放電パルスの伝搬特性の検討 - パルスの生成と測定 - "平成7年電気学会電力・エネルギー部門大会, No. 590, 1995.
- [12] 小川,他: "GISにおける部分放電パルスの伝搬特性の検討 - GIS構成要素の影響 - "平成8年電気学会全国大会, No. 1448, 1996.

吉田 昌展

(学生員) 1973年3月10日生まれ。97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、GISにおける部分放電計測に関する研究に従事。

高橋 俊裕

(学生員) 1973年4月25日生まれ。96年3月名古屋大学工学部電気学科卒業。同年4月同大学大学院工学研究科博士課程前期課程進学。現在に至る。部分放電計測に関する研究に従事。

星野 俊弘

(学生員) 1971年10月30日生まれ。97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月同大学院後期課程進学。現在に至る。主として、電磁波による部分放電測定技術に関する研究に従事。

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。

宮崎 明延

(正員) 1958年1月24日生まれ。81年3月東京理科大学工学部電気工学科卒業。同年4月中部電力(株)入社。現在、同社中央送変電建設所・設計技術グループに勤務。主として、地中送電線の設計業務に従事。

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。