ガス絶縁開閉装置の沿面針部分放電等価回路モデル

正員 前川 洋 (三菱電機)

正員 土井 雅史 (三菱電機)

正員 川本 俊治 (大阪府立大学)

Equivalent Circuit Model of Partial Discharge
for Needle on Spacer in Gas Insulated Switchgears

Hiroshi Maekawa, Member (Mitsubishi Electric Corp.)

Masashi Doi, Member (Mitsubishi Electric Corp.)

Shunji Kawamoto, Member (Osaka Prefecture University)

It is well known that the phase distribution of partial discharge in GIS depends on the source of discharge. However, the equivalent circuit model has not been considered sufficiently. On the other hand, the authors have proposed an extended Whitehead circuit model, and have explained the difference of the phase distribution of discharge. In this paper the case of needle on spacer is treated in a model GIS(300kV), and the difference of phase distribution is measured. Next the dust figures are obtained, and charged regions on the spacer are discussed. Finally, it is stated that the EMTP simulation by the extended Whitehead circuit model agrees with the result of experiments fairly well.

キーワード:部分放電, GIS, 絶縁診断, 等価回路モデル, スペーサ

1. まえがき

電力系統の受変電設備に広く用いられているガス絶縁開閉装置 (GIS, Gas Insulated Switchgears) は気中絶縁機器に比べて小形、高信頼性、保守の簡略化の利点がある。しかし、主回路の充電部分や可動部分がすべて覆われているため、外部から目視での診断は困難である。よって、GIS にセンサを取り付け内部の診断を行うことが、近年さかに行われている。GIS は一旦内部絶縁異常の事故が起きると復旧に時間を要するので、有効な外部絶縁診断法が求められている⁽¹⁾⁽²⁾。特に放置すれば内部地絡事故、短絡事故に発展する可能性の高い部分放電の診断は最重要項目である。部分放電の診断の目的は、GIS が絶縁破壊に至る前の軽微な段階で閉絡事故を防止することである。現在の段階では GIS の部分放電による絶縁に関して、検出後早急に運転停止が必要か、余裕があるのかを診断できる技術についてはまだ十分な確立がされていない。これを確立するためには部分放電の基礎現象面からの研究が必要である。

筆者らは、GIS の部分放電源の同定法について放電源が発する UHF(Ultra High Frequency)帯の電磁波を検出する方法

を適用し、部分放電信号の検波波形の半値幅と振幅の関係が放電源固有の領域を持つことを見出し、放電発生位相特性と組み合わせて部分放電源の同定法を提案した⁽³⁾。また、固体絶縁物では既に等価回路を用いた部分放電の説明がされていたが^{(4)~(6)}、GIS において放電源により放電発生位相が異なる現象を、固体絶縁物のボイド放電についての従来の Whitehead モデルを拡張して説明できることを提案した⁽⁷⁾。部分放電源の中でも金属自由異物は電磁力によりタンク内を動き回り、トラップに捕らえられるか、またはスペーサ沿面に付着するものがほとんどである⁽⁸⁾⁽⁹⁾。スペーサ沿面に付着した金属異物は、放置すると放電が進展し絶縁破壊に至る場合があり、この時はスペーサ交換のため多大な費用と労力を要する。したがって、特に部分放電の段階での検出が重要である。しかし、スペーサ沿面金属異物の部分放電現象についてはスペーサに蓄積された空間電荷の複雑な現象のため報告例が少なく、部分放電形態は不明な点が多い。

本論文では、300kV モデル GIS に模擬スペーサを設置して沿面針部分放電実験を行い、針の長さや模擬スペーサの大きさを変えて放電発生位相の相違を測定した。また、針をスペーサに埋め込んだ試料と沿面に貼り付けた試料発生位相の

差を調べ、さらに放電後のスペーサ上の帯電を調べた。この結果、沿面針の部分放電は針先端と針側面の両方で起きていることが分かった。Whitehead の拡張等価回路モデルに放電源による部分放電発生位相の差を考慮した回路定数を用いた EMTF 計算の結果は、実測結果とよく一致し、モデルの適用範囲が拡張できたことについて述べる。

2. 部分放電モデル

図1にGISの針-タンク、浮き針、沿面針について提案する部分放電等価回路モデルを示し、その動作を以下で説明する。(a)は放電源近傍のコロナ発生部分、(b)はコロナ発生部分以外の絶縁部分および(c)は電源部分である。(a)および(c)はそれぞれの放電源について共通とし、(b)が放電源に依存して変化するものとする。

沿面針の場合は図1の(b)を絶縁部分の容量 C_1 のみとして従来の Whitehead モデル⁽⁴⁾で説明できる。図1の回路の動作は、電源電圧 V により C_1 とコロナ発生部分の容量 C_2 が進み電流 I_{C1} により分圧充電され、 C_2 にかかる電圧 V_{C2} が放電開始電圧 V_G に達すると部分放電が繰り返される。電源電圧 V がピーク値をこえると I_{C1} は負となり C_1 にかかる電圧 V_{C1} は V_{C2} とは逆極性になるので等価的に C_2 は $(V - V_{C1})$ の低い電圧で逆充電される。従って部分放電はしばらく起こらず、結局 $V=0$ 近傍でのみ部分放電が発生する。

一方、参考文献 (10) によると針-平板の気中放電の空気絶縁部分を抵抗として説明しており、針-タンクの場合は図1の(b)を絶縁部分の抵抗 R_1 のみと仮定できる。この場合、図2に示すように、 $V_{C2}=V_G$ になると部分放電は開始され、 V がピーク値を超えて進み電流 I_{R1} が負になっても、 C_1 の代わりに R_1 があるために C_2 には V がそのまま加えられて充電されるので、 V がピーク値を越えても部分放電は発生する。この場合、 R_1 にかかる電圧 V_{R1} のため I_{R1} の位相は $\pi/2$ 近く遅れる。

以上の差異により針-タンクと沿面針の部分放電発生の位相差は基本的に $\pi/2$ となることがわかる。浮き針の場合についてはその中間として(b)は C_1 と R_1 の並列回路と考えることができ、位相差も $\pi/4$ 近傍になる。しかし沿面針の場合については絶縁スペーサ沿面空間電荷分布の位相特性への影響が解明されておらず、また沿面針と針タンク放電の中間領域での部分放電発生位相についても理解が不十分であった。

3. 実験方法

実験には図3に示す300kVのモデルGISを用いた。中心導体外径は130mm、タンク内径は550mmである。左端に試料設置のためアクリル窓付きの蓋があり、ここから試料の目視確認を行った。部分放電による中心導体の電圧変動を検出する容量結合型内部センサは点検用フランジに取りつけられている。センサからの信号線は25dBのアンプに入力したあと、さらに検波器(前段で30dB増幅)を通してオシロスコープ

図1 部分放電等価回路モデル

Fig.1 Equivalent circuit model of partial discharge.

図2 針-タンク部分放電の位相差

Fig.2 The phase difference by the partial discharge of needle-tank.

図3 実験装置の概要

Fig.3 Outline of the experimental apparatus.

に入力する。検波器の積分回路の減衰時間は、4ns/100mV である。また、バンドパスフィルタを内蔵し、周波数範囲は 200MHz から 2GHz までである。周波数 200MHz 以下は外部ノイズの影響が大きいため実用性を考え、カットしている。ケーブルの長さは内部センサからアンプまでは 10m、アンプから検波器および検波器からデジタルオシロスコープまでは各々 1m である。オシロスコープは、5GHz のサンプリング周波数でデータを収録した。

図 3 に示すモデル GIS のセンサから 0.5m 離れた中心導体上 A の位置に模擬スペーサを設置した。模擬スペーサは表面に $\phi 0.2\text{mm}$ のアルミ線をテープで固定し、アルミ線は模擬スペーサ底面側に折り曲げ、底面に銅テープで固定することにより、GIS の中心導体との導通を図った。試料の形態を表 1 に示すが、試料 1, 2, 4 および 5 は針の長さは一定 (20mm) とし模擬スペーサの高さを各々 70mm, 35mm, 20mm および 10mm と変化させた。試料 5 は針の長さのほうが、スペーサより長い形状となっている。試料 3 は針の長さと模擬スペーサの長さが接近した場合の条件の放電位相を調べるためのものである。なお、模擬スペーサの材料はエポキシ系 (充填剤はアルミナ系)、比誘電率は 6.1、厚みは 10mm である。実験は全て SF_6 ガス圧力 0.4MPa (ゲージ圧) の条件で行った。

4. 測定結果

<4.1> 部分放電発生位相特性

表 1 に各試料の部分放電発生位相の代表的な測定結果を示す。すべてのケースについて印加電圧は 120kV (実効値) である。表中の上が印加電圧、下が放電電流であり、横軸は 2ms/div である。また、放電電流の縦軸は 0.4mA/div である。測定波形はオシロスコープの 1 回の走査で得られたデータであり、電圧印加 10 分後に測定した。沿面金属異物の部分放電の大きさ、発生頻度が、電圧印加後時間の経過と共に小さくなっていく例が報告されているが⁽¹¹⁾、本研究では部分放電の大きさ、頻度を電圧印加後 1 時間程度オシロスコープの波形を目視で継続確認した限り変化は見られなかった。また、参考文献(11)では、金属異物部分放電は正極性の放電量が 3000pC、負極性の放電はほとんど観測されないが、本研究では負極性の放電量 (数 10pC) が正極性に比べて多い結果となった。その理由として文献では、アルミ線は $\phi 0.5\text{mm}$ 、長さは 30mm、スペーサは $\phi 50\text{mm}$ 、高さ 40mm の円筒状モールド樹脂を上下電極で挟みこまれた構造に対し、本研究ではアルミ線は $\phi 0.2\text{mm}$ 長さは 20mm から 25mm、スペーサは 70mm 幅×厚さ 10mm (試料 6, 7 は 20mm)、高さ 20mm から 70mm の立方体モールド樹脂を中心導体上に設置した構造の相違によるものと考えられる。試料 1 は絶縁スペーサの高さが 70mm 針の長さが 20mm で針先端からスペーサ端まで 50mm あり、放電発生位相は電圧零点近傍で発生している。模擬スペーサの高さが低くなるにしたがって、部分放電発生位相が遅れることが分かる。つまり、徐々に針-タンクの放電発生位相に近くなり

表 1 沿面針から針-タンクへの部分放電発生位相の変化

Table 1 The phase shift of partial discharge from needle on spacer to needle-tank.

試料 5 では針-タンク放電の様相を示す。全体に負の放電数が多く発生位相特性が顕著に表れており、まとめると次のようになる。

- (1) 試料 1,2 の負極性放電開始位相は約 140° であるが、試料 3,4 は約 180° である。
- (2) 試料 1 から 4 までの負極性放電終了位相は多少ばらつくが 270° から 280° である。
- (3) 試料 5 はスペーサより針の長さの方が長いため負極性放電電流は 270° 以降も観測され、沿面放電と針-タンク放電の重畳された電流波形と考えられる。

これを検証するため、次の実験を行った。

<4.2> 沿面針部分放電発生箇所

沿面針部分放電については、部分放電による発光のスペクトラムは報告されているが⁽¹²⁾、放電発生部分が針先端部分なのか針全体に亘るのかについては報告例がない。部分放電が進展してアーク放電に至った場合については報告されており針先端からアークが発生している⁽¹³⁾。沿面針の放電発生部分は今回の実験の場合、観測窓から試料が見えにくい位置にあるためと放電量が少ないため放電による発光を目視では確認できなかった。よって表 2 に示す試料を作成し、その部分放電発生位相特性から検討した。

試料 6 は幅 70mm 高さ 20mm 厚み 20mm の模擬絶縁スペーサ表面に $\phi 0.2\text{mm}$ のアルミ線をテープで固定したもので、作成方法は試料 1 から 5 と同じである。また、試料 7 は $\phi 0.2\text{mm}$ のアルミ線を直線状に張り、幅 70mm 高さ 20mm 厚み 20mm の形にスペーサ樹脂を流し込み注形作成したのものであり、アルミ線と絶縁物の間は十分に絶縁物で充填されている。よって、試料 7 は模擬絶縁スペーサに埋め込まれたアルミ線の部分からは放電しない構成となっている。表中の縦軸横軸は表 1 と同じである。

負極性放電については、試料 6 では部分放電の発生位相は 180° から始まり、一方試料 7 はそれより遅れ 210° で始まっている。この 30° の差異は、試料 6 では沿面針および針-タンクの放電が、試料 7 では針-タンク放電の特性のみ起きているためと考えられる。さらに、この現象を高電位の円筒形金属と絶縁物の線接触と考えると、高木効果と呼ばれる電界集中が起き⁽¹⁴⁾、試料 6 の沿面針部分放電では絶縁物と接する針全体から放電していることが考えられる。

<4.3> 模擬スペーサの蓄積電荷と等価回路

沿面針の部分放電により針先端近傍の模擬スペーサ表面に電荷が蓄積されることが報告されている⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。試料 1 および試料 4 について、印加電圧 120kV で 10 分間印加後試料を取りだし、針をはずした後、マイナス極性のトナーを刷毛で塗った。帯電図の例を表 3 に示す。試料 1 では針先端傍から直径 40mm の円状にマイナスの電荷が帯電している。針先の部分放電によってこの帯電部分が形成され、等価回路では

表 2 沿面針とスペーサ埋め込み針の部分放電発生位相特性

Table 2 The phase shift of partial discharge by needle on spacer and molded in spacer.

図 1 の C_1 で表されることが考えられる。また、試料 1,4 共に針と模擬スペーサの接触部分がすべて白く、負の電荷が蓄積されていることが分かる。針と模擬スペーサの接触部分の部分放電により接触部分に負電荷が帯電したと考えると、この部分は等価回路では図 1 の C_1 で表現できると考えられる。つまり、試料 1 では針先放電と接触部分の放電が起きており、また、試料 4 では接触部分の放電だけであるから、等価的な C_1 は試料 1 の方が大きいと考えられる。表 3 に試料 1 および 4 の部分放電位相特性について図 1 の回路による EMTP 計算と実験結果を比較するために再掲載した。実験では、放電電流はすべて正極性として観測しており、負極性放電で放電電流位相は EMTP 計算結果と良く合っている。表 4 に EMTP の計算に用いた値を示すが、 C_1 について試料 1 が $2\mu\text{F}$ 、試料 4 では $1\mu\text{F}$ とすることにより部分放電発生位相の差を説明することができる。

5. あとがき

GIS の沿面針部分放電位相特性について検討した結果、次のことが判明した。

- (1) 沿面針の部分放電発生位相特性は針の長さと絶縁物の高さの相対関係に依存する。
- (2) 針の長さが絶縁物より長い場合は、位相特性は針タンクと沿面針の重畳した特性を示す。放電箇所は針先端および針側面と絶縁物の接触線である。
- (3) 針の長さと絶縁物が等しい場合は、位相特性は沿面針の特性を示し、放電箇所は針側面と絶縁物の接触線である。

表 3 沿面針模擬スーサの帯電図、放電発生位相実験結果および EMTP 計算結果

Table 3 Dust figures, partial discharge and EMTP simulation for Sample 1 and 4.

表 4 EMTP 計算定数

Table 4 Constants for EMTP simulation.

	C_1 (μF)	C_2 (μF)	R_1 (k Ω)
試料 1	2.0	3.0	5.0
試料 4	1.0	3.0	5.0

(4) 針の長さが絶縁物より短い場合、位相特性は沿面針の特性を示し、放電箇所は針側面と絶縁物の接触線と絶縁物上の針先端である。

(5) 試料 1, 4 の放電位相特性の差異は、拡張 Whitehead モデル (図 1) の C_1 を変化させることにより、実験結果と EMTP 計算がよく一致することで説明できる。このことから、提案モデルの適用範囲を拡張できると考えられる。

今後、さらに部分放電の等価回路定数と物理現象との関係および整合性、絶縁物表面への帯電の影響、等価モデルの他への応用などについて検討を進める予定である。

(平成 12 年 7 月 25 日受付, 平成 13 年 3 月 26 日再受付)

文献

- (1) 榎原, 村瀬, 萩森, 若林, 江本, 小川: 「GIS における部分放電検出システムの開発」, 電学論 B, Vol. 117, No. 12, pp. 1575-1583, (平 9-12)
- (2) 前川, 榎井, 亀井, 宮本: 「GIS 部分放電位置標定システムの開発と実フィールドへの適用」, 電学論 B, Vol. 116, pp. 1575-1579, (平 8-12)
- (3) 前川, 土井, 川本: 「ガス絶縁開閉装置における部分放電の同定」, 電学論 B, Vol. 120, No. 8-9, pp. 1106-1111, (平 12-8)
- (4) S. Whitehead: "Dielectric Breakdown in Solids", Clarendon Press, (1951)
- (5) F. H. Keruger, "Discharge Detection In High Voltage Equipment", Temple Press, (1964)
- (6) 伊藤, 堺, 鳥山: 「ボイドの等価回路とボイド放電の経時変化と対応」, 電学論 A, Vol. 95, No. 8, pp. 335-340 (昭 50-8)
- (7) 前川, 土井, 川本: 「GIS 中の部分放電等価回路モデル」, 電学論 B, Vol. 120, No. 6, pp. 905-906 (平 12-6),
- (8) 宮本, 深見, 花岡, 夏梅, 井波, 吉村, 羽馬: 「回転運動を考慮した高電界中金属異物挙動のシミュレーション手法」, 平成 11 年電学会全国大会予稿, No. 388
- (9) 大隈, 清水, 石垣, 井波, 米沢: 「ガス絶縁開閉装置の金属異物検出技術の検討」, 平成 11 年電学会全国大会予稿, No. 396
- (10) 鳳, 関口, 河野: 「電離気体論」, 電気学会刊, p. 106 (昭 58)

- (11) 渡辺, 戸田, 加藤, 鈴木, 松尾:「SF₆ ガス中絶縁物沿面付着時の部分放電時間変化」, 平成 9 年電気学会全国大会予稿, No. 577
- (12) 渡辺, 黒澤, 田中, 岡本, 山田, 藤井:「SF₆ ガス中部分放電発光スペクトル」, 平成 3 年電気学会電力・エネルギー部門大会予稿, No. 44
- (13) 仲西, 渋谷, 荒幡, 江浦:「不平等電界下における SF₆ ガス中の支持絶縁物の沿面放電」, 電学論 A, Vol. 102, No.9, pp. 475-482, (昭 57-9)
- (14) 宅間 董:「複合誘電体における電界集中」, 静電気学会誌, 14, 1, pp. 40-48, (1990)
- (15) 鈴木, 依田:「SF₆ ガス中金属異物付着時の絶縁物沿面部分放電特性」, 平成 11 年電気学会電力・エネルギー部門大会予稿, No. 394
- (16) 鈴木, 依田:「SF₆ ガス中金属異物付着時の絶縁物沿面帯電特性」, 平成 12 年電気学会全国大会予稿, No. 6-220

前川 洋 (正員)

1946年12月13日生まれ。'72年3月大阪府立大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月三菱電機(株)入社。現在、同社系統変電・交通変電システム事業所、系統変電技術部監視制御システム担当部長。主として、変電機器監視システムの開発に従事。'93年電気学会進歩賞受賞。

土井 雅史 (正員)

1969年2月13日生まれ。'94年3月東京工業大学大学院理学研究科応用物理学専攻修士課程修了。同年4月三菱電機(株)入社。現在、同社先端技術総合研究所電機システム技術部絶縁グループにおいて、主として GIS の絶縁診断技術に関する業務に従事。現在、同社先端技術総合研究所環境システム技術部放電応用グループに所属。

川本 俊治 (正員)

1947年3月25日生まれ。'70年3月大阪府立大学電気工学科卒業。同年日立製作所入社。'80年大阪府立大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年大阪工業大学・大阪電気通信大学各非常勤講師。'85年米国クラークソン大学・ミネソタ大学各研究員。'89年大阪府立大学電気工学科講師。'91年 同助教授、'96年電気電子システム工学科教授となり現在に至る。ソリトンに関連する非線形微分方程式論、電力システムの安定性解析・安定化制御など非線形問題に関連する研究に従事。工学博士(電気)、Ph.D.(数学)、ニューヨーク科学アカデミー外国人会員。電気学会、IEEE など10学会の会員。