大気圧 SF₆ ガス中不平等電界下のバリア効果

正員 宮 川 勝 (東 芝)

正員 吉 田 哲 雄 (東 芝)

正員 正 木 信 男 (東 芝)

正員 大 竹 史 郎 (東 芝)

正員 大 島 巖 (東 芝)

Barrier Effect under Nonuniform Field in Atmospheric Pressure SF₆ Gas

Masaru Miyagawa, Member, Tetsuo Yoshida, Member, Nobuo Masaki, Member, Shirou Ohtake, Member, Iwao Ohshima, Member (Toshiba)

It is generally known that insertion of a barrier under nonuniform field in the air increases the flashover voltage, which is called a barrier effect. There are many uncertainties, however, about the barrier effect of an SF₆ gas that remain to be clarified. We therefore examined the influences of the barrier shapes and positions on the flashover voltage by inserting a barrier between a hemisphere capped rode and a plate in the SF₆ gas under near atmospheric pressure for the lightning impulse voltages and AC voltages (50Hz). As a result, the following findings were obtained. (1) Insertion of a disk-shaped barrier reduces the flashover voltage; a cup-shaped barrier whose surface curves almost along the equipotential line increased the flashover voltage by 30 to 40%. (2) Trapped charges on the barrier surface is of the same polarity as the applied voltage and the magnitude of positive charge was greater than that of negative charge. It was also found that there is a correlation between the amount of trapped charge and the flashover voltage. (3) As mentioned above, application of a barrier under nonuniform field in the SF₆ gas of atmospheric pressure is considered to help reduce the size of, for example, a cubic type gas-insulated switchgear.

キーワード：SF₆ ガス、バリア効果、部分放電、帯電、電界緩和

1. ま え が き

一般に、空気中の不平等電界下に絶縁板などのバリアを挿入すると、バリアなしに比べてフラッシュオーバー電圧が向上することはよく知られている。これをバリア効果と呼び、多くの研究がなされている⁽¹⁾⁽²⁾。

また、SF₆ ガス中のバリア効果についても幾つかの研究が行われている。例えば、針対平板電極にバリア(厚さ 0.1 mm)を挿入した場合に雷インパルス電圧に対しては効果があり、交流電圧では効果がない⁽³⁾。また、半球棒対平板においてバリアが高压電極と同電位の平行電極の効果を示すことにより交流電圧で効果がある⁽⁴⁾。および、半球棒対半球棒において雷インパ

ルスに対して1枚バリアでは効果がないが2枚にすると効果がある⁽⁵⁾などの実験結果が報告されている。しかし、SF₆ ガス中のバリア効果は体系的にまとめられていないので不明な点が多い。そこで著者らは、低圧力 SF₆ ガス中不平等電界下のバリア効果について検討し、バリアの形状を工夫することで雷インパルスフラッシュオーバー電圧が向上することを確認した⁽⁶⁾。

以上のようなことから、本研究ではガス絶縁機器縮小化のため大気圧近傍における SF₆ ガス中の半球棒対平板電極にバリアを挿入し、バリアの形状、バリアの位置などがフラッシュオーバー電圧に及ぼす影響を交流電圧と雷インパルス電圧について調査し、フラッシュオーバー電圧の向上要因について検討を行った。

図 1 試験装置

Fig. 1. Experimental setup in the vessel.

図 2 試料断面形状

Fig. 2. Section view of model electrode and barriers.

2. 実験方法

〈2・1〉 実験装置 本実験で用いた実験装置の概略を図 1 に示す。実験タンクは直径 50 cm、高さ 80 cm の鉄製である。この試験タンクの中に半球棒と平板電極およびバリアを配置し、真空ポンプによりタンク内圧力を 400 Pa 以下にした後、SF₆ ガスを 20°C 換算で 0.1 MPa まで封入した。ここで、半球棒、平板電極およびバリアは実験前にフロンやアルコールで十分洗浄後、残留電荷のないことを確認してタンク内にセットした。そして、SF₆ ガス封入後、約 8 時間放置してから実験した。次に、実験に用いた試料を図 2 に示す。(a) 図は半球棒対平板電極、(b) 図は円板状バリア、(c) 図は円板状バリアにひだを設けた形状の円柱状バリア、(d) 図はバリア表面が半球棒対平板電極の等電位線にほぼ沿った形状の碗状バリアである。また、バリアはその表面に導電塗料を塗布することで形成した導電層があるものとならないものを準備した。この導電層は、バリア表面の帯電を模擬している。試料の材質は半球棒と平板が黄銅で、バリアはエポキシ樹脂

脂であり、碗状バリアは放電現象観察時のみが見えるようにアクリル樹脂とした。

〈2・2〉 フラッシュオーバー電圧の測定と写真撮影

バリアの形状と位置を変え、更にバリア表面の導電層の有無を変えて交流部分放電開始電圧と交流フラッシュオーバー電圧および雷インパルスフラッシュオーバー電圧の測定を行った。部分放電は最小検出感度を 1 pC としたオシロスコープで測定し、交流フラッシュオーバー電圧は JEC-0201 に準じた電圧上昇法で電圧上昇速度を 5 kV/s として 5 回以上フラッシュオーバーさせ、その平均値を求めた。雷インパルスフラッシュオーバー電圧は JEC-212 に準じた昇降法で 50% フラッシュオーバー電圧を求めた。この場合のフラッシュオーバー回数は 20 回以上で電圧印加時間間隔は約 1 分とし、特にバリア上の帯電電荷の除去は行わなかった。

また、交流部分放電光と交流および雷インパルスフラッシュオーバーの静止写真を石英ガラスでできたのぞき窓から撮影した。フィルムは ASA 3000、レンズは f4.7 を用いシャッターは開放状態にし、外部から光が入らないようにカメラ周りを暗幕でおおった。部分放電光の撮影では露出を f4.7、シャッター開放時間を 1 分とした。フラッシュオーバーの撮影では減光フィルタを用い露出を f512、シャッター開放時間を電圧印加からフラッシュオーバーに至るまでとした。

〈2・3〉 雷インパルス電圧によるバリア上の帯電電荷量の測定と電荷図形の作成 雷インパルス電圧を 1 回印加した後、5 分以内に静電気測定器(栄戸電気社製スタチロン M)でバリア上の帯電電圧と極性を測定し、次に、バリアの静電容量を測定して帯電電荷量を算出した。更に、これを 10 回繰返しその平均値を求めた。また、バリア上の帯電状態を観察するために、複写機のトナー(富士ゼロックス社製 D 232、黒)を用いて電荷図形を作成した。

以上の測定と電荷図形の作成は、すべて図 1 に示す実験タンク内の SF₆ ガス中で行った。また、バリアは測定のたびに更新した。

3. 実験結果

〈3・1〉 交流フラッシュオーバー電圧特性 図 3 にバリアと半球棒の距離 l を 10 mm 一定とした場合の交流フラッシュオーバー電圧 V_{AC} と部分放電開始電圧 V_i を示す。なお、半球棒と平板間は 50 mm 一定である。以下の図も同様である。また、比較のためバリアなしの V_{AC} と V_i を併記する。図から V_{AC} の大きさは(円板状) < (バリアなし) < (円柱状) < (碗状) の順になっていることがわかる。碗状バリアの V_{AC} はバリアな

図 3 各バリアの部分放電開始電圧と交流フラッシュオーバー電圧

Fig. 3. AC flashover voltage and partial discharge inception voltage for each barrier.

しに比べて約 1.4 倍である。更に、導電層を設けるとそれぞれ V_{AC} と V_i は導電層なしより高くなった。なお、碗状バリアを挿入し l を変えた場合の V_{AC} と V_i 特性は、 l が大きくなると V_{AC} が小さくなり、 V_i が大きくなる傾向を示し気中のバリア特性と同じであった⁽²⁾。

〈3・2〉 雷インパルスフラッシュオーバー電圧特性

図 4 に交流フラッシュオーバー電圧特性と同様に、雷インパルス 50% フラッシュオーバー電圧 V_{50} とばらつき σ を示す。図から、 V_{50} の大きさは V_{AC} と同様に(円板状) < (バリアなし) < (円柱状) < (碗状)の順になっている。導電層なしの碗状バリアの V_{50} はバリアなしに比べて約 1.4 倍である。更に、正極性と負極性の V_{50} を比べると、負極性のほうが絶対値が大ききばらつきの小さい安定したフラッシュオーバーであることがわかる。次に、導電層を設けたバリアはバリア効果があるが、 V_{AC} とは逆に雷インパルスフラッシュオーバー電圧は導電層のない場合のほうが高くなる。すなわち、導電層を設けると碗状バリアのみバリア効果があり、他のバリアはバリアなしより V_{50} が低下した。導電層ありの正極性の σ は導電層なしの σ より小さくなっている。なお、碗状バリアを挿入し l を変えた場合の V_{50} 特性は、気中と同様に l が大きくなると V_{50} が小さく

図 4 各バリアの雷インパルス 50% フラッシュオーバー電圧とばらつき

Fig. 4. Lightning impulse 50% flashover voltage and standard deviation for each barrier.

図 5 各バリアの雷インパルス電圧と帯電電荷量との関係

Fig. 5. Relation between trapped charge and lightning impulse voltage for each barrier.

なる傾向を示した⁽²⁾。

〈3・3〉 雷インパルス電圧によるバリア上の帯電電荷量特性

図 5 に $l=10$ mm とし、バリアの形状を変え雷インパルス電圧を印加した場合のバリア表面上帯電電荷量 q を示す。図から、 q は印加電圧と同極性に帯電し印加電圧の上昇と共に増加する傾向を示す。また、碗状バリアの q が最も大きく最大値が正極性

で約 45 nC, 負極性で約 -65 nC である。更に, 正極性と負極性の q を比べると, <3・2>節で述べたようにフラッシュオーバー電圧の高い負極性のほうが絶対値が大きくばらつきの小さい安定した帯電であるのがわかる。

4. 検 討

<4・1> 部分放電開始電圧と交流フラッシュオーバー電圧の向上要因 導電層を設けると V_{AC} と V_i が上昇する要因は, 図 6 の静電界計算結果に示すように, 導電層により半球棒先端の最大電界強度が抑制されるためである。また, SF₆ ガス中不平等電界下の交流フラッシュオーバー電圧は, 電界集中部で生じた全路破壊に至る前の部分放電が空間電荷を形成し, この空間電荷が

図 6 碗状バリアによる半球棒先端の静電界強度

Fig. 6. Electrostatic field strength of extremity of hemisphere capped rod for cup-shaped barrier.

図 7 碗状バリアの交流電圧と最大部分放電電荷の関係

Fig. 7. Relation between maximum partial discharge and AC voltage of cup-shaped barrier.

電界集中部の電界を緩和するので実測値が理論値より上昇する⁽⁷⁾。従って, 半球棒対平板にバリアを挿入した場合でも裸電極と同様に電界緩和効果があると考えられる。なぜなら, 図 7 に示す碗状バリアの交流電圧 V と最大部分放電電荷 Q_m の特性を見ると, バリアなしと導電層なしのバリアは部分放電発生から Q_m が急変するまでの $V-Q_m$ 特性が同様であるが, 導電層ありは Q_m が小さい。次に, バリアが存在すると Q_m が急変しても破壊するまでの特性はバリアなしのようになすぐに破壊に至らず Q_m が抑制される。特に, 碗状バリアは Q_m が急変した後で Q_m を抑制し, 破壊電圧を大きく上昇させている。このような Q_m の急変は, 棒先端の部分放電がバリア表面に達しているためと考えられる。次に, バリアの形状によりフラッシュオーバー電圧が異なる要因は, バリア形状により棒先端の静電界は変わらないので, 部分放電による空間電荷の形成がバリアの形状に従うためと考えられる。以上のことは, 図 8 に示すバリアなしと各バリア形状の $l=10$ mm, $V=70$ kV における部分放電光の静止写真からも裏付けられる。(a) 図のバリアなしは半球棒先端付近のみに部分放電が発生している。これに対し, (b) 図の円板状バリアは部分放電がバリア表面に到達後, 表面に沿って進展してバリア端部の電界を強くしバリアなしよりフラッシュオーバー電圧を下げている。(c) 図の円柱状バリアは, 部分放電の進展をひだが阻止し, (b) 図より上昇する。(d) 図の碗状バリアは部分放電の進展を阻止すると同時に, 部分放電がバリア内面の形状に従って球状となり, 半球棒先端の電界を緩和しフラッシュオーバー電圧を大きく上昇している。

<4・2> 雷インパルスフラッシュオーバー電圧の向上要因 インパルス電圧におけるバリア効果を帯電電荷

図 8 各バリアの交流電圧 70 kV の部分放電光

Fig. 8. Glow of partial discharge at AC 70kV for each barrier.

図9 帯電電荷量と雷インパルス50%フラッシュオーバー電圧の関係

Fig. 9. Relation between lightning impulse 50% flashover voltage and trapped charge.

量 q で検討してみる。図9は円板状、円柱状、碗状バリアにおいて各々の V_{50} を1回印加したときのバリア表面上の帯電電荷量を示す。帯電電荷の極性は正極性 V_{50} に対して正、負極性 V_{50} に対しては負である。図9の V_{50} - q 特性から、正極性と負極性とにも V_{50} と q には相関関係があり、 q が増加すると V_{50} も上昇している。また図5より、 q はバリアの形状に大きく依存していることがわかる。更に、バリア表面の帯電を模擬した導電層ありのバリアは、バリア効果があるが導電層なしに比べて V_{50} が低下している。バリア表面上には印加極性と同極性の電荷が帯電し、バリア表面と半球棒間の電位差を小さくしている。これより、電界強度が低下するだけでなく、帯電電荷による電界が印加電圧の電界と逆方向に働いて電界緩和していると考えられる。

更に、バリア表面を帯電後、帯電させた極性と逆極性のインパルス電圧を印加すると帯電した電荷と印加電圧が加算され、フラッシュオーバー電圧が大きいもので50%程度低下した。これらのことより、 V_{50} は q が大きくなると上昇するといえる。また、負極性において円板状バリアにヒダを設けた円柱状バリアのほうが帯電電荷量が小さいにもかかわらず V_{50} が高いことから、 V_{50} の向上要因として V_{AC} と同様にヒダによる放電の阻止効果も加わっていると考えられる。これはヒダの高さ h が高いほどフラッシュオーバー電圧が高かったことから裏付けられる。

以上述べたように、 V_{50} の向上要因はバリア上の帯電による電界緩和効果とひだによる放電進展の阻止効果が考えられ、気中のバリア効果と同様の効果が出

図10 負極性雷インパルス電圧による碗状バリアの電荷図形(印加電圧200 kV)

Fig. 10. Dust figure of cup-shaped barrier by negative impulse voltage.

る⁽⁸⁾。しかし、気中と大きく異なる点は負極性の V_{50} が向上すること、および円板状はバリア効果がないが碗状は効果があることである。負極性の V_{50} が向上する理由は、図10に示す負極性雷インパルス電圧による碗状バリアの電荷図形から、帯電電荷が気中のように局所に集中⁽⁸⁾せず一様に分布しており、バリア裏面の電界強度も局部集中せず平均化するためと考えられる。

また、円板状のバリア効果がない理由は、帯電電荷によりバリア端部の電界強度が上昇するためである。すなわち、バリア表面が帯電すると見掛け上半球棒と同電位になり、端部の電界強度が上昇し、この電界強度でフラッシュオーバー電圧が決まるためである。

5. ま と め

0.1 MPa の SF₆ ガス中不平等電界下にバリアを挿入した場合の、フラッシュオーバー電圧向上に及ぼすバリアの形状や挿入位置の効果について検討を行った結果、以下のことがわかった。

(1) 碗状バリアを挿入すると、交流および雷インパルスフラッシュオーバー電圧がバリアなしに比べて約40%上昇する。円板状バリアを挿入すると逆に低下する。

(2) バリアなしとありの交流電圧 V と最大部分放電電荷 Q_m 特性は、 Q_m が急激に大きくなるまで一致している。 Q_m 急変後のバリアありの特性は、バリアなしのようにすぐに破壊に至らず Q_m が抑制される。

(3) 雷インパルス電圧印加時のバリア表面上の帯電電荷は印加電圧と同極性であり、帯電電荷量と雷インパルスフラッシュオーバー電圧には相関関係がある。

(4) 交流フラッシュオーバー電圧と雷インパルスフラッシュオーバー電圧の向上要因は、部分放電や帯電電荷が形成する空間電荷による電界緩和作用、およびひだによる放電進展阻止効果が考えられる。また、空間電荷

の形成はバリアの形状に依存する。

以上のように、大気圧の SF_6 ガス中不平等電界下にバリアを適用することでフラッシュオーバー電圧を向上でき、例えばキュービック形ガス絶縁スイッチギヤ (C-GIS) の縮小化を図ることができる。

終りに、本研究を行うにあたって、多大な御指導をいただいた当社 柳父悟電力変電技術部長、高木正友スイッチギヤ部長、松沢喜久雄スイッチギヤ主幹、大橋 宏スイッチギヤ主幹に感謝の意を表します。

(平成2年4月5日受付、同2年9月21日再受付)

文 献

- (1) 例えば, H. E. Remde & H. Boecker: "Voltage-Current Characteristics During Propagation of Surge Breakdown of a Point-to-Plane Gap with Insulating Barrier", IEEE paper, TP616-PWR, 271 (1971)
- (2) 例えば, 吉田, 他: 「気中バリア絶縁による耐電圧向上の検討」, 電学論 B, **100**, 57 (昭55-1)
- (3) D. König & H. G. Lantenshlager: "The barrier effect in air and SF_6 -insulated on uniform electrode configurations", 7th conference Gas Discharge and their Applications, 292 (1982)
- (4) 木村, 他: 「 SF_6 ガス中におけるバリア絶縁の効果」, 昭56年電気学会全大, p. 146
- (5) 吉田, 他: 「 SF_6 ガス中のバリア効果」, 昭59年同上, p. 65
- (6) 宮川, 他: 「低圧力 SF_6 ガス中不平等電界下のバリア効果」, 電気学会放電研資, ED-89-32 (平元)
- (7) 「気体絶縁への混合ガスの応用」, 電気学会技報(II部), No. 248 (昭62)
- (8) 「放電バリア効果—バリアによる放電進展の阻止・抑制効果—」, 同上(II部), No. 270 (昭63)

宮 川 勝 (正員)

昭和35年12月16日生。昭和58年3月明治大学工学部電気工学科卒業。同年4月(株)東芝入社, 重電技術研究所に勤務。主として, 中圧スイッチギヤの研究開発に従事。

吉 田 哲 雄 (正員)

昭和24年9月4日生。昭和43年3月広島県立尾道工業高等学校電気工学科卒業。同年4月(株)東芝入社, 重電技術研究所に勤務。主として, スイッチギヤの気中絶縁, 複合絶縁, 固体絶縁および低圧力 SF_6 ガス絶縁に関する研究に従事。

正 木 信 男 (正員)

昭和23年5月9日生。昭和46年3月神奈川大学電気工学科卒業。同年4月(株)東芝入社。主として, 中圧スイッチギヤの開発設計に従事。

大 竹 史 郎 (正員)

昭和34年9月26日生。昭和57年3月室蘭工業大学電気工学科卒業。同年4月(株)東芝入社。主として, スイッチギヤの設計に従事。

大 島 巖 (正員)

昭和21年4月28日生。昭和44年3月九州工業大学電気工学科卒業。同年4月(株)東芝入社, 重電技術研究所配属, 現在に至る。工学博士。この間, 変圧器・開閉器・変換装置・避雷器などの高電圧技術開発に従事。最近は真空遮断器, 中圧スイッチギヤ, 電力変換装置の開閉技術・高電圧技術およびパルスパワーの研究に従事。IEEE 会員。