直流課電がいし連の部分フラッシュオーバーに関する研究

正員 松岡良輔 (日本ガイシ)

正員 伊藤進 (日本ガイシ)

正員 坂西健治 (日本ガイシ)

Investigation of Single Unit Flashover in HVDC Insulator Strings

Ryosuke Matsuoka, Member, Susumu Ito, Member and Kenji Sakanishi, Member (NGK Insulators, Ltd.)

In the case of DC insulator strings, a special phenomenon, so called single unit flashover, has been recognized to occur under some special contaminated and wetted conditions not only in laboratories but also in actual lines.

Higher magnitudes of audible noise (AN), radio interference (RI), and television interference (TVI) from this single unit flashover may give a serious environmental impact to the neighbourhood of the transmission line. Some investigations have ever been made on this problem simulating such phenomenon under normal operating voltage conditions.

Here we explain the investigation results of single unit flashovers under cold-wet-switch-on conditions. Such a condition occurs when a de-energized transmission line is re-energized under a wet condition.

Higher occurrence probability of single unit flashovers was obtained under cold-wet-switch-on conditions compared with the case of normal operating voltage conditions.

Some candidates for countermeasures to suppress the single unit flashover have also been evaluated.

キーワード：直流送電，部分フラッシュオーバー，汚損がいし，可聴雑音

1. ま え が き

直流送電線のがいし装置においては，汚損湿潤条件によっては，がいし連中の1～2個のがいしが大きな放電音を伴う青白い連続アークによって橋絡される，部分フラッシュオーバーを発生する場合のあることが知られている^{(1)～(3)}。部分フラッシュオーバー発生時の騒音レベルは，汚損湿潤がいしから通常発生する部分放電に比べ非常に高く伝搬範囲も広いので，場合によっては線路沿線の住民に対する障害が問題となる恐れもある。

部分フラッシュオーバー現象は1971年に(財)電力中央

研究所塩原の500 kV 直流送電実験線において世界で初めて観測され，人工汚損がいしを含め，自然湿潤条件下で種々部分フラッシュオーバーについて基礎調査が行われた⁽¹⁾。その後部分フラッシュオーバー現象を系統的に評価するため，長年にわたり実験室での再現に努力がはらわれてきた。その結果，通常の人工汚損試験の場合より薄い霧の条件が，がいし連に沿った湿潤の不均衡を生じやすくこの現象を再現できることがわかり，乾燥時の直流フラッシュオーバー電圧の高い大形がいしが部分フラッシュオーバーの発生率を低く抑えるのに有効であることが確認された⁽³⁾。

これまでは，がいし連が連続して課電されている条

件での部分フラッシュオーバーの研究に限られていた。しかし、課電率の低い系統では、無課電時にがいしが湿潤した後課電される場合もあり、今回このような条件における部分フラッシュオーバーの発生確率や可聴雑音(AN)特性を調査した。また、部分フラッシュオーバー防止対策についても調査した。

2. 部分フラッシュオーバー現象

部分フラッシュオーバーは、がいし連中の一部のがいしの分担電圧が極端に大きくなり、がいし単体のフラッシュオーバー電圧より大きくなって発生すると考えられている。その発生プロセスを以下に示す。

(1) 湿潤あるいは汚損の不均衡が原因で特定のがいしの表面抵抗が他のがいしの抵抗に比べ高くなる。

(2) 抵抗の-highいがいしの電圧分担が高くなり、そのがいしの漏れ電流による発熱(ジュール熱)も大きくなる。

(3) このがいしは他のがいしに比べ乾燥効果が大きく湿潤しにくくなるので、表面抵抗がますます大きくなり、分担電圧も高くなる。

(4) 分担電圧ががいし単体のフラッシュオーバー電圧を上回ると部分フラッシュオーバーが発生する。

交流課電がいし連では部分フラッシュオーバー現象の発生は確認されていない。交流の場合には、がいし表面抵抗にアンバランスが生じても、がいしの自己容量、がいしと大地または線路との漂遊容量により電圧分担が直流の場合ほど不均等にならないためである。

3. 供試がいし

供試がいしとして笠径 320 mm の 16.5 トン直流がいし

図 1 供試がいし
Fig. 1. Test Specimen.

表 1 供試がいし連
Table 1. Specimen insulator strings.

適用電圧	がいし品名	連結個数	連結長(m)
±250 kV	320 mm 16.5トン直流がいし	34	5.78
	460 mm 33トン直流がいし	29	5.66
±500 kV	320 mm 16.5トン直流がいし	46	7.82
	460 mm 33トン直流がいし	33	6.44

いし (320 DC) と笠径 460 mm の 33 トン直流がいし (460 DC) を選んだ。250 kV 用がいし連については、320 DC の場合には設計塩分付着密度 0.25 mg/cm² 相当の連結個数とし、460 DC の場合には 320 DC とがいし連の長さがほぼ同じとなる個数とした。500 kV 用がいし連については、設計塩分付着密度 0.06 mg/cm² に相当する連結個数とした。供試がいし連はすべて 1 連懸垂吊とした。供試がいしの形状を図 1 に、がいし連の寸法、諸元を表 1 に示す。

4. 試験方法

〈4・1〉 試料配置 供試がいし連および AN 測定用マイクロホンの配置を図 2 に示す。

〈4・2〉 部分フラッシュオーバー試験 部分フラッシュオーバーの発生確認を以下の方法で調査した。

(i) 線路運転中に霧が発生し、がいしが湿潤する場合の模擬(電圧先行法) 汚損乾燥させたがいし連を霧室内につり下げ、一定の電圧を印加後、湿度 90~100%、霧濃度 0~0.4 g/m³ の霧中で部分フラッシュオーバー発生の有無を 30~60 分間観察した。

(ii) 無課電下でがいしが湿潤した後線路が課電される場合の模擬(湿潤先行法) 汚損乾燥させたがいし

図 2 試料配置
Fig. 2. Test Arrangement.

いしを霧室内につり下げた後、霧を発生させ、霧室内の湿度が90～95%に達した時点で霧をいったん停止し、がいし連に電圧を印加した。その後、適宜霧を発生させ30～60分間部分フラッシュオーバー発生の有無を観察した。

以上(i), (ii)の試験手順を図3に示す。

〈4・3〉 部分フラッシュオーバー防止対策の調査

部分フラッシュオーバーの発生を防止するには、(i)分担電圧の不均等が生じないようにする方法、例えば全面導電釉ががいしを採用すること、(ii)例え電圧分担の不均等が生じて、単体のがいしがフラッシュオーバーしないようがいし単体のフラッシュオーバー電圧を高くする方法などが考えられる。今回、がいし連中にシリコングリースを塗布したがいしを何個か挿入することによって、湿潤時、がいし連全体に印加されている電圧をこれらシリコングリース塗布がいしで分割して負担させることにより、部分フラッシュオーバーの発生が防止できるのではないかと考え、その防止効果を確認した。また、320 DCがいしに比べ笠径が大きくフラッシュオーバー電圧の高い460 DCを320 DCからなるがいし連に挿入した場合の防止効果についても調査した。

〈4・4〉 AN 特性 An(Audible Noise)については、IEC Pub. 651-1971に規定の騒音計を用い、1インチのコンデンサマイクロホンを供試がいし連から12 mの位置に置き、A特性の音圧レベル実効値を測定した。試験を実施した試験室は音響学的には残響室

に近いので、試験室の壁面での反射および吸収に対する補正については、正弦波発信器と無指向性スピーカを用いて残響時間を測定し、次式⁽⁴⁾により音響パワーレベル $PWL(A)$ を算出した。

$$PWL(A) = (SPL)_r + C_1 - C_2$$

ここで、 $(SPL)_r$ ：室内での測定音圧レベル[dB(A)]、 C_1 ：発生源から12 m地点の音圧レベルと PWL の比、 C_2 ：部屋の音響特性により定まる補正值

測定の結果、 $C_1 = 33 \text{ dB(A)}$ 、 $C_2 = 10 \text{ dB(A)}$ であった。また、部分フラッシュオーバーによるANの自由空間における伝搬については、測定点が音源から十分離れれば、発生源は点音源と見なせるので、音源から十分離れた地点の音圧レベル $(SPL)_r$ は、次式により求められる。

$$(SPL)_r = PWL(A) - 20 \log L - 11$$

L ：発生源から測定点への直線距離(m)

5. 試験結果

〈5・1〉 部分フラッシュオーバー試験結果 部分フラッシュオーバー試験結果を表2に示す。なお、部分フラッシュオーバーの発生状況の一例を図4に示す。

(1) 湿潤条件の影響 電圧先行よりも湿潤先行のほうが部分フラッシュオーバーが発生しやすい。なお湿潤先行の場合でも、がいし表面の湿潤が過度な場合には、局部アークは発生するが、部分フラッシュオーバーは発生しにくくなる。

(2) 印加電圧極性の影響 部分フラッシュオーバーの発生に及ぼす極性の影響は見られない。

(3) 印加電圧値の影響 印加電圧が高くなると部分フラッシュオーバー発生確率も高くなる傾向を示す

表2 部分フラッシュオーバー試験結果
Table 2. Test results of single unit flashover.

電圧印加法	印加電圧 (kV)	供試がいし装置	塩分付着密度 (mg/cm ²)	部分 FO 発生率
電圧先行	~500	320 DC×46	0.054	0/2
	~250	320 DC×34	0.227	0/4
		460 DC×29	0.213	0/3
湿潤先行	~500	320 DC×46	0.057	5/8
		460 DC×33	0.055	1/4
	+500	320 DC×46	0.053	4/7
		320 DC×34	0.229	0/4
			0.058	3/5
		460 DC×29	0.224	0/3
			0.055	0/5

注) 部分 FO 発生率は、部分 FO 発生回数/試験回数を示す。

図3 試験手順

Fig. 3. Test Procedures.

図 4 部分フラッシュオーバー発生状況
Fig. 4. An example of single unit flashover.

図 5 がいし単体の直流乾燥フラッシュオーバー
電圧 (FOV) と部分フラッシュオーバー
発生確率の関係

Fig. 5. Relation between DC dry FOV and occurrence probability of single unit flashover.

が、320 DC の場合には顕著な差は見られなかった。なお、人工汚損がいし自然湿潤条件下での試験ではがいしの平均分担電圧が同じでも、がいし連全体の印加電圧が高いほど部分フラッシュオーバー発生確率は高くなるとの結果が得られている⁽²⁾。

(4) がいし形状の影響 笠径が大きくがいし単体のフラッシュオーバー電圧の高い 460 DC のほうが 320 DC よりも部分フラッシュオーバー発生確率は低くなる傾向が見られる。

がいし単体の直流乾燥フラッシュオーバー電圧と部分フラッシュオーバー発生確率の関係を図 5 に示す。図には過去に当社で実施した電圧印加後霧が発生させた場合の結果も記した⁽³⁾。同図より、単体のフラッシュオーバー電圧の-high がいしほど、部分フラッシュオーバー発生確率は低くなることが明らかである。ただし、これは部分フラッシュオーバー発生時のがいしのフラッシュオーバー電圧が

がいし単体の乾燥フラッシュオーバー電圧と同等であることを示すものではない。

(5) 塩分付着密度の影響 塩分付着密度が高い場合には、部分フラッシュオーバーは発生しなかった。なお、人工汚損がいし自然湿潤条件下での電圧先行法による試験結果によれば、塩分付着密度があるレベルを超えると急激に発生しやすくなると報告されている⁽²⁾。このように自然湿潤条件下と人工湿潤条件下で、塩分付着密度に対する部分フラッシュオーバーの発生確率の傾向が大きく異なる原因としては、以下のようなどが考えられる。部分フラッシュオーバー発生時の漏れ電流は通常数 mA 以下であり、これを超えると部分フラッシュオーバーは発生せず、一般の汚損試験時と同様局部アークが発生しやすくなる。このため実験室での部分フラッシュオーバー試験の場合には、人工霧の注入量を汚損耐電圧試験の場合の 1/10 以下としている。このように霧の注入量を少なくしても、塩分付着密度が高い場合には、塩の潮解性のためがいし表面汚損層は湿潤しやすく、部分フラッシュオーバーを発生する湿潤条件に比べ湿潤過多となりやすい。これに対し自然湿潤の場合には、一般にがいし表面の湿潤の進行が遅くまたその割合も低いため、湿潤のアンバランスは比較的生じにくい。このため、自然湿潤条件下では漏れ電流によりがいし表面の湿潤乾燥のアンバランスが生じやすい重汚損の場合のほうが、部分フラッシュオーバーの発生確率が高くなると推測される。

〈5・2〉 部分フラッシュオーバー防止対策調査結果

調査試験結果を表 3 に示す。

(1) 湿潤度が低い条件では、シリコングリース塗布がいしを 5 個以上挿入することにより部分フラッシュオーバーは防止できたが、湿潤度が高い条件では 5 個挿入してもシリコングリース塗布がいしで部分フラッシュオーバーが発生した。これは表 3 に示すように、シリコングリース塗布がいし単体の耐電圧が湿潤条件により大きく変化するためと考えられる。

(2) 表 3 の結果から、挿入したシリコングリース塗布がいしの耐電圧とシリコングリース塗布がいしの挿入個数の積が印加電圧以上の場合には部分フラッシュオーバーが防止でき、それ以下の場合には防止できないようである。

(3) 320 DC がいし連に 460 DC がいしを 5 個挿入したが部分フラッシュオーバーは防止できなかった。部分フラッシュオーバーは 320 DC がいしで発生した。

〈5・3〉 AN 特性 調査結果を表 4 に示す。

(1) 通常がいし連の場合、部分フラッシュオーバー発生時の音響パワーレベルは 96~111 dB(A) であり、

表 3 部分フラッシュオーバー防止対策試験結果
Table 3. Investigation results of countermeasures against single unit flashover.

印加電圧	-500 kV			
塩分付着密度	0.06 mg/cm ²			
供試がいし連	320 DC×46			320 DC×41+460 DC×5
対 策	シリコングリース塗布 がいし 5 個挿入	シリコングリース塗布 がいし 4 個挿入	シリコングリース塗布 がいし 5 個挿入	460 DC を 5 個挿入
霧 濃 度	0～0.2 g/m ³	0～0.2 g/m ³	3～5 g/m ³	0～0.2 g/m ³
部分 FO の発生率	0/5	2/3	2/3	2/3
シリコングリース塗布 がいし単体の耐電圧*	120 kV/個		60 kV/個	—

部分 FO 発生率は、部分 FO 発生回数/試験回数を示す。

*：繰返し定印霧中試験法による

表 4 部分フラッシュオーバー発生時の AN 特性
Table 4. AN level of single unit flashover.

印加電圧 (kV)	供試がいし装置	塩分付着密度 (mg/cm ²)	部分 FO 発生時の 最大 AN [PWL (A)]dB
-500	320 DC×46	0.057	105
	460 DC×33	0.055	99
+500	320 DC×46	0.053	111
-250	320 DC×46	0.058	96
-500	320 DC×46 シリコングリース 塗布がいし 4 個挿入	0.052	102
	320 DC×46* シリコングリース 塗布がいし 5 個挿入	0.054	99
	320 DC×41 + 460 DC×5	0.053	93

*：霧水量 3～5 g/m³，他の試験は 0～0.4 g/m³

局部アーク発生時は最大 95 dB(A)であった。部分フラッシュオーバー発生時の AN の波形の一例を図 6 に示す。

送電線から 50 m 地点の騒音レベルを計算すると部分フラッシュオーバー発生時は 66 dB(A)，局部アーク発生時は、50 dB(A)となる。なお、交流 500 kV 送電線における降雨時の電線コロナによる AN は、線路から 50 m 地点において約 50 dB(A)であり⁽⁶⁾，部分フラッシュオーバー発生時の騒音レベルは非常に高いことがわかる。

(2) がいしの種類による騒音レベルの差は明確ではなかった。

(3) シリコングリース塗布がいしを挿入した場合の部分フラッシュオーバー発生時の音響パワーレベルは、99～102 dB(A)であり、通常がいし連のレベル

図 6 部分フラッシュオーバー発生時の AN 波形例

Fig. 6. An example of oscillogram of AN caused by single unit flashover.

105～111 dB より低かった。これは、がいし連全体に印加されている電圧の一部が、他のシリコングリース塗布がいしで分担されるため、部分フラッシュオーバー発生がいしの分担電圧が通常がいし連の場合の値より低いためと考えられる。

6. あとがき

今回の研究により、

- (1) 部分フラッシュオーバー発生確率は湿潤先行のほうが電圧先行の場合より高くなること。
- (2) 湿潤先行であっても部分フラッシュオーバー発生時の騒音レベルなどの特性は電圧先行の場合とほぼ同じであること。
- (3) 湿潤先行の条件下でも、がいし単体の乾燥条件下での直流フラッシュオーバー電圧の高いがいしほど、部分フラッシュオーバーの発生確率は小さくなること。

などが確認できた。

なお、部分フラッシュオーバーは、いったん発生すると数時間以上継続する場合があります、またその騒音レベルも高く広範な地域へ伝搬する。海外の±500 kV 級直流送電線では、特に深刻な環境問題となっていないが、国土の狭い我が国では、部分フラッシュオーバーの周囲に及ぼす影響が心配される。今後、部分フラッシュオーバーの発生を抜本的に防止する対策の確立に努めていきたい。

(平成 3 年 5 月 28 日受付, 同 3 年 9 月 10 日再受付)

文 献

- (1) 福島・須永:「直流送電線の雑音と騒音(第3報), がいいし連の部分閃絡による雑音と騒音の実験的検討」, 電研技術第1研報, 73075 (昭49)
- (2) 福島:「送電線のコロナ騒音」, 電研総合報告: TOI, (昭61年)
- (3) 内藤・長谷川・加藤・小川:「直流がいいし装置の汚損湿潤時のRI, TVIおよびAN特性」, NGKレビュー, No.48, (昭63)
- (4) 守田:騒音と騒音防止(昭49) オーム社
- (5) UHV 交流送電実証委員会: UHV 交流送電に関する実証研究, Z 85801 (昭60)

松岡良輔(正員)

昭和16年4月15日生。41年3月名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月日本碍子(株)入社。主として, がいいしの汚損特性に関する研究に従事。IEEE Senior Member, 日本沙漠学会会員。

伊藤進(正員)

昭和23年9月21日生。44年3月鈴鹿工業高等専門学校電気工学科卒業。同年日本碍子(株)入社。現在, 同社超高压研究所に勤務。主として, がいいしの高電圧試験研究, 汚損特性に関する研究に従事。

坂西健治(正員)

昭和18年9月15日生。37年3月県立岐阜工業高校電気科卒業。同年4月日本碍子(株)入社。主として, がいいしの汚損特性に関する研究に従事。