UHV 直流がいし装置の部分フラッシュオーバー特性

正 員 竹 中
正 員 安 井

陽 (東京電力)
充 (東京電力)

1. ま え が き

UHV 直流送電に関する研究は、UHV 送電特別委員会で行われ、環境対策上の課題として送電線のがいし汚損時における部分フラッシュオーバーによるラジオ雑音 (以下、RI と略記)、テレビ雑音 (以下、TVI と略記)、コロナ騒音 (以下、AN と略記) の対策についての研究の必要性が指摘されている⁽¹⁾。そこで、この点に留意して、部分フラッシュオーバー発生時の RI, TVI, AN 特性を把握するため研究を実施し、併せて部分放電についても調査した。

部分フラッシュオーバーは直流特有の現象であり、がいし連中の特定がいし 1 個 (まれには 2 個以上) に直流電圧が集中して、キャップ、ピン間を青白色の火花状アークが完全に橋絡し、激しい衝撃音を伴ってフラッシュオーバーする現象を指している。部分フラッシュオーバーは一度発生すると長時間継続する性質があるので、このときの RI, TVI, AN の特性を十分検討しておく必要がある。そこで、直流最高運転電圧 ± 650 kV に適用可能ながいし装置について、部分フラッシュオーバー発生時の RI, TVI, AN 特性を把握した。

本論文では、霧室内において部分フラッシュオーバー試験を行うことによって各種がいしの発生確率を求め、がいしを適切に選定することより部分フラッシュオーバー低減可能な見通しが得られた。この際、がいし連の表面抵抗測定値より、がいし連の分担電圧分布を計算し、別途、がいし単体の直流フラッシュオーバー電圧を求め、これらの試験データに基づき部分フラッシュオーバー発生確率について考察を行った。

なお、部分放電は交流でも発生し、がいし連中の不特定多数のがいしに清浄または軽汚損では青白色、重

汚損では赤色の沿面アークを生ずる現象であり、部分フラッシュオーバーとは異なる現象である。部分放電発生時の RI, TVI, AN については、直流 ± 200 kV がいし装置までは調べられているが⁽²⁾、直流 ± 650 kV がいし装置のデータはないので、直流 ± 650 kV がいし装置についてチェックを行った。

2. 供 試 試 料

本試験に供試したがいしの種類、形状は表 1 のとおりである。供試がいしは、直流 ± 650 kV, ACSR 810 mm² 4 導体送電線に適用可能な懸垂がいしであるが、部分フラッシュオーバー特性に未知の点があり検討する必要がある。

33 t 交流懸垂がいし (320 AC) は通常の交流懸垂がいしであり、直流線路では電食防止用亜鉛スリーブを付けて使用する。16.5 t 直流懸垂がいし (320 DC) は、我が国の直流線路に使用されているがいしである。33 t 直流耐霧がいし (460 DCF) は新たに開発されたものであり、そのときの人工汚損耐電圧試験結果によると、汚損耐電圧特性が 16.5 t 直流懸垂がいしと比較して同一連結長で 15% 高い結果が得られてい

表 1 供 試 試 料

Table 1. Specimen insulators.

がいし種類	がいし寸法 (mm)		汚損耐電圧 (kV/個)*
	がいし構造図	表面漏れ距離	
33 t 交流懸垂 がいし (320 AC)		460	18.3
16.5 t 直流懸垂 がいし (320 DC)		545	20.3
33 t 直流耐霧 がいし (460 DCF)		745	26.8

*: 塩分付着密度 0.01 mg/cm²

Partial Flashover Characteristics of UHV DC Insulator Assemblies. By Akira Takenaka, Member & Mitsuru Yasui, Member (The Tokyo Electric Power Co., Inc.).

竹中 陽: 正員, 東京電力(株)

安井 充: 正員, 東京電力(株)

る。なお、供試がいし装置はすべて1連懸垂装置とした。

3. 試験方法

部分フラッシュオーバーの試験方法として、汚損して乾燥させたがいし連を霧室内につり下げ、所定の電圧印加後清浄な人工霧を発生させた。そして霧発生後のラジオ雑音端子電圧(以下、RIV と略記)、TVI, AN を測定した。RIV, TVI は霧発生後 45 分間準せん頭値を連続測定しその最大値をとり、AN については暗騒音レベルを低く抑えるため霧発生後 20~25 分(霧充滿安定化後 5~10 分)の間霧発生装置を止めて、その間の 5 分間 A 特性で音圧レベル実効値を連続測定し、その最大値をとった。霧室内における供試がいし装置、直流電源、霧発生装置などの配置を図 1 に示す。

図 1 に示すように、電圧供給線とがいしとの接続部にシールドリングを取付けるなどコロナ発生防止対策を実施した。なお、本試験開始前にダミーの清浄がいしをつり下げ、本試験と同一条件で電圧を印加し、RIV, TVI, AN レベルを測定しバックグラウンドレベルが十分低いことを確認した。

図 1 試料配置

Fig. 1. Test arrangement.

図 2 測定回路

Fig. 2. Measurement circuit.

人工霧は蒸気霧を用い約 100~200 個のノズルから発生させ、供試がいし装置には直接霧があたらないようにし、霧水量を自然霧に近い約 $0.1 \sim 0.4 \text{ g/m}^3$ に調整した。自然霧に近い薄霧が充滿安定化するまでの時間を雲水量計で測定すると 15 分ほどであり、その間の RIV, TVI レベルはかなり大きいレベルを発生しており、その間を含めての最大値をとった。電源としては、三相 60Hz, 6kV, 60MVA 短絡発電機を電源とした直流 $\pm 750 \text{ kV}$ 発生装置を用いた。各種雑音特性の測定回路を図 2 に示す。RI については NEMA 規格の Pub. 107 (1964) に従い、周波数 1MHz で RIV を測定し、それを RI に換算した⁽³⁾⁽⁴⁾。

RIV を RI に換算するには、RIV から 31dB を引き RI を推定した。TVI の測定については特に定められた規格がないので、霧室内に受信アンテナを置き、周波数 100 MHz の電界強度を測定した。TVI の室内測定値は、試験室の壁等の反射による影響が含まれるほか多くの影響要因があるので、室内の電界強度測定値から発振源強度を理論的に求めるのはほとんど不可能である。そこで今回の試験においては、既知の放射電力の発振源をがいし連が置かれていた位置に置き、放射電力と室内の電界強度との関係を求めた。この関係よりがいしの部分フラッシュオーバー発生時の電界測定値をそのときの放射電力に換算した。

一方、屋外であらかじめ放射電力と電界強度の関係を求めておき、上記の放射電力より求める地点の電界強度に換算した。AN については JIS-C 1502 (1977) 規格の騒音計を用いて、1 in のコンデンサマイクホンを供試がいし装置から 12m の位置に置き、A 特性音圧レベルを測定した。霧室は音響学的には残響

室に近いので、測定室の壁面での反射および吸音に対する補正を行った。また、屋外への換算は発生源を点音源として求めた⁽⁵⁾。

4. 部分フラッシュオーバー特性

〈4・1〉 部分フラッシュオーバーの発生方法 部分フラッシュオーバーは直流送電特有の現象であり、電中研塩原実験場において、自然湿潤下の人工汚損がはいしやアメリカの直流送電線などにおいて発生している。一方、霧室内において人工汚損、人工湿潤の条件で部分フラッシュオーバーを発生させることは困難であった。その原因として、通常の汚損試験に用いられる霧水量が自然霧に比べて多いことによるものと考えられる。

そこで、霧水量を自然状態に近い条件 (0.1~0.4 g/m³) に調整することにより、軽汚損 (塩分付着密度 0.01 mg/cm²) において部分フラッシュオーバーを発生させやすい条件が得られた。がはいし 1 連中に 1 個もしくは複数個発生しても、発生回数を 1 回とした試験回数に対する発生回数の比率を部分フラッシュオーバー発生率とし、表 2 に示す。表 2 の分母は試験回数、分子は発生回数を意味する。

部分フラッシュオーバーが発生している確認は、青白色のアークがキャップ、ピン間を完全に橋絡していることからわかったが、部分フラッシュオーバーの特徴である激しいさく裂音からも判定することができる。

〈4・2〉 RI, TVI, AN 特性 今回、部分フラッシュオーバーを安定して発生させることによって、部分フラッシュオーバー発生時の RI, TVI, AN 特性を検討した。

直流 ±650 kV がはいし装置について、部分フラッシュオーバー発生時の RI, TVI, AN の最大レベルは表 3 のとおりである。AN については 460 DCF は 320 AC よりかなり低くなるが、RI と TVI についてはおおむねがはいし種類によるレベル的な差はみられない。

部分フラッシュオーバー発生時の RI, TVI は、各々 80 dB, 50 dB 程度であり、表 4 の部分放電発生時の最大レベルに比べ各々 20 dB, 30 dB 程度高くなる。また AN は最大 67 dBA であり、部分放電発生時に比べ 15 dBA 程度高い。

部分フラッシュオーバー発生時における RI, TVI, AN の距離減衰特性を調べた結果は図 3 のようであり、部分放電発生時の送電線直下のレベルまで低減するにはかなりの距離を必要とする。

〈4・3〉 部分フラッシュオーバーの分析

(1) 部分フラッシュオーバーの発生率 発生率の極性による差を 320 AC を用いて同一条件で比較したところ、正極性が 5 回中 1 回、負極性が 3 回中 1 回発生

表 2 がはいし別部分フラッシュオーバー発生率の試験結果

Table 2. Test results of partial flashover occurrence rate with reference to insulator types.

がはいし種類	試験条件			がはいし装置の部分フラッシュオーバー発生率
	霧水量 (g/m ³)	塩分付着密度 (mg/cm ²)	印加電圧 (kV)	
320 AC ×55個	0.1~0.4	0.01	-650	$\frac{10}{16}$ (63%)
320 DC ×47個	0.1~0.4	0.01	-650	$\frac{2}{4}$ (50%)
460 DCF ×35個	0.1~0.4	0.01	-650	$\frac{1}{16}$ (6%)

注) 汚損条件には塩分付着密度 0.01 mg/cm² の塩汚損時とはほぼ同一の耐電圧を与える等価塩分付着密度 0.1 mg/cm² の石こう (Ca₂SO₄・2H₂O) 汚損を含む。

表 3 部分フラッシュオーバー発生時の RI, TVI, AN のレベル

Table 3. RI, TVI and AN level measured during partial flashover.

項目 \ がはいし種類	320 AC	320 DC	460 DCF
RIV (1 MHz) (dB)	109	—	112
RI (dB)	78	—	81
TVI (100 MHz) (dB)	53	—	51
AN (dBA)	67	59	56
換算地点	RI: 送電線直下 26 m (地上 1 m) TVI, AN: がはいし連直下 50 m (地上 1 m)		

注) 一: 測定せずを表す。
RI: NEMA 表示
CISPR 表示への換算は 2 dB 加える。

表 4 部分放電発生時の RI, TVI, AN のレベル

Table 4. RI, TVI and AN level measured during partial discharge.

項目 \ 電圧	直流 ±650 kV			(比較用) 交流 500 kV 送電線
	320 AC	320 DC	460 DCF	
RIV (1 MHz) (dB)	90	89	88	—
RI (dB)	59	58	57	59
TVI (100 MHz) (dB)	19	—	21	—
AN (dBA)	51	50	47	51
換算地点	RI: 送電線直下 26 m (地上 1 m) TVI, AN: がはいし連直下 50 m (地上 1 m)			送電線直下 23 m (地上 1 m)

注) 一: 測定せずを表す。
RI: NEMA 表示
CISPR 表示への換算は 2 dB 加える。

しておりほとんど差がないと判断される。これより印加電圧は -650 kV で試験を行った。がはいし装置の部分フラッシュオーバー発生率は表 2 に示すとおりであり、

注 RIは送電線直下2.6m(地上1m)からの水平距離
TVI, ANはがいし連直下5.0m(地上1m)からの水平距離

図3 部分フラッシュオーバー発生時のRI, TVI, ANの距離減衰特性

Fig. 3. Lateral profile of RI, TVI and AN caused by partial flashover.

(a) 部分フラッシュオーバー発生状態

(b) 部分フラッシュオーバー発生領域

図4 部分フラッシュオーバー発生状況の説明

Fig. 4. Explanation of partial flashover.

がいし種類により320 AC, 320 DC, 460 DCFの順で小さくなっている。

この理由として次のことが考えられる。がいし単体について考えると、直流フラッシュオーバー電圧 v は分担電圧 u' より通常の状態では十分大きい。しかし、がいし連の湿潤のアンバランスにより、表面抵抗が高い少数の特定がいしと、その他の低抵抗がいしに分かれる。高抵抗、低抵抗がいしは分布パターンが違うので区別できる。その結果、その高抵抗がいしの分担電圧が極端に大きくなり、高抵抗がいしの分担電圧 u の分布とがいし単体の直流フラッシュオーバー電圧 v の分布が重なり合うと、図4(a)に示す部分フラッシュオーバーが発生すると考えられる。図4において個々の高抵抗がいしが部分フラッシュオーバーするかどうかは、 u, v の相対関係($u > v$ のとき発生)によって決まる。従っ

て u, v の重なり合う領域が少ないがいしでは、部分フラッシュオーバーの発生率が小さくなると想定される。

(2) 部分フラッシュオーバーの分析 高抵抗がいしの分担電圧 u の平均値を μ_u 、標準偏差を σ_u 、がいし単体の直流フラッシュオーバー電圧 v の平均値を μ_v 、標準偏差を σ_v とし、それぞれ正規分布に従うと仮定すると、部分フラッシュオーバー発生領域は図4(b)に示す分布 $w = v - u$ の負の領域にある確率として求める。この w は平均値を $(\mu_v - \mu_u)$ 、標準偏差を $\sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_v^2}$ の正規分布として計算される⁽⁶⁾。

正規分布 w の負の領域(部分フラッシュオーバー発生確率)を求める。 $\mu_u = \mu_v$ (電圧ゼロ)の位置が標準偏差 $\sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_v^2}$ を基準として、 $(\mu_v - \mu_u) / \sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_v^2}$ だけ離れた点であるから、求める負の領域すなわち、がいし単体の部分フラッシュオーバー発生確率は正規分布表より $p(\%)$ と求める。

次に、がいし装置としての部分フラッシュオーバー発生確率を求める。一連がいし個数 n 個、部分フラッシュオーバーが発生する可能性があるがいし連の高抵抗がいしの出現率を $q(\%)$ とすると、がいし単体について部分フラッシュオーバーが発生しない確率は $1 - p/100$ 、がいし連の高抵抗がいしの個数は $nq/100$ となるから、がいし装置について部分フラッシュオーバーが発生する確率は、

$$1 - (1 - p/100)^{nq/100}$$

より求める。

高抵抗がいしの分担電圧 u およびがいし単体の直流フラッシュオーバー電圧 v の分布は試験より求めた。まず、部分フラッシュオーバー発生時の分担電圧 u は直接測定できないため、図5に示すがいし連のがいし単体の表面抵抗を測定し、これより分担電圧を計算した。

図5 がいし連の単体表面抵抗分布 (460 DCF がいし連の一例)

Fig. 5. Distribution of unit surface resistance along insulator strings (An example of 460 DCF insulator strings).

図 6 抵抗倍数の発生累積頻度 (460 DCF がいし連)

Fig. 6. Cumulative frequency of resistance ratio (460 DCF insulator strings).

表面抵抗分布の測定は、部分フラッシュオーバー発生試験と同一の汚損度、霧水量において単位長あたりの印加電圧を同一にして 10 分、30 分、60 分ごとに課電を停止し、1,000 V メガーにより測定した。湿润がアンバランスになった 60 分後のがいし連の抵抗分布は、図 5 からわかるとおりばらつきが小さい大多数の低抵抗がいしと少数の高抵抗がいしに分かれた。この高抵抗がいしが部分フラッシュオーバーを発生する可能性があるがいしである。ここで

$$r = \frac{\text{がいし連の高抵抗がいし個々の抵抗値}}{\text{がいし連の低抵抗がいしの平均抵抗値}}$$

とし、 r を抵抗倍数と呼び、その発生累積頻度を示すと図 6 のようにほぼ直線になるため、平均値を μ_r 、標準偏差を σ_r の正規分布とみなす。

高抵抗がいしの分担電圧 u は、一連がいし個数 n 個、高抵抗がいしの出現率 $q(\%)$ 、抵抗倍数 r 、運転電圧 E とすると次式より求まる。

$$u = \frac{r}{n \times \frac{q}{100} \times r + n \times \left(1 - \frac{q}{100}\right)} \times E$$

$$= \frac{\text{抵抗倍数}}{\text{低抵抗がいしの平均抵抗値を 1 としたときのがいし連の全抵抗}} \times E$$

ここで、抵抗倍数 r が正規分布のため、高抵抗がいしの分担電圧 u も正規分布に従う。

一方、軽汚損状態において、乾燥して表面抵抗が 5 MΩ 程度になったがいし単体の直流フラッシュオーバー電圧 v は、試験データより求めると平均値として μ_v 、標

表 5 正規分布モデルによる部分フラッシュオーバー発生率の評価

Table 5. Appraisal of partial flashover occurrence rate by means of normal distribution model.

名 称	記 号	単 位	320 AC	460 DCF
一連がいし個数	n	個	55	35
がいし連の高抵抗がいしの出現率	q	%	15	23
抵抗倍数 r の平均値	μ_r	—	5.1	4.1
r の標準偏差	σ_r	—	1.8 (μ_r の 35%)	1.4
高抵抗がいしの分担電圧 u の平均値	μ_u	kV	37.3	44.5
u の標準偏差	σ_u	kV	13.1 (μ_u の 35%)	15.6
がいし単体の直流フラッシュオーバー電圧 v の平均値	μ_v	kV	54.0	89.0
v の標準偏差	σ_v	kV	2.7 (μ_v の 5%)	4.5
部分フラッシュオーバー発生領域の位置	$\frac{\mu_v - \mu_u}{\sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_v^2}}$	—	1.25	2.75
発生率の計算結果	がいし単体	p	%	10.6
	が い し 装 置	%	60	2
発生率の霧室内試験結果			%	63
				6

準偏差として σ_v の正規分布となった。320 AC 55 個および 460 DCF 35 個のがいし装置について、最高運転電圧 $E=650$ kV として部分フラッシュオーバー発生率の比較を行うと次のようになる。

抵抗倍数 r の平均値 μ_r は、表 5 に示すとおり 460 DCF は 320 AC に比較して小さいので、高抵抗がいしの分担電圧 u の平均値 μ_u は、460 DCF がわずかに大きくなっているにすぎない。一方、がいし単体の直流フラッシュオーバー電圧 v は乾燥フラッシュオーバー距離により決まるため、表 5 に示すとおり平均値 μ_v は 460 DCF のほうが格段に大きい。

このため、460 DCF の部分フラッシュオーバー発生領域の位置は 320 AC より隔たっているから、計算結果に示すように、460 DCF のがいし単体について部分フラッシュオーバー発生率は小さい。

その結果、460 DCF、320 AC がいし装置の部分フラッシュオーバー発生率は、それぞれ 2%、60% となる。この値は試験結果とおおむね対応しているので、両者のフラッシュオーバー発生率の相違を説明することができる。

以上のことから、汚損耐電圧特性を向上する目的で開発された直流がよいはかさ径、乾燥フラッシュオーバー距離ともに大きくなっているため、部分フラッシュオーバーの発生に減少に役立つ。

5. 部分放電特性

〈5・1〉 RI, TVI, AN 特性 直流 ± 650 kV がいいし装置について、部分放電発生時の RI, TVI, AN 特性について調査した結果は表 4 のとおりである。我が国で実績のある交流 500 kV 送電線の RI, AN レベル⁽⁷⁾とはほぼ同程度である。TVI は 21 dB になり、最低サービス電界 54 dB において、テレビ受信品質評価値⁽⁸⁾3~4 (多少気になる) 程度のレベルに相当する。

なお、部分放電発生時の極性効果について、RIV, AN レベルを一部調査したが、明確な差異は認められなかった。

6. ま と め

直流 ± 650 kV がいいし装置について、部分フラッシュオーバー発生時の RI, TVI, AN 特性の把握と対策に重点をおいて研究を実施した。

(1) 部分フラッシュオーバーを霧室内で安定して発生させることによって、部分フラッシュオーバー発生時の RI, TVI, AN 特性を検討した。それぞれのレベルは部分放電発生時のレベルに比べ、それぞれ最大で 20 dB, 30 dB, 15 dBA 程度高くなることがわかり、対策の必要性が認められる。

(2) 部分放電発生時の RI, AN 特性は、交流 500 kV 送電線のレベルとはほぼ同程度である。また、TVI は最低サービス電界において多少気になる程度のレベルに相当する。

(3) 部分フラッシュオーバーはがいいし連の湿潤のアンバランスにより、がいいし連の高抵抗ががいいしに集中した分担電圧が、がいいし単体の直流フラッシュオーバー電圧を超えると発生する。従って、部分フラッシュオーバーを減少するには、がいいし単体の直流フラッシュオーバー電圧を

高くするため、かき径、乾燥フラッシュオーバー距離とも大きいがいいしを使用することが効果的である。

試験データを用いてがいいしの分担電圧とがいいし単体の直流フラッシュオーバー電圧の分布を正規分布のモデルと仮定して、直流がいいし装置の部分フラッシュオーバー発生確率を考察した。その結果、部分フラッシュオーバー発生確率はモデルによる考察結果と霧室内の試験結果がほぼ一致し、汚損耐電圧特性を向上する目的で開発された直流がいいしを使用すれば、部分フラッシュオーバーの発生確率が小さいことが示された。この点については、今後自然条件下での課電試験において更に検討する必要がある。

終りに、汚損湿潤時のコロナ特性試験の実施に御協力いただいた日本ガイシ(株)超高压研究所の関係者に感謝の意を表します。

(昭和 61 年 11 月 21 日受付, 同 62 年 9 月 2 日再受付)

文 献

- (1) UHV 送電特別委員会報告書——UHV 直流送電に関する研究——委員会報告, No. 285802 (昭 60-6) 電中研
- (2) 松岡, 他: 「直流送電用がいいし装置の汚損湿潤時における各種コロナ雑音特性」, 電学論 B, **101**, 595 (昭 56-10)
- (3) M. Yasui & M. Murooka: "Practical Design of AC 1,000 kV Insulator Assemblies", Presented at the IEEE/PES 1986 Summer Meeting, Mexico City, Mexico, July 20-25, IEEE Product No. 86 SM 431-1
- (4) 500 kV 送変電設備の実証試験研究報告(その 4): 「静電誘導とコロナ雑音」, (昭 47-4) 電中研
- (5) 守田: 騒音と騒音防止(第 2 版), p. 132 (昭 49) オーム社
- (6) 藤木・塩見: エレクトロニクスにおける信頼性, p. 70 (昭 56) 電子通信学会編
- (7) UHV 交流送電実証試験委員会報告書——UHV 交流送電に関する実証研究——委員会報告: Z85801 (昭 60-3) 電中研
- (8) F. B. Harvey: "A Study of Human Subjects Response to HV Transmission Line Related Interference with Television Picture Quality", EL-1587, EPRI Interim Report 68-4 (1980)