気中長ギャップのせん絡特性

Flashover Characteristics of Large Gap Spacings in Air

\equiv	宅	義	治*	竹	下	英	世*
	Yoshiharu	Miyake		H	Iideyo T	`akeshita	
笈	Л	俊	雄**	鎌	田		譲**
	Toshio (Oikawa		5	Yuzuru	Kamata	

梗 概 内 容

400 kV 級送電の基礎資料をうる目的で,気中長ギャップのインパルス,交流,開閉サージによるせん絡試験 を実施した。電極構造は棒-棒,棒-導体,導体-導体,導体-平板,棒-平板の5種類で、ギャップ長は最大5m までである。

発生電圧はインパルス 3,000 kV, 交流 1,600 kV (波高値),開閉サージ 1,000 kV 程度であり、この範囲内で ギャップ長とせん絡電圧の関係は、インパルス正極性では直線的で、インパルス負極性のせん絡電圧は正極性 に比べてかなり高く、また電極による差が著しい。交流せん絡電圧は電極構造により二つのグループに分けら れる。また波頭長を変えた実験では100µs付近のせん絡電圧が最も低く、交流のせん絡値を下回っていること が明らかとなった。

1. 緒 言

最近わが国においては400kV級送電の計画が進められ ているが、送電線、機器の設計にあたっては、長ギャッ プのせん絡特性を明らかにしておく必要がある。しかし ながら気中長ギャップのせん絡試験を行なうには、非常 に大規模な設備が必要であり、5m程度のギャップ長に ついて報告された例は世界でも数が少なく(1)~(4),わが国 で発表されたものはない。超高圧送電線の設計に必要と 考えられる電極は多数あるが,その中で最も基本的で, かつ重要と思われるものとして,棒-棒,棒-導体,導体-導体,導体-平板,棒-平板の5種類を選び、ギャップ長 5mまでのインパルス、交流、開閉サージ電圧に対する せん絡試験を行なった。長ギャップのせん絡値は周囲の 接地体との距離によって変わり、インパルス負極性では 特に著しい影響が現われる。それゆえ本実験では電極部 分から接地体への距離は最小6.5mに保ってある。





試験期間は約6箇月にわたり、その間気象条件も相当変動してい るが、今回の試験では空気密度の補正のみを行ない、湿度補正に関 しては参考程度にとどめた。

2. 使用機器

2.1 5,000 kV 衝擊電圧発生器

日立研究所超高圧実験室内に設置されているもので、その外観は 第1図のとおりである。おもな仕様は次のとおりである。

公称発生電圧	5,000 kV
最大蓄積エネルギー	92 kWs
全直列容量	0.00735 μF

2.2 1,650 kV 試験用変圧器

5,000kV衝撃電圧発生器と同一建家内にあり、550kVのユニット を3台カスケード接続し、従来の試験用変圧器とは形の異なった特

5,000 kV 衝擊電圧発生装置 第1図

第2図 1,650kV 試験用変圧器



第3図 注水装置および注水状況

殊のもので,外観を第2図に示す。おもな仕様は次のとおりである。

- 一次電圧 $4 \,\mathrm{kV}$ 二次電圧 1,650 kV 周 波 数 $50 \,\mathrm{c/s}$ 電圧上昇速度 7.5~3.0 kV/s (3段カスケード)
- 東京電力株式会社 * ** 日立製作所日立研究所

 $75 \,\mathrm{k}\Omega$ 直列制動抵抗 2.3 1,100 kV 結合コンデンサ形計器用変圧器 交流電圧の測定ならびに開閉サージ発生用として使用したもの で、おもな仕様は次のとおりである。 一次電圧 $1,100\,{\rm kV}$ 二次電 圧 220-110-55 V 100 VA 定格二次負担

気中長ギャップのせん 絡特性 1



第4図 導体-導体電極のグローコロナ (ギャップ長3.5m,電圧1,150kVrms, AC 50~)





1155

第5図 棒-導体 せん 絡時の状況 (ギャップ長5m, インパルス正極波 2,800kV)

静電容量 1,000 pF 階 級 1.0 級

2.4 1,500 Ø 球ギャップ

電圧更正用として使用されたもので、交流電圧測定時は 710kΩ のグリセリン抵抗を保護用に用い、衝撃電圧測定時は抵抗なしの状 態で使用した。下部の接地球をウオームギヤにより上下させてギャ ップ長を調整する。

2.5 注 水 装 置

注水装置には 1 mm φ のノズル70個が取り付けてあり, ノズルの 取付面積は 2,300×1,100 mm である。第3回に注水装置および注水 状況を示す。

3. 試験電極および配置

3.1 電極の構造

棒電極は一辺12.5mmの角棒で,高さ約8.7mのがい管上に取り 付けられている。導体-導体電極は単導体送電線の相間を模擬した もので,25mm¢アルミパイプを上下に対向させ,両端で電界が強 くなるのを避けるため、1mの曲率半径で曲げてある。上部が高圧 電極,下部が接地電極で,ギャップ長調整は接地側電極で行なった (第4図)。棒-導体電極は前記のものを水平に配置したものである (第5図)。導体-平板,棒-平板に使用した平板電極は,コンクリー ト床面上に2×2m,厚さ0.6mmの銅板をはんだにより継ぎ合わ せ,極力突起のないように仕上げたもので,全体の面積は12×12m とした。



第7図 1,500 Ø 球ギャップによる発生電圧較正曲線

で、機器は屋内に、供試電極は屋外の試験ヤードに設置した。

4. 試験方法および試験結果

4.1 衝撃電圧試験

— 13 —

4.1.1 50% せん 絡電圧の 求め 方および 測定 誤差

50% せん絡電圧は昇降法により求め, 電圧印加回数は 30 回とした。電圧値の標準には 1,500 mm Ø 球ギャップを用い, 測定値の更正は次に述べる方法によった。

衝撃電圧発生器最下段の 0.5 µF のコンデンサには並列に 380 MΩの抵抗がはいっており、この抵抗を流れる電流から求め た最下段コンデンサの充電電圧と, 球ギャップで更正した発生電 圧の関係を求めると第7図のようになる。同図における50%せ ん絡電圧の信頼限界はギャップ長1,100mmのとき±0.3%で、き わめて確度は高いが、1,500 mm Ø 球ギャップでは2,000 kV 程度 までしか求めることができないし, また最下段のコンデンサ充電 電圧と全充電電圧の比は天候そのほかにより相当変動するので, この更正曲線を常に用いることは不適当である。したがって、こ の実験で50% せん絡値を求めるには陰極線オシログラフを用い, その更正に球ギャップを使用した。オシログラフで測定する場合 には分圧比を正確に求める必要がある。本実験では放電抵抗を分 圧器に共用しており、電圧発生器上端より約19m 斜めに引き出 してあるので,対地浮遊容量のための分圧比は抵抗比と必ずしも 一致しないおそれがあり, オシログラフによる測定それ自身にも 誤差がはいりうるので、次の方法によった。

3.2 供試電極および機器の配置

前記5種の供試電極および機器の配置状況は第6図に示すとおり

日 立

言平

64	1	-17	一一の測点決に といまれた 原口	on LL
出	1	X	ニシの側を法により米のた面片	· 0) IT.
111	-	-		

オシログラフから求めた発生電圧と充 電電圧から求めた発生電圧の比 (%)	91	92	93	94	95	96	97	98
回数	1	10	15	21	21	13	0	1

100~200 kVの範囲で約80回電圧を発生させて,衝撃電圧発生 器充電電圧から求めた発生電圧とオシログラフにより求めた発生 電圧との関係を調べた。この際正確な分圧比は不明であるので, かりに抵抗比を用いる。このように別々な2方法で求めた発生電 圧の関係を整理すると第1表のようになる。

第1表の結果をみれば上記2種類の電圧測定法の間には強い相 関関係があることは明らかで、一定誤差は大部分が分圧比の誤差 に基づき、変動誤差は充電電圧の変動、オシログラフの測定誤差 に基因していると考えられる。いま**第1表**の結果を整理し、上記 の比の期待値を*R*とし、2σを誤差と考えれば

 $R = 94.2 \pm 2.7(\%)$

となる。したがって分圧比としては抵抗比の100/94.2=1.06 倍を 採用すればよく,また球ギャップによる測定を基準とした場合の 測定誤差は2.7/94.2×100=2.9(%)である。

4.1.2 衝撃電圧発生器と供試物の距離の影響

衝撃電圧発生器と供試物間の距離が最も長い場合には 20 m 近 くなるので,供試物の端子に分圧器を設けることが望ましいが, 今回は実験の都合上衝撃電圧発生器の近くに設置した放電抵抗を 分圧器に共用した。このため実験を始める前に分圧器により測定 された波形と,実際に供試物に印加される波形がどの程度異なっ ているかを調べる目的で,供試物端子に別の分圧器をそう入して, 両者の波形の比較を行なった(**第8**図)。同図(b)は無負荷波形で 波頭長 1.2 µs であるが,供試ギャップをつなぐと 1.5 µs となる。 測定点(A)と測定点(B)では波高値に変化なく,波頭部の反射波 が若干異なっているが,この程度の波頭振動はせん絡電圧に影響 を及ぼさないものと考えられるので,以下電圧の測定は(A)端で 行なった。

4.1.3 試 験 結 果

論

試験結果は第9~13図のとおりである。

4.2 交流電圧試験

4.2.1 試 験 方 法

交流せん絡電圧は 10~20回の測定値の平均から求め,相対空気 密度補正を行なったのち 1% 有意水準の信頼限界を算出した。ま た各電極とも少なくとも一点で注水せん絡電圧を求めた。測定し た注水量は無風の状態で水平分 3.4 mm/min であるが,屋外の実 験であるため風の影響などで注水条件は大幅に変わっているもの と思われる。使用した水の固有抵抗は 15 kΩ-cm であった。電圧 測定には 1,100 kV PD を使用した。 第 14 図 にせん絡試験時のオ



12 23







(d) 測定点(A)の波形 波高値 665 kV 波頭長 1.5 µs 波尾長 26.0 µs

----- 14 ------

第8図 分圧器そう入位置の影響







www.www.www.



シログラムの一例を示したが,試験用変圧器のインピーダンスが 大きいため,せん絡してもすぐ電圧が回復し連続4回せん絡して いることがわかる。

4.2.2 測 定 結 果

-1

測定結果は第9~13図に示す。

4.3 開閉サージ試験

4.3.1 試験回路

試験回路は第15図に示すように、衝撃電圧発生器に25~ 330kΩの水抵抗と1,000pFの結合コンデンサを接続して緩波頭

第14図 棒-棒電極(ギャップ長 3.5 m) せん絡時の 電圧オシログラム (1,100 kV rms)



第15図 緩波頭波発生回路



第17図 棒-棒電極の緩波頭 第18図 棒-導体電極の緩波 波せん絡特性 頭波せん絡特性 極性であり、そのオシログラムを第16図に示す。発生電圧の測 定はコンデンサ分圧により、分圧比はCメータにより測定した。 なお50% せん絡値を求めるには20回の昇降法によった。得られ た値には空気密度の補正のみ行なった。その結果は第17~21 図 1158

昭和37年8月

H

評 論

第44卷第8号







に示すとおりである。

5. 結果の検討



第22図 従来のデータとの比較 棒-棒間げき

第2表 ギャップ長2m についての比較

衝撃電圧せん絡				交流電圧せん絡 kV(波高値)			
JEC-107	ΤĔ	極	1,180	乾燥せん絡	1 111-1 1		
$(1.5 \times 40 \ \mu s)$	負	極		注水せん絡			
ASA-C68	Æ	極	1,220	乾燥せん絡	1,045		
$(1.5 \times 40 \ \mu s)$	負	極	1,380	注水せん絡	3		
VDE	Æ	極	1,200	乾燥せん絡	1,025		
$(1 \times 59 \ \mu s)$	負	極	1,370	注水せん絡			
日立実測	īE.	極	1,150	乾燥せん絡	1,079		
$(1.5 \times 40 \ \mu s)$	負	極	1,320	注水せん絡	1,118		

5

1

5.1 従来のデータとの比較

第4.1節および第4.2節で得られた測定結果について従来の小ギ ャップのデータとどのようなつながりを有しているかを,棒-棒ギャ ップについて検討すると第22図のようになる。現在のところ規格 化された値は約2~2.5mまでで、今回の最小ギャップ長が2mで あるので、2mについて比較すると第2表のようになる。第2表か ら明らかなように交流50 c/sの値は約3% ASAより高く、インパ ルス正波は約2.5%、負波は約5%低くなっている。しかし測定誤差 は3%程度で、さらに湿度の影響を考慮すれば差があるということ はできない。他の電極については規格化されたものはないので比較 は避けた。

5.2 インパルス試験

インパルス試験時のオシログラムの一例を第23図に示す。第9~ 13図によれば対称電極(高圧側と接地側電極が同一形状のもので, 棒-棒,導体-導体および棒-導体)と非対称電極(導体-平板,棒-平板)とでは極性効果の程度が異なっている。すなわちギャップ長 3.5 m についていえば,負極性せん絡値と正極性せん絡値の比が対 称電極で1.1~1.2,非対称電極で1.4~1.6 である。

第24図に各電極についてせん絡特性を一括したものがのせてあ る。同図で明らかなように正極性のせん絡電圧は狭い範囲にまとま り、負極性のせん絡電圧には電極形状の差が著しく現われており、 導体-平板の正極性の場合を除けば、対称電極と非対称電極では別な グループに分かれている。

正極性と負極性のストリーマの形式には著しい差が見られる。す なわち正波印加時には高圧側電極からは樹枝状のストリーマが生 じ,ギャップ長の1/2の長さになることもあるが、負波印加時では単 一のストリーマが生じ、その長さも正波に比べてはるかに短い。第



第23図 印加波形オシログラム (タイミング500kc) 導体-導体電極ギャップ長 5 m インパルス正極性 (1.5×39 µs), 2,600 kV



25図に棒-導体で生じたコロナを,第5図にせん絡させたときの写 真を示す。特に第25図のような激しいグローコロナは他の電極 (棒-平板,導体-平板)でも観察された。これらはいずれも正極性の 場合で,負極性ではこのような強烈なコロナは発生しない。このグ ローコロナは光が弱いので長時間安定に発生しないと写真撮影が不 可能であり,またせん絡してアークが発生すると,この強い光のた めに打ち消されてしまう。 第24図 各種電極せん絡特性

第25回のように、高圧、接地電極からコロナが生じて中央で橋 絡した形式になると、印加波形が波尾においてひずむ。また正極波 と負極波で特に異なったのは導体-平板で、正極波印加時は樹枝状ス トリーマが高圧側から生じ、平板からはまったく生じなかったが、 負極波では高圧側から生ずるストリーマに対応して、平板からも単

— 16 —



第25図 棒-導体インパルスコロナの状況 (ギャップ長5m, インパルス正極波 2,800 kV)



ギャップ長2mのせん絡電圧 第3表 せん絡電圧 (kV 波高值) C/A D/A C/B D/B波頭長 | 波頭長 120 µs | 600 µs (C) (D) 電 極 交 流 標準波 (%) (%) (%) (%) (A) (B) 棒−棒 1,079 1,150 950 96 88 1,100 10283 棒−導体 1,062 1,180 920 1,050 87 99 89 78 導体-導体 1,070 1,210 970 1,130 91 106 80 94 導体-平板 913 1,155 720 920 79 101 80 62 椿-平板 858 1,005 670 880 78 103 88 67



(棒-棒, ギャップ長 1.5 m)

いことを示している。すなわち波頭長 600 µs の 50% せん絡値は従 来の考えと一致しているが,波頭長 120 µs では 5 種類の電極すべて が交流せん絡電圧より低く,棒-平板電極では特にこの現象が著しく 交流せん絡値の 78% になっている。

第26図 導体-平板電極で生じたストリーマ (ギャップ長3.5m, AC50~, 930 kVrms)

一のストリーマが生じ、棒-棒電極の場合と同じような状態となった。

5.3 交流試験

第24図から明らかなように、この場合にも対称電極と非対称電極 のグループに区別することができる。すなわち、ギャップ長 3.5 m ではこの二つのグループのせん絡電圧には約20%の相違があり、非 対称電極ではギャップ長が大となるほど電圧曲線のこう配が小とな って、非直線の傾向を強く示している。

対称電極では印加電圧がせん絡電圧近くになってもストリーマの 長さはそれほど発達せず,たとえば 第25図の写真に示すようなグ ローコロナの状態を保ち続ける。また場合によってはストリーマが 発達することもあるが,その輝度はあまり強くなく不安定である。 ところが非対称電極では 第26図に示すように,相当長く輝度の高 いストリーマが明確に認められる。またこのストリーマは正のサイ クルに生じたものと思われるが,棒-棒電極で得られたオシログラム では,正のサイクルにせん絡を生じたものと,負のサイクルでせん 絡したものの比は約6:4であった。

注水時,乾燥時のせん絡値はその平均値を比較すると第9~13図 に見るように特にはっきりした傾向は見られず,大部分は注水せん

またこれをインパルス標準波に対する割合でみると,導体-平板電 極の場合に波頭長 120 µs のとき 62%, 600 µs のとき 80% で, い ずれも各電極構造のうちで最低値を示している。そこで波頭長を標 準波から緩波頭の領域まで変化した場合, せん絡電圧がどのように 変化するかを求めたのが第27図である。同図中上部の曲線は相対 空気密度補正のみを行なったもの、下部の曲線はさらに湿度補正を 行なったものである。緩波頭波に対する湿度補正係数はまだ明らか にされていないので、ここではかりにインパルス標準波に対するも のを使用した。また交流せん絡値の湿度補正は ASA: C-68 によっ た。図から明らかなように、湿度補正を行なうことによって、 各測 定点は一様な曲線上に配列される傾向が強くなっており、使用され た補正係数が極端に違っていないことを示している。波頭長の変化 領域は2µsから600µsまでで,波頭長が大きくなると同一ギャッ プ長に対する 50% せん絡値はしだいに低下し, 100 µs 付近で最低 となり、その後ふたたび上昇している。このときのオシログラムに よると波頭長2µsから17µsのものはすべて波尾で放電を生じ, 50 µs をこえているものはすべて波頭放電である。

波頭長を一定として、ギャップ長とせん絡電圧の関係をまとめた ものが第28,29図である。波頭長120µsのときのせん絡電圧は対 称電極と非対称電極の差がはっきりと区別され、交流の場合と同様 であるが、600µsのものは両者の差が判然としておらず、インパル スのせん絡特性と同じような傾向にある。また120µsの場合には



絡電圧がやや高目になっている。しかし個々の測定値は乾燥の場合 に比べて注水時のほうが変動が大きく,せん絡電圧の最低値は常に 注水時に現われている。

5.4 開閉サージ試験

. 104

交流せん絡値と開閉サージせん絡値とを比較したものが第3表で ある。従来開閉サージのせん絡値はインパルスより低く, 交流より は高いものと考えられていたが, ここではこれが必ずしも成立しな

第28図 波頭長 120 µs のせん絡特性

— 17 —

1160 昭和37年8月

評 JZ.

H

論

第44卷第8号



第29図 波頭長 600 µs のせん絡電圧

600 µs の場合よりギャップ長に対する非直線性が顕著であること もわかる。

> 6. 結 言

以上の実験結果を要約すると次のとおりである。

(1) インパルスせん絡特性は直線的であるが、 交流せん絡特性 は非直線的である。

(2) インパルス正極性のせん絡電圧は電極形状の影響が少ない が, 負極性は電極形状の影響が大きく, せん絡電圧も高い。

(3) インパルス正波ではストリーマが樹枝状で長く進展してい るが, 負波では単一のものが多く, 長さも短い。

(4) 交流せん絡電圧は対称電極と非対称電極の二つのグループ に分かれ、後者のせん絡電圧が低い。

(5) 交流注水せん絡電圧と乾燥せん絡電圧の間には、はっきり した差が認められず、注水せん絡電圧のほうが高い場合もある。 (6) 交流ストリーマは電極によって異なるが、ギャップ長の1/2 の長さになることもある。

(7) 緩波頭波のせん絡電圧としては50%放電電圧を求めること が適当である。

(8) 棒-棒ギャップにおいては波頭長 100 µs 付近のせん絡電圧 が最低となる。

(9) 波頭長 120 µs のせん絡電圧は, 交流せん絡値より低いが, 波頭長 600 µs のものは交流とインパルスの中間にある。

(10) ギャップ長-せん絡電圧特性は波頭長 600 µs のときは直線 的であるが、120 µs のものは非直線的である。

献 考 文

- A. F. Rohlfs, H. E. Fiegel, J. G. Anderson: AIEE Transac-(1)tions Paper, 61-226 (Dec. 1960)
- J. H. Hagenguth, A. F. Rohlfs, W. J. Degnan: AIEE Power (2)Apparatus and Systems, 72 (1952)
- Н. Н. Тиходеев, А. Н. Тчщнов: Электрнчество No. 2 (3)(1959)
- (4) Н. Н. Тиходеев, А. Н. Тчшнов: Электричество No. 3 (1958)



ガス密封形油入電器のガス漏れ検出装置

この考案はガス密封形油入電器のガス漏れを確実に検出すること のできるガス漏れ検出装置についてのものである。

· この考案は図面に示すように油温目盛およびガス圧目盛を施した 表示盤上へ油温指針および補助ガスタンク内圧により変位するガス 圧指針とを同心的に取り付け, これらガス圧指針と油温指針とは標 準状態において一定の角で追従するように構成し, これら指針は所 定の角のに調整した接点を有する検出機構を形成してある。指針軸 は互に絶縁されておりこれら軸間にはガス漏れ警報器に連なる警報 回路を構成してある。

もし油槽内にガス漏れが発生した場合は補助ガス槽内のガス圧は 初期設定時より低下するので油温指針とガス圧指針との角は設定角 θに近づき, ガス漏れが絶縁油に悪影響をおよぼすまでに減圧した 場合には油温指針またはガス圧指針はこれらの対向する接点に接触 して軸間は短絡され, 警報回路を付勢してガス漏れを報知する。 設 定角のはガス圧すなわち封入ガス量の減少下限で警報を発するよう 設定しておくものとする。

この考案によれば油槽内に発生するガス漏れはこれを外部より監 視できるのでガス漏れの初期においてこれを検出でき, 早期発見が 可能となり, 危険状態まで封入ガス量が減少した場合はこれを外部 に警報すると共に油温,ガス圧を個々に測定できるなど実用的効果 がある。 (諸角)

