気中長ギャップのせん絡特性

Flashover Characteristics of Large Gap Spacings in Air

三 宅 義

Toshio Oikawa

治*

竹 下 英 Hideyo Takeshita 世*

Yoshiharu Miyake 笈 川 俊

雄**

鎌 田 Yuzuru Kamata

譲**

内 容 梗 概

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。

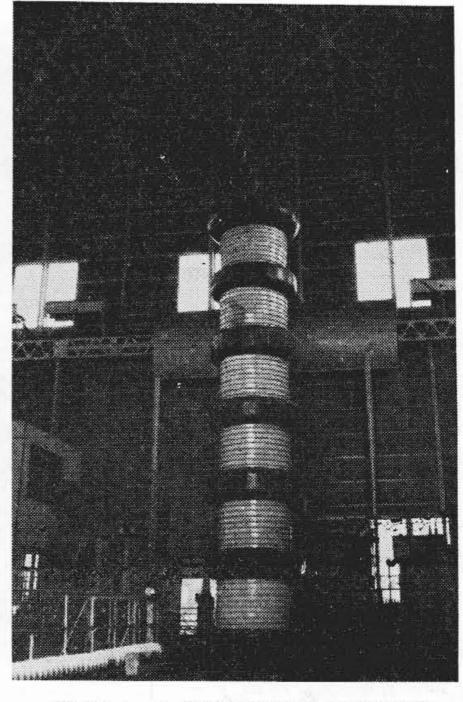
発生電圧はインパルス 3,000 kV, 交流 1,600 kV (波高値), 開閉サージ 1,000 kV 程度であり、この範囲内でギャップ長とせん絡電圧の関係は、インパルス正極性では直線的で、インパルス負極性のせん絡電圧は正極性に比べてかなり高く、また電極による差が著しい。交流せん絡電圧は電極構造により二つのグループに分けられる。また波頭長を変えた実験では 100μ s 付近のせん絡電圧が最も低く、交流のせん絡値を下回っていることが明らかとなった。

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、5 m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5 m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6.5 m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。

第1図 5,000 kV 衝擊電圧発生装置



第2図 1,650kV試験用変圧器

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。

92 kWs

公 称 発 生 電 圧 5,000 kV

最大蓄積エネルギー

全 直 列 容 量 0.00735 μF

2.2 1,650 kV 試験用変圧器

5,000 kV 衝撃電圧発生器と同一建家内にあり、550 kV 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。

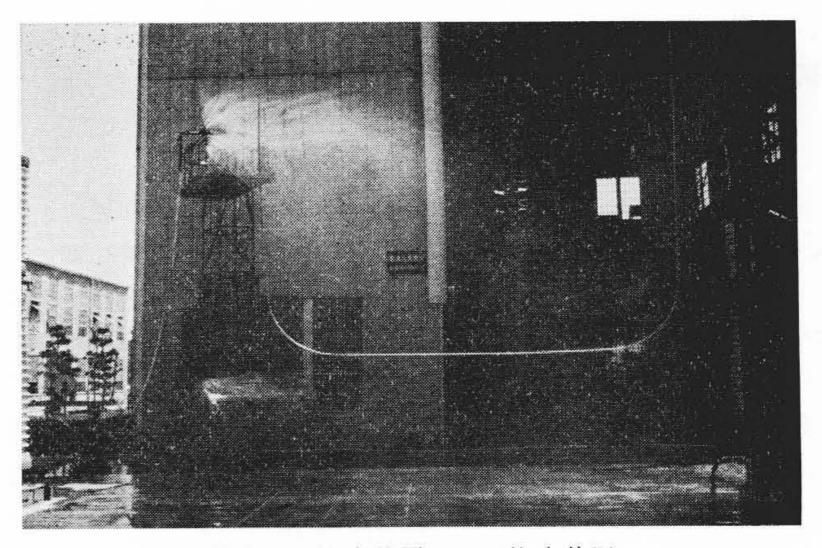
一 次 電 圧 4kV

二次電圧 1,650kV

周 波 数 50 c/s

電圧上昇速度 7.5~3.0 kV/s (3 段カスケード)

** 日立製作所日立研究所



第3図 注水装置および注水状況

直列制動抵抗 75 kΩ

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 kV

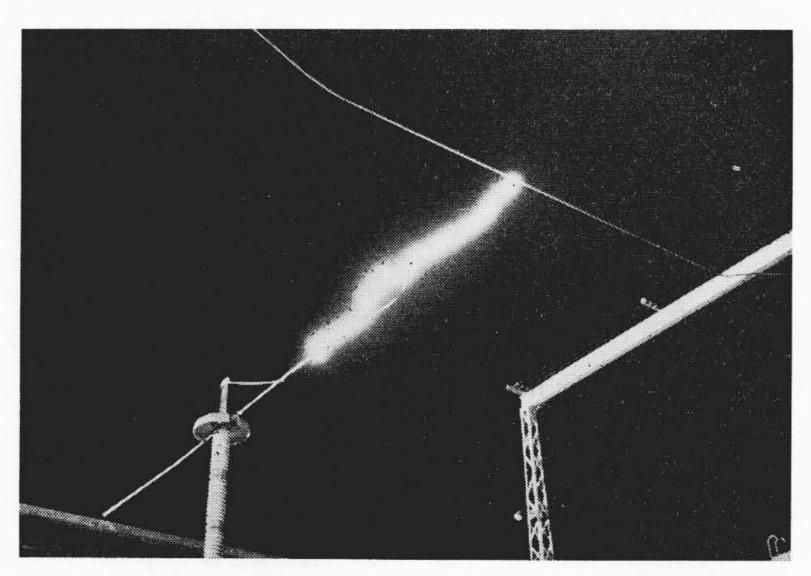
二次電圧 220-110-55 V

定格二次負担 100 VA

^{*} 東京電力株式会社



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, AC50~)



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 $710 \,\mathrm{k}\Omega$ 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ャ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 $1 \, \text{mm} \phi$ のノズル70個が取り付けてあり、ノズルの取付面積は $2,300 \times 1,100 \, \text{mm}$ である。第 3 図に注水装置および注水状況を示す。

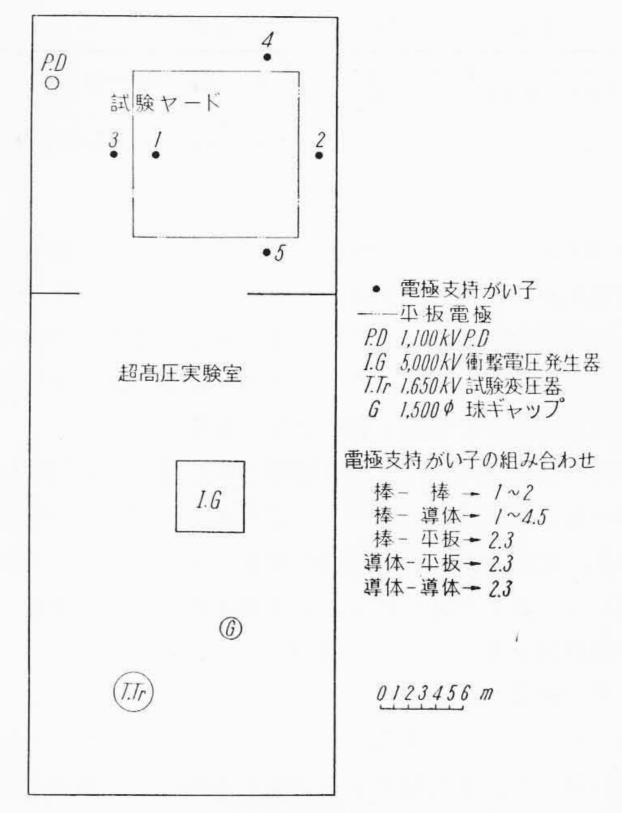
3. 試験電極および配置

3.1 電極の構造

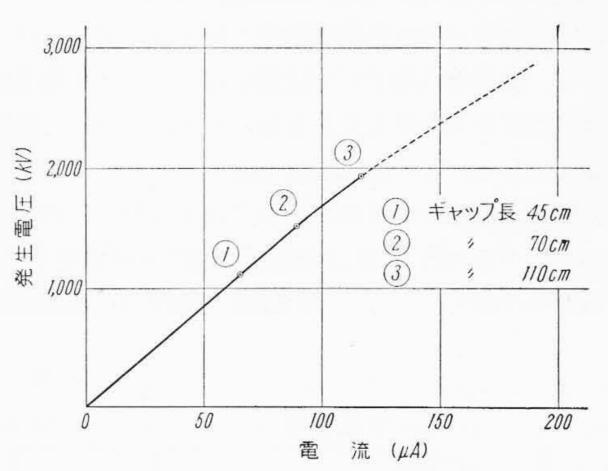
棒電極は一辺12.5 mmの角棒で、高さ約8.7 m のがい管上に取り付けられている。導体-導体電極は単導体送電線の相間を模擬したもので、25mmøアルミパイプを上下に対向させ、両端で電界が強くなるのを避けるため、1 mの曲率半径で曲げてある。上部が高圧電極、下部が接地電極で、ギャップ長調整は接地側電極で行なった(第4図)。棒-導体電極は前記のものを水平に配置したものである(第5図)。導体-平板、棒-平板に使用した平板電極は、コンクリート床面上に2×2m、厚さ0.6 mmの銅板をはんだにより継ぎ合わせ、極力突起のないように仕上げたもので、全体の面積は12×12mとした。

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



第6図 試験機器配置図



第7図 1,500 φ 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 衝擊電圧試験

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 $1,500 \, \mathrm{mm} \phi$ 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 ΜΩ 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 1,100 mm のとき $\pm 0.3\%$ で、き わめて確度は高いが、1,500 mm φ 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 19 m 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。

日

第1表 二つの測定法により求めた電圧の比

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。

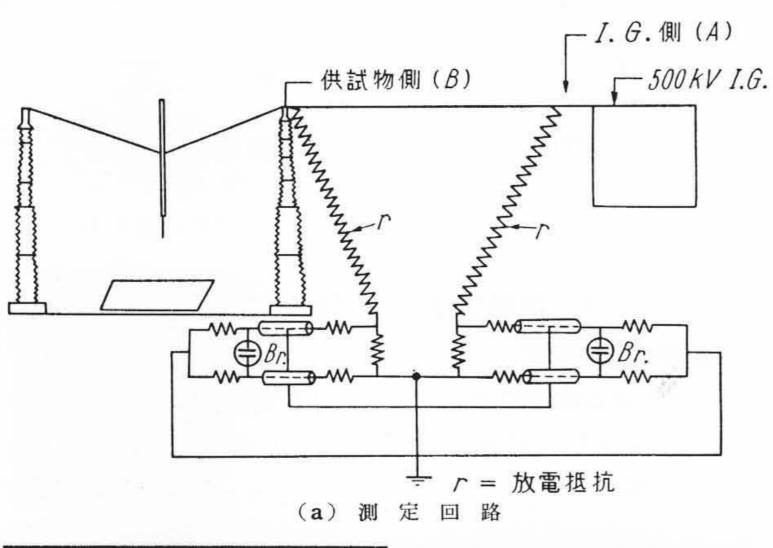
第1表の結果をみれば上記 2種類の電圧測定法の間には強い相関関係があることは明らかで、一定誤差は大部分が分圧比の誤差に基づき、変動誤差は充電電圧の変動、オシログラフの測定誤差に基因していると考えられる。いま第1表の結果を整理し、上記の比の期待値をRとし、 2σ を誤差と考えれば

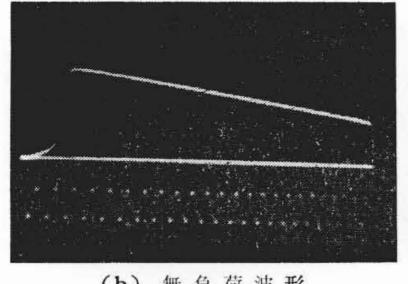
$R = 94.2 \pm 2.7 (\%)$

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 $2.7/94.2\times100=2.9(\%)$ である。

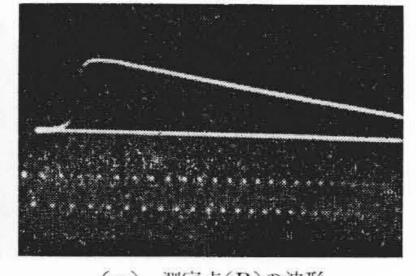
4.1.2 衝撃電圧発生器と供試物の距離の影響

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

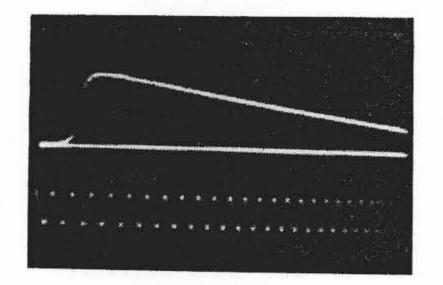




(b) 無負荷波形 波高値 665 kV 波頭長 1.2 μs 波尾長 38.5 μs



(c) 測定点(B)の波形 波 高 値 665 kV 波 頭 長 1.5 µs 波 尾 長 24.5 µs



(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

第8図 分圧器そう入位置の影響

波頭長 $1.2 \mu s$ であるが、供試ギャップをつなぐと $1.5 \mu s$ 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。

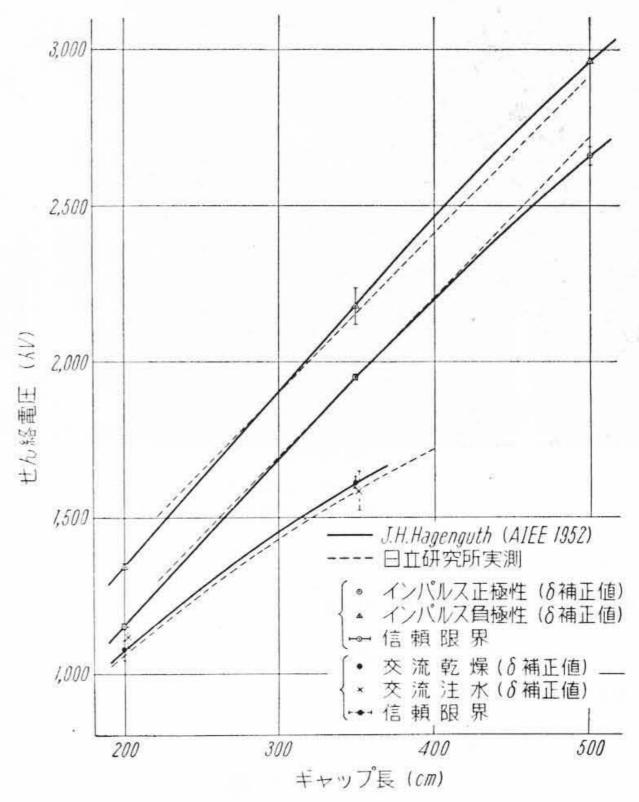
4.1.3 試 験 結 果

試験結果は第9~13図のとおりである。

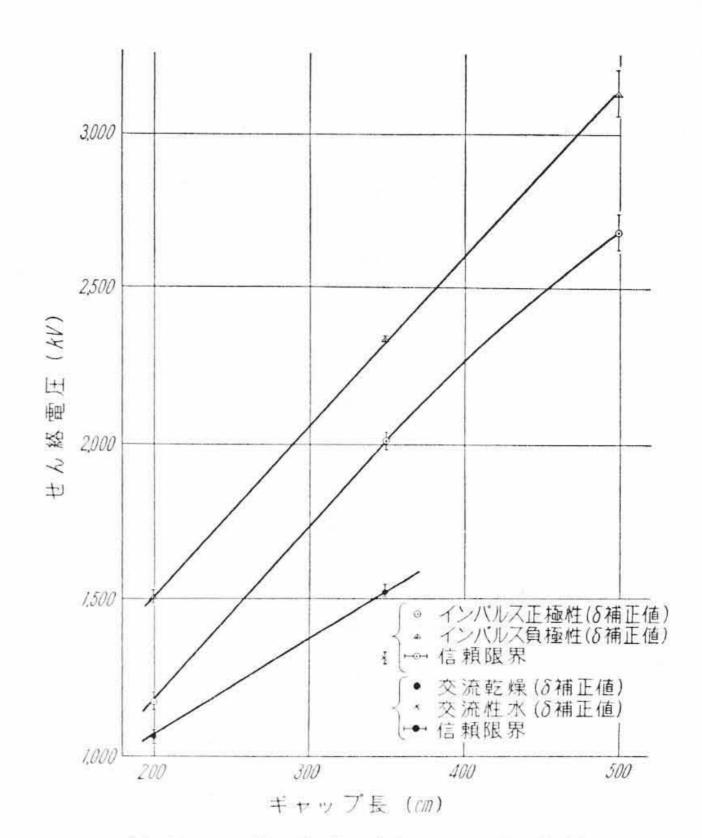
4.2 交流電圧試験

4.2.1 試 験 方 法

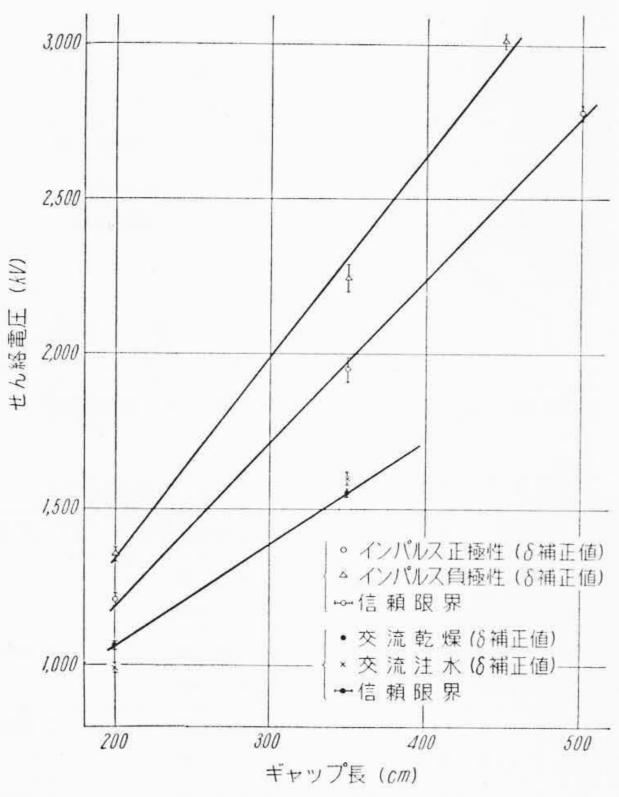
交流せん絡電圧は $10\sim20$ 回の測定値の平均から求め、相対空気密度補正を行なったのち 1% 有意水準の信頼限界を算出した。また各電極とも少なくとも一点で注水せん絡電圧を求めた。測定した注水量は無風の状態で水平分 3.4 mm/min であるが、屋外の実験であるため風の影響などで注水条件は大幅に変わっているものと思われる。使用した水の固有抵抗は 15 k Ω -cm であった。電圧測定には 1,100 kV PD を使用した。 第 14 図 にせん絡試験時のオ



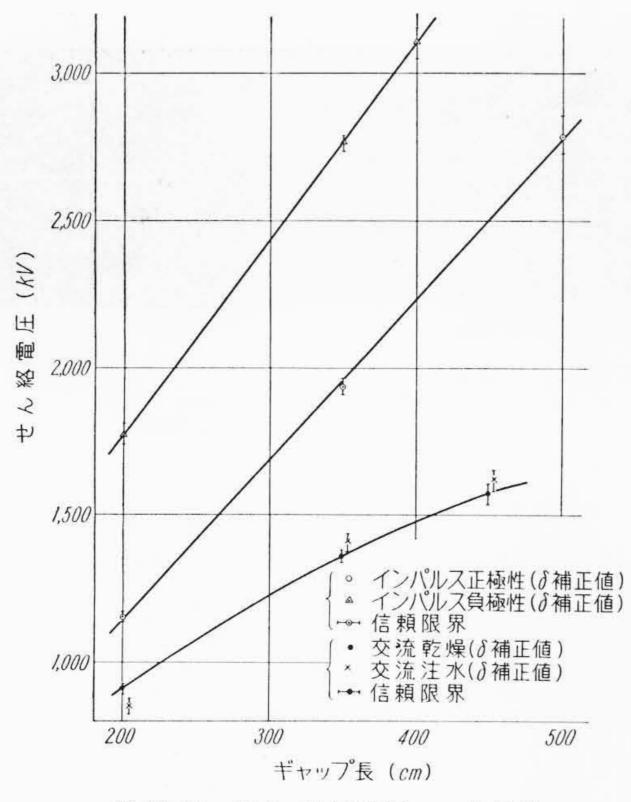
第9図 棒-棒 電 極 せ ん 絡 特 性



第10図 棒-導体電極せん絡特性



第11図 導体-導体電極せん絡特性



第12図 導体-平板電極せん絡特性

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

測定結果は第9~13図に示す。

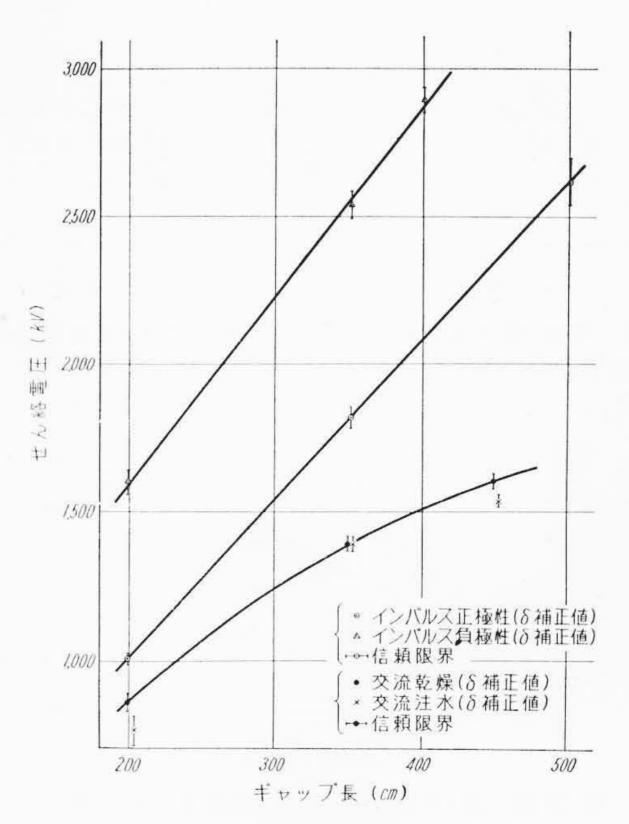
4.3 開閉サージ試験

4.3.1 試 験 回 路

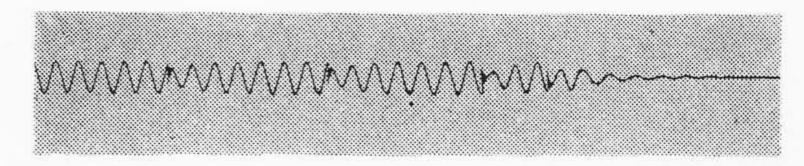
試験回路は第15図に示すように、衝撃電圧発生器に25~330 k Ω の水抵抗と 1,000 pF の結合コンデンサを接続して緩波頭波を発生させた。この結合コンデンサと直列に分圧用マイカコンデンサ (4 μ F) および 1 M Ω の漏えい抵抗がはいっている。開閉サージ波形としては波頭長 120 μ s と 600 μ s のものを使用し、これをうるには水抵抗の抵抗値を調整した。また緩波頭波放電電圧としては 50% 放電電圧を測定した。

4.3.2 試 験 結 果

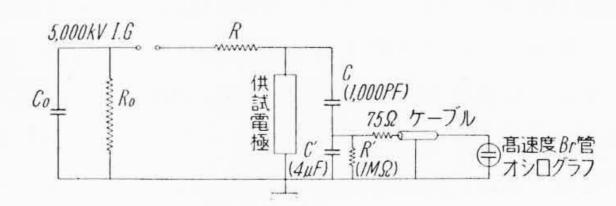
緩波頭波の波頭長は 120 μs と 600 μs の 2 種類で、いずれも正



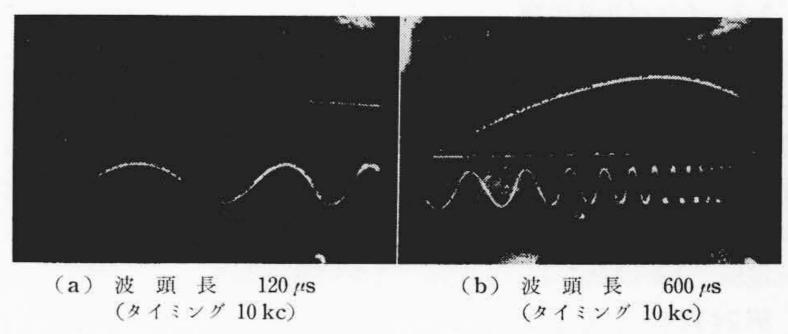
第13図 棒-平板電極せん絡特性



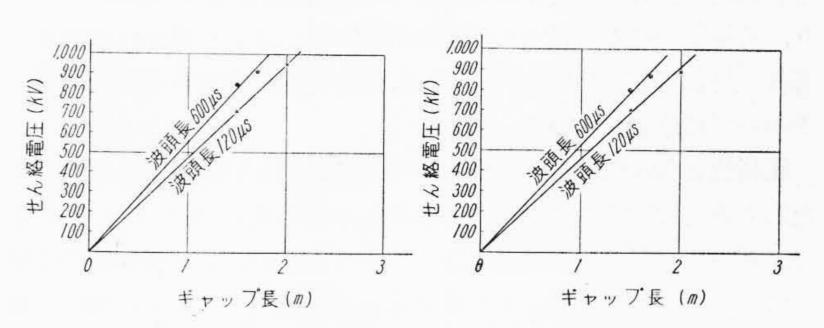
第 14 図 棒-棒電極 (ギャップ長 3.5 m) せん絡時の電圧オシログラム (1,100 kV rms)



第15図 緩波頭波発生回路



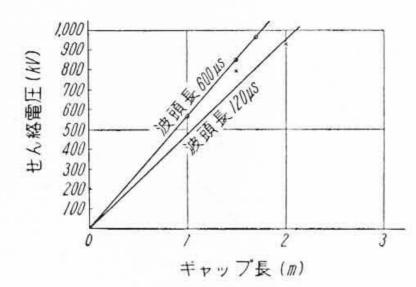
第 16 図 緩波頭波のオシログラム

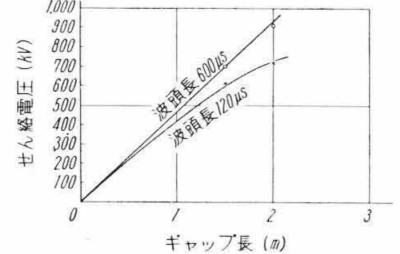


第17図 棒-棒電極の緩波頭 波せん絡特性

第 18 図 棒-導体電極の緩波 頭波せん絡特性

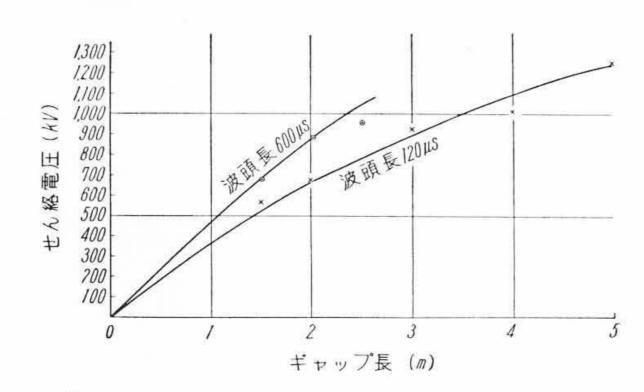
極性であり、そのオシログラムを**第16**図に示す。発生電圧の測定はコンデンサ分圧により、分圧比はCメータにより測定した。なお50% せん絡値を求めるには20回の昇降法によった。得られた値には空気密度の補正のみ行なった。その結果は**第17~21**図





第19図 導体-導体電極の緩 波頭波せん絡特性

第 20 図 導体-平板電極の緩 波頭波せん絡特性



第21図 棒-平板電極の緩波頭波せん絡特性

に示すとおりである。

5. 結果の検討

5.1 従来のデータとの比較

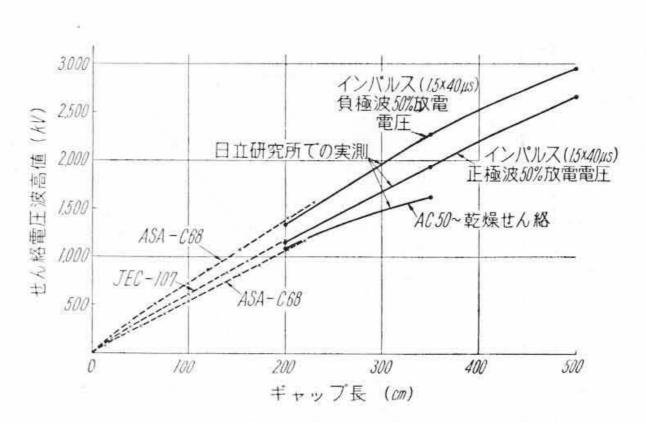
第4.1節および第4.2節で得られた測定結果について従来の小ギャップのデータとどのようなつながりを有しているかを,棒-棒ギャップについて検討すると 第22 図 のようになる。現在のところ規格化された値は約2~2.5 m までで,今回の最小ギャップ長が2 mであるので,2 mについて比較すると第2表のようになる。第2表から明らかなように交流50 c/s の値は約3% ASA より高く,インパルス正波は約2.5%,負波は約5%低くなっている。しかし測定誤差は3%程度で,さらに湿度の影響を考慮すれば差があるということはできない。他の電極については規格化されたものはないので比較は避けた。

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。

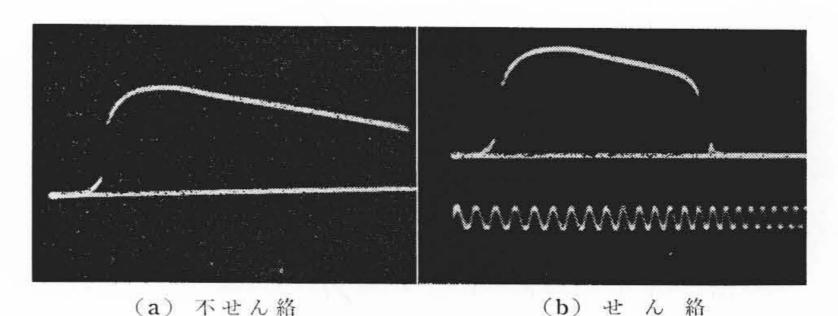
正極性と負極性のストリーマの形式には著しい差が見られる。すなわち正波印加時には高圧側電極からは樹枝状のストリーマが生じ、ギャップ長の½の長さになることもあるが、負波印加時では単一のストリーマが生じ、その長さも正波に比べてはるかに短い。第25図に棒-導体で生じたコロナを、第5図にせん絡させたときの写真を示す。特に第25図のような激しいグローコロナは他の電極(棒-平板、導体-平板)でも観察された。これらはいずれも正極性の場合で、負極性ではこのような強烈なコロナは発生しない。このグローコロナは光が弱いので長時間安定に発生しないと写真撮影が不可能であり、またせん絡してアークが発生すると、この強い光のために打ち消されてしまう。



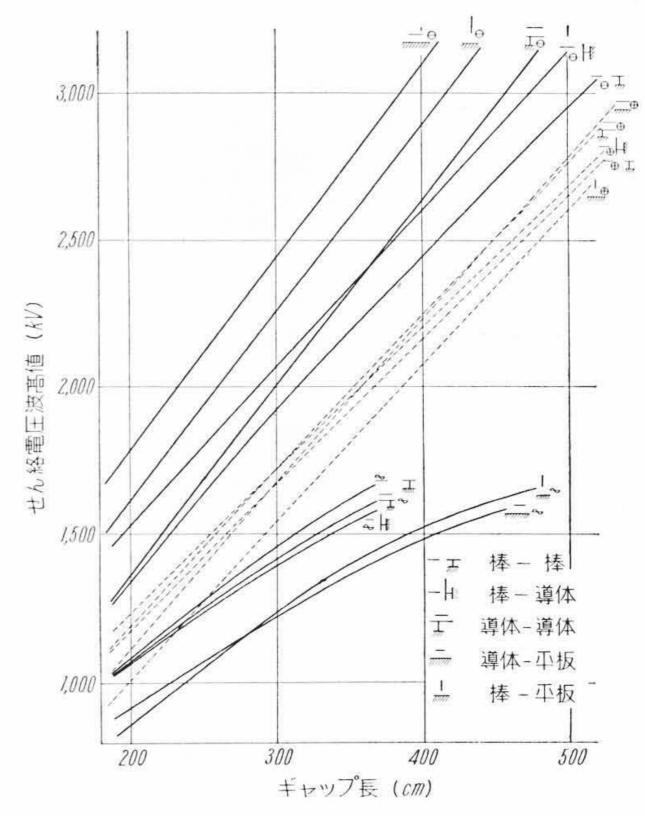
第22図 従来のデータとの比較 棒-棒間げき

第2表 ギャップ長2mについての比較

衝撃電圧せ	kV		交流電圧せん絡 kV (波高値)			
JEC-107 (1.5×40 μs)	正負	極極	1,180	乾燥せん絡 注水せん絡	-	
ASA-C68 (1.5×40 μs)	正負	極極	1,220 1,380	乾燥せん絡 注水せん絡	1,045	
VDE (1×59 μs)	正負	極極	1,200 1,370	乾燥せん絡 注水せん絡	1,025	
日立実測 (1.5×40 μs)	正負	極極	1,150 1,320	乾燥せん絡 注水せん絡	1,079 1,118	



第 23 図 印加波形オシログラム (タイミング 500 kc) 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



第24図 各種電極せん絡特性

第25図のように、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一平板で、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



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



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

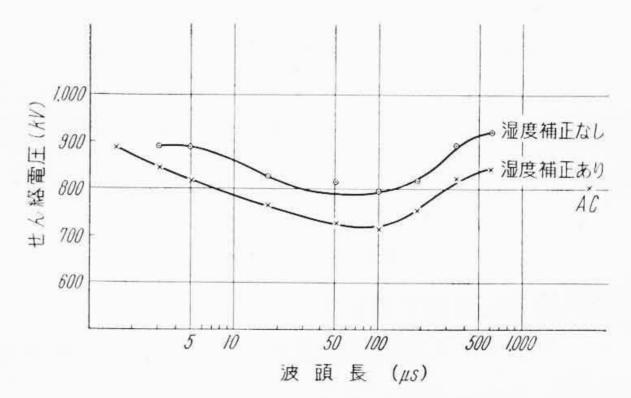
注水時,乾燥時のせん絡値はその平均値を比較すると第9~13 図に見るように特にはっきりした傾向は見られず,大部分は注水せん絡電圧がやや高目になっている。しかし個々の測定値は乾燥の場合に比べて注水時のほうが変動が大きく,せん絡電圧の最低値は常に注水時に現われている。

5.4 開閉サージ試験

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3表 ギャップ長2mのせん絡電圧

	せん	絡電圧	(kV 波高	5値)	C/A (%)	D/A (%)	C/B (%)	D/B (%)
電 極 交 i	100 01 PAGE	標準波 (B)	波頭長 120 μs (C)	波頭長 600 μs (D)				
棒-棒	1,079	1,150	950	1,100	88	102	83	96
棒-導体	1,062	1,180	920	1,050	87	99	78	89
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	62	80
棒-平板	858	1,005	670	880	78	103	67	88

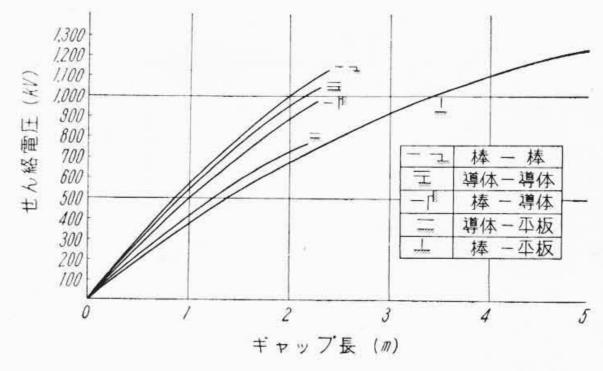


第 27 図 波頭長-50%せん絡電圧曲線 (棒-棒,ギャップ長 1.5 m)

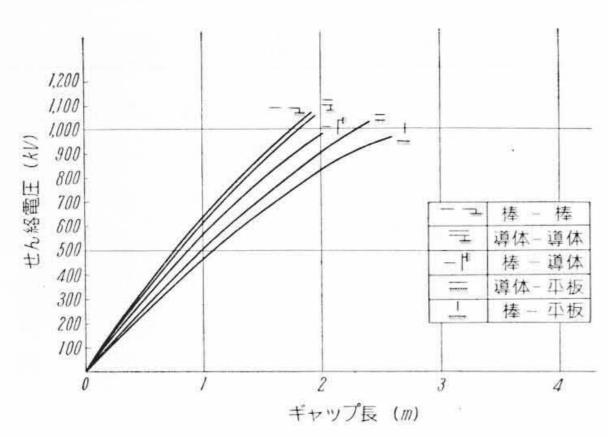
いことを示している。すなわち波頭長 $600 \mu s$ の 50% せん絡値は従来の考えと一致しているが、波頭長 $120 \mu s$ では 5 種類の電極すべてが交流せん絡電圧より低く、棒-平板電極では特にこの現象が著しく交流せん絡値の 78% になっている。

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 2 μs から 600 μs 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 2 μs から 17 μs 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 $120~\mu s$ 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、 $600~\mu s$ 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 $120~\mu s$ の場合には



第 28 図 波頭長 120 µs のせん絡特性



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½ 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 $100 \mu s$ 付近のせん絡電圧 が最低となる。
- (9) 波頭長 $120 \mu s$ のせん絡電圧は、交流せん絡値より低いが、 波頭長 $600 \mu s$ 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 $600 \mu s$ のときは直線的であるが、 $120 \mu s$ のものは非直線的である。

参 考 文 献

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



新案の紹介



登録新案 第 553216 号

渡 辺 政 己・畠 山 尚

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 θ 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 θ 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)

