

最近のドライバルブ避雷器

落 清*

Hitachi Dry Valve Lightning Arresters

By Kiyoshi Ochi

Kokubu Branch Work of Hitachi Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

The improvement of the performance characteristics of lightning arresters and a better administration of them will surely lead to a higher rate of reliability and economy of electric power supply, and out of this knowlege have emerged a number of improved lightning arresters in such a variety that can not be noticed with any other apparatus for transmission service.

Hitachi dry valve arresters have undergone various factory tests and actual service tests in which they could shown their capability to fulfill the industry's requirements as regards discharge voltage and discharge current capacity. Especially, in respect to the latter characteristic, these arresters have got through with success 10 successive discharge of 500 A (2 ms) applied at 30 second interval in a long-time-repeated-surge test conducted recently by the writer. This is noteworthy achievement because the users can now depend to some degree on these arresters for the protection of insulation of transmission outfits on occasions of multiple stroke or switching surges, which was distinctly not the job for the conventional dry type lightning arresters.

〔I〕 緒 言

避雷器の性能向上と適切な運用は、電力の信頼性と経済性をいつそう高めるものである。近年における避雷器性能の進歩は、送電機器のうちでも著しいものゝ一つで、アメリカ、スイスなどでは近接雷撃、直撃雷などに対してもある程度の保護効果があり、さらに小電流長時間耐量試験〔150 A (2 ms) 20 回〕などを推奨実施して、開閉サージなどに対しても保護能力のある避雷器を製作しているようである。

一方我国でも 60 kV (昭 24 年)、100 kV (昭 25 年) 避雷器の現地試験⁽¹⁾、100 kV 放電耐量の達成⁽²⁾ (昭 26 年ドライバルブ避雷器)、三重変電所におけるケーブル回路用 7 kV 避雷器試験、新北陸幹線 275 kV (直接々地避雷器 (第 1 図次頁参照) の完成など避雷器の性能は大きな進歩を示している。さらに昭和 24 年以来電気学会の避雷器標準特別委員会において審議されていた、現在の避雷器技

術に立脚した。新避雷器規格 (JEC) も昭和 29 年 1 月草案を完了し、近く制定の運びになつている。避雷器は性能向上と共に、信頼性を増大しつつある現況である。以下に最近のドライバルブ避雷器について述べる。

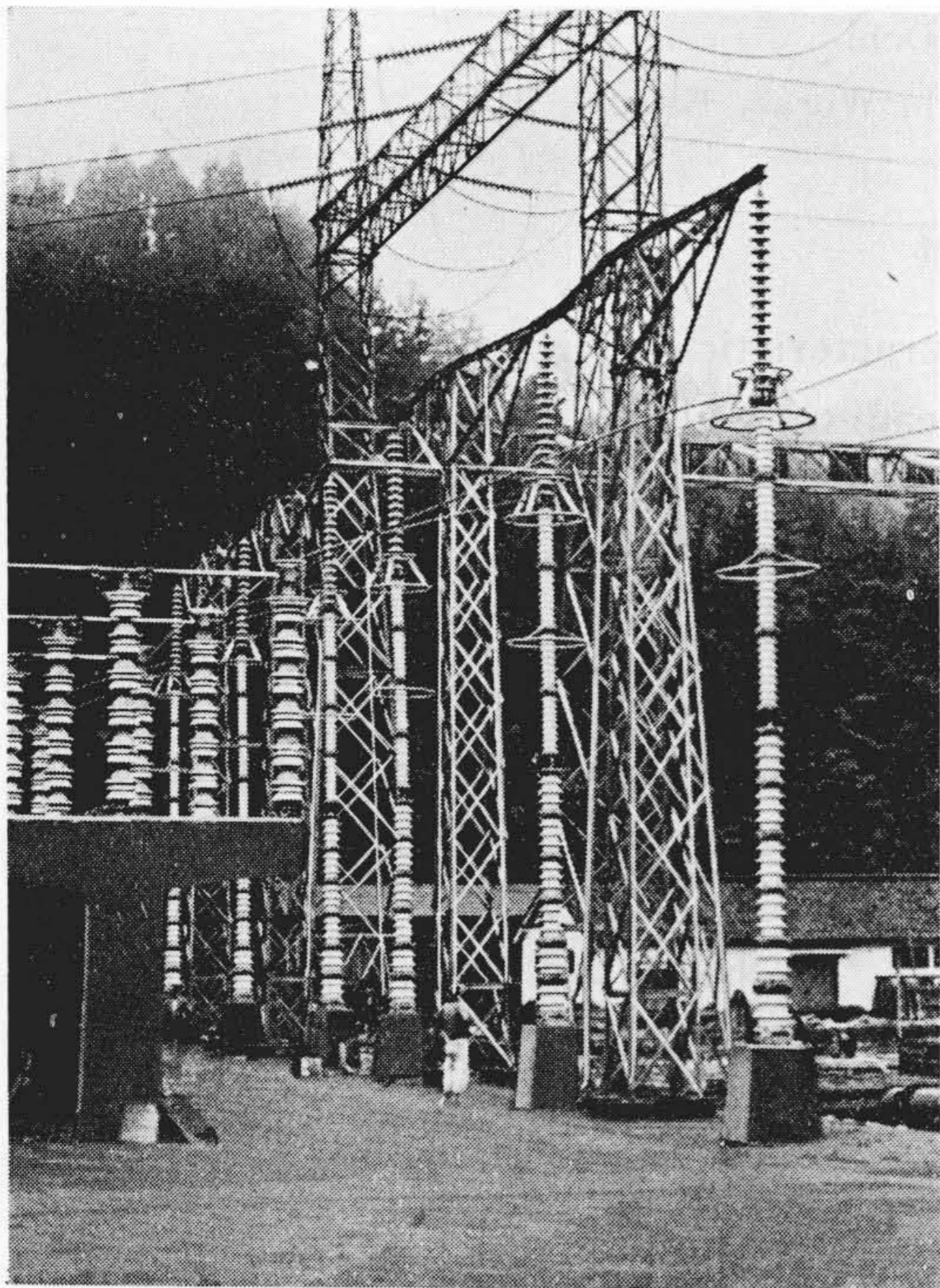
〔II〕 特性要素

特性要素の制限電圧、放電耐量は共にこの数年来大きく改良されている。第 1 表は発変電用ドライバルブ避雷器の特性表であつて、放電々流 1.5 kA, 5 kA に対する制限電圧は JEC の値より低く、また最近のアメリカにおける避雷器制限電圧 (平均値) に比べて、同一許容端子電圧に換算すれば約 5~9% 程度下回つている。

放電耐量は避雷器の保護範囲と耐久力を定めるものであるが、従来乾式避雷器の最大の弱点は、その放電耐量がアルミニウム避雷器などに比べて小さいことであつた。昭和 23 年の日発の避雷器仕様書では 5,000 A が規定されており、それが当時の技術水準でもあつた。アメリカで当時すでに 100 kA (5×10 μs) を規定して⁽³⁾、近接

* 日立製作所日立工場国分分工場

雷撃などに対しても保護能力のある避雷器を製作していた。我国では昭和26年3月ドライバルブ避雷器の抵抗要素が始めて、電気試験所で100kA(22μs)に耐えることを確認された。一方波高値30~50kA乃至100kAの雷撃電流は、その波尾は5~20μs程度で非常に短い、多重雷撃などは波高値数千アンペアに引続き十数アンペ



第1図 275kVドライバルブ避雷器 (新愛本変電所)

Fig. 1. 275kV Dry Valve Lightning Arresters (Shin'aimoto Substation)

アで長く尾を引いており⁽⁴⁾、また送電線あるいはケーブル回路の開閉サージによる放電々流は、波高値約200A程度で、継続時間も2ms以上に達するものが実測されている⁽⁵⁾。第2図はアメリカにおける115kV送電線の開閉サージによる避雷器放電々流波形の一例である。S.B. Haward氏らはこれまでの避雷器破壊の大部分の原因はこれらの長時間継続電流によるものであることを指摘し、衝撃大電流試験のほかに、小電流長時間放電耐量試験として、150A(2ms)20回を推奨実施し、これらの試験に合格した避雷器は開閉サージなどに対しても十分の成果を挙げていることを報告している⁽⁶⁾。

これまでの工場試験の結果でも、数万アンペアの衝撃電流に耐える抵抗要素がエネルギーとしては数分の1程度の小電流長時間放電試験で破壊しており、この種小電流継続サージが、抵抗要素には予想以上に苛酷なものであることを示している。第2表は最近工場および電力中央研究所で行ったドライバルブ避雷器抵抗要素の小電流長時間放電耐量試験の結果で⁽⁷⁾、450~700A(2ms)に耐えている。第3図は上記の工場試験のときの電圧、電流波形を示す。

〔III〕 直 列 間 隙

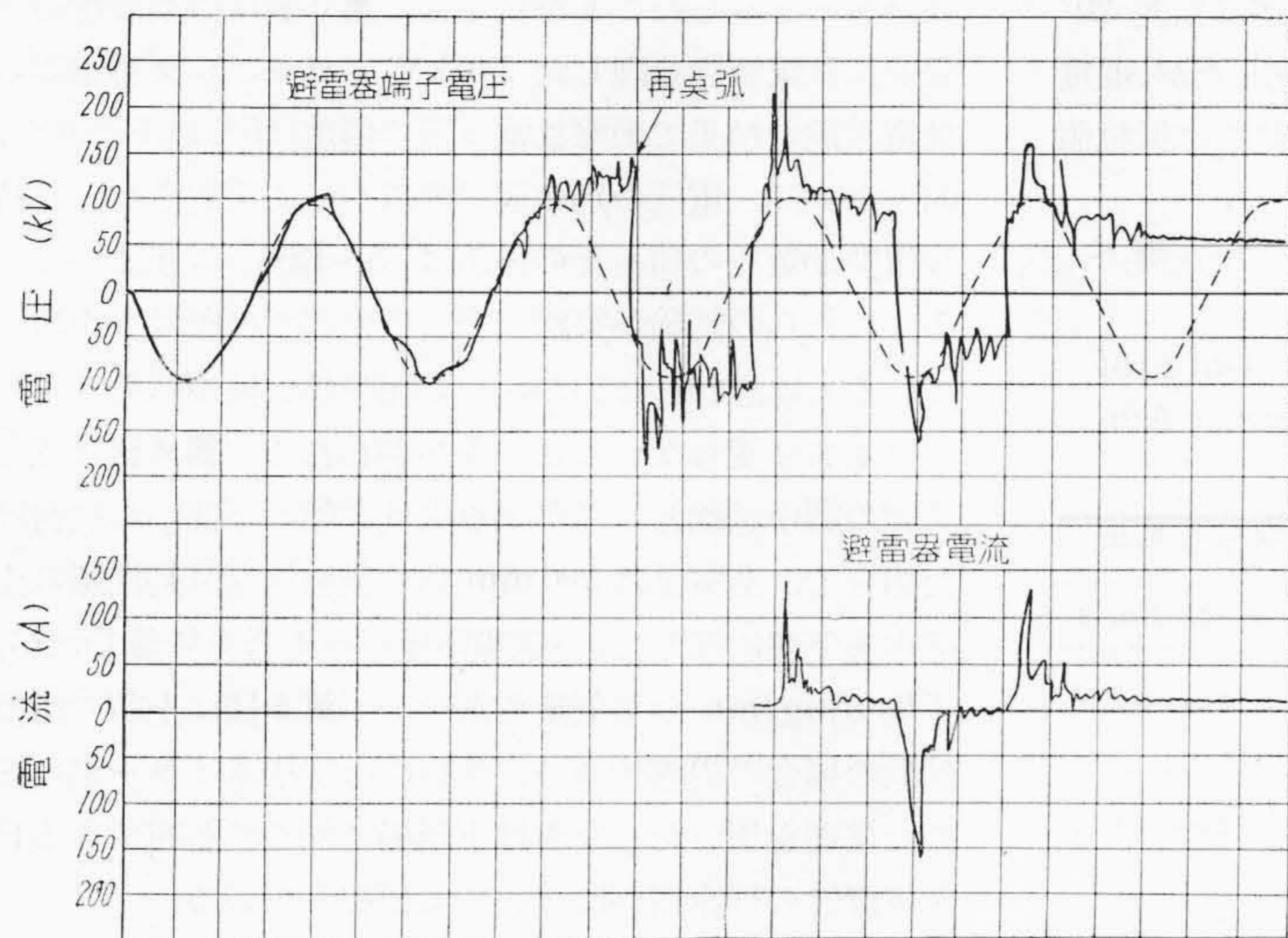
直列間隙には放電特性と続流遮断能力の2つの重要な特性がある。そのうち続流遮断能力(絶縁回復の速いこと)は間隙の構造その他によつても異なるが、交流放電開始電圧と内部間隙箇数が大いに関係し、いずれもある程度まで高いことが望ましい。ドライバルブ避雷器では工場および現地試験の結果から、交流放電々圧は2.5~3E(公称電圧)附近に、間隙箇数は遮断限界に対して30%以上の余裕のある数に選んで遮断の確実を期している。

第1表 発変電所用ドライバルブ避雷器特性標準表

Table 1. Standard of Station Type Dry Valve Lightning Arrester

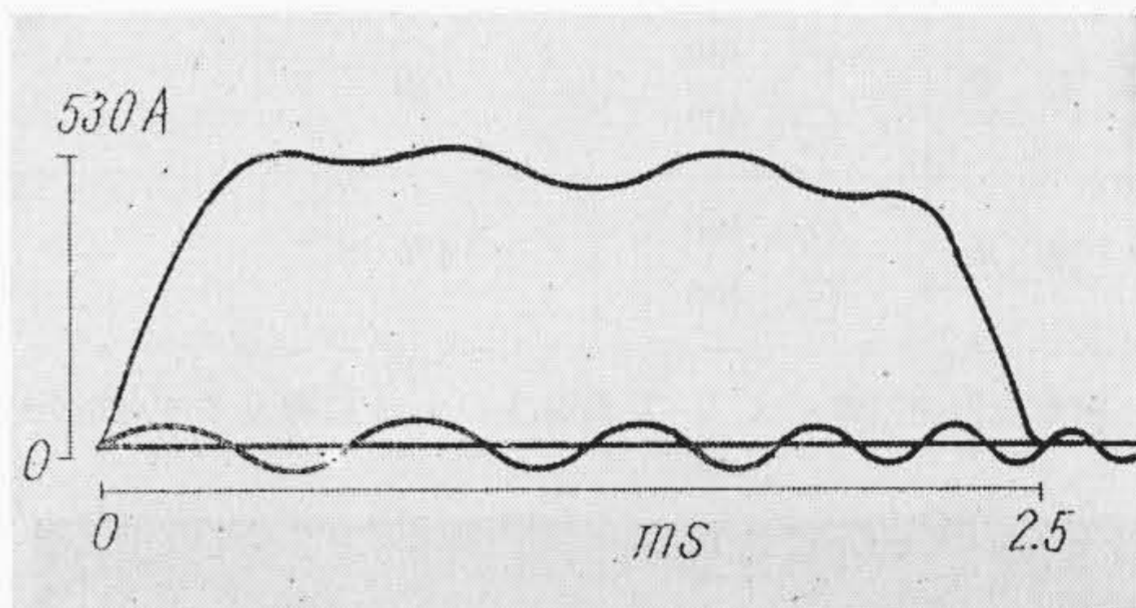
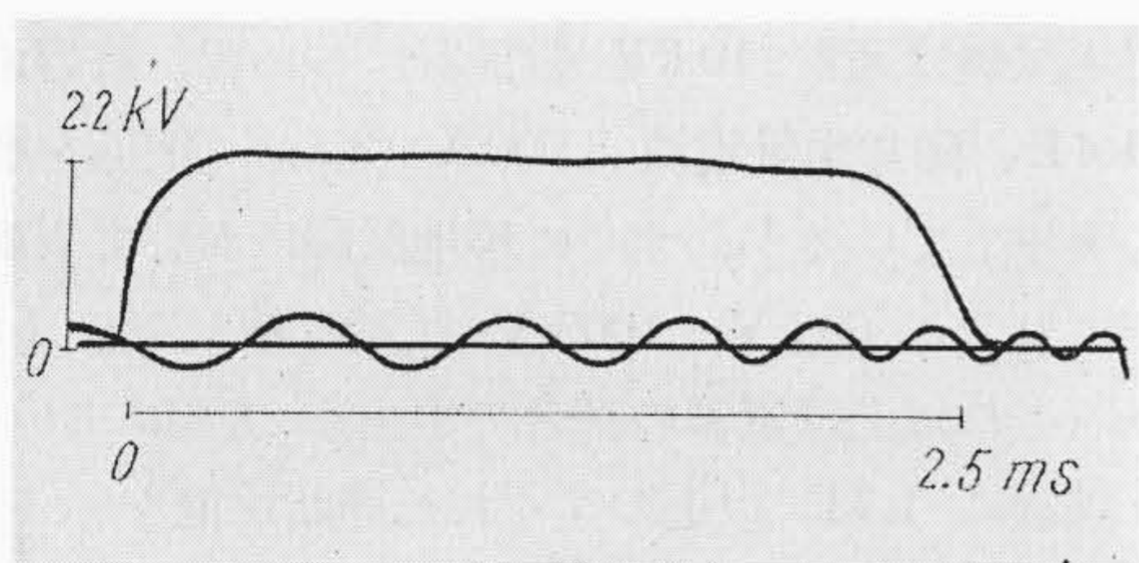
公称電圧 (kV)	基準衝撃絶縁 強度 (kV)	衝撃放電開始電圧 (kV)		商用周波放電開始電圧 kV(eff)		制 限 電 圧 (kV)				
		JEC規定	ドライバルブ 避雷器	JEC規定	ドライバルブ 避雷器 (平均)	J E C 規 定		アメリ カ (平均値) 5,000A	ドライバルブ 避 雷 器	
						1,500A	5,000A		1,500A	5,000A
3	45	17	17	6以上	7	13	15	14	13	14
6	60	30	30	12	14	26	30	28	26	28
10	90	45	45	20	25	45	50	46	39	43
20	150	90	90	40	60	85	100	94	78	85
30	200	140	140	60	90	130	145	140	117	128
40	250	180	180	80	120	170	195	186	156	170
50	300	230	230	100	150	215	245	233	195	213
60	350	270	270	120	180	260	290	280	234	255
70	400	315	315	140	210	300	340	324	273	300
100	550	450	450	200	300	400	450	465	390	425
140	750	630	630	280	420	560	630	655	545	595
200	1,055	900	900	400	600	800	900	930	780	850

(註) アメリカ(平均値)は許容端子電圧を我国のものに換算した場合の値を示す。



第2図
115 kV 送電線に於ける開閉サージによる避雷器放電電流オシログラム

Fig.2.
Oscillogram of Arrester Current Measured During Line-Dropping Tests in 115 kV System



第3図 小電流長時間放電耐量オシログラム

Fig.3. Oscillogram of $i-t, v-t$ in Long Duration Surge Test

第2表 ドライバルブ避雷器 150φ 抵抗板の小電流長時間放電耐量試験結果
Table 2. Data of Long Duration Surge Tests of 150φ Characteristic Element

区分	試料	第 1 回			第 2 回			第 3 回		
		電流 2ms (A)	回数	時間間隔	電流 2ms (A)	回数	時間間隔	電流 2ms (A)	回数	時間間隔
電力中央研究所 試験結果	10	268~214	20	30 (s)	—	—	—	845~646	4 回目貫通	30 (s)
	11	280~226	20	30	—	—	—	775~662	9 回目貫通	30
	12	280~216	20	30	474~364	10	30 (s)	—	—	—
	13	280~216	20	30	530~388	10	30	—	—	—
	14	300~236	20	30	530~388	10	30	—	—	—
工場試験結果	480-1	450~480	5	3 (mn)	450	20	3 (mn)	—	—	—
	480-2	470	5	3	430~450	20	3	—	—	—
	480-3	390	5	3	530	20	3	—	—	—

(註) ただし 1 回, 2 回, 3 回は同一試料について, まづ第 1 回の試験を行い, 引続き第 2 回, 第 3 回の試験を実施した。

放電特性は絶縁保護上, JEC その他の規格を満足することは当然のことであるが, 放電特性が種々の使用条件のもとで常に変らぬことが避雷器として最も必要なことである。たとえば濃霧のとき衝撃放電開始電圧が上昇するとすれば, その保護効果は著しく低減される。また交流放電開始電圧が限界以上に低下するようなことがあれば, これまた続流遮断が困難となる。従来直列間隙の交流放電開始電圧は注水時と乾燥時で約 30% 近く変動す

ることがあつた。これは注水時に碍管表面に生じた導電性の薄い被膜によつて, 間隙の漂游容量その他が変り, 間隙全体の電圧分布が変つてくるためである。これに対しては碍子との結合力が化学的に強い。撥水性の珪素樹脂を碍管の表面に塗布すれば極めて有効である。また従来下部の開いた絶縁物の雨覆を取付けていた高抵抗シールド用高抵抗体は, 表面珪素樹脂処理した碍管中に封入して, 完全な防湿構造とすることにより抵抗値は外界の

影響をほとんど受けなくなつた。この抵抗体は温度 20°C から 100°C までの繰返し冷熱試験を実施したが、温度係数は約 -0.0028 で、この程度の温度変化では抵抗値

第 3 表 161kV 直列間隙の各種外界状態における放電試験結果

Table 3. Breakdown Voltage Test Data of 161 kV Series Gap in Different Ambient Condition

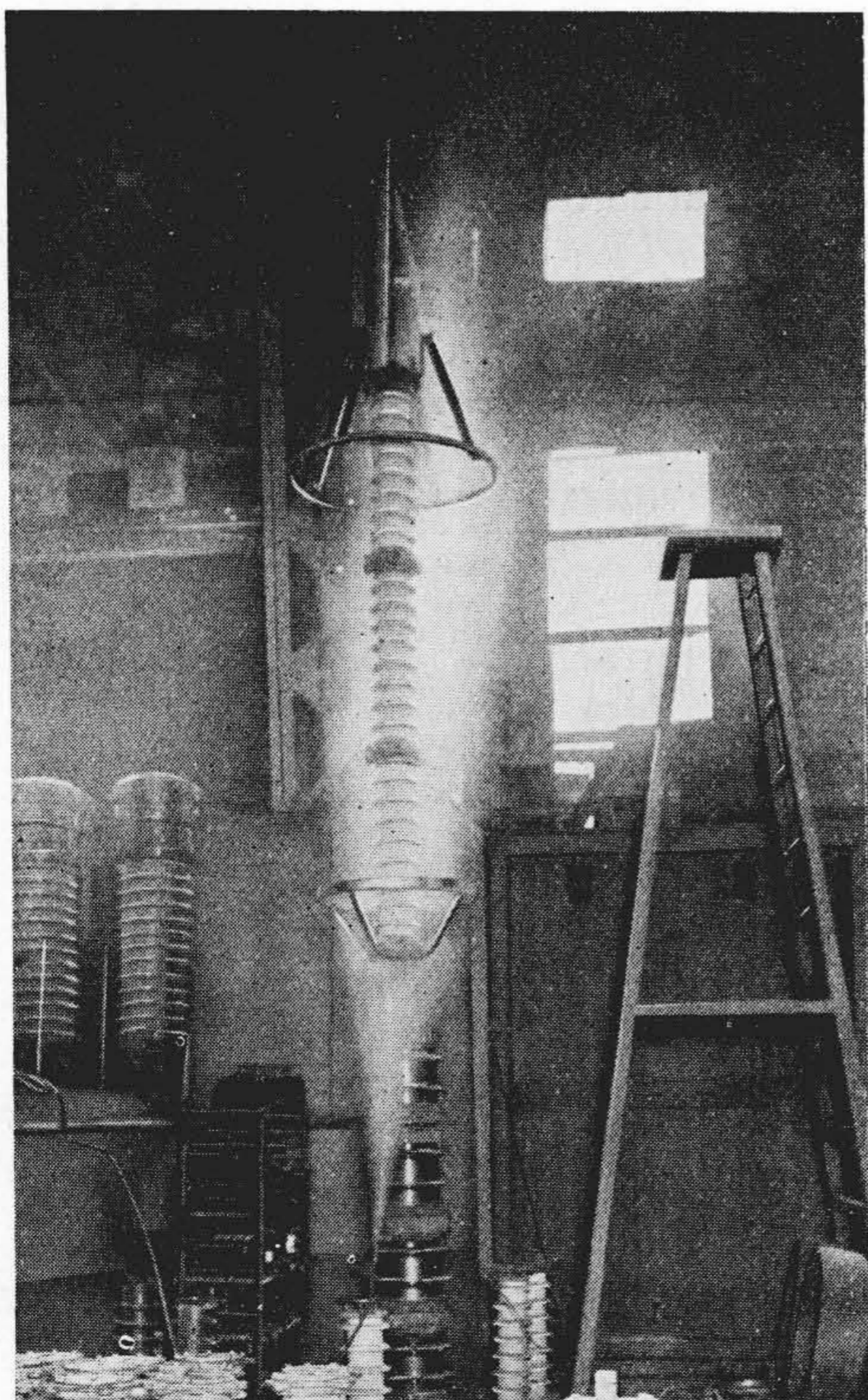
区 分 状 態	衝撃放電開始電圧 (kV)		商用周波放電開始電圧 (kV) eff	
	避雷器 No. 1	避雷器 No. 2	避雷器 No. 2	避雷器 No. 3
乾 燥	⊕ 450	462	462	472~515
	⊖ 410			
注 水	⊕ 460	520	520	468~482
	⊖ 430			
霧 中	⊕ 440	475	475	495~495
	⊖ 405			
煤 煙 乾 燥	⊕ 480	520	520	—
	⊖ 400			
煤 煙 霧 中	⊕ 460	478	478	—
	⊖ 400			

(註) 衝撃放電開始電圧は V-T 曲線上の 1 μ s に相当する点を取つた。

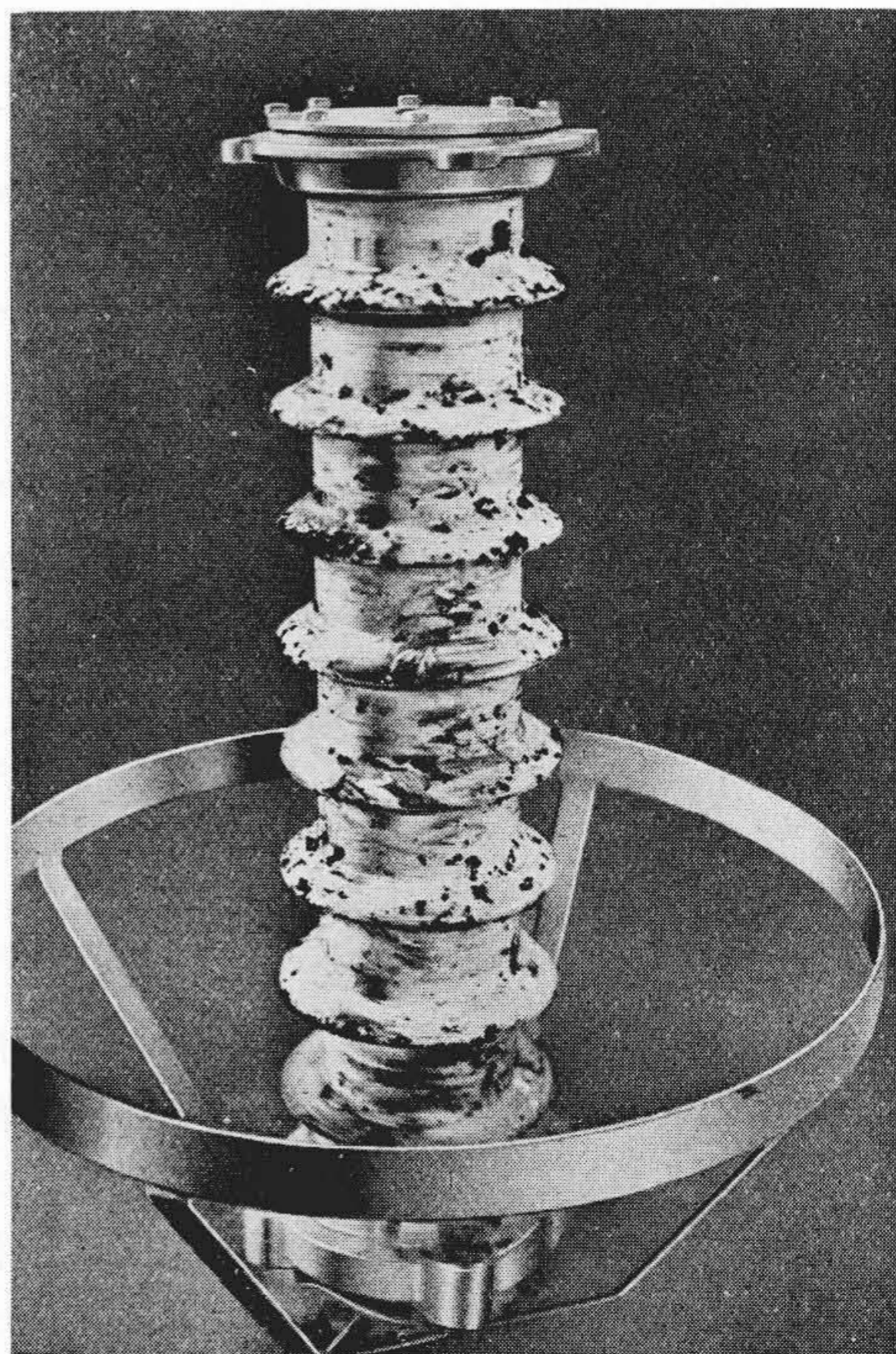
はほとんど変らぬことを示した。第 3 表は直列間隙碍管表面に珪素樹脂処理した 140kV ドライバルブ避雷器の放電試験の結果で衝撃放電々圧の偏差は6%以下であり、同一型式同一電圧の別の避雷器について実施した。交流放電開始電圧の値もその偏差は 5~12% に止まっている。これらの試験が実際の場合のすべての条件を再現しているとは思われないが、一応相当酷い使用状態でも特性はあまり変わらないことがうかがわれる。第 4 図は上記試験の霧中試験として蒸気を直列間隙の下部から吹付けた場合で、蒸気量は 200mm 角の吸取紙を直列間隙の上部中央下部に吊して、一定時間後の吸水量を秤量したが、平均 8mg/mn の蒸気量であつた。第 5 図は上記の汚損試験の場合の碍管状態で、汚損には工場ボイラー室の湿つた煤煙を用いた。なお目下現場で簡単に塗布できる自然乾燥性の珪素樹脂についても研究している。

〔IV〕 続 流 遮 断

工場試験は通常 10 kV 避雷器について、許容端子電圧 1.4E、印加衝撃電流 3,000A (2 μ s) 50 回を標準として実施しているが、すでに現地試験においても綱島変電所における 60 kV、100 kV 試験にそれぞれ 1.8E、1.5E (これ以上は電源の都合で中止)、工場における 60 kV 試験に 1.7E 以上のすぐれた遮断性能を示してい



第 4 図 161 kV 直列間隙の霧中試験
Fig.4. Breakdown Voltage Test of 161 kV Series Gap in Fog

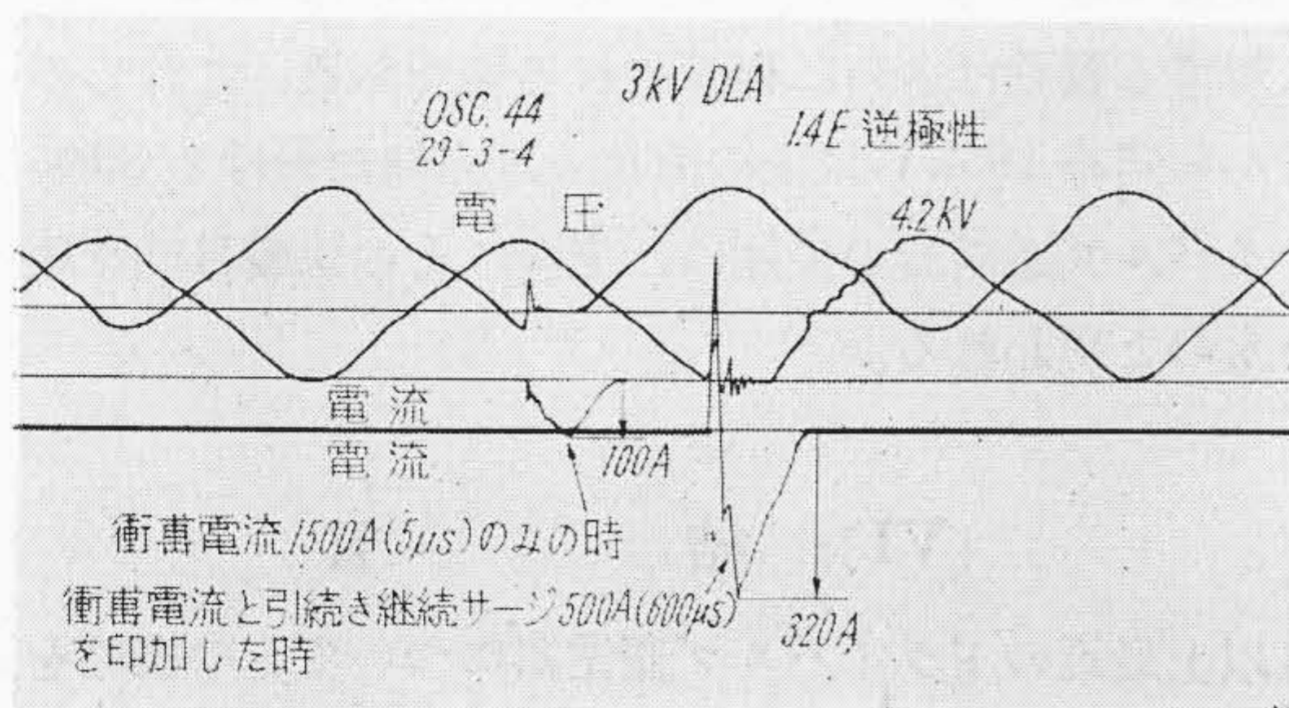


第 5 図 161 kV 直列間隙の汚損状態
Fig.5. Contaminated Condition of 161 kV Series Gap

第4表 衝撃電流の大きさによる続流値の変化
Table 4. Difference of Follow Current by Different Magnitude of Impulse Current

印加衝撃電流 (A)	機 圧 (kV) eff	続流波高値 (A)
2,000 (20 μs)	14.3	96
4,000 (15 μs)	14.1	115
9,000 (10 μs)	14.1	125

(註) 1. 直列間隙は 10 kV のものを使用す。
2. 抵抗板は 10 kV 単位より 10% 減にて使用。



第6図 3kV ドライバルブ避雷器 (特性要素枚数は標準の 80%) の続流遮断オッシログラム

Fig. 6. Oscillogram Showing the Interruption of Follow Current on 3kV Dry Valve Arrester

る。これらの試験はすべて、印加衝撃電流 2,000A 程度で行われたもので、いわゆる雷進行波を対象にした試験であったといえる。この点新しい JEC では 3,000A (15 μs) 以上 10 回と規定されており、従来の学会試験要項の 750A に比べれば、避雷器の信頼性は大幅に向上せられるものと思われる。すなわち続流遮断時の続流値の大きさは、極性、印加角度、その他の因子によつて左右されるが、印加エネルギーが大きい程続流が増し、遮断を困難にするからである。第4表は 10 kV ドライバルブ避雷器について、印加電流を 2kA から 9kA まで変えて、それぞれ連続 10 回の逆極性試験を実施した場合の結果で、9 kA のときの続流値は 2kA のときの約 1.3 倍の 125A に増加している。

また昭和 29 年 3 月中部電力三重変電所で実施された、7kV ケーブル回路用避雷器試験の予備試験として、3kV 避雷器 (特性要素枚数は標準の 80% のもの使用) について、最初避雷器を放電せしめるための印加電流は 1.5 kA (5 μs) とし、引続いて長さ約 36 km のケーブル回路に相当する模擬回路を、常規大地電圧の約 6 倍に充電し、これを放電したとき流れる長時間継続電流約 500A (600 μs) を加えて、逆極性、3 mn 間隔連続 15 回の試験を行つた。続流値は約 300A にもなつたが全回異常なく遮断した。第6図はこのときのオッシログラムで、継

続サージが流れたときは、始動衝撃電流のみの場合に比べて、続流値は約 3 倍の 320A にも達している。

印加エネルギーの相異で続流値の変ることを明瞭に示している。ドライバルブ避雷器は三重変電所における現地試験においても、ケーブル回路用避雷器としてすぐれた性能を示した⁽⁸⁾。

[V] 直接々地に 80% 避雷器の適用

許容端子電圧は避雷器が雷電圧で放電し、引続き流れる続流を遮断しうる機圧の最高限度であつて、もし機圧がそれ以上になれば避雷器は破壊する。したがつて避雷器の選択は、接地事故あるいはその他の場合での系統の最大電圧で定めることが必要である。我国では非接地系統の場合 JEC で一線接地時の健全相の電圧上昇を公称電圧の 1.4 倍とし、特殊の系統を除き一般の回路に一率に 1.4E 避雷器が使用されることになつた。しかしアメリカ等では非接地系統に使用する避雷器の許容端子電圧は線間電圧の 105%、直接々地 ($R_0/X_1 < 1$, $X_0/X_2 < 3$) では 80% のものを使用するのが標準となつていようである⁽⁹⁾。目下我国でも 140 kV 以上の送電線の直接々地昇圧の問題が各所に実施されつつある状態にあるが、鉄塔その他機器絶縁などの条件から避雷器についても未だはつきりした基準がきまつていない現況である。

いま直接々地避雷器として、アメリカ、スエーデンなどのごとく、非接地の避雷器許容端子電圧の 80% 避雷器を考えれば、第5表(次頁参照)のごとくなり、直接々地避雷器許容端子電圧は一階級下の非接地避雷器の許容端子電圧とほぼ一致する。すなわちこの値は定格電圧の 97.5% に相当する。また直接接地系統での一線接地故障時の健全相の電圧上昇は一般に下記のごとく表わされる。

$$\frac{V}{\sqrt{3}} \times A \times B \dots \dots \dots (1)$$

- 但し V: 線間電圧 (定格電圧)
- A: 一線接地時の健全相の高圧上昇率, 1.3 倍以下
- B: 発電機速度上昇, フェラントイ効果などによる係数

上式にアメリカ、新北幹および第5表の場合をあてはめて見ると次のごとくなる。

$$\text{アメリカ } \frac{V}{\sqrt{3}} \times 1.3 \times 1.10 = 0.840V \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{新北幹 } \frac{V}{\sqrt{3}} \times 1.3 \times 1.35 = 1.025V = 282kV (3)$$

$$\text{第5表 } \frac{V}{\sqrt{3}} \times 1.3 \times 1.28 = 0.975V \dots \dots \dots (4)$$

今後建設される直接々地系統では、ダンパー付き回転機の使用と、有効接地の条件が満足され、かつ系統の事故

第 5 表 直接々地避雷器として非接地避雷器の 80% 避雷器を使用したときの比較

Table 5. Comparison of Permissible Line to Ground Voltage of 80% Lightning Arrester (Solidly Grounded System) and Standard Lightning Arrester (Isolated Neutral System)

公称電圧 (kV)	定格電圧 (kV) eff	非 接 地		直 接 々 地	
		避雷器許容端子電圧 (a) (kV) eff	衝撃基準絶縁強度 (kV)	避雷器許容端子電圧 $a \times 80\%$ (kV) eff	衝撃基準絶縁強度 (kV)
140	161.0	$140 \times 1.4 = 196$	750	157	550
(170)	195.5	$170 \times 1.4 = 238$	900	191	750
200	230.0	$200 \times 1.4 = 280$	1,050	224	900
250	287.5	$250 \times 1.4 = 350$	1,300	280	1,050

に対しては迅速な両端同時遮断の継電方式が採用されるものと思われる。そうすれば避雷器が直接々地系統に使用される場合、商用周波の電圧の最大となるのは、一線接地故障で負荷遮断した場合、受電側で避雷器が遮断器より山側にある場合と考えられる。このような場合の B に相当する係数としては変圧器、発電機の内部リアクタンスによる電圧上昇を 10%、送受電側遮断器の時間的遅れはほとんどないから、発電機の上昇を含めてフェランティ効果による上昇は 15%⁽¹⁰⁾ と考えれば十分であると思われる。そうすると B の値は 126.5% となるが、これを (4) 式のごとく 128% に取ればさらに安全側にあることになる。すなわち 80% 避雷器の採用は我国の直接々地系統に対してほとんど使用上にも無理がなく、かつ現在の標準避雷器 (1.4E) をそのまま使用できることになるから経済的利益も大きい。

また電圧の高い超高压系統(直接々地)では開閉サージは線間電圧の上昇に伴い絶対値が非接地の場合に比べて大きくなり、絶縁上にも極めて重要な問題となつている。しかし我国においては避雷器の開閉サージに対する動作状態についてはいまだ資料も少く、実際にどの程度の責務となるか詳細は不明であるが、開閉サージの大きさは一般に遮断器の改良に伴い、直接々地では常規大地電圧の 3 倍以下といわれておる。ドライバルブ避雷器の交流放電開始電圧は $2.5 \sim 3E$ に調整されているから、3 倍の開閉サージではまず動作しない筈であるが、万一この 3 倍の開閉サージで避雷器が動作した場合を考える。たとえば 287.5kV 送電線(直接々地)、亘長 230km に公称 200kV ドライバルブ避雷器 (80% 避雷器) が使用さ

れていると、このとき線路に充電されたエネルギーは、一線の大地容量を $0.0085 \mu\text{F}/\text{km}$ とすれば約 465kj となる。また引続き流れる続流半波のエネルギーは波高値を 300A とすると、許容端子電圧 280kV で約 300kj となり、全体で約 765kj となる。一方ドライバルブ避雷器の抵抗要素は 500A (2ms) 30s 間隔、10回以上に耐えており、熱容量は計算上 5,000kj 以上となるからなお相当の余裕がある。一般に開閉サージは波尾が長く、5~6ms におよぶものもあるといわれているから、エネルギーの一部は当然変圧器を通して大地に放電され、特に直接々地の場合には接地抵抗が小さいために、避雷器に対する責務はさらに軽減される筈である。これらのことから定格 195kV 以上の直接々地系統における 80% ドライバルブ避雷器の使用は、完全にその保護目的を達するものと思われる。

[VI] 結 言

以上最近のドライバルブ避雷器についてその概略を述べた。避雷器の放電特性、制限電圧、放電耐量などの改善によつて、避雷器の保護範囲は拡大し、雷進行波ばかりではなく近接雷撃あるいは開閉サージなどに対しても、ある程度系統機器の絶縁防護が期待できることを示した。今後これら避雷器の適切な運用によつて、送電系統の雷撃、その他による故障の発生は著しく低減して行くものと信じている。

参 考 文 献

- (1) 電気協同研究: 62 (昭 25-4)
- (2) 落, 杉山: 日立評論 34 444 (昭 27)
- (3) A.S.A. No. 28 p. 13 (May, 1944)
- (4) C.F. Wagner, G.D. McCaun and E. Beck: T.A.E.E. 60 p. 1227 (1941)
- (5) Harold A. Peterson: Transients in Power System, p. 181 (19)
- (6) Howard, Carpenter and Schwartz: Surge Testing of Lightning Arrester, A.I.E.E. Vol. 70 p. 1488 (1951)
- (7) 避雷器専門委員会資料 (昭 29-3)
- (8) 10kV 避雷器特殊動作責務試験結果速報 (昭29-3)
- (9) Electrical Transmission and Distribution Reference Book, p. 363 (1944)
- (10) 電気協同研究: Vol. 10 No. 2 p. 8 (昭 29-4)