

充電電流遮断時に於ける再点弧防止の研究

牧 元* 森田 誠一**

The Research on the Non-Restrike “Contrarc” Circuit Breakers

By Hajime Maki and Seichi Morita
Hitachi Laboratory and Taga Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

We studied on the device which protects the “Contrarc” circuit breaker from restrike ring to get the breaking characteristics with less than one restrike when it interrupted the charging current of the transmission lines.

The 161 kV “Contrarc” circuit breaker with this device was tested on the 154 kV Inawashiro line and on the 154 kV Kiso-Kansai lines of Japan Electric Power Generation and Transmission Co., Ltd.

The 69 kV “Contrarc” circuit breaker was also tested with this device on the 60 kV Musashisakai~Oi cable transmission line of National Railway of Japan.

The results were as follows:

1. When the 161 kV “Contrarc” circuit breaker interrupted 140~160 kV, 50~60A, numbers of restrike were 1~3 and surge voltage crests were 1~2.7 times of normal phase voltage crests. When it interrupted 160 kV, 200 A, number of restrike was 0~1 and surge voltage crests were 1~2.2 times of normal phase voltage crests.
2. The 69 kV “Contrarc” circuit breaker interrupted 68 kV, 78 A with neither restrike nor abnormal voltage.
3. The Construction of this device is very simple and it may easily be fitted on the arc suppressing chamber.

[I] 緒 言

無負荷送電線及び進相用蓄電器回路の遮断時には再点弧現象を伴い、回路に異常電圧を発生し故障の原因となる恐れがある。高圧送電線並びにケーブル回路に使用される遮断器には無再点弧、或は最小限度として再点弧回数1回以下であることが要望されている。一方是等の遮断器は短絡電流をも安全に遮断するよう要求される。充電電流の遮断現象は短絡電流の遮断現象とは大いに異なる所があるため必ずしも短絡電流の消弧装置を以つて無再点弧又再点弧1回以下の遮断性能を得ることは出来な

い。特に自力強制消弧型の遮断器では充電電流遮断用の装置を短絡電流遮断装置に附加することが必要となるが、附加した装置は構造簡単で、しかも短絡電流遮断特性を助長することが望ましい。進相用蓄電器回路開閉器は進相電流の遮断のみ要求されるものであるから無再点弧にすることは割に簡単である。然し他に短絡電流遮断用の遮断器が必要となるので、同一遮断器を以つて進相電流と短絡電流の遮断を行うことを要望されている。充電電流の遮断の研究は工場に於いて行うのみならず実際の送電線で行わねばならない。幸にして送配電異常電圧専門委員会並びに日本発送電電力技術研究所の御協力と御援助を得て 154 kV の送電線に於いて多数回の遮断試験を行い、充電電流遮断現象の究明並びに無再点弧を目標と

* 日立製作所日立研究所

** 日立製作所多賀工場

する消弧装置の試験研究を行うことが出来たことは洵に感謝に堪えない所である。研究成果としては 161 kV 制弧遮断器に就いては簡単な装置を附加して試験した結果再点弧回数 1 回の成績に近い結果を得、再点弧 1 回以下の性能にする基礎資料を得た。69 kV 制弧遮断器に就いては昭和 26 年 5 月国鉄武蔵境変電区にて武蔵境、大井町間の 60 kV ケーブル回路の充電電流遮断試験に於いて 161 kV 制弧遮断器と同様の装置を附加して無再点弧の成績を得た。又進相用蓄電器回路用としては昭和 25 年 12 月 69 kV 制弧遮断器（再点弧防止装置付）を四国配電株式会社応神変電所に納入し、会社主催の試験に好成績を得ている。以上の研究結果を茲に報告する次第である。

〔II〕 研究 経 過

高压送電線に於ける充電電流の遮断に関する研究は昭和 18 年より開始され先ず 50,000 kVA 発電機を主体とする遮断実験設備で蓄電器を利用して基礎研究を行い、昭和 19 年 4 月には電気協同研究会の超高压専門委員会異常電圧分科会主催で、九州東幹線の充電電流遮断試験を日本発送電株式会社上津役変電所で 161 kV 制弧遮断器⁽¹⁾を以て行つた。

戦後 23 年 6 月日本発送電株式会社電力技術研究所の御協力を得て、猪苗代旧幹線を使用し京北変電所にて 161 kV 制弧遮断器及び 161 kV 高速度再投入型制弧遮断器を使用し充電電流遮断試験⁽²⁾を行つた。上記試験の結果より 161 kV 制弧遮断器の遮断性能と遮断現象を明らかにした。161 kV 高速度再投入型制弧遮断器は、再遮断の際の遮断特性を良好にするため、再投入の際制弧室内に強制送油が行われる方式になっている。制弧室内に送油が行われる状態で充電電流を遮断した場合、如何に遮断性能の向上があるかを調べた。この結果油流の効果により殆んど無再点弧で遮断し得ることと、制弧室内の絶縁耐力の回復状態等を知ることが出来た。本試験結果を基礎とし制弧室に構造が簡単で短絡電流の遮断性能には悪影響のない充電電流遮断装置を附加したものを試験し、昭和 24 年 6 月電力技術研究所の御協力により猪苗代旧幹線に於いて試験を行つた。結果は普通型制弧室より遮断性能の向上を認められたが再点弧回数 1 回以下の条件に対して不満足であつた。第二次試作品は更に性能の向上を目指して改造を図り、電力技術研究所並びに日本発送電株式会社東海支店の御協力を得て、大山変電所に於いて木曾関西幹線の充電電流遮断試験を行つた。この結果は第一次試験品に比し特性向上が認められ、160 kV, 200 A の遮断に於いては再点弧回数 1 回以下の成績を得た。しかし数十 A の遮断に於いては稀に再点弧回

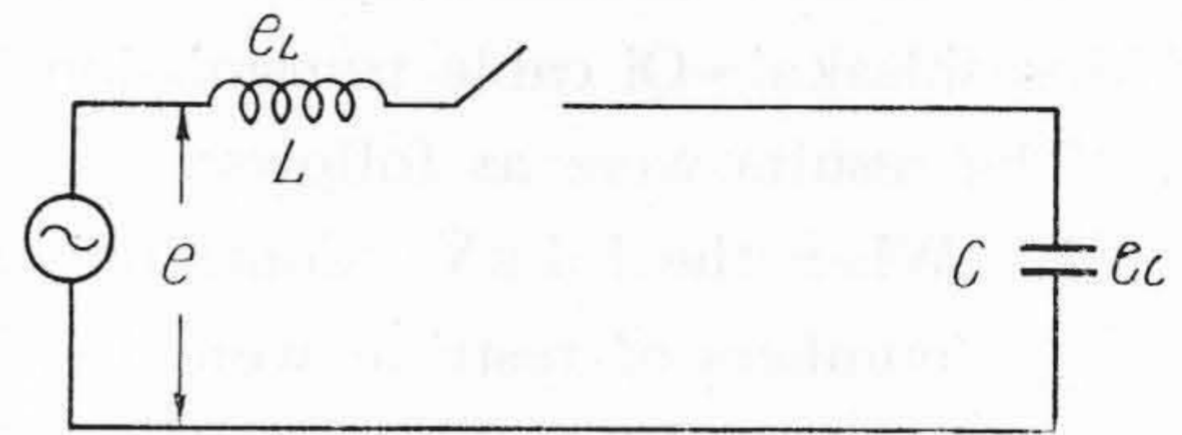
数 3 回に及ぶものもあり、尙改造を要することを知つた。昭和 26 年 5 月国鉄 60 kV ケーブル試験関係研究委員会主催で国鉄武蔵境変電所にて武蔵境、大井町間の 60 kV ケーブル回路に於いて、69 kV 制弧遮断器の充電電流遮断試験が行われ、第三次試作品の性能を試験する機会が与えられた。本試験の結果は無再点弧に遮断し異常電圧は発生しないことが明らかとなつた。

従来の進相用蓄電器回路開閉器は早切型を使用し、その遮断速度を適当に選ぶことにより無再点弧遮断を行つて来た。昭和 25 年 12 月四国配電株式会社応神変電所に再点弧防止装置付制弧室遮断器を納入し、会社主催の試験に於いて好成績を得た。

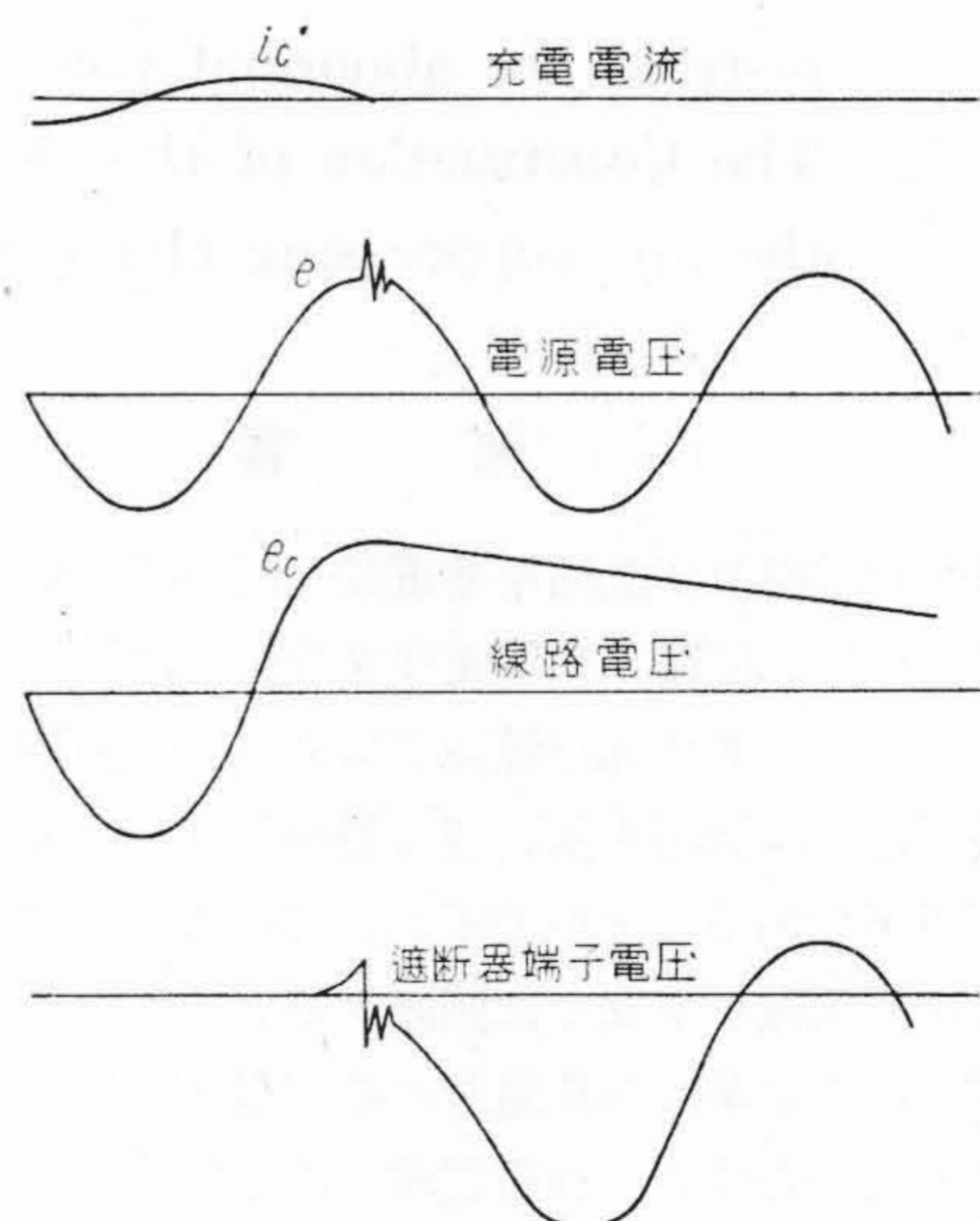
〔III〕 充電電流の遮断に就いて

充電電流の遮断は無再点弧遮断と再点弧遮断の二つを考慮することが必要である。

(1) 無再点弧遮断 簡単に考察するために第 1 図の如き等価回路に就て考えると次の如くである。 L は電源の発電機、変圧器等のインダクタンス、 C は送電線の対地容量である。第 2 図は電流、電圧の関係を示す。充電



第 1 図 充電電流遮断等価回路
Fig. 1. Equivalent Circuit for Charging Current Interruption



第 2 図 無再点弧の充電電流遮断現象
Fig. 2. No Restrike Interrupting Phenomena of Charging Current

電流は電源電圧に対して90°進んでいるから充電電流の零値では電源電圧は最大値である。遮断器の接触子が開離して遮断動作が始まると、接触子間には電弧が発生し電流零値に於いて電弧は消滅する。この時電源電圧、線路電圧、遮断器端子電圧には次の変化が起る。

充電電流通流中は電圧は次の如く平衡している。

$$e = e_L + e_c \dots\dots\dots (1)$$

e : 電源電圧 e_L : リアクタンス降下電圧

e_c : 線路容量降下電圧

従つて線路電圧は電源電圧よりリアクタンス降下電圧だけ高くなつて居るが、充電電流が遮断されると遮断器の電源側端子は電源電圧に復帰する。従つて電流零値に於いては $2e_L$ を振幅とし電源側の固有周波数に従う過渡現象を生じ減衰して電源電圧になる。線路電圧は e_c の波高値にて充電されて残留されている。遮断器の端子間電圧は電源電圧と線路電圧の差であるから、充電電流遮断直後はリアクタンス降下電圧による再起電圧と、電源電圧と残留電圧の差による回復電圧である。リアクタンス降下電圧による再起電圧は充電電流の続流を決定するもので遮断器の電弧空間がこの電圧によつて再び絶縁破壊すれば充電電流は続く。この場合のリアクタンス降下電圧は短絡電流遮断時の再起電圧に比して極めて小さいために充電電流は一旦は容易に消滅する。この再起電圧に引続いて現われる回復電圧は次の如くである。

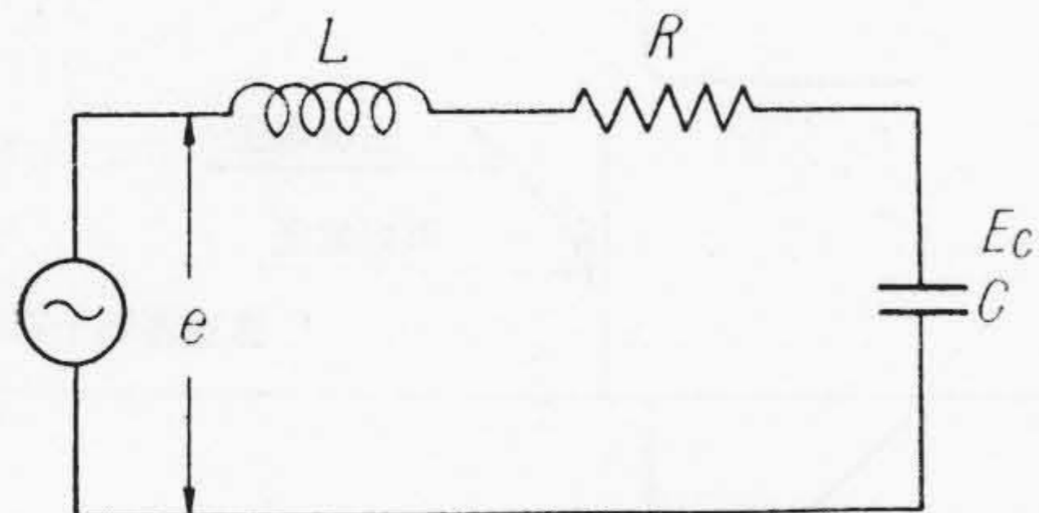
$$\text{回復電圧} = E_c - E_m \cos \omega t \dots\dots\dots (2)$$

E_c : 線路残留電圧 $E_c \doteq E_m$

E : 電源電圧

この回復電圧は半周波後には略々 $2E$ となるため短絡電流の回復電圧に比して苛酷である。遮断器端子間がこの回復電圧によつて破壊されると所謂再点弧現象を生ずる。無再点弧なるために回復電圧を凌駕する絶縁回復力を遮断器が持つことが必要である。

(ii) 再点弧 遮断器が充電電流を遮断した後回復電圧によつて端子間の絶縁が破壊し所謂再点弧を生ずると電圧電流の現象は(1)の場合に比して複雑になる。等価回路を第3図の如く考えると再点弧電流⁽³⁾は次の如く



第3図 再点弧時の等価回路
Fig. 3. Equivalent Restriked Circuit for Charging Current Interruption

なる。

$e = E_m \sin (\omega t + \theta)$: 電源電圧

$V = E_c$: 線路残留電圧

i : 再点弧電流

$$i = \frac{E_m}{Z} \sin (\omega t + \theta - \phi)$$

$$+ \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{\sqrt{\frac{L}{C} - \frac{R}{4}}} \frac{E_m}{Z} \sin (\theta - \phi) e^{-\alpha t} \sin (\beta t - \phi)$$

$$- \frac{1}{\sqrt{\frac{L}{C} - \frac{R}{4}}} \left\{ E_c + \frac{E_m}{\omega C Z} \cos (\theta - \phi) \right\} e^{-\alpha t} \sin \beta t \dots\dots\dots (3)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \quad \alpha = \frac{R}{2L}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\beta}{a} \quad \beta = \sqrt{\frac{1}{CL} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

$R \doteq 0 \quad Z \doteq \frac{1}{\omega C}$ とし且充電電流遮断後電源電圧

の最大値で再点弧が起つたとすれば

$$i = -\omega C E_m \sin \omega t$$

$$- \frac{(E_c - E_m)}{\sqrt{\frac{L}{C}}} e^{-\frac{R}{2L} t} \sin \sqrt{\frac{1}{LC}} \cdot t \dots\dots (4)$$

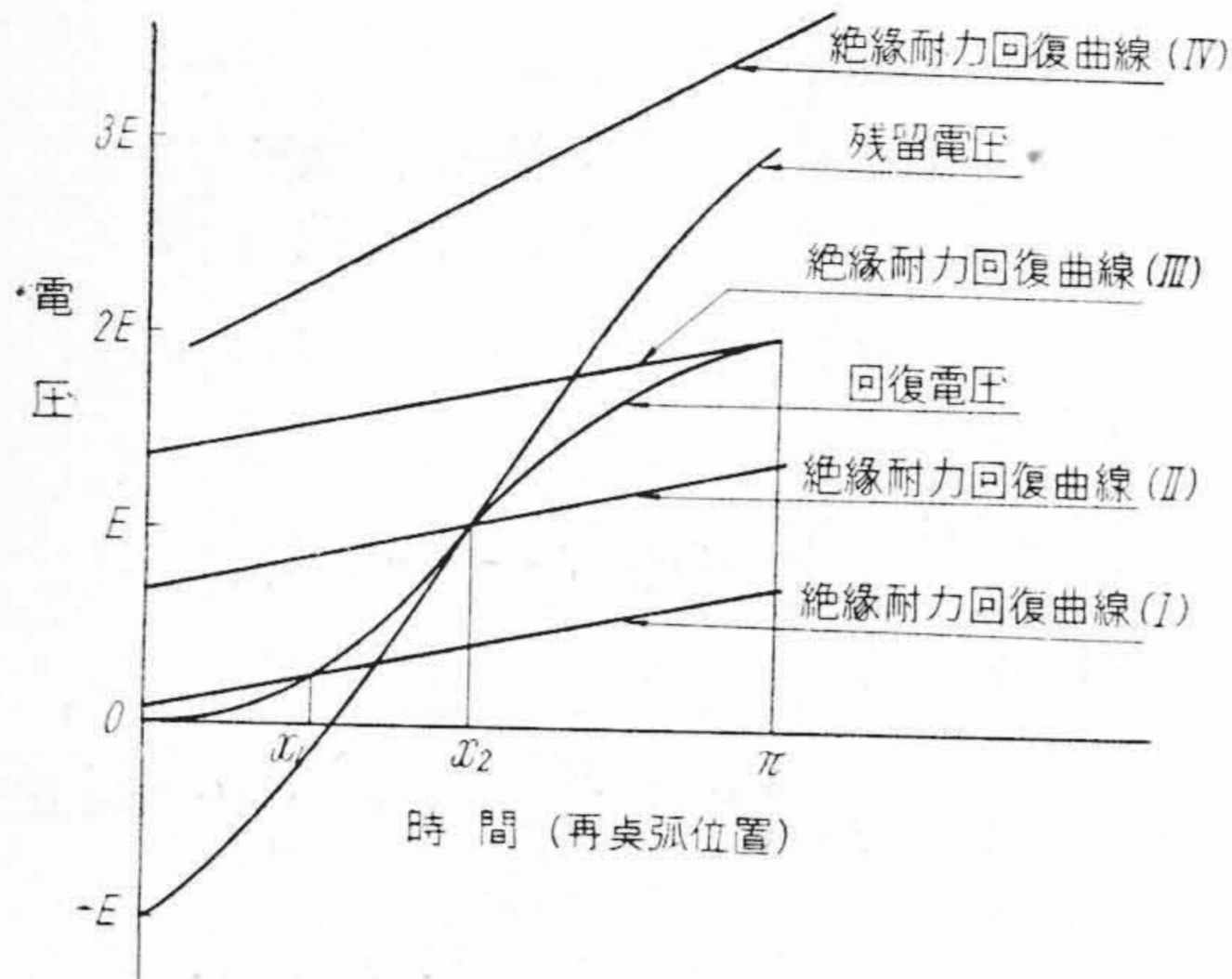
又この電流による線路充電電圧は

$$e_c = \frac{1}{C} \int i dt = E_m \cos \omega t + (E_c - E_m) e^{-\frac{R}{2L} t} \cos \sqrt{\frac{1}{LC}} \cdot t \dots\dots\dots (5)$$

即ち再点弧電流は定常電流と過渡電流の和である。従つて再点弧電流の周波数は電源の周波数より高いから電流零の回数が多くなり消滅の機会は増える。又線路充電電圧は定常充電電圧と過度充電電圧の和になる。従つて再点弧電流が消滅した時の再起電圧と回復電圧は定常充電電流遮断時とは異つて来ることは明らかである。

再点弧電流が半周波で消滅すれば線路残留電圧はほぼ $3 E_m$ となる (但し $r \doteq 0$) 従つて回復電圧は $[3 E_m - E_m \cos \omega t]$ となり定常充電電流遮断直後より苛酷な回復電圧となる。再点弧電流が1周波続いて遮断が起る場合は線路側残留電圧は E_m で回復電圧は $E_m - E_m \cos \omega t$ となり、無再点弧の回復電圧と同じになる。即ち再点弧電流の継続時間によつて回復電圧が異つて来る。

次に再点弧の発生位置は遮断器の絶縁耐力曲線と回復電圧回線によつて決るものである。第4図は遮断器の絶



第 4 図 線路残留電圧と絶縁耐力回復度
 Fig. 4. Line Residual Voltage and Recovery Rate of Insulation Strength of Circuit Breakers

縁回復度と再点弧後の線路の残留電圧の関係を示すものである。

絶縁耐力回復曲線は回復電圧の低い所 (x_1) で再点弧が起り残留電圧も $E/5$ にすぎない。 (π) は残留電圧が最も高く $3E$ である。 (IV) は絶縁耐力回復度が回復電圧を上廻るため無再点弧である。遮断器の絶縁耐力回復度によつて線路の残留電圧は $0 \sim 3E$ の間に大きく変化し、次の回復電圧に大きい変化が起ることになる。遮断器の絶縁耐力の回復度によつては遮断を困難にし大きい異常電圧を発生する機会がある。最悪の条件は半周波毎に回復電圧の最大値で絶縁破壊が生ずる場合である。

絶縁耐力	線路残留電圧	再点弧回数
$2E$	$3E$	第 1 回再点弧
4_2E	$5E$	第 2 回再点弧
.....
$2nE$	$(2n+1)E$	第 n 回再点弧

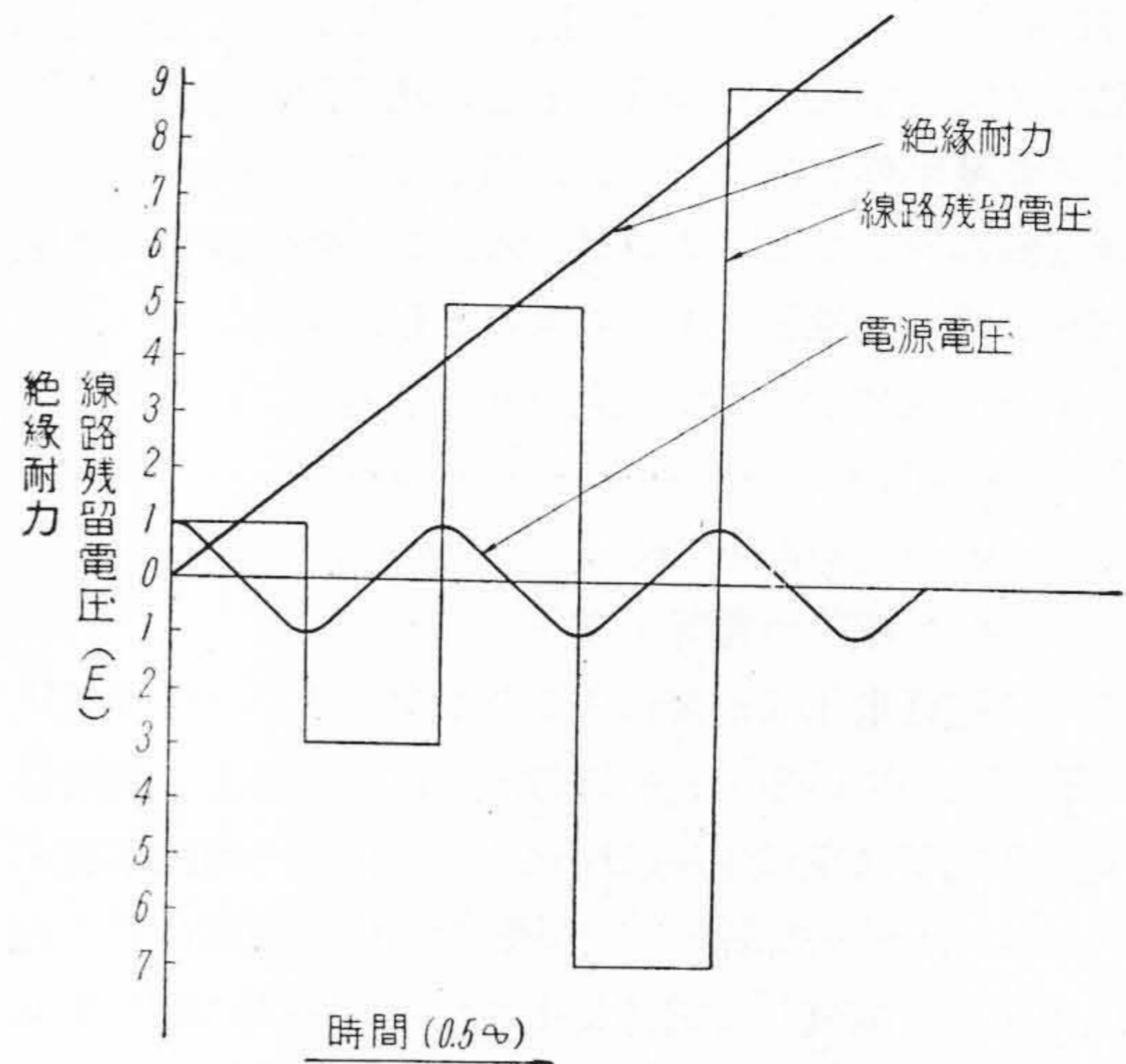
之を図示すると第 5 図の如くである。実際には $r \neq 0$ でなく過波充電電圧の減衰等の為この様に高い残留電圧は現実にはない。

再点弧電流遮断の場合の再起電圧は次の如くなる。再点弧が回復電圧の最大値で起つたとすると線路充電電圧は(5)式の如くなる。再点弧電流は半周波で消滅すると線路残留電圧は $3E$ となり電源電圧は瞬間線路充電電圧から電源電圧に復帰する。この時過渡電圧が発生する。

$$e_t = 2Ee^{-\frac{R_0}{2L}t} \sin \sqrt{\frac{1}{LC_0}} \cdot t \dots \dots (6)$$

$L : C_0, R_0$ は電源側の回路定数

$$f = \frac{5}{2\pi\sqrt{LC_0}} : \text{電源固有周波数}$$

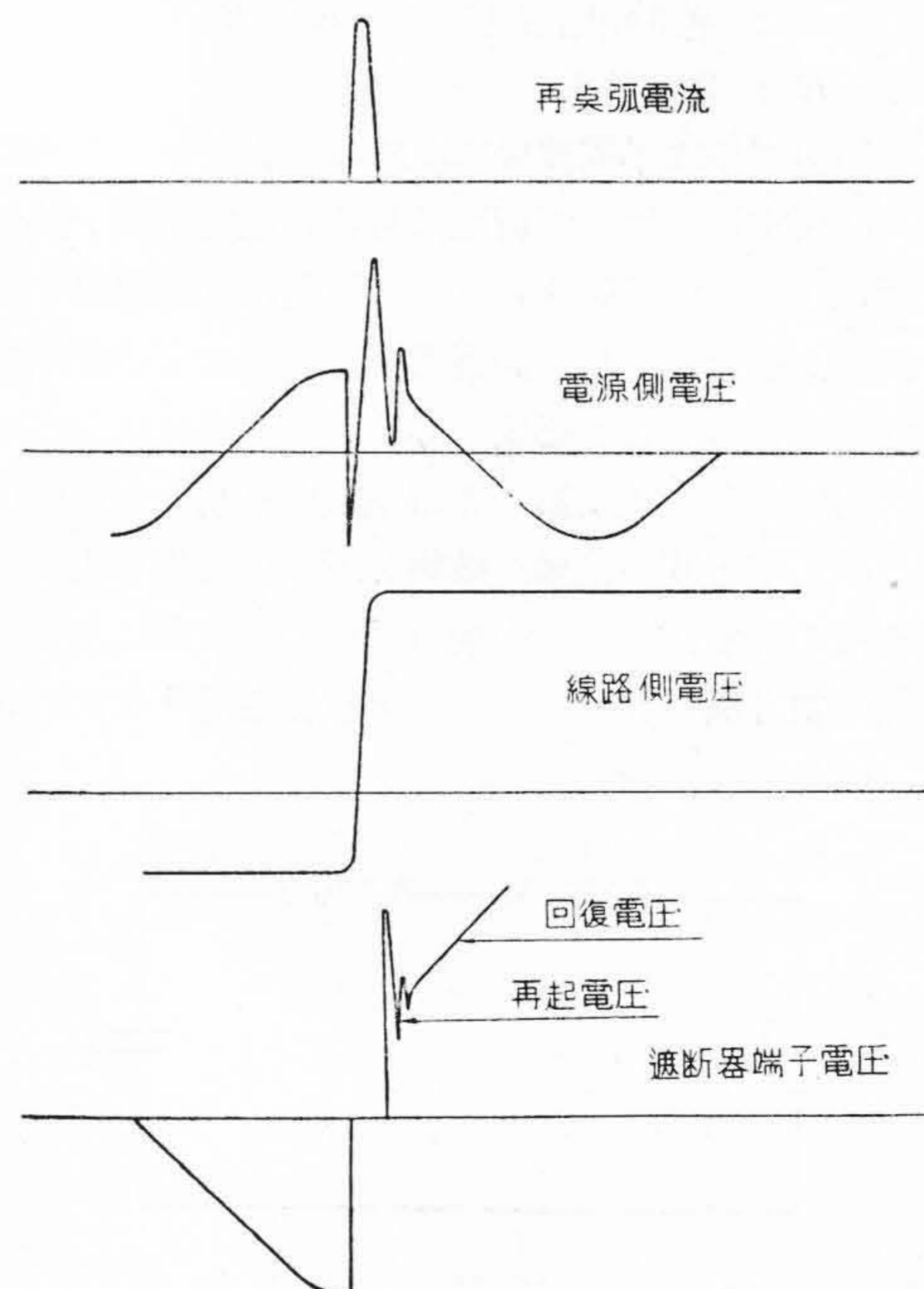


第 5 図 最悪条件における再点弧
 Fig. 5. Restrike at the Worst Conditions

f は数百~数千 \sim である。再点弧電流の再起電圧は定常電流の遮断の場合より苛酷になる。之を図示すると第 6 図の如くである。

遮断器絶縁耐力回復度によつて再起電圧の大きさの変化することは回復電圧の場合と同様である。

以上無再点弧の場合と再点弧の場合の遮断現象に就いて述べた。定常充電電流は再起電圧は小で遮断し易いが遮断器の絶縁耐力の回復度を増すと接触開離直後でも遮



第 6 図 再点弧時の電圧と電流との関係
 Fig. 6. Restriking Voltage and Current

断が行われる場合がある。従て無再点弧なるためには遮断速度を大にすることと強力な消弧方法とによつて絶縁耐力の回復速度を大きくすることが必要である。

再点弧遮断の場合、遮断器の絶縁回復特性によつて線路残留電圧が広範囲に変化するから、次の回復電圧及び再起電圧の大きさが大きく変化する。従つて短路電流の遮断の如く回復電圧及び再起電圧が一定でなく、再点弧電流の遮断のときは不齊になりがちである。再点弧の場合は過渡充電電圧が発生し異常電圧が発生する。又再点弧電流遮断の場合電源側には過渡充電電圧から電源電圧に復帰するとき過渡電圧が発生する。その大きさは遮断器の絶縁回復度によつて変化し、最悪の場合は再点弧が半周波毎に回復電圧の最高値で起る様な絶縁回復度を持つ場合である。

〔IV〕 試作再点弧防止装置の構造

無再点弧又は再点弧回数1回以下にて充電電流を遮断するためには、〔III〕に記述した如く遮断器は苛酷な回復電圧上昇度を凌駕する絶縁耐力の回復度を持たなければならない。遮断すべき充電電流は一般に小さく154kVの送電線で数A~数百Aの程度である。第1表は送電線の充電電流の1例を示すものである。

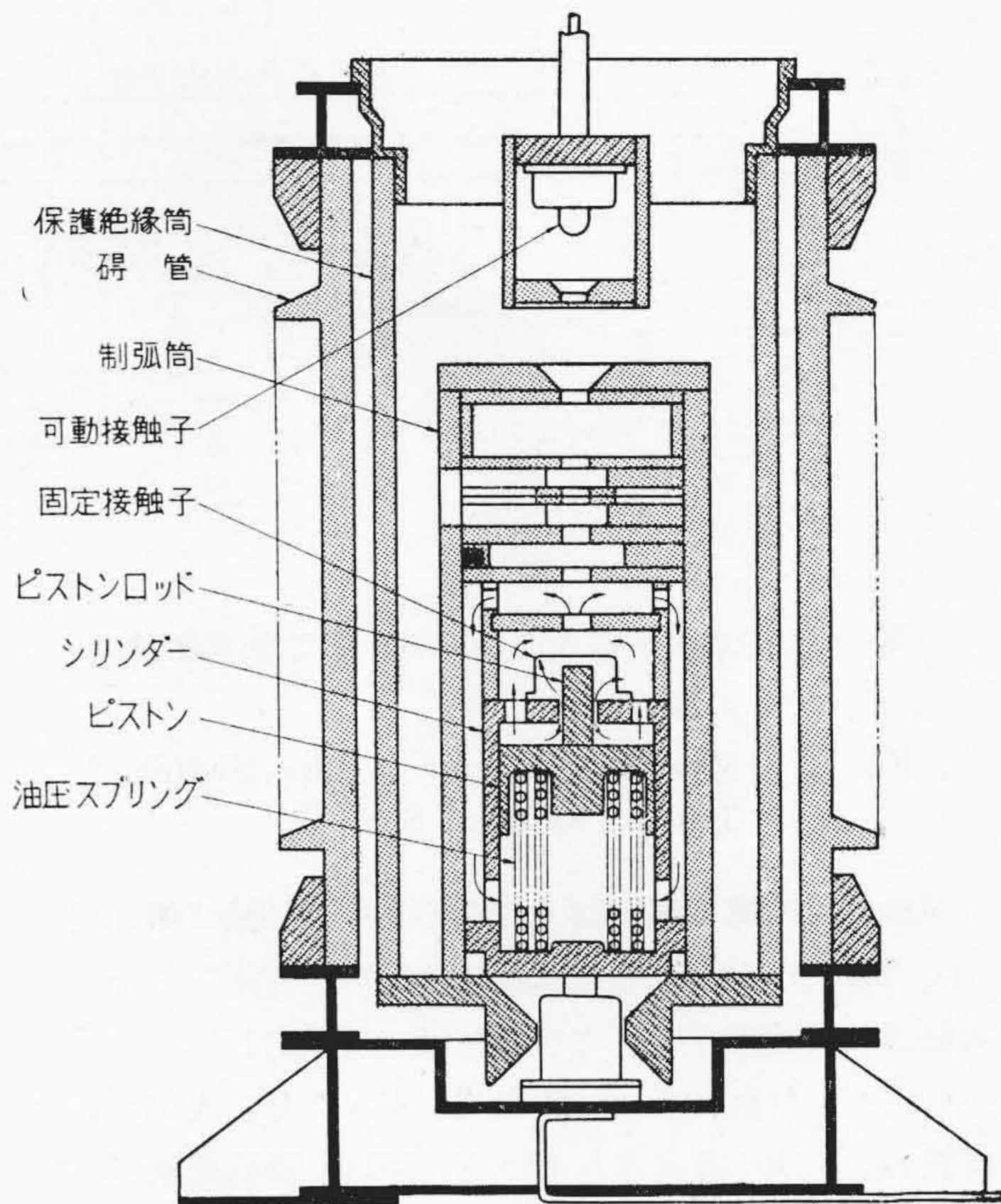
かかる小電流を遮断する時は、電弧勢力は小さく瓦斯の発生量も僅であるから、電弧勢力を利用する自力強制消弧方式は再点弧回数1回以下を果すことはむずかしい。

第1表 無負荷送電線の充電電流の例

Table 1. Some Exampel of Line Charging Current

送電線	送電距離 km	電圧 kV	充電電流 A
猫苗代旧幹線京北一片岡間	113	154	25
京北一猪苗代間	226	154	50
木曾幹線 犬山一大井間	40	154	15
犬山一古川橋間	160	154	60
木曾、関西幹線 犬山一古川橋一八尾一犬山	340	154	200

かかる場合他力強制消弧方式が有利であり、しかも充電電流には短絡電流を遮断するに要する程度の強力な他力は必要でない。我々は自力強制消弧方式の制弧室に対して簡単な他力方式の装置を、自力の特性を損はぬよう配置して試験を行つた。その基礎資料は161kV制弧遮断器の数回に亘る充電電流遮断試験結果と、161kV高速度再投入遮断器による充電電流遮断試験結果により得られたもので、特に後者は再遮断の際制弧室に強制送油を行う構造を利用し充電電流を強制送油中で遮断したも



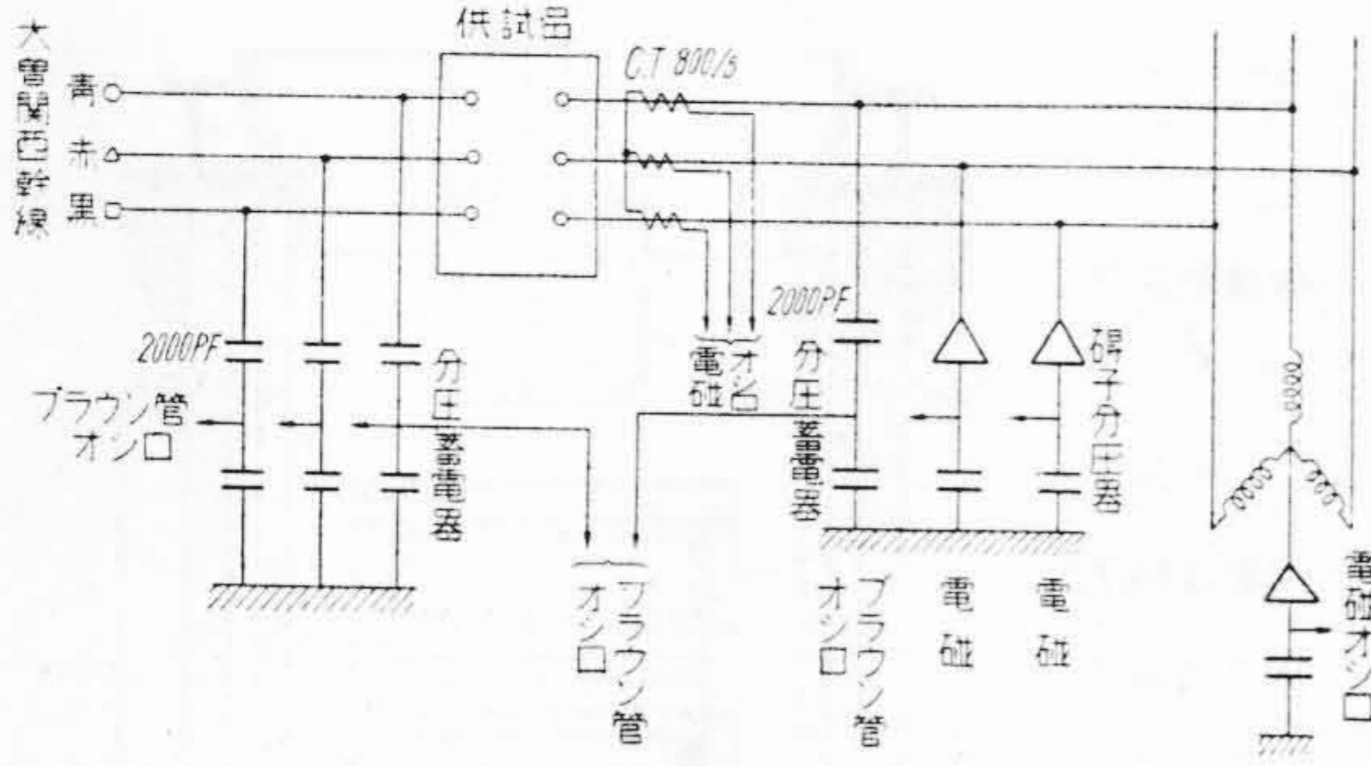
第7図 再点弧防止装置付制弧室
Fig. 7. "Contrarc" Chamber with Charging Current Interrupting Device

のである。この結果は制弧室内で充電電流を可動接触子が噴油口に達しない前に殆んど無再点弧で遮断している⁽²⁾。即ち可動接触子が噴油口に達しない間は送油があつても制弧室は殆んど密閉状態であるから接触子間隙に激しい油流が存在しない。このことは少量の油流を有効に使用することに充電電流の遮断が可能なることを示唆している。試験した制弧室の構造は第7図に示す如くである。短絡電流を遮断するための部分は普通のものと同様なる所はないが、固定接触子の下部に可動接触によつて押し下げられているピストンがあり、遮断と共にこのピストンがバネによつて電弧路と軸方向に油流を作動させる構造となつている。このピストンは制弧室の内部において油を還流させるのみであつて、圧力の均衡は保たれているから、大電流遮断時に悪影響を及ぼすことはない。

ピストンは可動接触子より若干遅れた速度で動き接触子が開離してから油流の有効時間は約1.5〜である。

〔V〕 試作再点弧防止装置付制弧室の試験

(1) 第一次試作品 昭和24年6月、日本発送電株式会社京北変電所に於いて同所に設置されている161kV制弧遮断器に取付け猪苗代旧幹線の充電電流遮断試験を行つた。



第 8 図 京北変電所における充電電流遮断試験の測定回路

Fig. 8. Measuring Circuit of Line Switching Test at Keihoku S. S.

試験条件は第 2 表の如くである。測定回路は第 8 図の如くで電流は C. T. 電圧は結合蓄電器を使用して分圧器増幅器にて電磁オシログラフを以つて測定した。

(2) 二次試作品 昭和 24 年 12 月、大山変電所に於いて同所に設置されている。161kV 制弧遮断器に取付け木曾関西幹線の充電電流遮断試験を行つた。第二次試作品は猪苗代幹線に於ける第一次試作品の結果より改

第 2 表 試 験 条 件

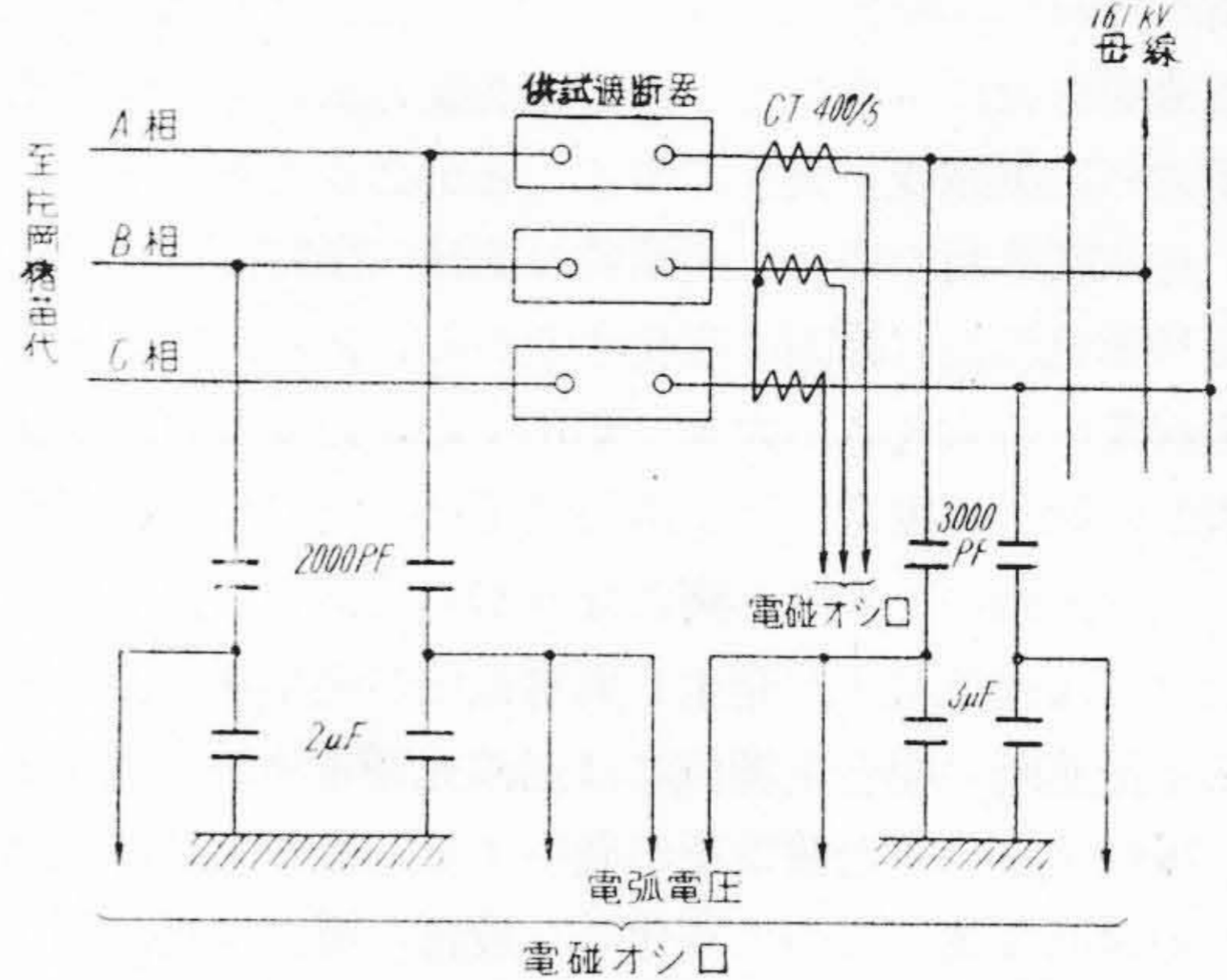
Table 2. Test Conditions

試験回路	試験回数	送電距離 (km)	試験電圧 (kV)	遮断電流 (A)	初開離速度 (m/sec)
京北一片岡	5	110	135	25	5
京北一猪苗代	5	120	135	50	5

造を加えたもので、改造要点はピストンを改造し有効油量を第一次試作品より約 60% 増加した。試験遮断器の都合にて初開離速度 4.5 m/sec 以上出し得なかつた。試験条件は第 3 表の如くである。

測定回路第 9 図 (a) 及び (b) に示す如くで電流の測定は C. T. を使用し、電圧の測定は結合蓄電器で分圧して電磁オシログラフ、ロングレコードブラウン管オシログラフで測定した。

160 kV 60 A 遮断の場合は 10 分間隔で 10 回連続遮断を行つて性能の変化を調べた。160 kV 200 A 遮断の場合は環状回路になつて送電端と多電端の電圧



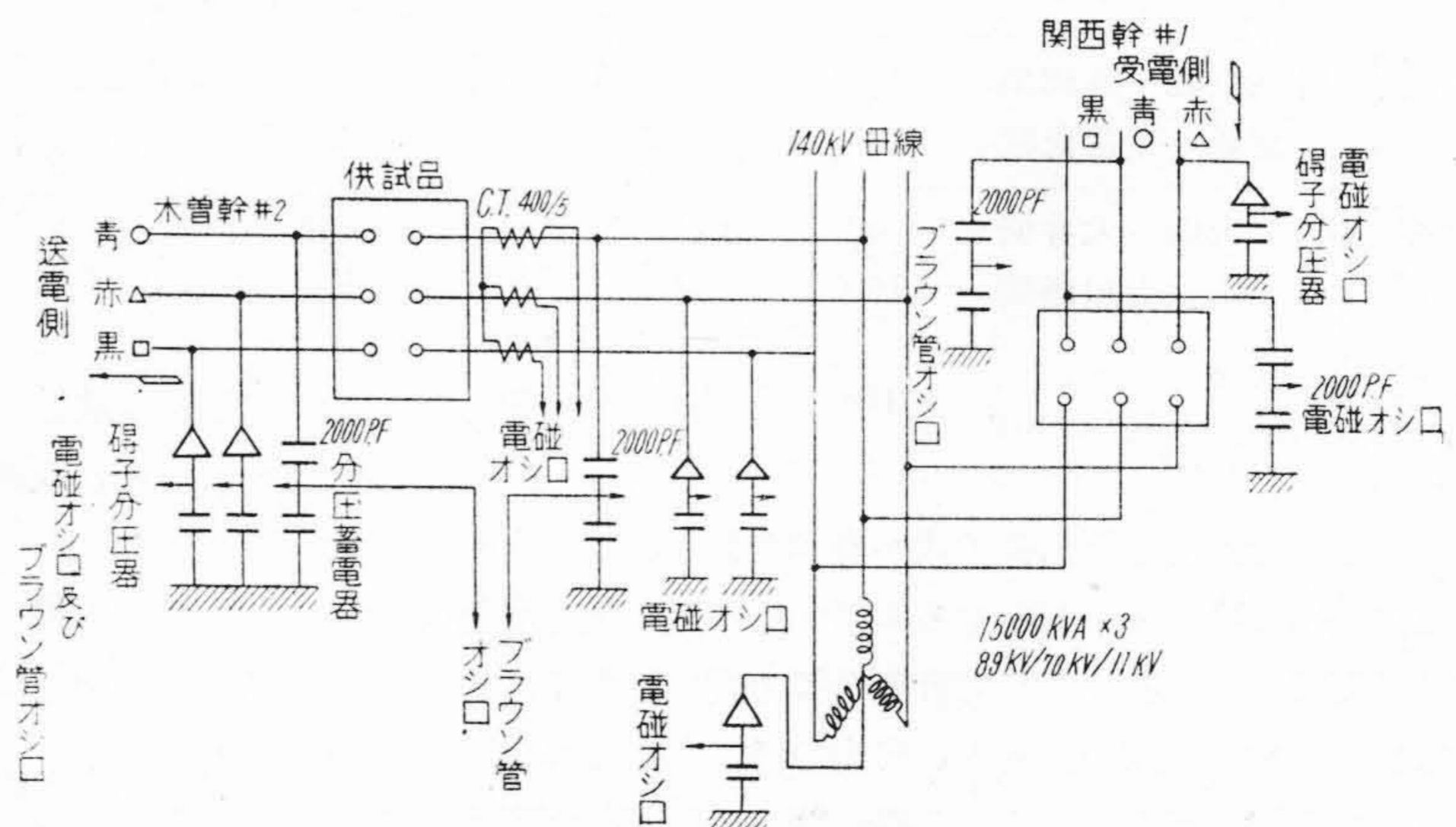
第 9 図 (a) 木曾幹線及び関西幹線の充電電流遮断試験の測定回路

Fig. 9. (a) Measuring Circuit of Line Switching Test of Kiso and Kansai Trunk Line

測定を行つた。

(3) 69 kV 進相用蓄電器回路遮断器 四国配電株式会社応神変電所に 66 kV 5,500 kVA 進相蓄電器が設置された。この回路には 69kV 制弧遮断器が使用され、制弧室には上記再点弧防止型が採用され短絡電流の保護と蓄電器電流の開閉とを一つの遮断器を以つて行うこととなつた。供試品の定格は次の如くである。

進相用蓄電器 型 SOF, 式 R, 容量 250A, 24 台
電圧 19kV 電流 13.2A 周波数 60 ~ 単相全容量 66kV 5,500kVA
遮断器 型 BOK, 式 PAB, 電圧 69kV, 電流 400A
遮断容量 1,500 MVA (69kV) 投入気圧 4.5 kg/cm²



第 9 図 (b) 木曾、関西幹線をループに接続した場合の充電電流試験測定回路

Fig. 9. (b) Measuring Circuit of Line Switching Test of Loop Connected Kiso-Kansai Trunk Line

本設備竣工後昭和 25 年 12 月、四国配電株式会社主催で蓄電器並びに遮断器の試験が行われた。本試験の詳細に就ては別論文に記載されている。

第 3 表 試験条件
Table 3. Test Conditions

試験回路	試験回数	送電距離 (km)	試験電圧 (kV)	遮断電流 (A)	初開離速度 (m/sec)
犬山—古川橋	10	157	160	60	4.5
犬山—古川橋 八尾—犬山	5	343	160	200	4.5

第 4 表 試験条件
Table 4. Test Conditions

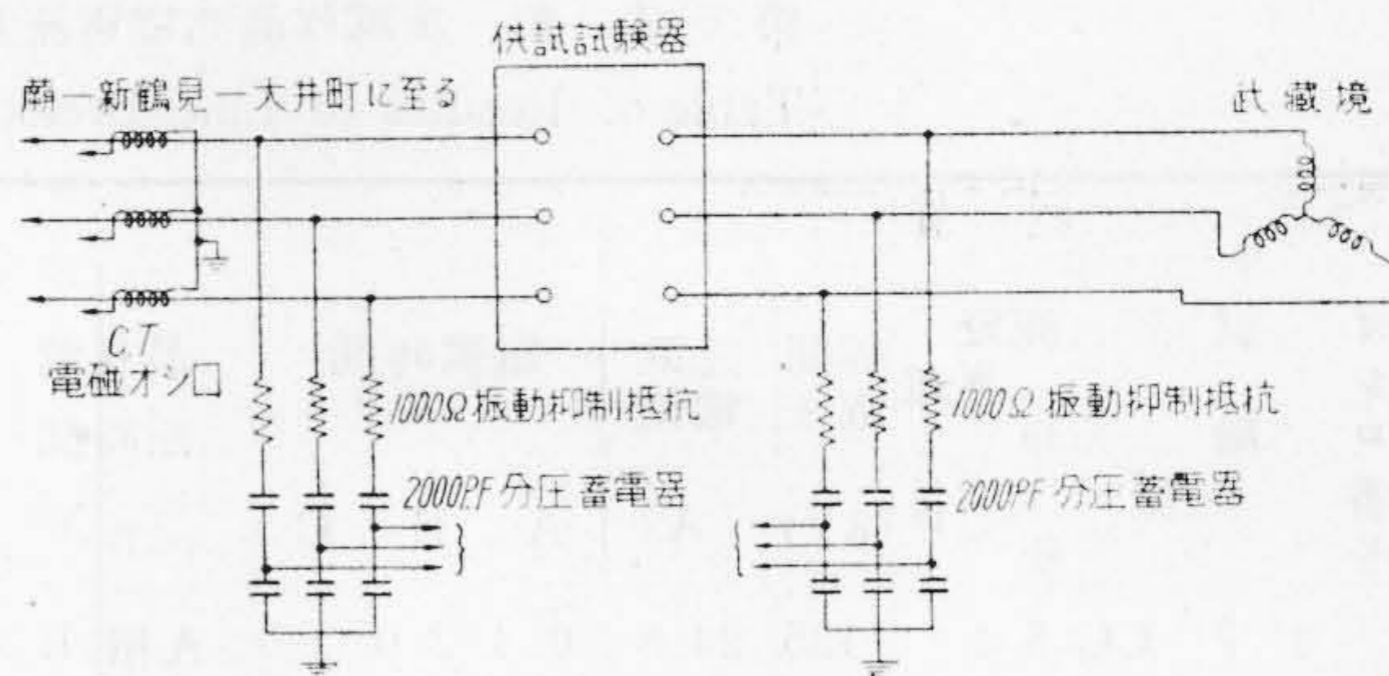
試験回数	試験種類	試験電圧 (kV)	遮断電流 (A)	初開離速度 (m/sec)	備考
5	投入	60	50		
4	遮断	60	50	5	直列リアクター短絡
4	遮断	60	50	5	

(4) 69kV ケーブル回路用遮断器 昭和 26 年 5 月 国有鉄道に於いては新鶴見、大井町間に敷設された 60 kV ケーブルに対し将来運転上の参考資料を得るため国鉄給電事務所、60 kV ケーブル試験関係研究委員会主催のもとに種々試験が行われた。遮断器の 60kV ケーブル充電電流の遮断試験もその試験の一項目として行われ、幸い武蔵境変電区の 69kV 制弧遮断器の試験に際し、再点弧防止装置付制弧室と同時に進行する機会を得た。本制弧室は上記四国配電株式会社応神変電所の試験結果に基づき更に改造を加えたものである。

試験遮断器は武蔵境変電区の炭方面一号線及び 2 号線用として設置されたもので、一号線遮断器は再点弧防止装置付制弧室を二号線は普通型の制弧室を取付け試験を行つた。試験条件は第 5 表の如くである。測定回路は第 10 図に示す。

第 5 表 試験条件
Table 5. Test Conditions

遮断器	試験回数	回路	試験電圧 (kV)	電流 (A)	初開離速度 (m/sec)
再点弧防止型	5	武蔵境—新鶴見—大井町	68	78	5
普通型	5	//	68	78	5

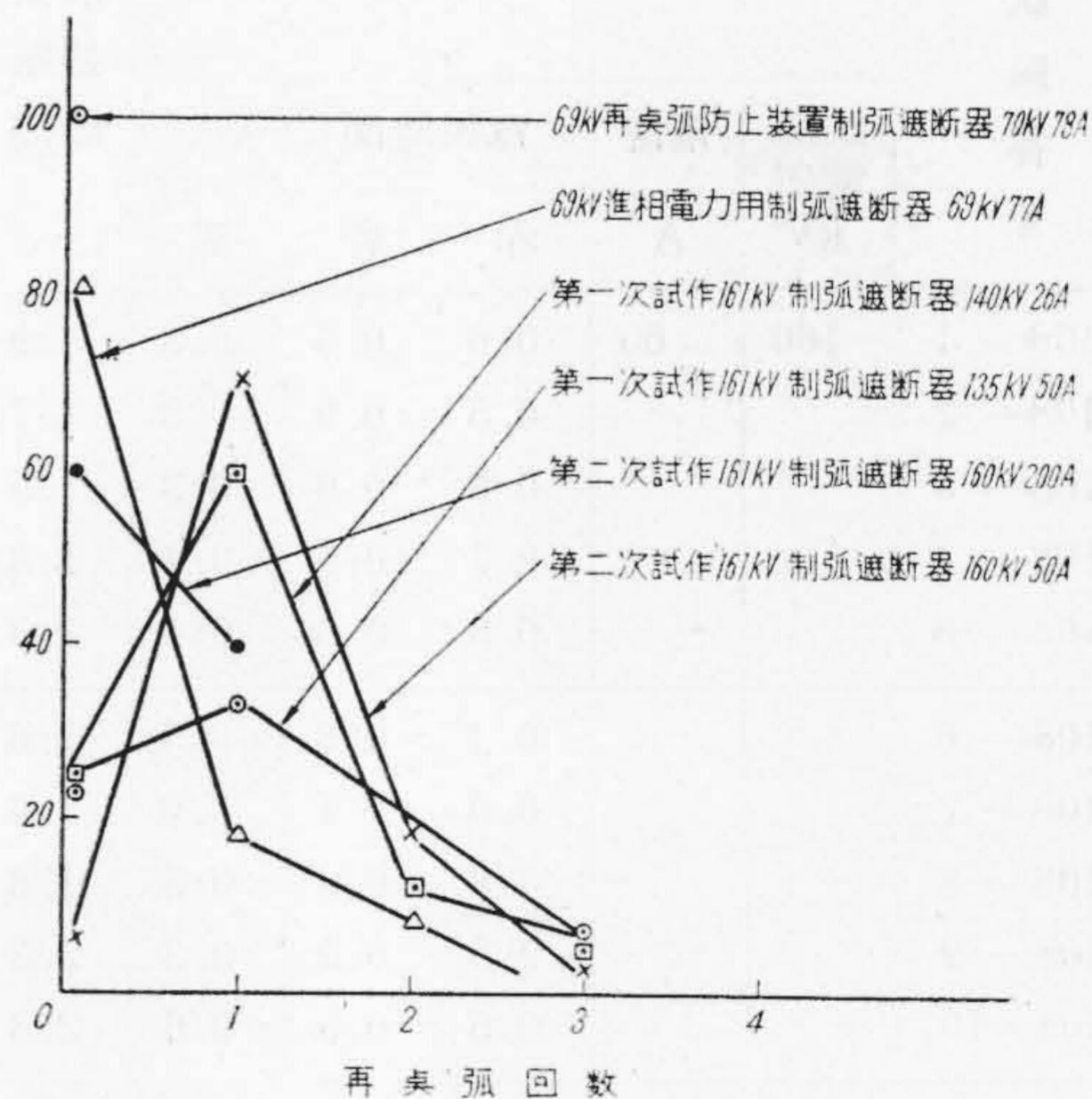


第 10 図 国鉄武蔵境 SS における 60kV ケーブル充電電流遮断試験の測定回路

Fig. 10. Measurement Circuit of Charging Current Interrupting Test at Musashisakai S. S. of J. N. R.

[VI] 試験結果

(i) 第一次試作制弧室 試験結果は第 6 表に示す通りである。再点弧回数 0~3 で異常電圧は 1~2.7 倍である。再点弧回数の分布は第 11 図に示す如く 1 回が大部分で 2 回~3 回は僅である。再点弧回数の 2~3 回は、



第 11 図 再点弧防止装置付制弧遮断器の再点弧回数の頻度

Fig. 11. Frequency of No. of Restrikes of Improved "Contrarc" Circuit Breakers

A 相に多いので試験後解体調査の結果 A 相制弧室の構造悪く油洩れのあることが判つた。試験結果を種々検討の結果再点弧回数を 1 回以下におさめるためには構造を多少改造する必要のあることが分つた。

(ii) 第二次試作制弧室 試験結果は第 7 表に示す如くである。160 kV, 59 A の遮断に於いて再点弧 1~3 回異常電圧 1.0~2.1 倍である。再点弧回数の分布は第 12

第 6 表 第一次試作品充電電流遮断試験結果

Table 6. Results of Line Breaking Tests by the First Experimental Chamber

オシロ 番号	試 験 記 号	測 定 事 項 単 位	区 分										異 常 電 圧					
			線間 電圧 (kV)	充電 電流 (A)	電弧時間 (\sim)			最長遮 断時間 (\sim)	再点弧電流 定常電流			再 点 弧 回 数			定常直に対する倍数			
					A	B	C		A	B	C	A	B	C	V _{AT}	V _{CT}	V _{AL}	V _{BL}
1	CC-5-1	135	24.8	0.3	2.0	2.0	A相 1.3	6.0	2.0	2.0	2	0	0	1.3	1.2	2.5	1.3	
2	CC-5-2	138	24.8	0.1	5.0	4.3	C// 1.5	6.0	5.0	4.3	2	1	1	1.5	1.4	2.7	1.3	
3	CC-5-3	141	25.6	0.4	3.6	1.5	A// 1.5	6.0	3.6	1.5	2	1	1	1.4	1.2	2.5	1.6	
4	CC-5-4	141	26.5	0.2	5.5	—	A// 2.0	5.5	5.5	—	3	1	0	1.3	1.7	2.0	1.5	
5	CC-5-5	142	26.4	0.1	2.8	—	B// 0.7	2.2	2.8	—	0	0	0	1.1	1.0	1.1	1.0	
6	CC-6-1	134	49.6	0.3	6.5	6.6	B// 1.6	3.0	6.5	6.6	1	2	0	1.0	1.2	1.5	1.5	
7	CC-6-2	134	50.4	0.4	—	3.2	A// 1.2	6.0	—	3.2	2	0	1	1.0	1.2	1.2	1.2	
8	CC-6-3	135	50.4	0.3	3.5	3.0	B// 1.0	3.5	3.5	3.0	1	1	1	1.0	1.0	1.4	1.4	
9	CC-6-4	136	51.2	0.4	—	3.8	B// 0.8	3.7	—	3.8	1	0	1	1.0	1.0	1.5	1.5	
10	CC-6-5	136		0.3	2.9	3.5	A// 1.8	5.2	2.9	3.5	3	1	1	1.0	1.2	1.3	1.3	

第 7 表 第二次試作品充電電流試験結果

Table 7. Results of Line Breaking Tests by the Second Experimental Chamber

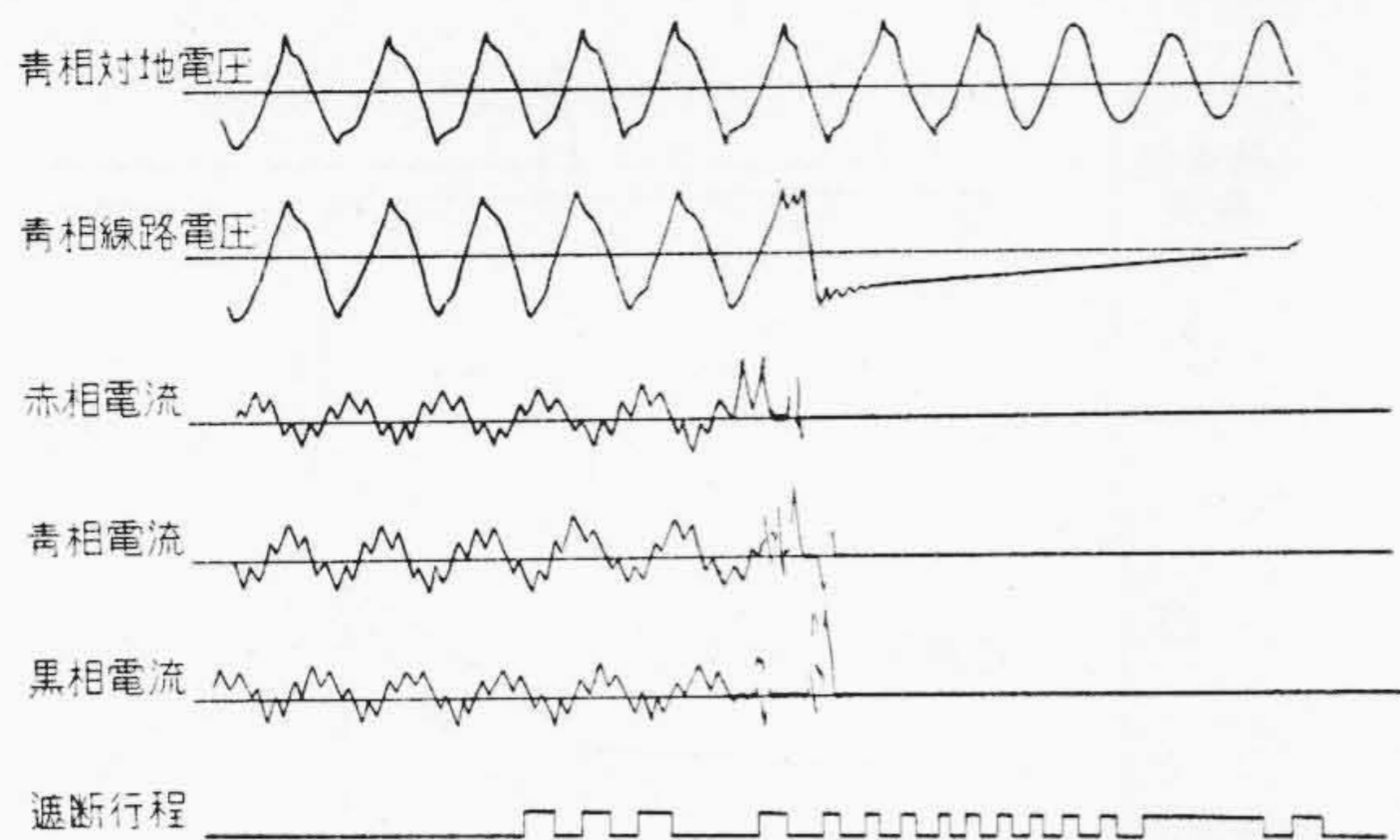
試 験 番 号	試 験 電 圧 kV	電 流 A	電弧時間 (\sim)			最長 遮断 時間 (\sim)	再点弧電流 定常電流			再 点 弧 回 数			異 常 電 圧		
			赤	青	黒		赤	青	黒	赤	青	黒	赤	青	黒
108—1	160	60	0.6	0.5	0.3	1.9	3.0	1.5	4.8	1	1	1	1.0	1.6	1.8
108—2			0.5	0.9	0.3	1.7	3.7	2.5	4.5	1	2	1	1.0	1.1	1.7
108—3			0.6	0.9	0.3	1.9	3.5	2.0	4.5	2	1	1	—	1.7	1.8
108—4			0.7	0.5	0.4	1.3	2.1	3.5	2.8	1	0	1	—	1.2	—
108—5			0.8	0.6	0.4	1.3	2.5	2.0	2.0	1	0	1	—	1.4	—
108—6			0.4	0.8	0.5	1.6	2.0	3.0	3.0	2	2	1	—	1.3	—
108—7			0.5	1.1	0.6	1.6	2.5	2.0	3.0	1	1	1	—	1.3	—
108—8			0.8	0.6	0.5	1.8	4.5	1.5	4.0	1	1	1	—	1.2	—
108—9			0.5	0.9	0.3	2.3	1.6	1.6	4.0	1	2	2	—	1.3	—
108—10			0.5	0.9	0.6	2.3	3.0	2.8	2.0	1	3	1	—	2.1	—
109—1	160	200	—	2.2	—	2.2	—	1.9	—	—	1	0	—	2.0	—
109—2			—	1.4	—	1.4	—	2.9	—	—	0	0	—	1.8	—
109—3			—	1.8	—	2.6	—	2.0	—	—	1	1	—	—	—
109—4			—	1.8	—	3.0	—	2.8	—	—	0	1	—	2.2	—
109—5			—	1.8	—	1.8	—	2.0	—	—	0	0	—	1.4	—

回の如くで大部分 1 回以下である。10 回連続試験の結果は劣化的傾向は認められぬ。160kV 200A の遮断は再点弧、0—1 回異常電圧 1.4~2.2 倍で所期の目的を達している。第 12 図 ab はオシログラムの 1 例である。

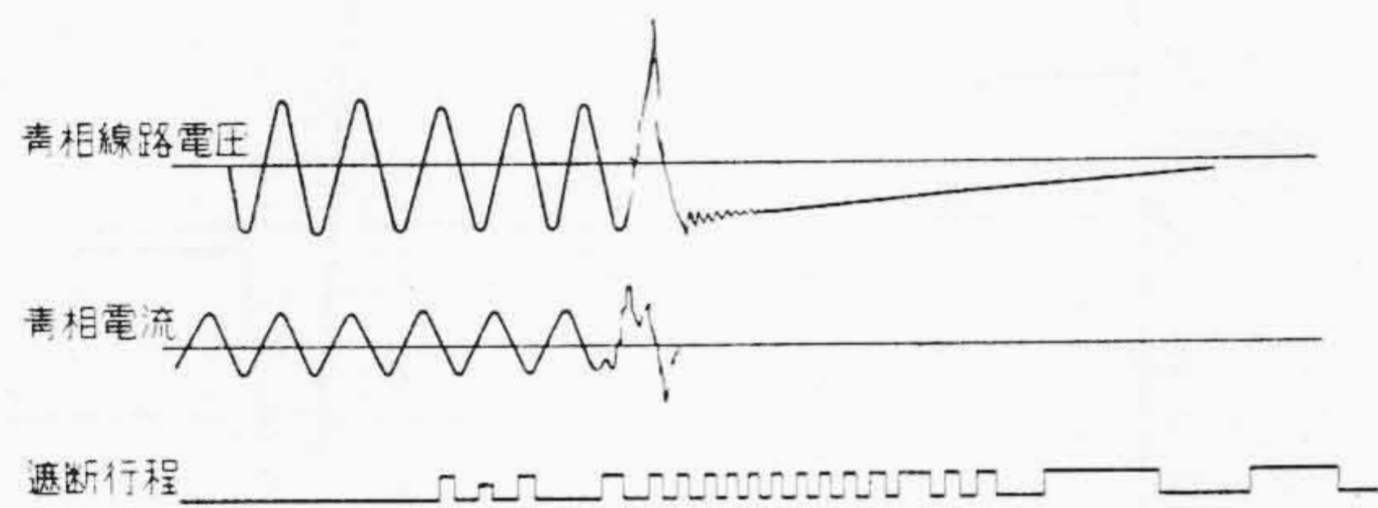
(iii) 進相用蓄電器回路用 69kV 遮断器 試験結果の詳細は別論文に記載されるので省略する。投入時突入電流は最大倍程度である。60kV 50A の遮断に於いて直

列リアクターのある場合、再点弧回数 0~2、直列リアクターのない場合 0~1 回で再点弧回数 2 は 10 回中 1 回で他の多くは無再点弧である。

(iv) ケーブル回路用 69kV 制弧遮断器 試験結果は第 8 表に示す如くで再点弧防止型では 68kV, 78A の遮断に於いて無再点弧、従つて異常電圧は出ない。普通型では 69kV, 78A の遮断に於いて再点弧回数 0~2、異



第 12 図 (a) 充電電流遮断試験のオシログラム
Fig. 12. (a) Oscillogram of Line Breaking Test 160 kV 60 A.



第 12 図 (b) 充電電流遮断オシログラム 160kV 60A
Fig. 12. (b) Oscillogram of Line Breaking Test 160 kV 200 A

常電圧 1~1.9 倍である。第 13 図は無再点弧の場合のオシログラムの 1 例である。

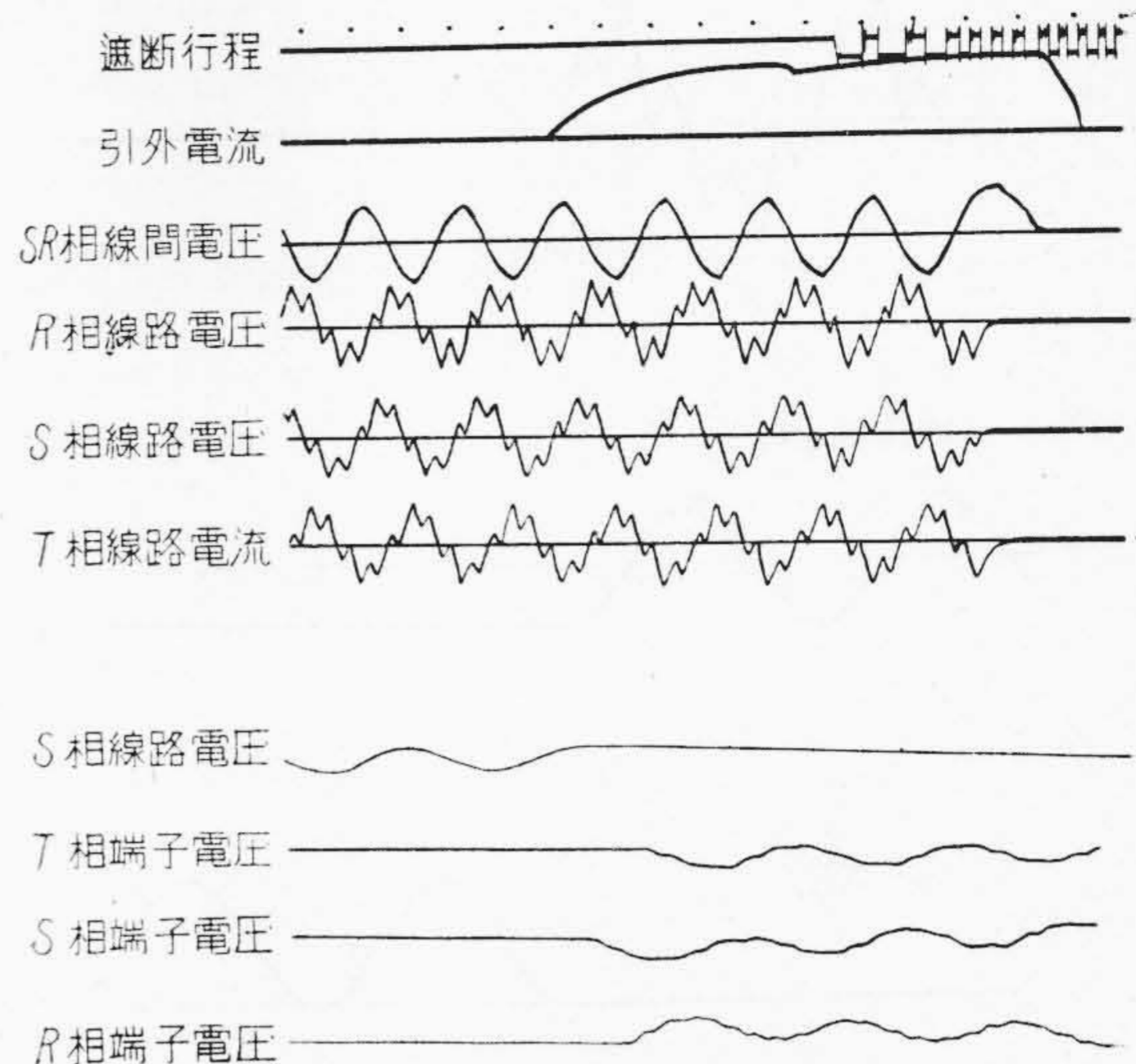
[VII] 試験結果の考察

(1) 遮断現象 送電線の充電電流を遮断した場合の

第 8 表 60kV ケーブル用制弧遮断器試験結果

Table 8. Results of 60kV Cable Charging Current Interrupting Tests by Contrarc Circuit Breakers

遮断器種類	試験番号	試験電圧 (kV)	電流 (A)	電弧時間			最長遮断時間 (ms)	再点弧電流 異常電流			再点弧回数			異常電圧		
				R	S	T		R	S	T	R	S	T	R	S	T
再点弧防止型	C-0-1	70	78	0.35	0.3	0.05	0.35	0	0	0	0	0	0	1.0	1.0	1.0
	C-0-2			0.4	0.73	0.73	0.73	0	0	0	0	0	0	1.0	1.0	1.0
	C-0-3			0.65	0.38	0.65	0.65	0	0	0	0	0	0	1.0	1.0	1.0
	C-0-4			0.55	0.22	0.55	0.55	0	0	0	0	0	0	1.0	1.0	1.0
	C-0-5			0.92	0.70	0.65	0.92	0	0	0	0	0	0	1.0	1.0	1.0
普通型	C'-0-1	68	77	0.92	0.70	0.65	1.89	4.0	4.0	4.0	2	2	1	1.3	1.1	1.9
	C'-0-2			0.16	0.68	0.68	1.55	3.7	4.6	3.2	2	2	1	—	—	—
	C'-0-3			0.86	0.62	0.62	1.92	4.0	3.5	4.0	2	2	1	—	—	—
	C'-0-4			0.82	0.61	0.61	1.38	3.3	3.5	4.3	1	1	1	1.0	1.5	1.0
	C'-0-5			1.35	0.95	0.95	1.85	0	1	0	0	1	0	1.0	1.0	1.0

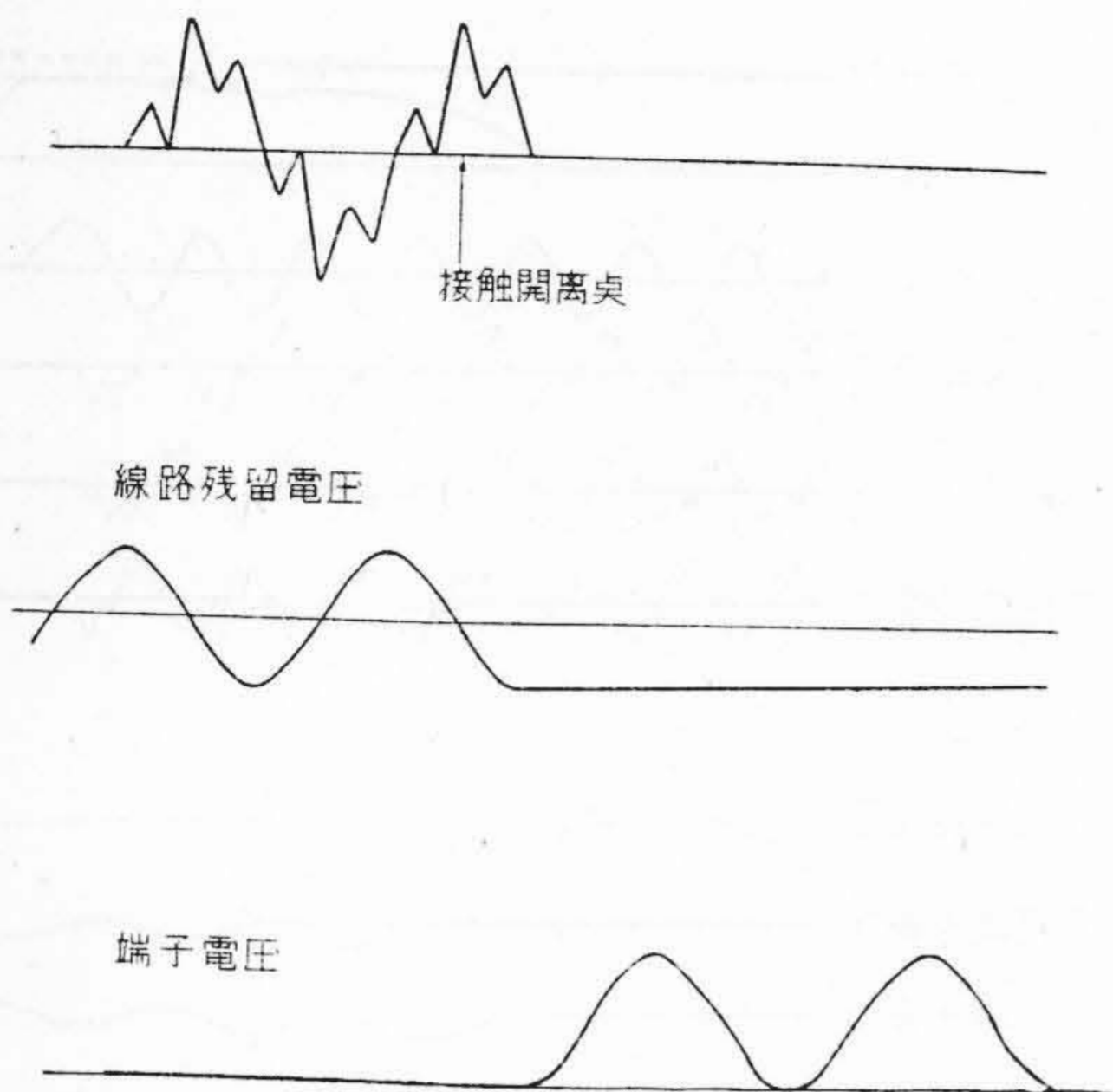


第 13 図 無再点弧の場合のオシログラム
Fig. 13. Oscillogram at the Case of No Restrike

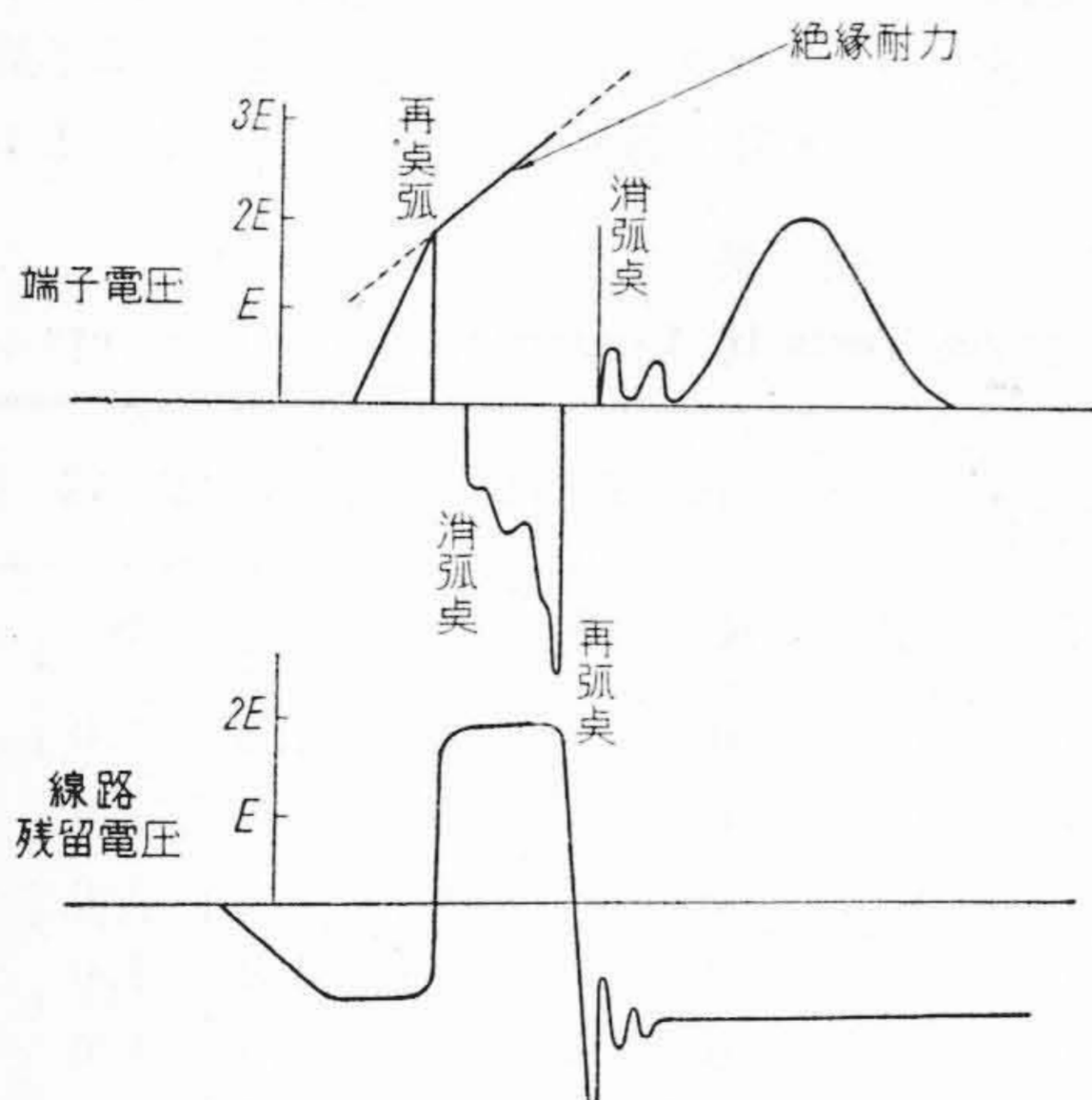
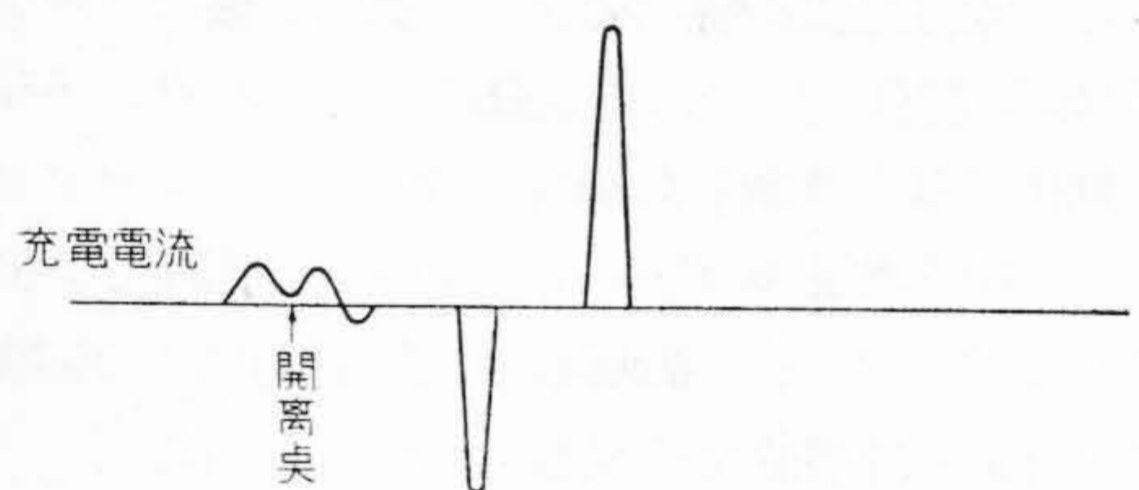
例を示すと次の通りである。

(A) 無再点弧遮断の場合 第 14 図はケーブル回路用 69kV 制弧遮断器に再点弧防止装置を附し 68kV 78 A を無再点弧で遮断した場合の S 相のオシログラムである。接触開離後 0.2 ms で充電電流を遮断し 2 倍の対地電圧に耐えている。遮断器の絶縁耐力はこの回復電圧曲線を上廻り理想的な絶縁耐力回復度である。

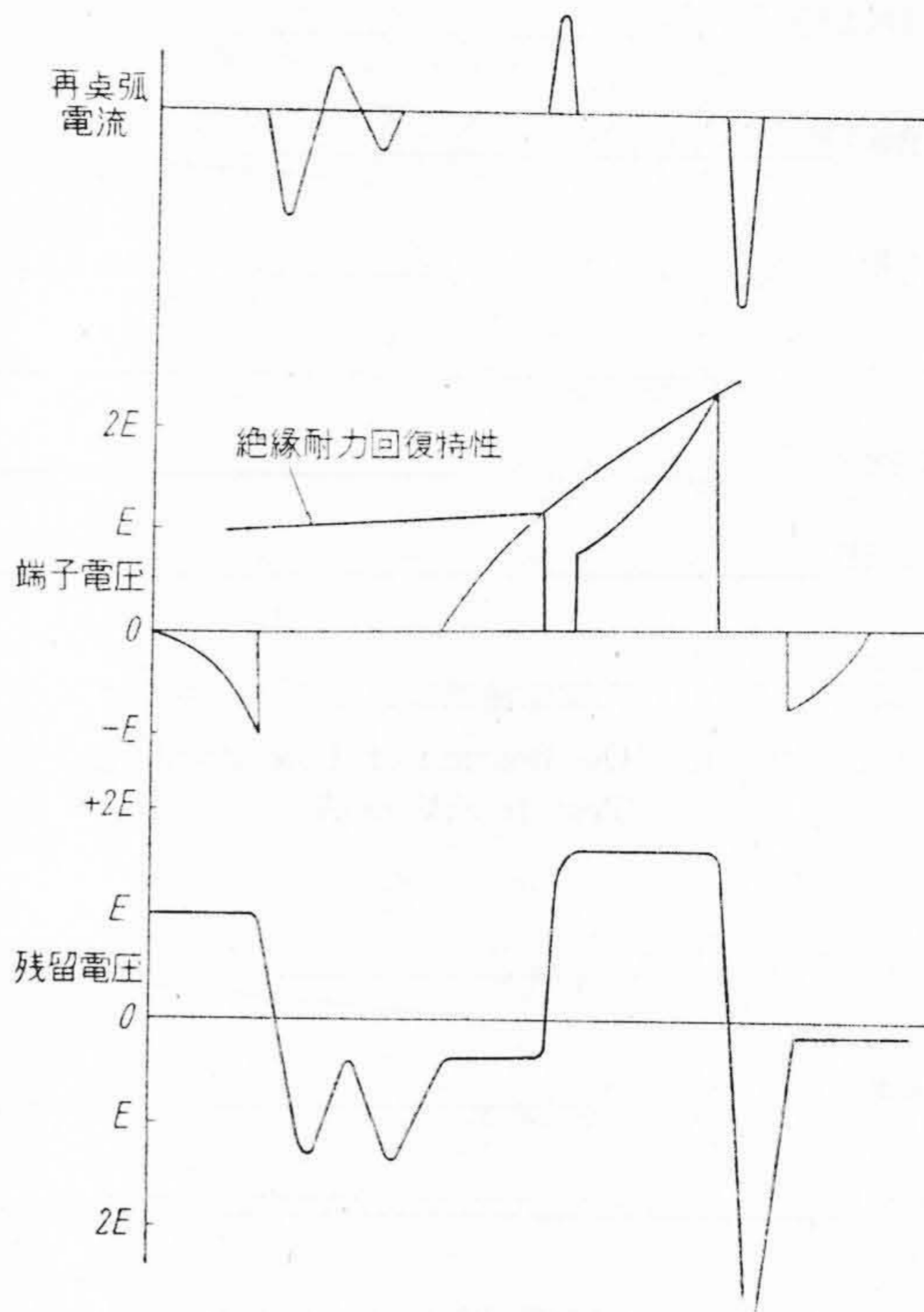
(B) 再点弧遮断の場合 第 15 図は普通型の 69kV 制弧遮断器で 67kV 75 A を再点弧 2 回で遮断したる場合の S 相のオシログラムである。充電電流は半周波で遮断し再点弧は約半周波毎に 2 回起つている。第 1 回の



第 14 図 再点弧防止装置付制弧遮断による 60 kV ケーブル充電電流遮断のオシログラム 60kV 78A
 Fig. 14. Oscillogram of 60kV Cable Charging Current Interruption by Improved "Contrarc" Circuit Breaker 60 kV 78 A.



第 15 図 普通の制弧遮断器による 60kV ケーブル充電電流遮断のオシログラム
 Fig. 15. Oscillogram of 60kV Cable Charging Current Interruption by Normal "Contrarc" Circuit Breaker 60 kV 78 A.

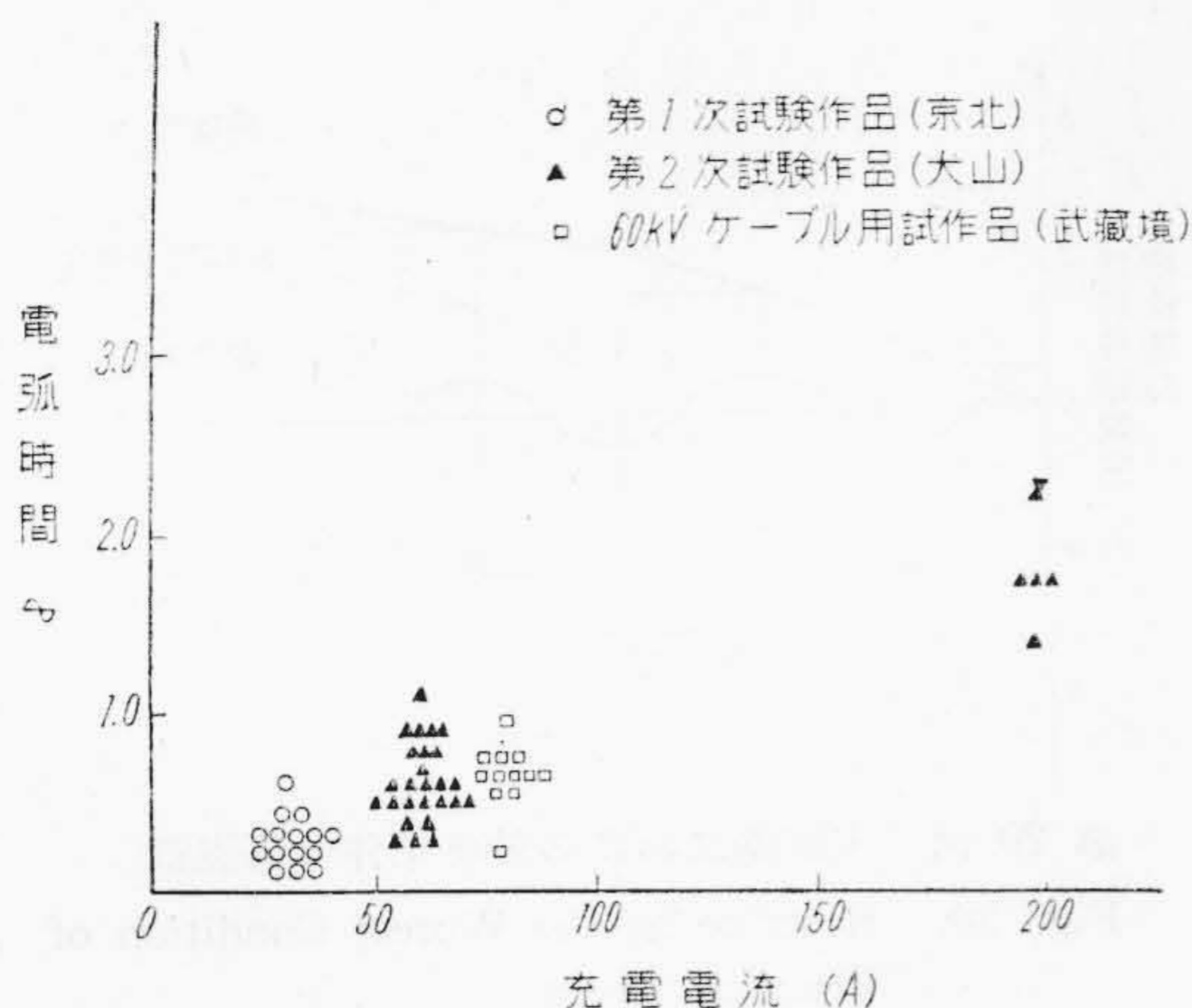


第 16 図 再点弧時の電圧電流 (工場試験結果) 100 kV 4 A
 Fig. 16. Restriking Voltage and Current 100 kV 4 A (Laboratory Test)

再点弧は電源電圧の 160% の値で起り再点弧電流は半周波で遮断している。消滅直後に電源電圧の 72% の再起電圧が現われている。第 2 回の再点弧は電源電圧の 260% の点で起り再点弧電流は半周波で遮断している。消滅直後の再起電圧は電源電圧の 200% で高周波である。遮断器の絶縁耐力の回復曲線は第 1 回と第 2 回の再点弧電圧を結ぶ線で第 3 回目の回復電圧をはるかに上廻り、爾後は再点弧していない。

第 16 図は 161kV 制弧遮断器で 50,000kVA 発電機を電源とする工場実験設備で蓄電器の充電電流を遮断した場合のオシログラムで、再点弧電流が半周波以上続いた場合の例で、各再点弧毎の残留電圧及び回復電圧が著しく異つてゐることを示す。

(2) 電弧時間 この電弧時間とは接触子が開離してから定常の充電電流が遮断されるまでの時間で、第 17 図は再点弧防止装置を付した場合の電流と電弧時間の関係を示す。充電電流 60 A 以下の場合には電弧時間は 1ms 以下で、著しい場合は接触子の開離瞬時に遮断されている。電弧時間が小さいことは遮断器の端子間隙の短い内に回復電圧に曝されることになるので絶縁耐力の回



第 17 図 充電電流値と電弧時間の関係
Fig. 17. Relation between Arcing Time and Interrupted Charging Current

復は困難である。消弧力の強化の外に初開離速度の増大が重要な条件となる。200 A の場合は電弧時間は 1 \sim 以上となり充電電流遮断時の端子間電圧は大きい。

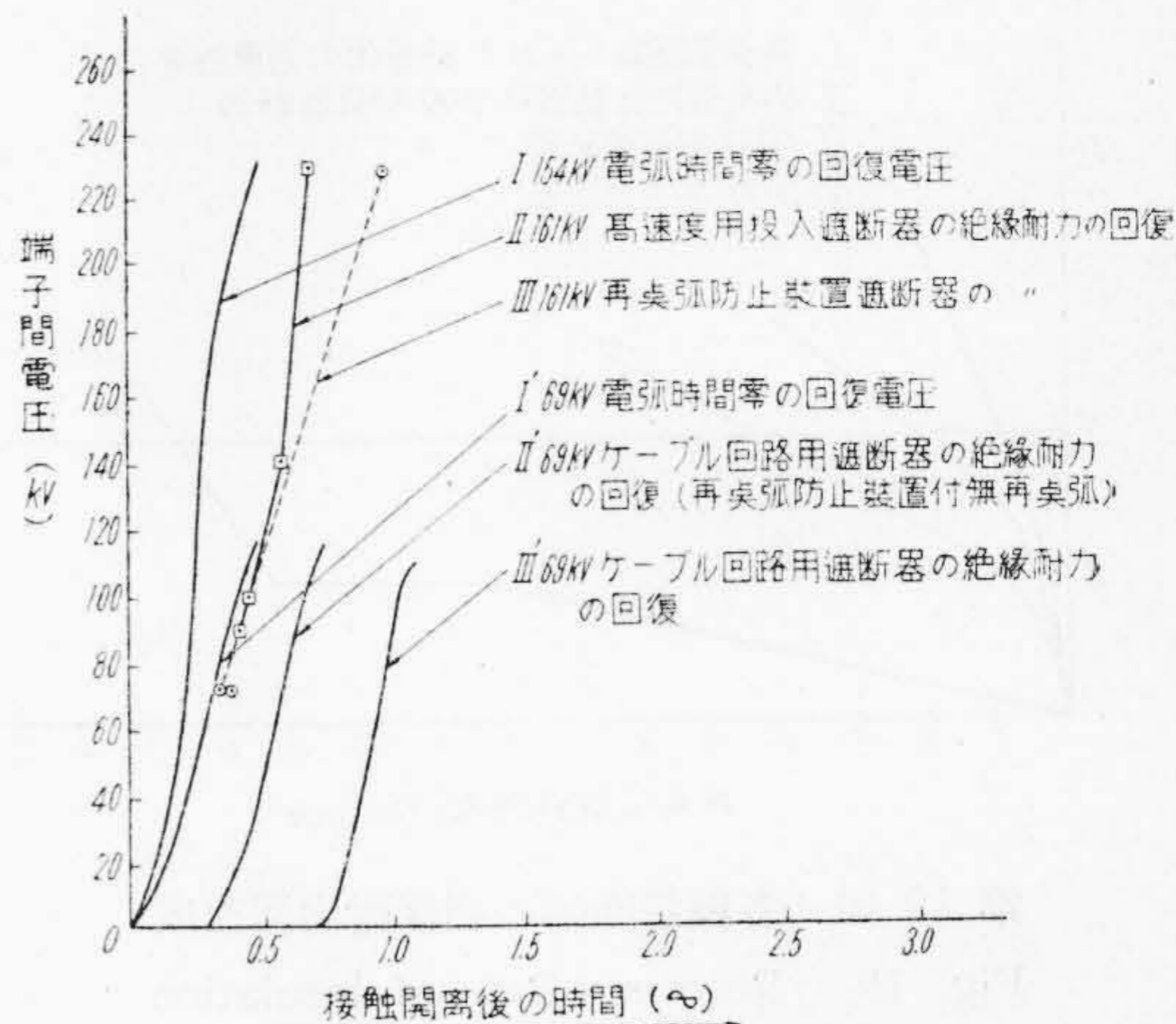
(3) 再点弧電流 再点弧電流は定常電流と過渡充電電流との合成である。再点弧が回復電圧の相当高い所で起きると定常電流より過渡電流が大きくなり電流零値の回数が増える。消弧力の大きい遮断器では再点弧電流の消滅は半周波である。第 9 表は再点弧電流の周波数の例である。再点弧電流周波数は前述の如く回路の LC により定まりその大きさは大体端子電圧と回路のサージインピダンスによつて定まるものである。再点弧電流の周波数は商用周波数より大きいがその値は定常電流の数倍となるから半周波のエネルギーは定常充電電流の半周波に放出するものと大差はない。

第 9 表 再点弧電流と周波数の最大値
Table 9. Maximum Restriking Current and Frequency

送電線	距離 (km)	電圧 (kV)	電流 (A)	再点弧周波数 (\sim)	再点弧電流最大値
猪苗代旧幹線 京北一片 岡	110	140	25	320	6.0
京北一猪苗代	220	140	50	225	6.8
木曾幹線 犬山一古川橋	160	150	60	320	5
犬山一古川橋一 八尾一犬山	340	160	200	100	3

(iii) 遮断器の絶縁耐力の回復

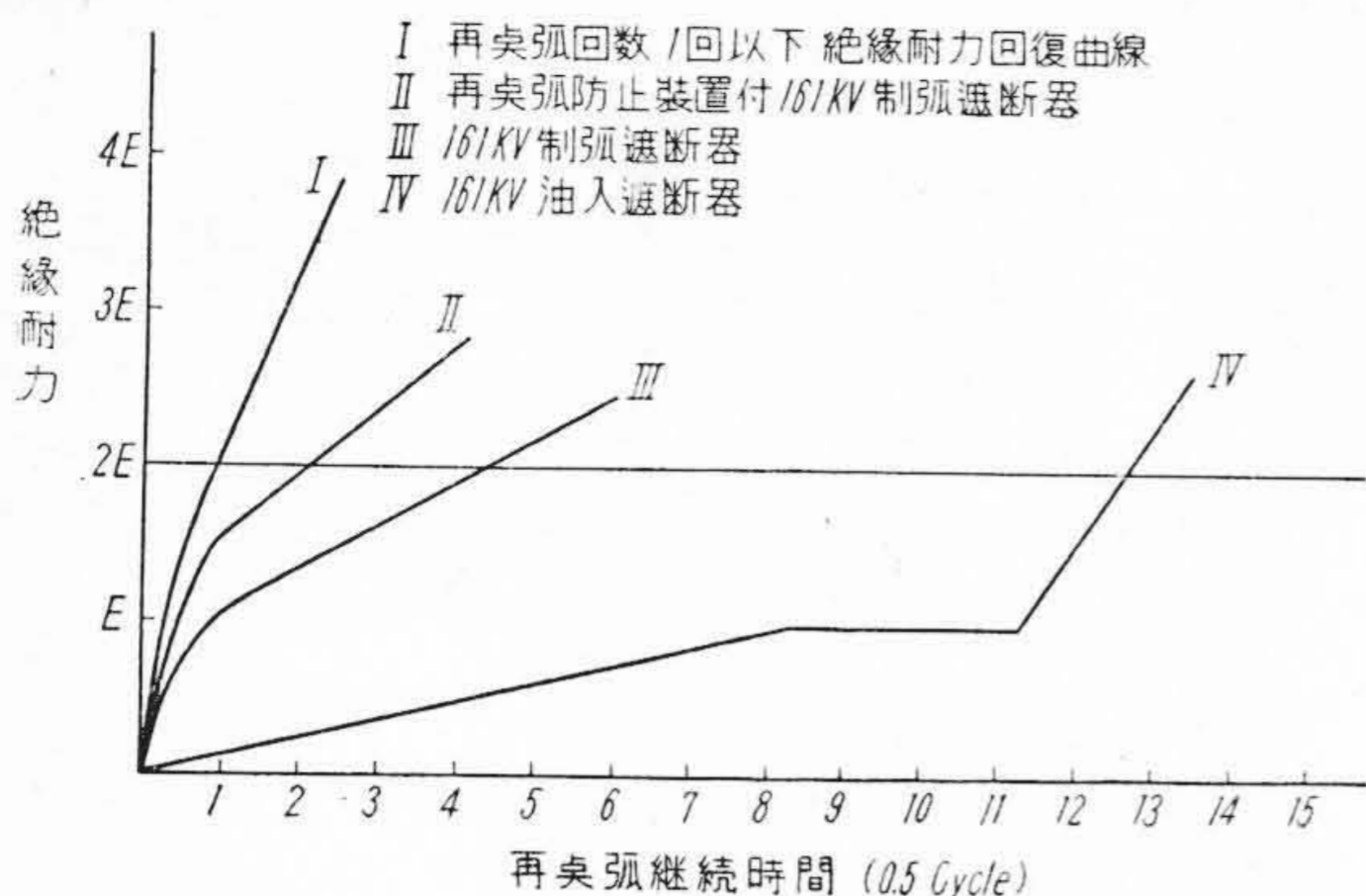
遮断器の絶縁耐力の回復状態は端子間電位差をブラウン管オシログラムで撮り再点弧瞬時の破壊電圧を測定することによつて知ることが出来る。再点弧防止型制弧遮



第 18 図 制弧遮断器の絶縁耐力回復度
Fig. 18. Recovery Rate of Insulation Strength of "Contrarc" Circuit Breakers

断器の試験結果より第 1 回の再点弧時の端子電圧を測定し第 18 図の如き絶縁回復特性を得た。(I) は電圧 160 kV の回路で接触開離と同時に充電電流が遮断された場合の回復電圧曲線で遮断器の絶縁耐力回復線がこの曲線を上廻るならばいかなる場合も再点弧しないわけである。(II) は 161 kV 高速度再投入制弧遮断器で送油のある状態の絶縁耐力回復曲線で再点弧回数 0 \sim 1 の場合である⁽²⁾。(III) は試作再点弧防止装置付遮断器の絶縁耐力回復曲線である。(I)' は 69 kV の回路で接触開離と同時に定常の充電電流が遮断された場合の回復電圧曲線で絶縁耐力曲線がこれを上廻ると無再点弧である。(II)' は 69kV 再点弧防止付遮断器の電弧時間 0.2 \sim の回復電圧曲線でこの場合無再点弧であつたから遮断器の絶縁回復特性は回復電圧曲線を上廻り電弧時間零の場合の回復電圧特性に近いことは明らかである。(III)' は 69kV 普通型の制弧遮断器の絶縁回復特性である。この結果より明らかな如く 161 kV 再点弧防止装置付制弧遮断器は再点弧回数 0 \sim 1 の強制送油方式(再投入型)の特性 (II の特性) に殆んど接近し、又無再点弧特性に極めて近い。従つて僅かの改造によつて目的を達し得ることが判る。

以上は無再点弧を目標とした絶縁耐力の回復特性であるが、再点弧回数の多い場合の絶縁耐力回復特性に就いて述べる。これは異常電圧に関連して重要である。(III) に述べた如く再点弧後の線路の過渡充電電圧の振幅は再点弧瞬時の破壊電圧の大きさによつて決まる。再点弧後の線路の残留電圧並びに回復電圧もこれが基礎となる。第 19 図は再点弧継続時間と絶縁耐力回復特性との関係で (I) は再点弧 1 回以下絶縁耐力回復特性、(II) は 161



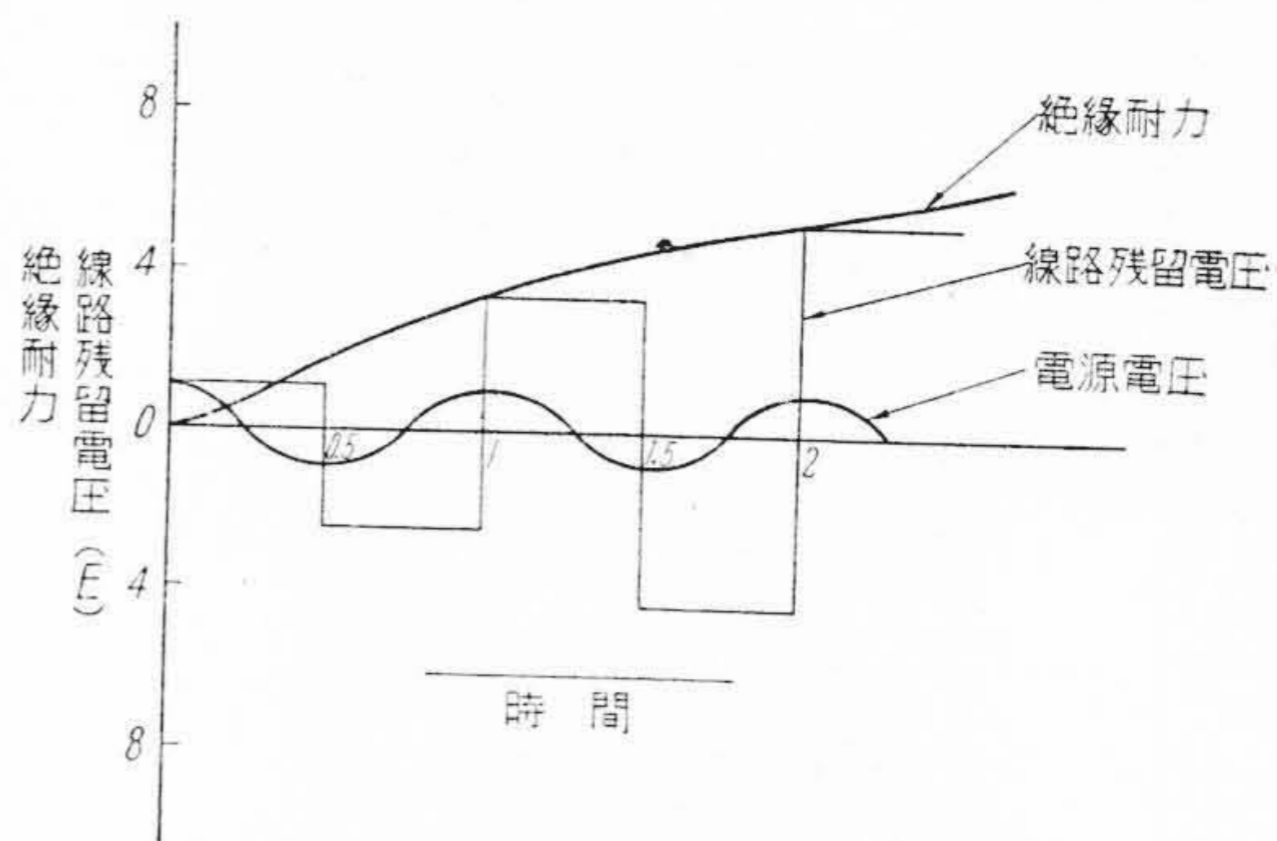
第 19 図 各種遮断器の絶縁耐力回復度
Fig. 19. Recovery Rate of Insulation Strength of Miscellaneous Circuit Breakers

kV 再点弧防止装置付制弧遮断器、(III) は 161kV 制弧遮断器、(IV) は 161 油入遮断器の例である。上述の如く最悪の場合は半周波毎に回復電圧の最大値で再点弧を起し再点弧電流が最初の半周波で遮断される如き特性である。実際回路に於いては過渡充電電圧には減衰があるから、第 5 図の如き高い残留電圧、回復電圧は起らない回路の減衰率をオシログラムより測定すると第 10 表の如くである。

第 10 表 送電線の過渡充電電圧の減衰率
Table 10. Attenuation Factor of Transient Charging Voltage on Transmission Lines

試験回路	線路 kV	減衰率 ($2 \frac{L}{R}$)	周波数 ω
工場実験回路		80	250
60 kV ケーブル回路	15	175	250
猪苗代旧幹線	220	124	220
京北—猪苗代			
木曾幹線、犬山—古川橋	100	250	300

工場実験回路の減衰率は送電線に比して一番小である。この減衰率から云えば第 1 回再点弧が回復電圧の最大値で起ると線路の残留電圧は $2.5 \sim 2.3 E$ となる。従つて実際回路に於ける最悪の条件は第 20 図の如き曲線となる。この曲線より明らかな如く無再点弧なるために定常充電電流遮断後遮断器の絶縁耐力回復度は $4 E/\omega$ 以上を必要とし、第 1 回再点弧後遮断が完了するためには $3 E/\omega$ を必要とする。併し、絶縁回復度が比較的小さく十数回の再点弧を生ずる遮断器も絶縁回復度が $0.57 \sim 1.3 E/\omega$ 程度になれば遮断が完了している。これは残留電圧と回復電圧とに再点弧の位相による大きい不齊が影響するからである。消弧力の異なる遮断器の絶縁



第 20 図 実回路における最悪条件の再点弧
Fig. 20. Restrike at the Worst Condition of Practical Lines

耐力の回復は大体 $1/2 \omega$ 以内に E 以上となり消弧力の小なる遮断器は E に達するまでに数 ω を要する。異常電圧が問題となるのは端子間の絶縁耐力が E 以上になつてからである。従つて再点弧回数を異常電圧に関連して考えると絶縁耐力が E になるまでの再点弧回数を論議することはあまり意義はないと考えられる。

要するに無再点弧ならば異常電圧は出ない。再点弧 1 回以下ならば異常電圧は 3 倍以下、減衰等を考慮に入れば 2.5 倍以下に確実に抑え得られる。

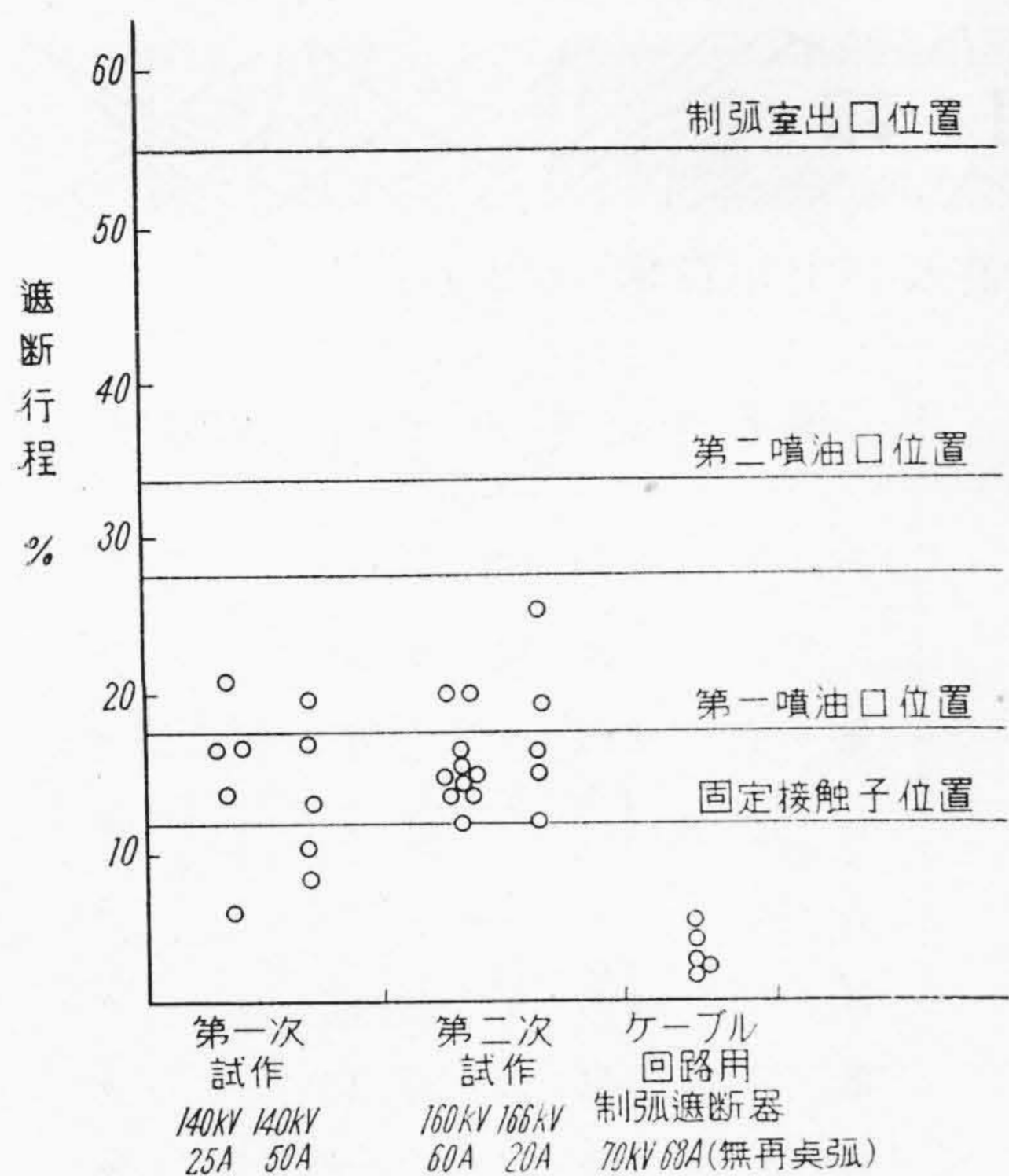
無再点弧にするための絶縁耐力回復は接触開離直後約 1ω の間の消弧力の強化が必要である。これは短絡電流を遮断する程の強力なる他力を必要とはしない。今回試作の再点弧防止装置は試験結果より明らかな如く大体この目的に沿つていると云える。

(iv) 制弧室内に於ける遮断完了位置 第 21 図は制弧室内における再点弧防止装置附の場合の遮断完了位置を示すもので 154 kV, 60 A の遮断の際は第一噴油口に達しない点で遮断が完了しているものもある。これは再点弧防止装置の油流の効果を示すものである。160 kV, 200 A の場合第一噴油口附近まで電弧が延び噴油孔の効果も預つて効果のあることを示している。

(v) 異常電圧 充電電流遮断時に発生する異常電圧に就いては研究の結果次第に現象が明らかにされつつある(4)。

(A) 再点弧時に発生する過渡充電電圧の周波数は数十~数百 ω で、その大きさは前述の如く遮断器の絶縁回復度に関係し、最悪の場合は数回の再点弧で 6 倍程度になり得る。かかる最悪の条件が出現する確率は非常に少い。回路の構成にもよるが、今回の試験結果の如く 2.5 倍以下で、3 倍以上の発生は稀である。

(B) 再点弧電流遮断時に於ける電源側電圧は過渡充電電圧から電源電圧に復帰する。この時電源側の L, C による固有周波数と過渡充電電圧と電源電圧の差を振幅



第 21 図 再点弧防止装置付制弧遮断器の電弧長

Fig. 21. Arcing Length of Improved "Contrarc" Circuit Breakers

とする高周波の過渡電圧が発生する。線路側には過渡充電電圧の瞬時値の残留電圧を生じ、これに線路の往復反射による高周波の電圧が重畳される。

異常電圧の大きさは実測の結果遮断器の種類によつて大差はない。唯再点弧回数に大差がある。これは上述の如く異常電圧が遮断器の遮断行程中に於ける或る部分の絶縁回復度に関係するからである。

異常電圧の発生を確実に 3 倍以下とするためには再点弧回数を 1 回以下とすべきである。

[VIII] 結 言

充電電流遮断性を向上するため、161 kV 及び、69 kV

制弧遮断器に附加する再点弧防止装置を試作し、送電線で試験を行い次の結果を得た。

(1) 161 kV 制弧遮断器では 161 kV 50~60A の遮断に於いて異常電圧 2.5 倍、再点弧回数 0~3, 160kV 200A では異常電圧 2.5 倍、再点弧回数 0~1 の性能を得た。再点弧回数の分布は 1 回以下が多く、その絶縁耐力回復特性は理想的な特性に近いことが認められ、再点弧回数 1 回以下の性能を得るための有益なる資料を得た。

(2) 69kV 制弧遮断器では 68 kV 80 A の遮断に於いて無再点弧の好結果を得た。

(3) 本再点弧防止装置は構造簡単で制弧遮断器には大きい改造を行うことなく附することが出来る。短絡電流の遮断特性に対しては、好い影響こそあれ悪影響はない。

(4) 再点弧防止装置付制弧遮断器を力率改善用蓄電回路に使用すれば、応神変電所に於ける如く特に進電流開閉用開閉器を設置する必要がない。

終りに本試験研究を行うに当り 161 kV 遮断器に関しては御指導と御援助を賜つた送配電異常電圧委員会の委員各位、御協力を得た元日本発送電株式会社電力技術研究所富山電力科長並びに関係者各位、元日本発送電東海支店西田氏、現地関係者各位、69 kV 遮断器に関し御指導並びに御援助を得た国鉄 60 kV ケーブル試験研究委員会各位、御指導並びに新協力を賜つた東京大学福田教授、国鉄供電事務所森尻主幹電気試験所法貴課長、並びに試験関係者各位に深謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) 牧、森田、鴨志田、電気学会雑誌 68, 288 昭 23-11.
- (2) 牧、鴨志田、日立評論 31, 37 昭 24-1.
- (3) 福田、電気回路 261.
- (4) 送配電異常電圧専門委員会資料 1-145.

高 速 度 鋼

日立製作所冶金研究所長 工学博士 小柴定雄 著

(誠文堂新光社)

A列5判230頁 美装クロス箱入

販 賣 日 立 評 論 社 定價 250 圓 卅 32 圓

特 許 月 報

最近登録された日立製作所の特許及び実用新案 (2)

区 分	登録番号	名 称	工場名	発 明 考 案 者	登録年月日
実用新案	391116	遠心分離機カバー	多賀	川崎光彦	27. 3. 20
"	391117	遠心分離機	"	川崎光彦	"
"	391118	流体洩れ止め輪	亀有	久保沢稔	"
"	391119	空気圧縮機用弁	日立	{大坪弘一 二平豊治	"
"	391120	エレベータ扉開閉装置	多賀	神峰次郎	"
"	391121	電磁接手	日立	{佐藤正三 鈴木正明	"
"	391122	変圧器の保護間隙装置	亀戸	鬼頭国忠	"
"	391123	堅切型断路器	日立	滑川清	"
"	391124	交流電弧熔接装置	多賀	小林国雄	"
"	391125	噴霧兼用注水ノズルの漏水防止装置	亀戸	石原定男	"
"	391126	外輪加熱装置	日立	{前川愛一 滑川清	"
"	391127	輪状体加熱装置	"	前川愛一	"
"	391128	交流電弧熔接機電流指示装置	多賀	小林国雄	"
"	391129	ロープ緊定装置	亀有	安河内春雄	"
"	391130	外輪加熱装置	日立	前川愛一	"
"	391131	防爆電器蓋締付装置	"	滑川清	"
"	391132	カム型開閉器	"	本間千代一	"
"	391133	複動カム型開閉器	"	滑川清	"
"	391134	防爆機器蓋締付ネジ脱落防止装置	多賀	五島正巳	"
"	391135	遠心噴霧機	日立	滑川清	"
"	391136	制限開閉器	亀有	原政次	"
"	391137	熱動継電器調整装置	日立	{佐藤正三 五島土忠	"
"	391138	手動開閉器ハンドル止め装置	"	{白田武夫	"
"	391139	交流熔接機に於ける電流調節装置接栓	多賀	小林国雄	"
"	391140	電動機速度制御装置	"	小家正道	"
"	391141	機関起動電動機用補助電磁スイッチ	"	飯島登	"
"	391142	電動機速度制御装置	"	山家正道	"
"	391143	車輛用二枚引戸操作装置	笠戸	安達義雄	"
"	391144	水密型抵抗器箱	日立	豊田隆太郎	"
"	391145	電弧熔接機の電極送給装置	"	田中貞之助	"
"	391146	カーボンパイル抵抗器の乱調防止装置	多賀	杉浦慎三	"