

## 電磁接触器の接触子の躍動

## A Problem on Electromagnetic Contactor

松村 睦夫\* 宮沢 浄\*  
Noboru Higaki Mutsuo Matsumura Kiyoshi Miyazawa

## 内 容 梗 概

接触子の躍動は電磁接触器の性能をいちじるしく阻害するもので、これを軽減は望ましいことであるが、その反面、現象そのものが非常に複雑なために、理論的解析は簡単ではない。

本稿では、数多い躍動の要因の中から比較的扱いやすい因子すなわち接触子の形状および接触圧力をえらんでこれを理論的および実験的に検討し、躍動軽減の基本的な考え方に達するまでの経過について述べ、さらに躍動を少なくして、JEM-1038「交流電磁接触器」のA級1号1種を達成することのできた日立新型電磁接触器に言及する。

## 〔I〕 緒 言

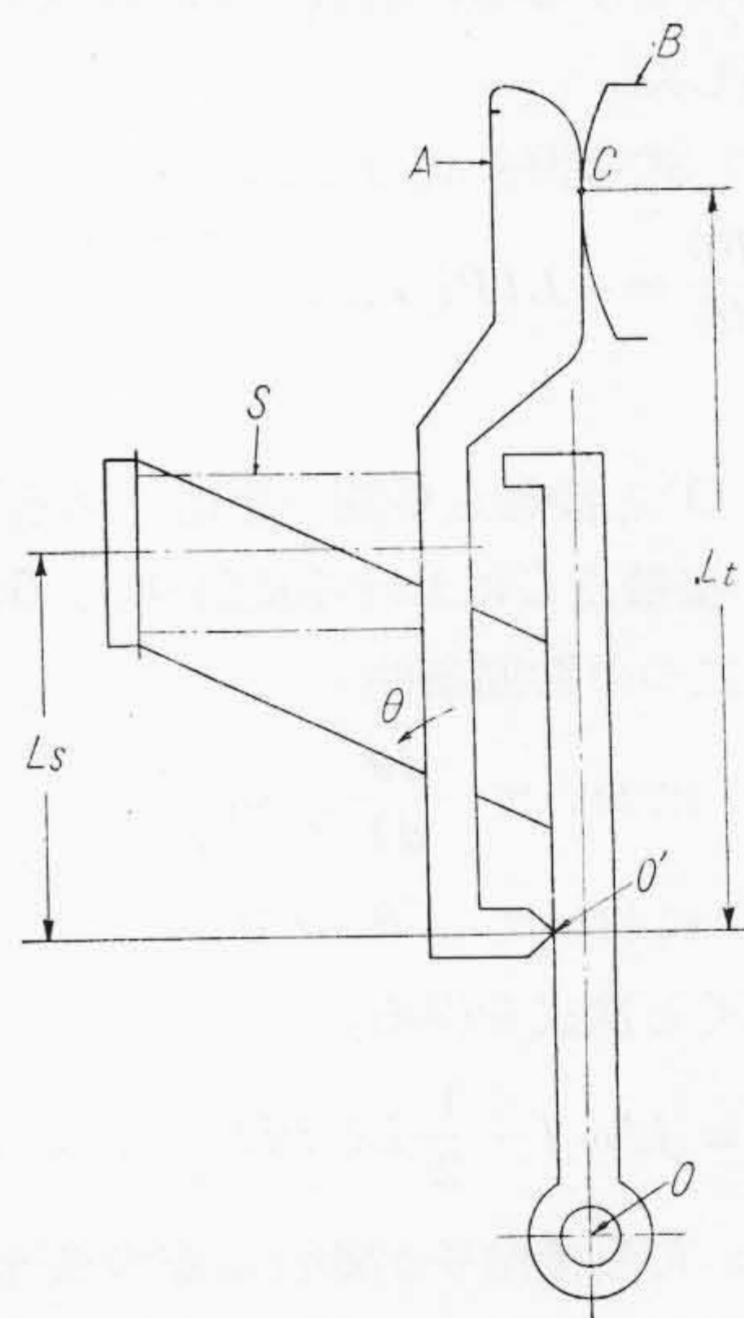
電磁接触器は、電動力応用に欠くことのできない制御器具の一つであるが、それだけに苛酷な条件のもとで使用されることが多い。その際とくに問題になるのは接触子の溶着および電氣的寿命である。ほかの部分がいかにすぐれていても、接触子に溶着の可能性のあるものや、接触子消耗がはなはだしいような接触器を使用した場合にはその保守の労は大変なものである。

電気接点の溶着のもつとも基本的な形は、ジュール熱による接触面の部分過熱<sup>(1)</sup>であるが、これには定常的なものもあるが電磁接触器のように接触子が相互に急速度で衝突するものでは、躍動による、閉成時の過度的な開閉が問題になる。たとえば、かご形誘導電動機の直入起動の場合には、この開閉により過渡的に定格電流の数倍の電流を開閉することになり、接触部に大なる熱を発生し、これにより材料が溶融し接触部の荒れを生じてはなはだしいときには溶着を起すに至る。また溶着には至らなくても、このような接触器では接触子の異常消耗がはなはだしく到底所期の目的には使えない。これを防止するには、接点材料の吟味もさることながら、根本的には接触子の躍動を極力少なくするような構造にするほかはない。

日立製作所では、すでに発表<sup>(2)</sup>され、各方面に使用されている新型交流電磁接触器を開発するに先立ち、各部分の基礎研究の一環として接触子躍動の現象をとりあげ理論的考察と実験を行つた。現象は複雑で、理論と実験とはかならずしもよく一致しなかつたが、この研究の結果、躍動のきわめて少ない接触器を得るための設計方針を確立することができた。

なお、電磁接触器の接触部分には数種の形式があるが、ここでは大容量の接触器に広く採用されているフィンガ形接触子に研究の対象を限定した。ここにその経過を述べ、大方の御批判を仰ぐ次第である。

\* 日立製作所日立工場



第1図 接触部可動部分模型図

## 〔II〕 躍動の力学的考察

電磁接触器の接触子の躍動には、閉路時、両接触子が接触を開始する際に起る反ばつにもとづくものと、電磁石が密着したときの打撃が、取付枠そのほかを伝わつて接触子を振動せしめておこるものとの二種類がある。前人により取扱われている<sup>(3)</sup>ように、ここでも前者を第一次躍動、後者を第二次躍動と呼ぶことにする。

## (1) 第一次躍動

第1図はここで考える接触部分を示し、Aは可動接触子、Bは固定接触子、Cは両接触子の接触点、Sはワイピングバネである。Aは支点O'のまわりに回転でき、O'は固定軸Oのまわりに回転する支持台H上の一点となつている。

いま、回転系全体がOのまわりに時計方向に回転してAがBに衝突した直後を考えると、AはC点においてBより反ばつ力をうけ矢の方向に回転運動を始める。その場合のAの運動方程式は次式で表わされる。

$$J_o' \frac{d^2\theta}{dt^2} = -Lsfi \dots\dots\dots(1)$$

$J_o'$ : AのO'まわりの慣性モーメント(cm<sup>2</sup>-kg)

$\theta$ : AのO'まわりの角変位置〔図示の方向を正にとる〕(rad)

$Ls$ : O'とバネS間の距離〔図示〕(cm)

$fi$ : バネの初圧 (kg)

式(1)の右辺はワイピングバネの初圧  $fi$  によるトルクを表わす。厳密にはこのほかにAの角変位  $\theta$  によるトルク、および支持台がOを中心にして回転しているために生ずるトルクも合わせ考えなければならないが、ここで使った試験装置では、これらは初圧  $fi$  によるトルクに比して無視しうる値となるので、取扱いを簡単にするために省略した。

さらに(1)式を書き改めると、

$$J_o' \frac{d^2\theta}{dt^2} = -LtPi \dots\dots\dots(2)$$

ここに

$Lt$ : O'と接触点C間の距離〔図示〕(cm)

$Pi$ : 接触点Cにおける接触初圧 (kg)

式(2)を二つの初期条件

$$t = 0 \text{ において } \frac{d\theta}{dt} = \omega_1$$

$$t = 0 \text{ において } \theta = 0$$

を入れて解くと次式を得る。

$$J_o'\theta = J_o'\omega_1 t - \frac{1}{2} Lt Pi t^2 \dots\dots\dots(3)$$

ここで  $\omega_1$ : 可動接触子が離れる際の初速度 (rad/s)  
式(3)から、可動接触子の最大角変位置  $\theta_m$  を求めると、

$$\theta_m = \frac{J_o' \omega_1^2}{2Lt Pi} \text{ (rad)} \dots\dots\dots(4)$$

また可動接触子が、ふたたび固定接触子に衝突するまでの時間を  $\tau_{11}$  とすると

$$\tau_{11} = \frac{2J_o' \omega_1}{Lt Pi} \text{ (s)} \dots\dots\dots(5)$$

この第2回目の衝突後、さらに反ばつして第3回目の衝突をなす迄の開離時間を  $\tau_{12}$  とすると

$$\tau_{12} = \frac{2J_o'}{Lt Pi} e\omega_1 \text{ (s)} \dots\dots\dots(6)$$

ここで  $e$  は接触子間の反ばつ係数で、したがつて  $e\omega_1$  は、第2回目の反ばつの初速度である。このように連続して起る反ばつの開離時間の合計を  $\tau_1$  で表わすと、

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \tau_{11} + \tau_{12} + \dots\dots = \frac{2J_o'}{Lt Pi} \omega_1 (1 + e + e^2 + \dots) \\ &= \frac{2J_o' \omega_1}{Lt Pi} \frac{1}{1 - e} = \tau_{11} \frac{1}{1 - e} \text{ (s)} \dots\dots(7) \end{aligned}$$

いま、 $J_o$ : AのOまわりの慣性モーメント (cm<sup>2</sup>-kg)  
 $\omega_o$ : 第1回の衝突直前のAのOまわりの角速度

(rad/s)

とおけば、衝突前後のAの運動エネルギーの関係は、

$$e^2 \frac{1}{2} J_o \omega_o^2 = \frac{1}{2} J_o' \omega_1^2$$

$$\therefore \omega_1 = \sqrt{\frac{J_o}{J_o'}} e\omega_o \dots\dots\dots(8)$$

式(8)の  $\omega_1$  の値を前述の式(4)(5)および(7)に入れると、それぞれ次式を得る。

$$\theta_m = e^2 \frac{J_o \omega_o^2}{2Lt Pi} \text{ (rad)} \dots\dots\dots(4')$$

$$\tau_{11} = \frac{2\sqrt{J_o J_o'}}{Lt Pi} e\omega_o \text{ (s)} \dots\dots\dots(5')$$

$$\tau_1 = \frac{2\sqrt{J_o J_o'}}{Lt Pi} \omega_o \frac{e}{1 - e} \text{ (s)} \dots\dots\dots(7')$$

式(5')において、 $\tau_{11}$  を小さくするように、右辺の各値をえらべば、式(4')と式(7')とより最大角変位置  $\theta_m$  および全開離時間  $\tau_1$  も小さくなるのがわかる。

(2) 第二次躍動

第一次躍動が可動接触子自身がつもつていた運動エネルギーによるのに対し、第二次躍動は、操作電磁石の可動子が固定子に衝突し、その際運動体がつもつていた運動エネルギーが取付盤あるいは取付枠を介して、可動接触子に与えられることによると考える。

したがつて、実際の第二次躍動現象は取付盤あるいは取付枠の弾性振動などの要因を含み、きわめて複雑で、厳密な理論的取扱いはほとんど不可能であるが、第一次躍動の場合と同様に、この場合の反ばつ初速度を  $\omega_2$  (rad/s) とすると、式(4)、(5)および(7)に対応して次式を得る。

$$\theta_{m2} = \frac{J_o' \omega_2^2}{2Lt Pf} \text{ (rad)} \dots\dots\dots(9)$$

$$\tau_{21} = \frac{2J_o' \omega_2}{Lt Pf} \text{ (s)} \dots\dots\dots(10)$$

$$\begin{aligned} \tau_2 &= \tau_{21} + \tau_{22} + \dots = \frac{2J_o'}{Lt Pf} \omega_2 (1 + e + e^2 + \dots) \\ &= \frac{2J_o' \omega_2}{Lt Pf} \cdot \frac{1}{1 - e} = \tau_{21} \frac{1}{1 - e} \text{ (s)} \dots\dots(11) \end{aligned}$$

$\theta_{m2}$ : 可動接触子の最大角変位置 (rad)

$\tau_2$ : 全開離時間 (s)

$Pf$ : 接触点Cにおける接触終圧 (kg)

可動接触子に与えられる衝撃エネルギー量を  $E_M$  ( $\times 10^3$  erg) とすると、

$$E_M = \frac{1}{2} J_o' \omega_2^2$$

$$\therefore \omega_2 = \sqrt{\frac{2E_M}{J_o'}}$$

これを前記の式(9)、(10)および(11)に入れると、それぞれ次式を得る。

$$\theta_{m2} = \frac{E_M}{Lt Pf} \text{ (rad) ... (9')}$$

$$\tau_{21} = \frac{2\sqrt{2J_o' E_M}}{Lt Pf} \text{ (s) ..... (10')}$$

$$\tau_2 = \frac{2\sqrt{2J_o' E_M}}{Lt Pf} \cdot \frac{1}{1-e} \text{ (s) ..... (11')}$$

第一次躍動におけると同様にここでも、式(10')において $\tau_{21}$ が小さくなるように右辺の各値をえらべば $\theta_{m2}$ および $\tau_2$ も小さくなることわかる。

〔III〕 試験結果

(1) 試験方法

第2図に示すような形状の試験用銅接触子(Lt=40mm, 50mm, 85mm

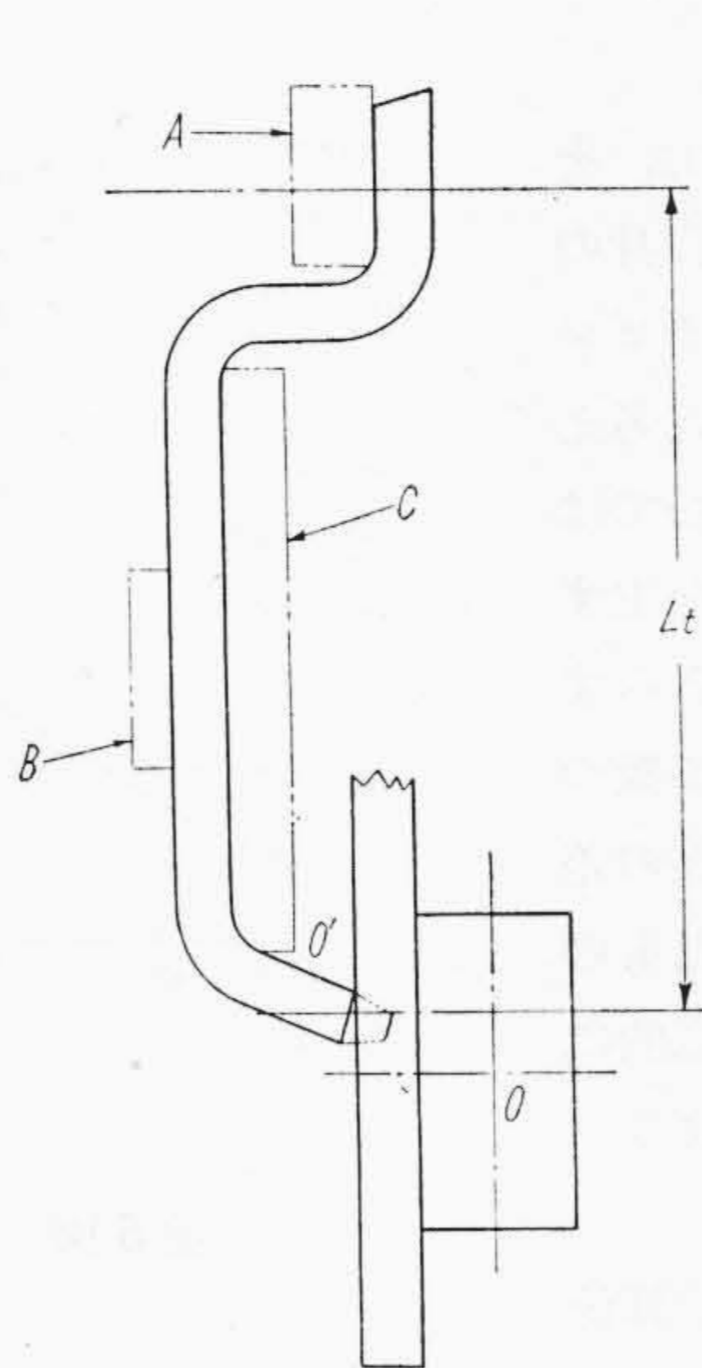
の3種類)をつくり、これを実際の交流電磁接触器にとりつけて試験を行つた。この際、附加重量A, BおよびCを適当に加減してO'およびOまわりの慣性モーメント $J_o'$ および $J_o$ をいろいろに変化させた場合の躍動を測定した。

第3図は躍動記録回路で、固定、可動両接触子間に乾電池によつて一定電圧1.5Vをかける。回路には電磁オシログラムの振動子が直列に入っているから、両接触子が接触していれば振動子は電流を記録する。躍動時には、接触状態が破れるから、オシログラム上では、断続線となつて表われる。このようにして得られる躍動オシログラムの一例を第4図に示す。

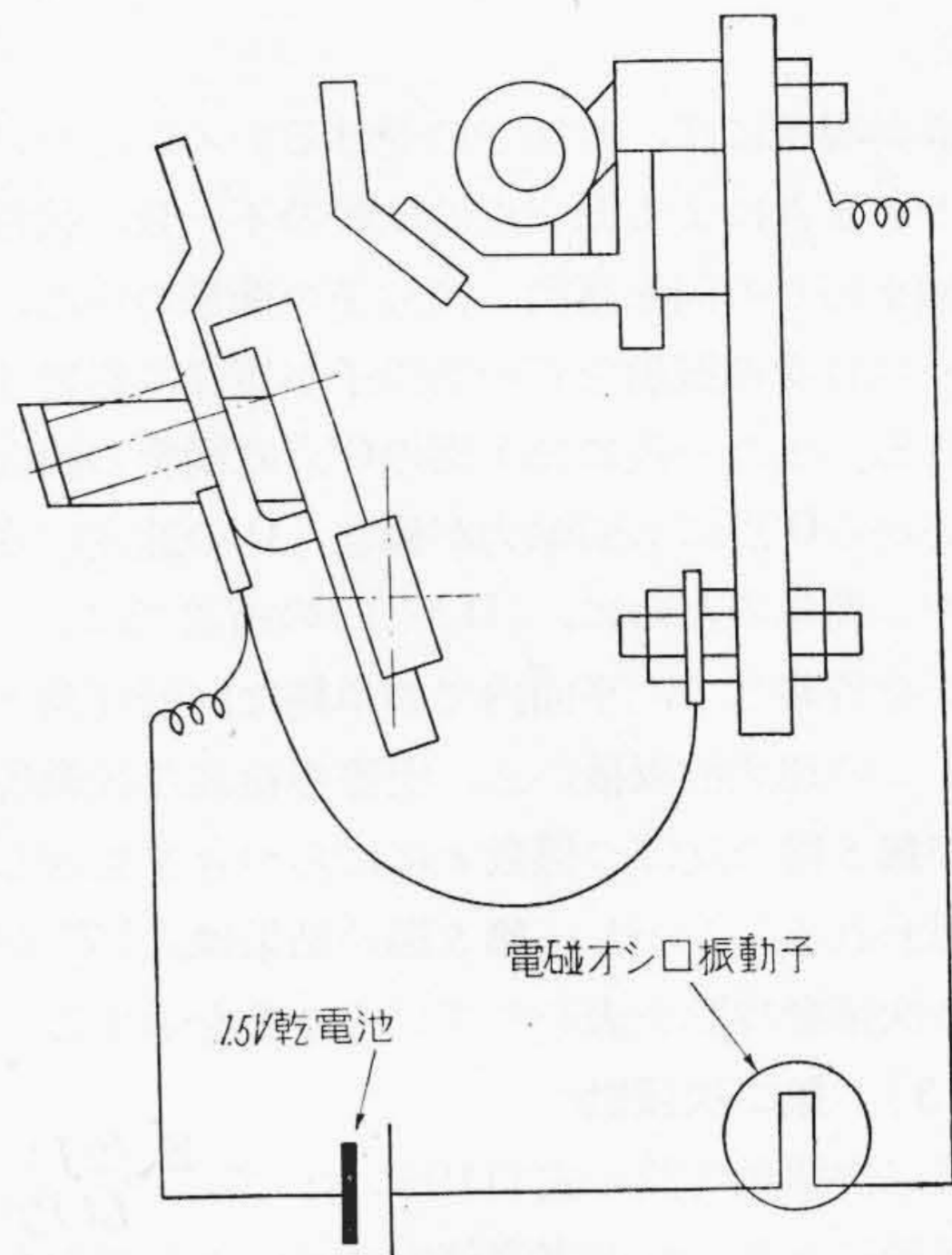
この各破断部に相当する時間を、オシログラムから求めて合計すれば、それが、その時の全開離時間になる。この方法は、躍動時間を知るのに簡単適切ではあるが、躍動変位量の測定はできない。しかし〔II〕(1)の終りでも述べたように前者を少なくすれば後者も少なくなるから、また躍動の微小変位量を測定するのは簡単でないから、この方法を採用した。

(2) 第一次躍動

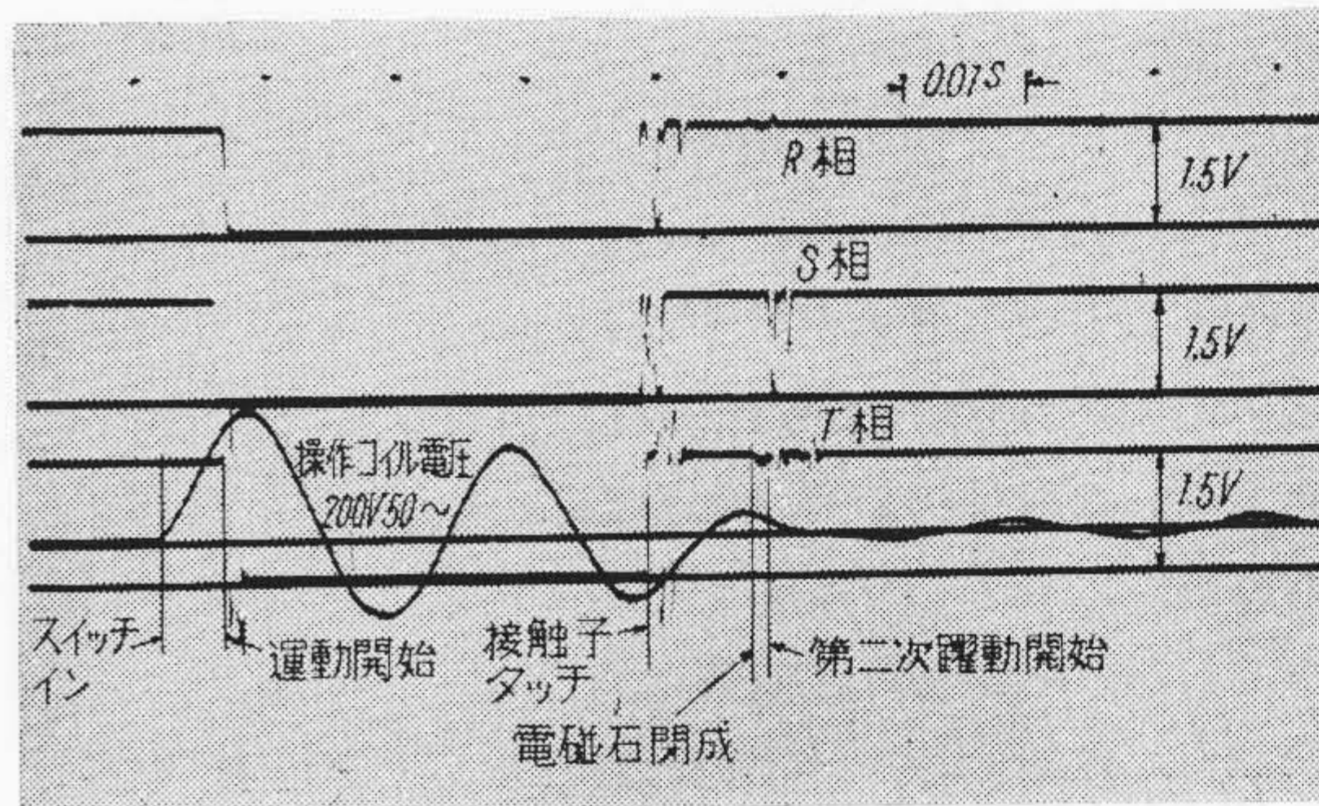
第一次躍動時間の理論式(7')において $\tau_1$ の実測値と、 $\frac{2\sqrt{J_o J_o'}}{Lt Pi} \omega_o$ の計算値から反ばつ係数 $e$ を逆算して、グラフ上に表わすと、第5図のようになる。 $e$ は0.2~0.5の範囲に散らばつてゐるが、これを統計的に処理して平均値 $e = 0.37$ 、不偏分散 $(0.046)^2$ を得た。すなわちこの場合反ばつ係数 $e$ は90%の確率で $0.37 \pm 0.076$ の範囲に分布していることがわかる。したがつて式(7')を十分信頼できるものとする。なお上記において、 $J_o J_o'$ は計算可能であり、 $Pi = 2\text{kg}$ (一定)に保つた。 $\omega_o$ は、躍動オシログ



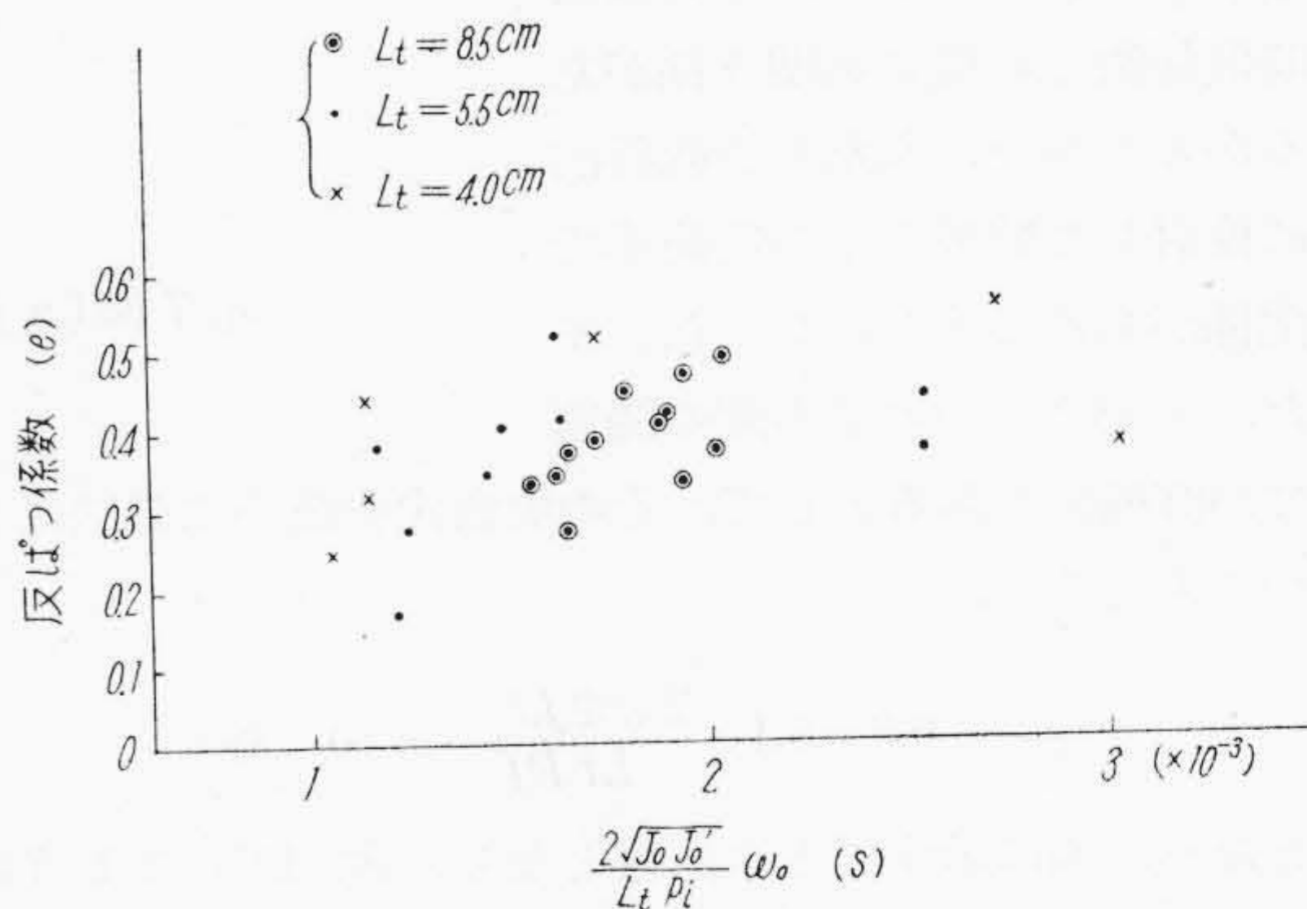
第2図 試験用可動接触子



第3図 躍動記録回路



第4図 躍動オシログラムの例



第5図 第一次躍動時間( $\tau_1$ )の実測値から得る反ばつ係数( $e$ )

ラムから得られる平均角速度をとつた。装置の制約上躍動時間と $\omega_o$ とを同時に測定できなかつたからである。

操作電磁石の線輪電圧を一定(200V 50 $\sim$ )に保つて測定したが投入時間、したがつて $\omega_o$ はスイッチ投入時の電圧位相によつてそれぞれの場合について異なることが判明

した。

躍動現象には、接触子の受けるいろいろの摩擦力、そのときどきによる衝突点の位置の不一致、接触子自身の縦軸まわりの回転運動、接触子の衝撃の中心、ワイピングバネ自身の振動などの諸因子が複雑に影響すると考えられる。また一般に第1図のO'点は衝突の瞬間中心ではないからO'点にも衝撃力が働き、O'の速度に変化を生ずる<sup>(4)</sup>。簡単のために、[II](1)の所論では、これらのすべてを省略して、平面内での単純な回転運動として扱った。この理想的取扱いと、実際の複雑な躍動現象との差異が第5図の反ばつ係数*e*にばらつきを生ぜしめたものと思われる。しかし、第5図の結果は式(7)が近似的に第一次躍動時間を表わしていることを示すといえよう。

(3) 第二次躍動

第二次躍動時間の式(11')において、 $\frac{2\sqrt{2J_0'}}{LtPf}$ の計算値を横軸にとり、 $\tau_2$ の実測値をプロットしてみたが実測値のばらつきがはなはだしかった。

これは可動接触子に与えられる衝撃エネルギーの量  $E_M$  が一定値ではなく、個々の場合についてきわめて不規則的に変ることによるものと考えた。すなわち[II](2)で述べたように、取付盤あるいは取付枠の弾性振動の不規則性にもとづくものとしたのである。そこで互に近隣した  $\frac{2\sqrt{2J_0'}}{LtPf}$  に対する実測値の平均値をプロットして、第6図を得、さらにこれについて、 $\tau_2$ と躍動時間係数との間に相関々係があるかどうかを、ふたたび統計的に検討した結果1%の危険率で関係があることがわかった。また、上記の二つの量の間の関連性が直線的であるとして、その実験式を最小二乗法によつて求めると、

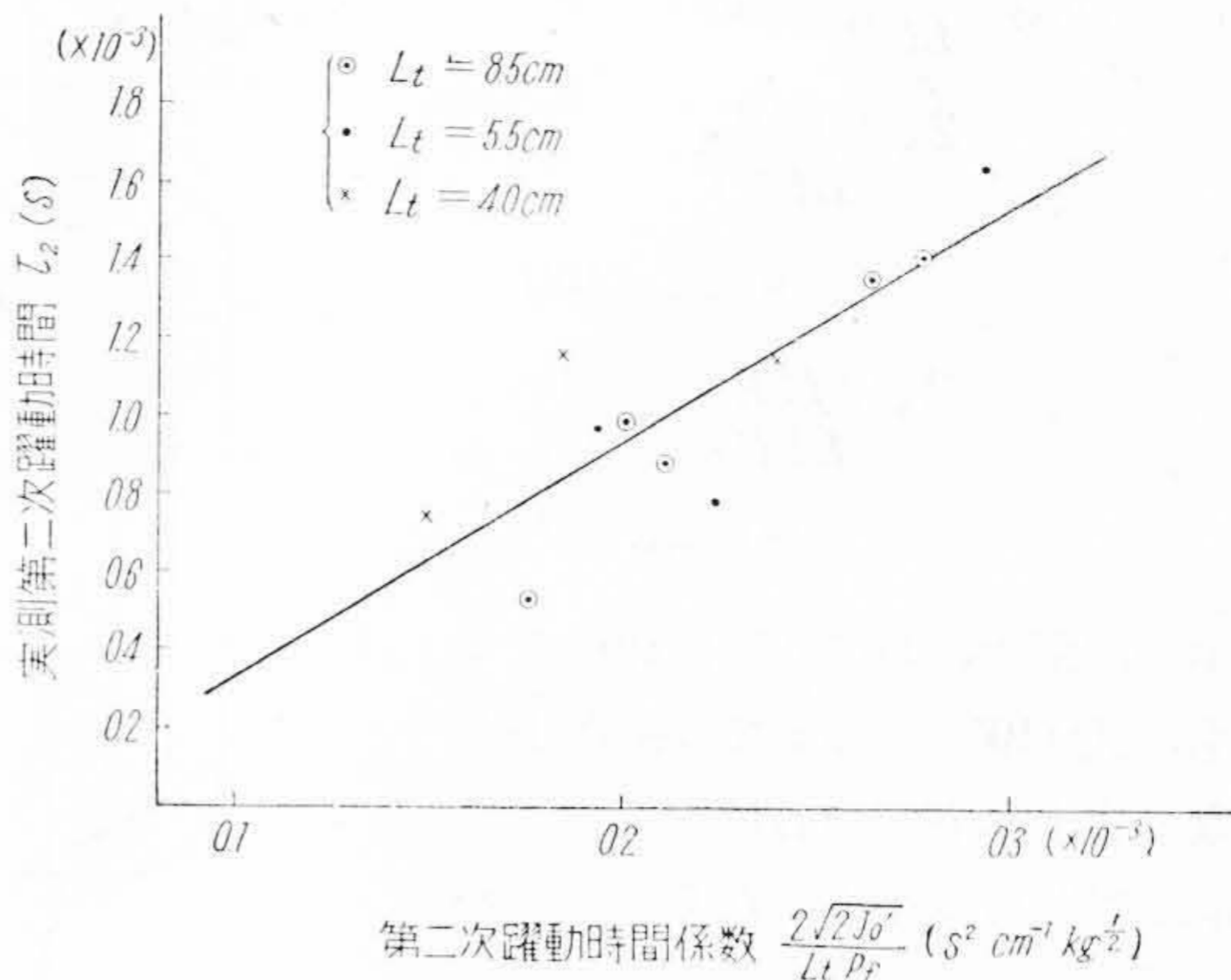
$$\tau_2 = -0.3 + 6.1 \times \frac{2\sqrt{2J_0'}}{LtPf} \quad (\times 10^{-3} \text{ 秒})$$

となり、図に示すごとき直線となり、式(11')のように原点を通らない。

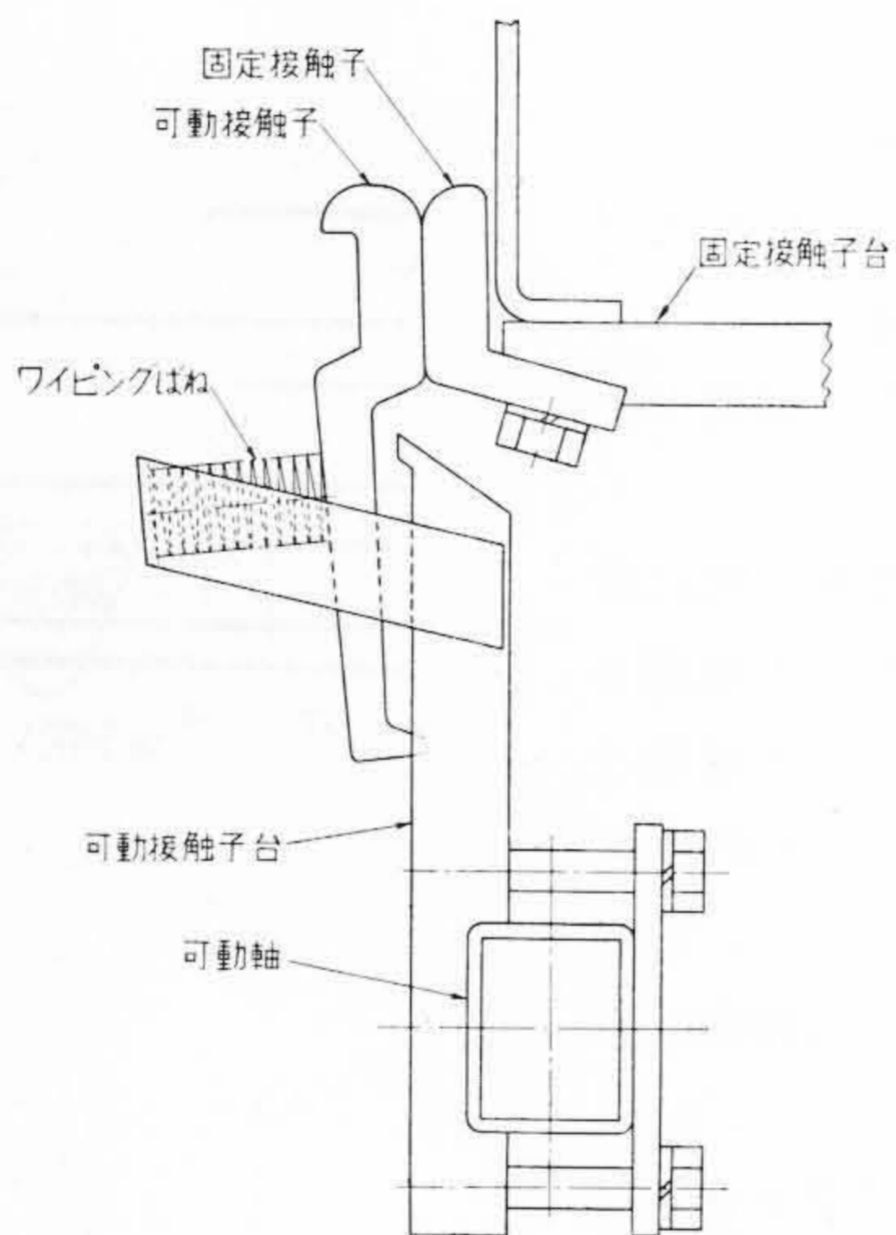
結論として、式(11')は、 $E_M$ の不規則な変化を含みながら、第二次躍動時間のごく大まかな傾向を示すというにとどめる。

[IV] 躍動から見た接触子形状

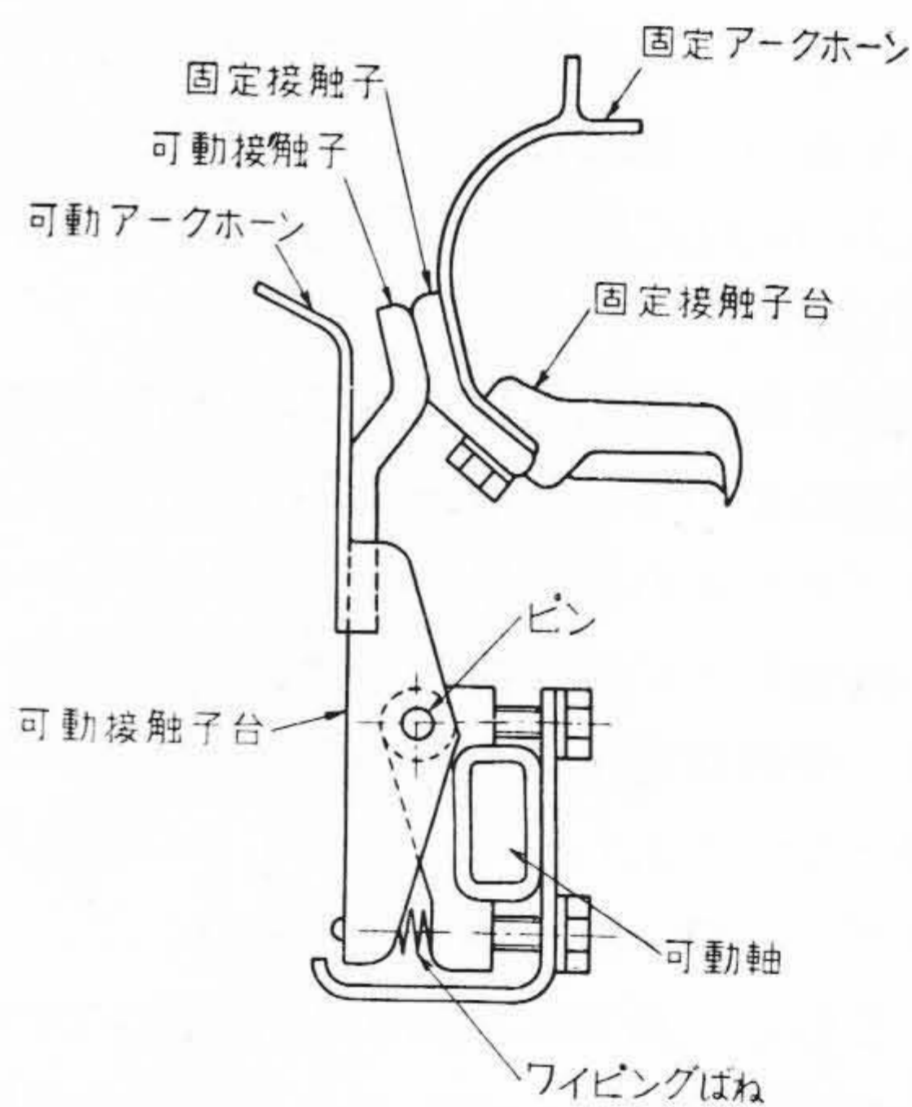
前述のごとく、第一次躍動時間  $\tau_1$  は式(7)により、第二次躍動時間  $\tau_2$  は(11')により近似的に表わされること



第6図 第二次躍動時間( $\tau_2$ )の実測値



第7図(a) 新型接触子部分



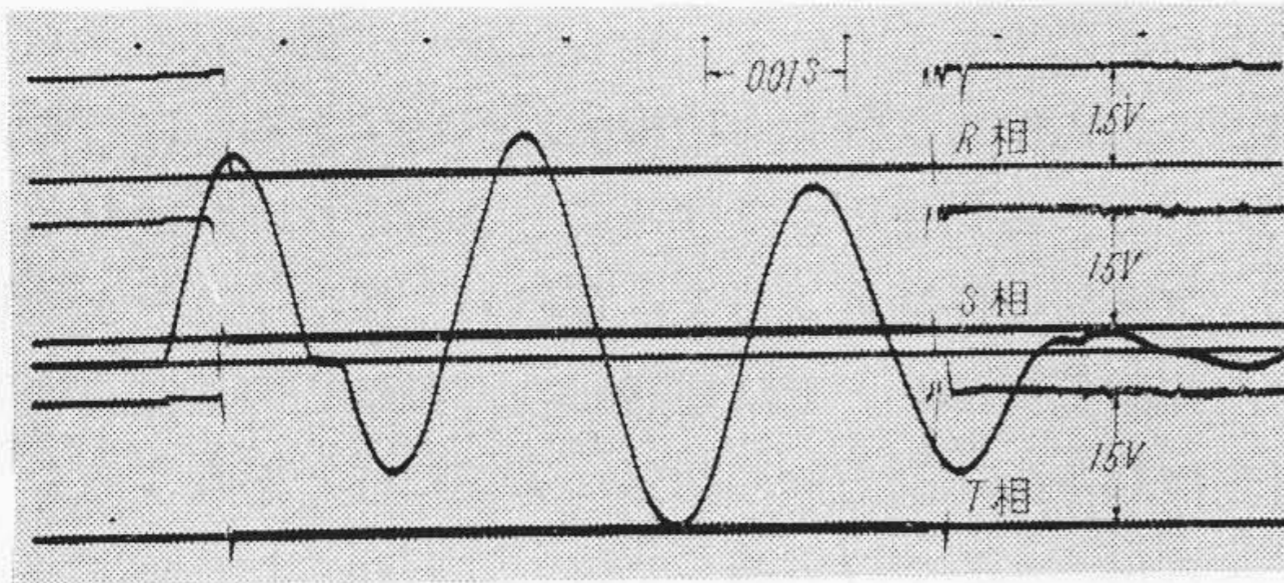
第7図(b) 試験用接触子部分

が知られた。したがって接触子形状は式(7)および(11')より  $\frac{2\sqrt{J_0 J_0'}}{LtPi}$  (第一次躍動時間係数と名づける) および  $\frac{2\sqrt{2J_0'}}{LtPf}$  (第二次躍動時間係数と名づける) ができるだけ小となるようにきめなければならない。

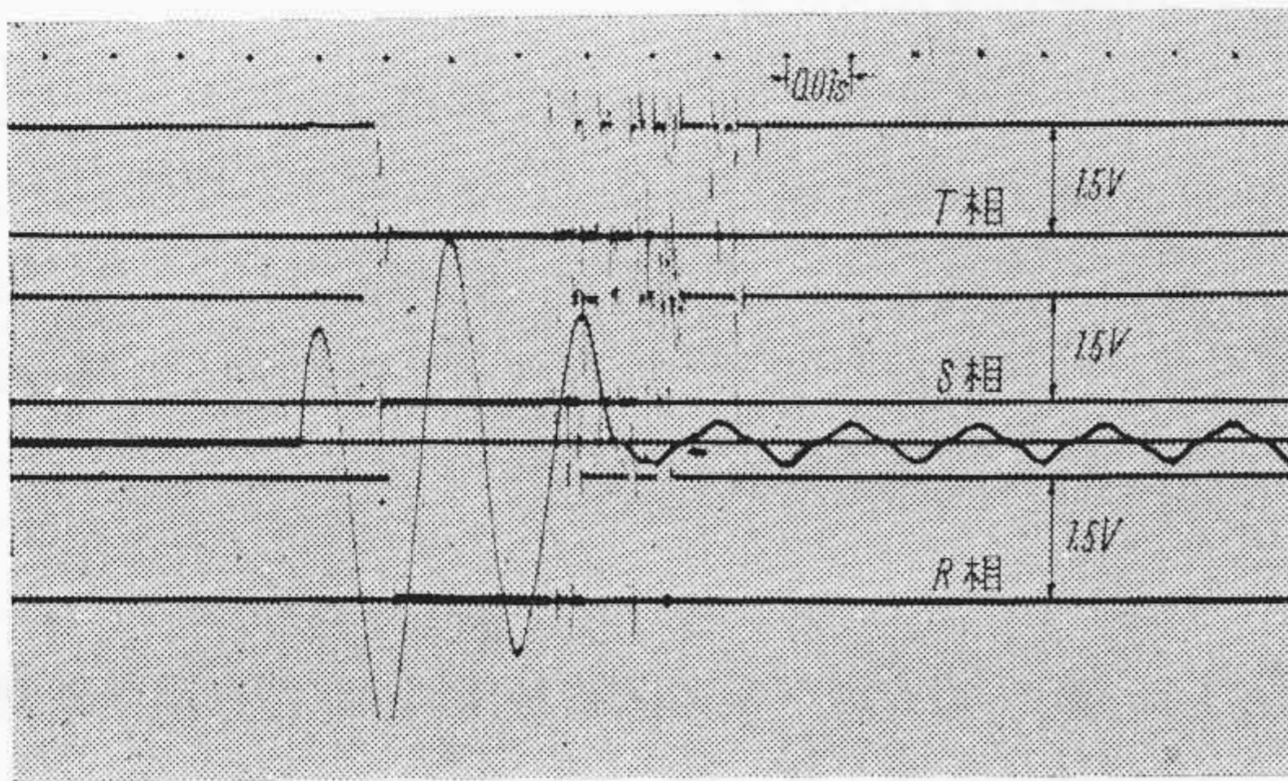
しかし、実際の接触器に適用する際にはほかの面からの制約もあつて、かならずしもこれのみから考えることもできないが、要約してつぎの二項にまとめることができる。

(i) 接触子の形状

同じ  $Lt$  の値に対して  $J_0$  および  $J_0'$  の値を小さく取りうるような形状でなければならぬ。かくすることによつて第一次および第二次躍動時間係数を小さくす



第8図(a) 新型接触子部分の躍動オシログラム



第8図(b) 試験用接触子部分の躍動オシログラム

ることができる。

(ii) 接触圧力

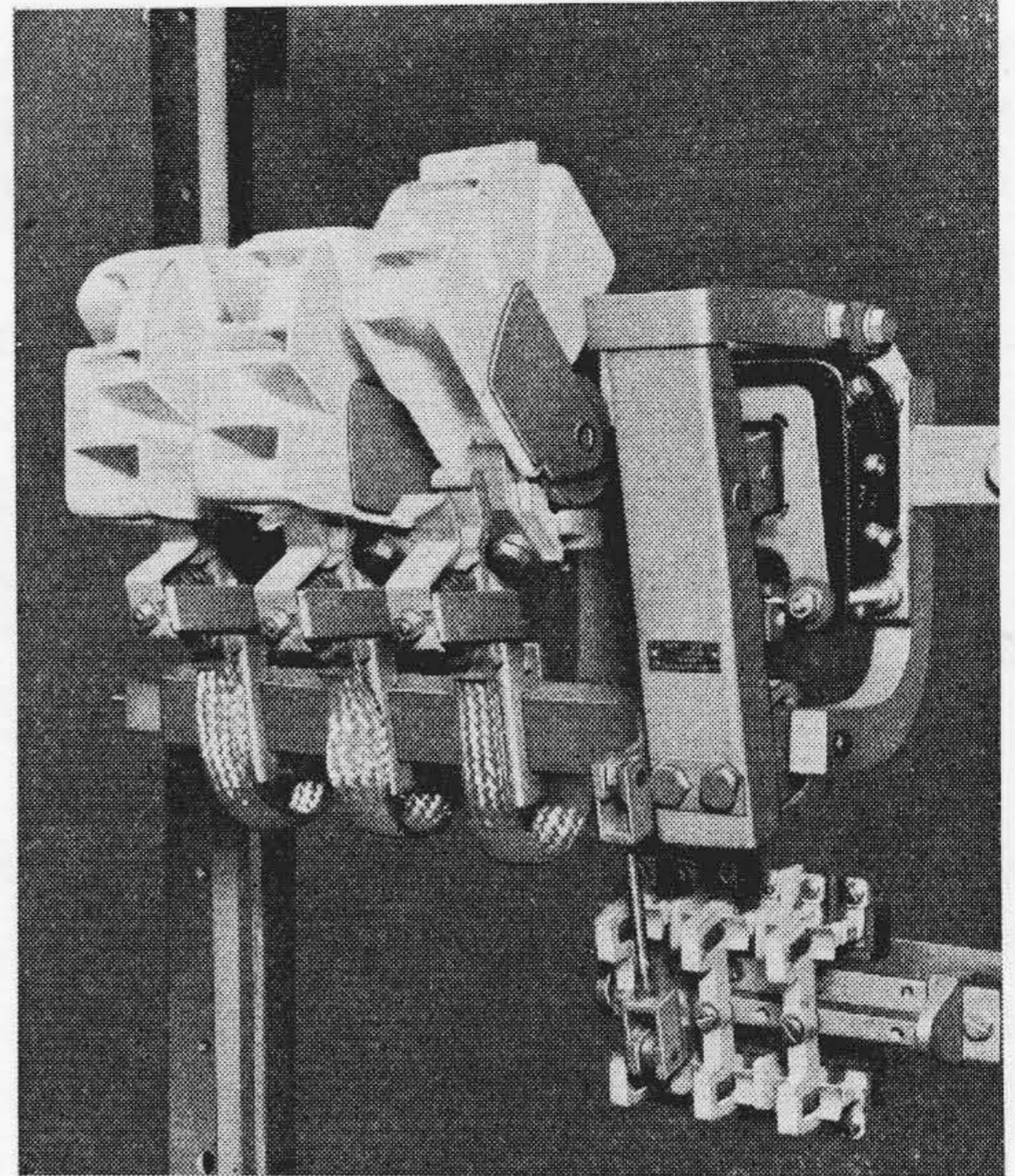
躍動時間係数だけからいえば、接触初圧  $P_i$  と接触終圧  $P_f$  とは大きい程よいわけであるが、一方これらをあまり大きくすると、操作電磁石は大型となり、衝撃エネルギーが増大して躍動を増す傾向を生じる。しかも接触圧力とくに初圧は溶着の面から一定圧力以上を要求されるので、実際にはこれらの点を考慮して電磁石の動作をさまたげない範囲で  $P_i$  および  $P_f$  の値をなるべく大きくとり、余分な吸引力を減少せしめて、式(7)の  $\omega_0$  や式(11)の  $E_M$  を小にすることを考慮すべきである。

上述のような、接触子形状決定に対する基本的な考え方にもとづいて設計された接触子部分を第7図(a)に、試験用として躍動が多く起るよう設計された接触子部分の一例を第7図(b)に示す。第8図(a)および(b)は、それぞれ上記二種類の接触部分の躍動オシログラムである。

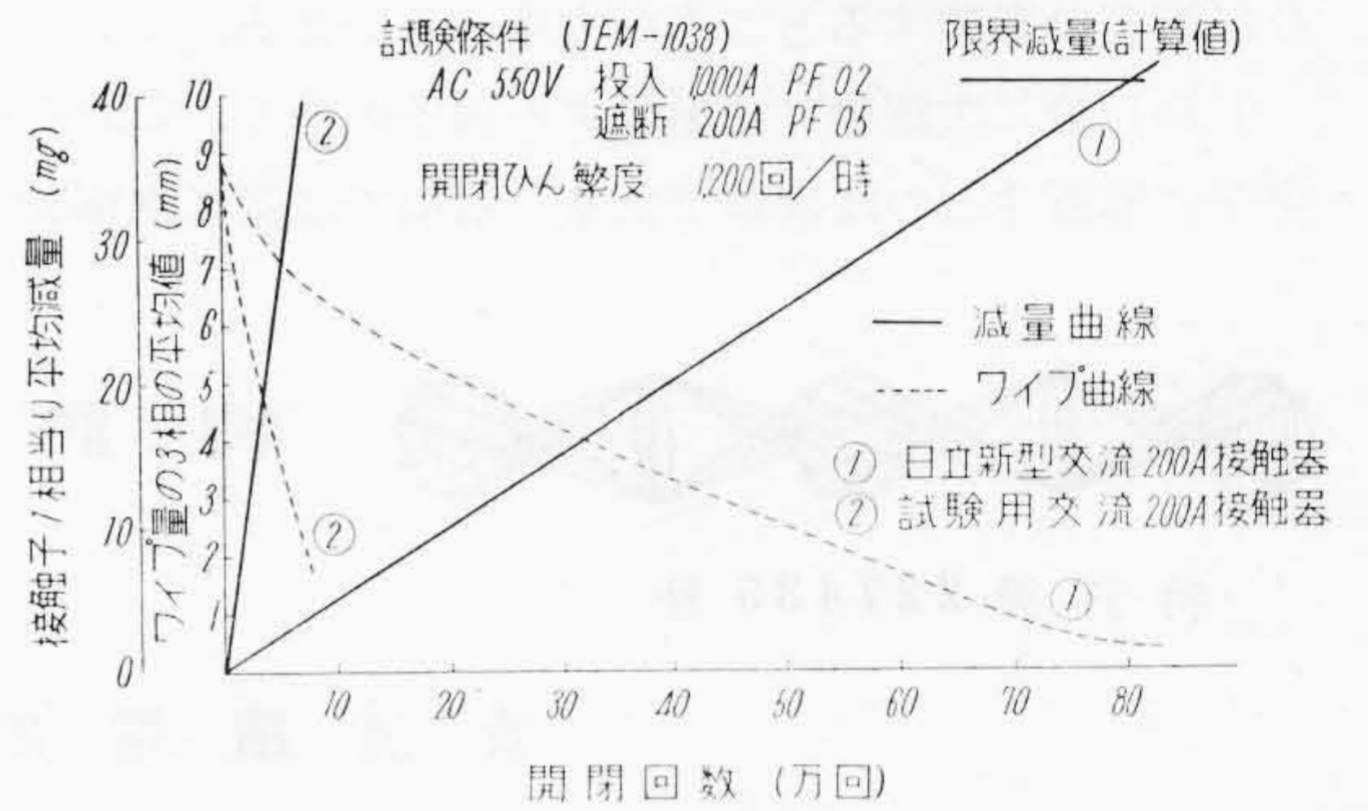
[V] 新型接触器の性能

以上の理論的考察および実験結果にもとづいて設計された新型電磁接触器はすぐれた性能をもつことが確認された。第9図に新型交流200A電磁接触器を示す。

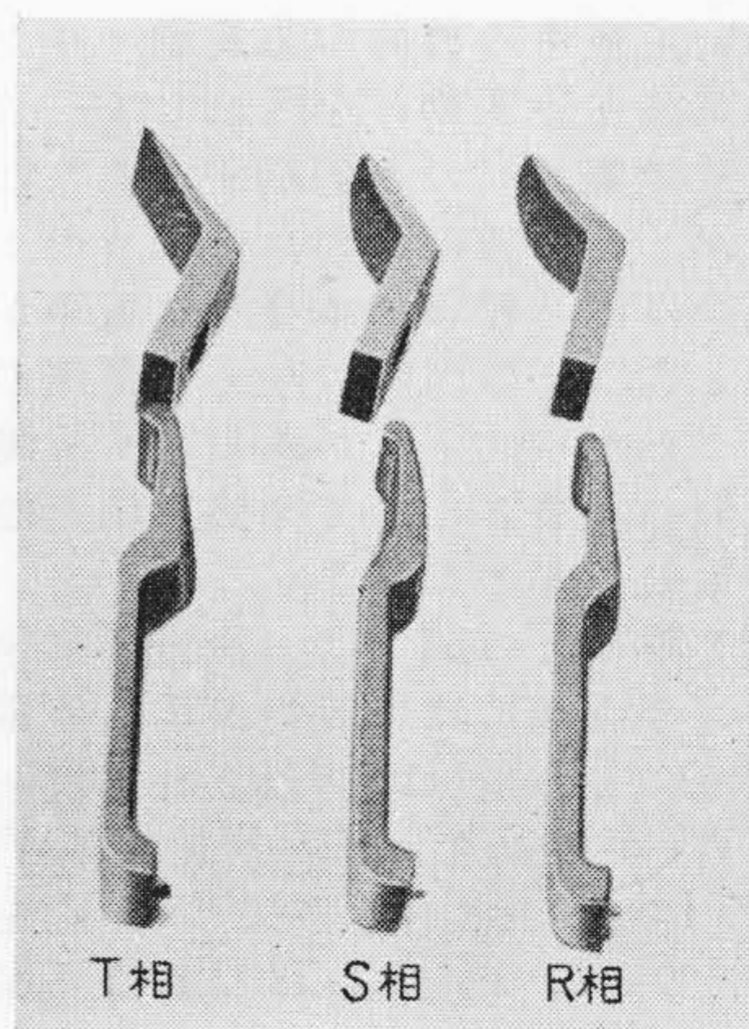
第10図はその接触器についてなされた開閉ひん繁度1,200回/時における電氣的寿命試験の結果で、接触子重量の減少量(接触子の寿命を直接表わすには、この量によると都合がよい。)およびワイプ量(接触深さ)の減少を開閉回数に対して示す。図において、限界減量とは接触子の使用限界を重量の減少量で示したもので、あらか



第9図 新型交流200A電磁接触器



第10図 日立新型交流200A接触器の電氣的寿命試験結果



第11図 電氣的寿命試験80万回終了後の接触子の消耗状況

じめ計算して求めた。図に示すように新型接触器の寿命は80万回に達し、JEM-A級1号1種に合格するものである。同図には、躍動のやや多い試験用接触器(第7図(b)はこの接触器の接触子部分)について同じ試験を行った結果を示してあるが、両者を比較しても、躍動が接触子の電氣的寿命にいかにか大きな悪影響を与えるがよくわかる。第11図に、上記新型接触器の接触子の電氣的寿命80万回後の消耗状況を示す。

溶着についてもまったく同様に、試験用接触器では、JEMによる閉路容量試験には合格するにもかかわらず、10万回足らずの動作中に数回溶着しているのに、新型では寿命試験中、溶着は一度も起きなかつた。

同様な設計方針により、200A型のほかに100, 400, 600および1,000A型の交流電磁接触器を開発し、いずれも接触子の躍動を少なくして寿命をいちじるしく改善し、苛酷な使用条件に適合するものとして、現在各方面に広く用いられている。

## [VI] 結 言

接触子の躍動によつてもつとも強く支配されるものが電流閉路の際の電弧による、接触子の消耗ならびに溶着であることは前に述べた通りである。この場合、閉路時の過渡現象によつて、第一次躍動の間では電流値はまだ小さいが、第二次躍動の間ではすでに全電流に達しうるので、第二次躍動の方がはるかに接触子の消耗ならびに溶着に影響するところが大きいといえる。

しかし第二次躍動には影響する因子が多く、これらを完全に解析するのは困難である。本稿では第二次躍動の

直接の原因である $E_M$ を一定と仮定して論じたのであるが、さらに第二次躍動を積極的にへらすためには、この $E_M$ をできるだけ小さくすることを考えなければならない。筆者らの経験によると、電磁石と接触子部分との相対的位置関係、たとえば電磁石の可動鉄心の運動方向と可動接触子の運動方向の関係が $E_M$ に強く影響するようであるが、ここでは省略した。これら残された諸問題は今後さらに研究をつづけ、より一層優秀な接触器を世に送り出していく所存である。

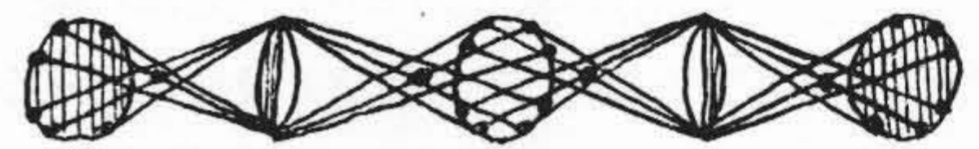
おわりに、本研究に関し有益な御指針を賜つた日立製作所日立工場藤久保工場長、日立研究所今尾部長、日立工場稲木部長および泉副部長、直接製作および試験を担当された制御器製作課、検査課制試係の方々に厚く御礼申し上げる次第である。

## 参 考 文 献

- (1) 鳳：電気接点と開閉接触子 144 (昭-25克誠堂)
- (2) 日立評論 39, 45 (昭32-1)
- (3) 森泉：日立評論 27, 79 (昭19-2)
- (4) W. Laig-Hörstebroek: ETZ-A 74, 41 (Jan. 1953)



## 特 許 の 紹 介



特許第227435号

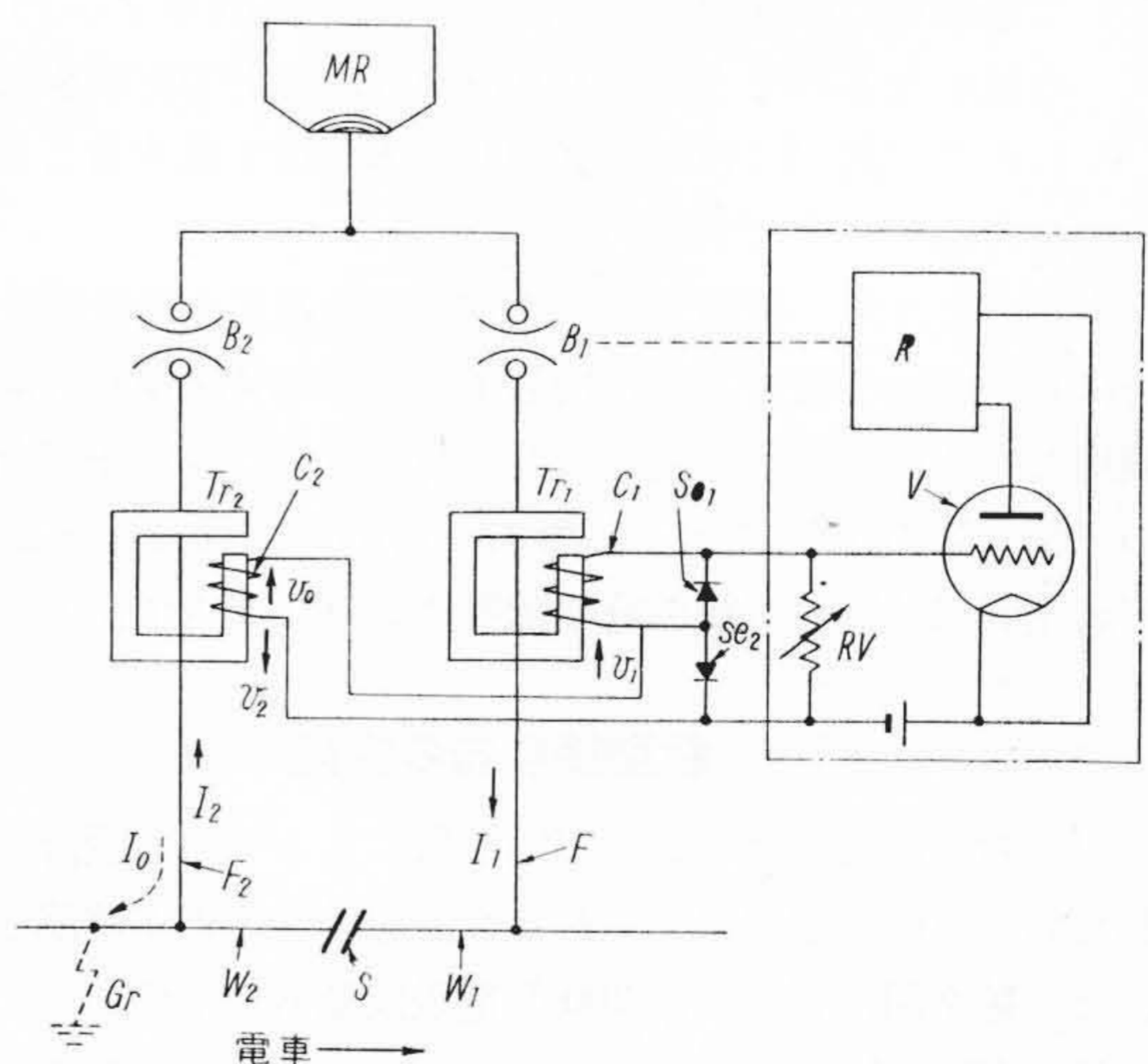
平井善一郎

## 直 流 饋 電 線 保 護 継 電 装 置

直流饋電線の保護において電車の負荷の急変動と接地または短絡など故障時の電流の急変動とを区別して、負荷の急変動には応ぜずに故障電流にのみ応動するような対策は種々公知に属するが、この種のものには色々のケースがあつてなかなか万全は期し難い。本発明は電車がある一区間に入つてくるとき、その区間に与える電流の変動が非常に急激であることから、これがあたかも故障電流の生じたときと近似の現象となつて回路を誤遮断することあるに鑑みて対策したものである。

サイラトロンVの格子と陰極との間には二次電圧選別用抵抗RVが接続され、この両端には急峻電流による電圧は出るが緩徐変化の電流による電圧は抹殺されて現われない。電車がトロリー $W_2$ からセクションSを経て $W_1$ に突入するとフィダ $F_1$ の $I_1$ は急増し $v_1$ によつてVを動作せしめようとするが、フィダ $F_2$ の $I_2$ は反対に急減するので $v_1$ と反対方向の $v_2$ が生じ両者は互に相殺してVを動作せしめることがない。このようにした場合故障が $W_2$ 側にGrのように生じて $I_0$ が新たに加わつた場合にはそれによつて $v_0$ なる故障電圧が生ずる。放つておけばこの $v_0$ によつてVは動作し遮断器 $B_1$ を誤遮断するおそれがある。

$Se_1$ および $Se_2$ は変流器 $Tr_1$ および $Tr_2$ の二次線輪 $C_1$ および $C_2$ に並列に接続されたセレン整流器で、電圧 $v_0$ は $Se_2$ によつて短絡されるので $Se_2$ および $Se_1$ の接続によりVの誤動作を避けることができる。 $Se_1$ には別の用途がある。接地故障などが $W_1$ 上に生ずると $F_1$ 側に $I_0$ が現



われ $C_1$ に $v_0$ が生ずるが $Se_1$ はこれを短絡することがないのでそのまま抵抗RVの電圧を高めてVを動作させ自回路の遮断器 $B_1$ を遮断して故障を掃とうことになる。本装置は東海道線草薙変電所における競演で最良の成績を収めた。(宮崎)