

水銀灯用定電流変圧器

Constant-current Transformer for Mercury Lamp

松村和男* 松田茂晴* 佐藤博*
Kazuo Matsumura Shigeharu Matsuda Hiroshi Satô

内容梗概

定電流変圧器は古くから知られているが、従来わが国では直列点灯方式がほとんど採用されることがないので実用された例はない。最近道路照明に水銀灯を用いる例が多くなり起動特性の良い直列点灯方式が再検討され、実用段階に入ったのでこの方式の電源変圧器である定電流変圧器を完成した。定電流変圧器の製作に当たって考慮すべき点は負荷インピーダンス変化の許容範囲選定と定電流特性の精度をいかに高めるかにあるといえる。完成した現品につき試験した結果では、定電流特性はきわめて良好で、実際に水銀灯と組み合わせた実用試験においても満足すべき結果が得られた。

1. 緒言

道路照明には直列点灯方式が適しており、アメリカでは現在も盛んに用いられているが、わが国ではいまだその実例がほとんどない。この方式は配電線の銅量が少なく済むという利点があるにもかかわらず回路電圧が高くなる結果、従来は並列点灯方式よりも設備費の面でむしろ高価となり普及しなかったものとする。最近の道路照明には、水銀灯を用いる例が多くなってきているが、この水銀灯は従来の並列点灯方式によるよりも直列点灯方式によるほうが起動特性が良く原理的に有利である。また技術の進歩により高圧ケーブルもよほど安価に得られるようになってきたので、今後はわが国でも直列点灯方式の普及が急速に進むものと思われる。

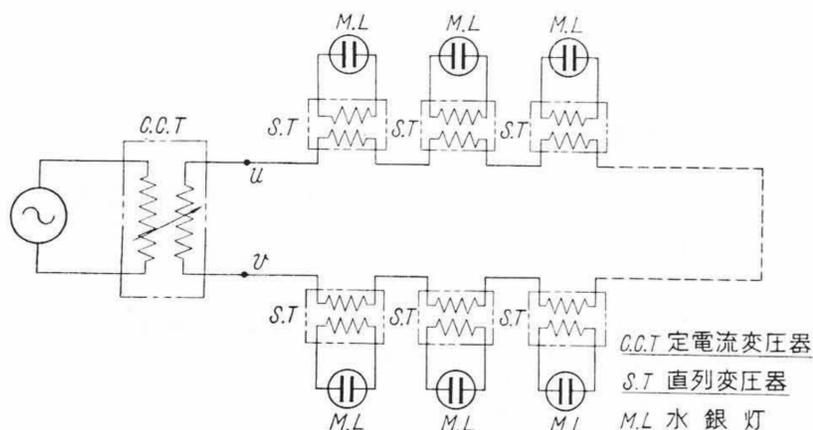
日立製作所ではこの気運にさきがけて直列点灯方式の電源変圧器である定電流変圧器の研究に努力を注いできたが、このほど実用機の完成を見たのでここに報告し参考に供するものである。

2. 直列点灯方式の利点

照明配電方式としては従来並列点灯方式が採用されてきたが、水銀灯の点灯には、直列点灯方式が有利であるので以下この点について述べる。

第1図は直列点灯方式の結線図である。同図に示すようにすべてのランプはそれぞれの絶縁変圧器を介して接続されており、おのおの絶縁変圧器の一次側はすべて直列に接続されている。このため次の利点がある。

- (1) 直列回路であるからいずれの直列変圧器にも同一電流が流れるので配電線末端においても明るさの低下する心配がない。
- (2) 配電線の銅量が少ないので長距離にわたって配線する場合は経済的に有利である。



第1図 水銀灯直列点灯回路

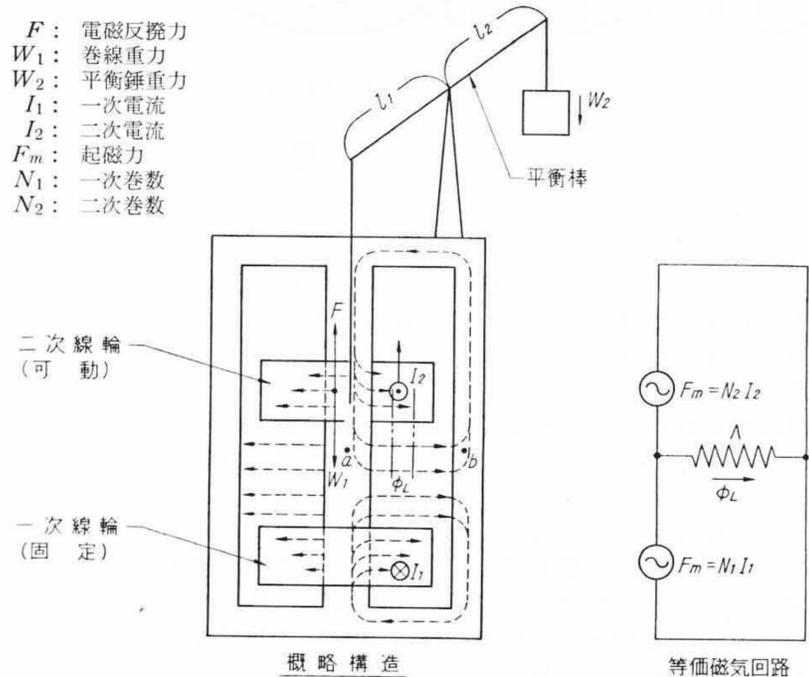
- (3) 低温でも確実に起動できる。

以上のうち(1)および(2)は白熱電灯を負荷とする場合にも同じことがいえるが、(3)は水銀灯を負荷とする場合の利点である。以下この理由を説明する。

水銀灯は放電管であるため一定値以上の起動電圧が必要であるがこの起動電圧は大なり小なりバラツキがあるのが普通である。さらにこの起動電圧は周囲温度の影響を受けやすく、低温になるにしたがい次第に高い起動電圧となる。並列点灯方式ではどのランプにもほぼ同じ電圧が印加されるから、起動電圧の高いランプは起動しがたく、電源電圧や周囲温度の影響を受けて起動困難なものが出て来ることはいぬめない。これに対し直列点灯方式では、すべての絶縁変圧器に同じ電流が流れているから、それぞれの絶縁変圧器の二次側にはほぼ同じ電圧が誘起され、起動しやすいランプが直ちにアークを発生することは並列点灯方式と同様であるが、起動直後の水銀灯は管内の水銀蒸気圧が低いのでアーク電圧は非常に低くほとんど0インピーダンスの状態となる。このため第1図u~v間から見た回路のインピーダンスが減少し回路電流は増加する。一方、未点灯ランプは電極間が絶縁状態にあるから、絶縁変圧器の二次側には電流が流れず、一次側の電流はすべて励磁電流となり、回路電流の増加とともに二次電圧は上昇するので起動しがたいランプも次々と点灯するようになる。

3. 定電流変圧器の動作原理

第2図に定電流変圧器の動作原理図を示す。図示のように一次線輪は固定され、二次線輪は可動である。この変圧器に負荷すると負



第2図 定電流変圧器の動作原理図

* 日立製作所 亀戸工場

荷電流 I_2 により図の a～b 間に漏えい磁束 ϕ_L が流れる。この空間の磁束密度を B 、巻線の全長を l で表わせば巻線間には次式による電磁反発力 F が働く。

$$F = B l I_2 \dots \dots \dots (1)$$

a～b 間の空間の単位面積当たりのパーミアンスを A_0 とすれば

$$B = N_2 I_2 A_0 \dots \dots \dots (2)$$

であり、(1)、(2)式より次式を得る。

$$F = N_2 l A_0 I_2^2 \dots \dots \dots (3)$$

(3)式で N_2 および l は巻線仕様から定まる定数であり、 A_0 は鉄心形状によってほぼ一定値となるから、一括して定数 k で表わすと(3)式は

$$F = k I_2^2 \dots \dots \dots (4)$$

と書き直せる。

次に第2図で平衡棒が平衡している状態を考える。このとき次式が成立する。

$$(W_1 - F) l_1 = W_2 l_2$$

これより

$$F = W_1 - \frac{l_2}{l_1} W_2 \dots \dots \dots (5)$$

となる。すなわち平衡状態にあるときは(4)、(5)両式から下式が成り立つ。

$$I = \sqrt{\frac{1}{k} \left(W_1 - \frac{l_2}{l_1} W_2 \right)} \dots \dots \dots (6)$$

ここで W_1 、 W_2 、 l_1 、 l_2 、 k はすべて一定であるから平衡棒が平衡しているときは常に電流は一定値となる。

次に不平衡状態を考える。たとえば負荷インピーダンスが減少して電流 I_2 が増加した場合には電磁反発力が大きくなり、可動線輪は上方に移動する。したがって一次、二次線輪間隔が広くなり変圧器内の漏えいリアクタンスが増加する。このため回路の電流は線輪の移動とともに減少するが、電磁力が(5)式の平衡条件を満たすようになったところで線輪は停止する。このとき(5)式の右辺にはなんら変化がないから(6)式も成り立ち、電流値は元の値と同じになる。負荷インピーダンスが増加したときは上述の逆の過程を経て矢張り電流は元の値にもどり、いずれにしても定電流特性が得られる。

4. 定電流装置としての定電流変圧器の利点

定電流装置として掲げられるものに鉄共振形や磁気増幅器形定電流装置があるが、それらの装置と比較した定電流変圧器の利点として次の点があげられる。

- (1) 構成電気部品が少なく故障を起こしがたいので保守点検の必要が少ない。
- (2) 配電線に許容される程度の周波数変動には影響を受けない。
- (3) 一般配電線に見られる程度の電圧変動があっても電流値は変化しない。
- (4) コンデンサ、リアクトルを用いないので共振による異常電圧の出るおそれがない。
- (5) 可動接点がなく、平衡錘を移動するだけで、連続的に電流値を変えることができるので、小形電動機を追加するだけで容易に調光することができる。

一方、応答時間のやや大きい点および可動部分のあることが欠点として考えられるかも知れない。しかし水銀灯は瞬間的な過電流があっても、白熱電球におけるような寿命短縮の懸念はなく、かえって起動を促進し利点の方が大きい。諸外国においては白熱電球の直列点灯に定電流変圧器を使用している実績も多い。次に可動部分については次の理由により強度、寿命などの心配はない。

- (a) 定常運転中の可動線輪はほとんど静止している。
- (b) 可動線輪が急激な運動をする起動または停止は装置の性質上、1日に1回程度である。
- (c) 起動時においても軸受の回転速度は60(rpm)、回転角は最大60度程度である。
- (d) 可動部分重量をささえる軸受の荷重安全率は十分大きくとることができる。

以上に述べたように定電流変圧器は幾多の特長を有している。このため、アメリカでは街路照明用直列点灯装置にはすべて定電流変圧器を使用しており、並列点灯とほぼ同数の設置例がある。

5. 水銀灯用定電流変圧器の仕様決定法

定電流変圧器の仕様は回路全体の電圧および電流に影響を及ぼすので、起動および調整が良好に行なわれるように、適切に選ぶ必要がある。

以下この決定方法について述べる。

(1) 一次電圧、周波数、定格二次電流

いずれも電源、負荷に合わせて任意に選ぶことができるが、定電流変圧器は電源電圧の変動があっても出力電流の変化はほとんどないので一般にタップ電圧は小さくてすむ。±5%程度のタップを設ければ十分と思われる。定格二次電流は負荷の仕様に合わせれば良いが、6.6A または20A が標準である。

(2) 二次電圧

起動条件および定電流変圧器の最小インピーダンス電圧にしたがって定める。

(3) インピーダンス

負荷回路の最大、最小インピーダンスにより定めるが、構造上の制約がある。

(1)項については特に問題ないので(2)、(3)項について次に述べる。

5.1 二次電圧

定電流変圧器の最小インピーダンス電圧と密接な関係にあるので直ちに求めることはできないが、次項により最小インピーダンス電圧 V_{zmin} を求めてから算出する。

この二次電圧は水銀灯の起動が順調に行なわれるに十分な値としなければならない。最低周囲温度における平均起動電圧 E_s 、そのときの電流 I_0 、灯数 n 、電源電圧変動率 ϵ はあらかじめ調べて置く必要がある。以上の値をもとに二次電圧 E_2 は次式で得られる。

$$E_2 = \frac{n E_s + \frac{I_0}{I_r} V_{zmin}}{1 - \epsilon} \dots \dots \dots (7)$$

I_r : 定格二次電流

(7)式では回路力率をほぼ0とみなし、定電流変圧器および回路の抵抗降下を無視しているが、直列変圧器を用いた水銀灯の起動時の回路力率は一般に数%程度であるから実用上問題となる誤差は生じない。

5.2 インピーダンス電圧の決定

インピーダンス電圧は最小値および最大値を定めて置けば良い。最小値は起動時の出力端子電圧を高くするためにできるだけ小さくすることが望ましいが、余り小さくすると短絡の際に瞬時的な過大電流が流れてランプの寿命をおびやかす。また構造的にも可動線輪の支持物があるため一次、二次両線輪を密着できないので25%以下は製作上困難であり、アメリカでも50%が標準となっている。最小インピーダンス電圧を50%以上にすると巻線の利用率が悪くなるので経済的には不利である。

次に最大インピーダンス電圧の決定である。一般には100%イン

ピーダンスのものを想定し勝ちであるが、4章で述べたように水銀灯の場合にはいくぶん低めにしてもさしつかえなく、かえって最大インピーダンスを低くすることは機器容量が小さくなり経済的である。限度は回路の最小負荷インピーダンスとの兼合いにより決定されるべきものである。

Z_{min} : 回路インピーダンスの最小値

I_r : 回路電流 (定格二次電流)

$\cos \theta$: 回路力率

E_0 : 定電流変圧器の二次電圧

としたとき定電流変圧器の最大インピーダンス電圧 V_{Zmax} は次式により求めることができる。

$$V_{Zmax} = \sqrt{E_0^2 - (I_r Z_{min})^2 \cos^2 \theta} - I_r Z_{min} \sin \theta \dots\dots (8)$$

一方 V_{Zmax} と E_0 により短絡電流 I_s は次式のようになる。

$$I_s = \frac{E_0}{V_{Zmax}} I_r \dots (9)$$

したがって (8) 式で求めた V_{Zmax} を (9) 式に代入して I_s を求め、この I_s が過度に大きくならぬように V_{Zmax} を決定すれば良い。

6. 平衡機構

定電流変圧器には巻線に生ずる電磁力を調整するための平衡装置と可動部分の損傷を防ぐための制動装置、緩衝装置が必要である。第3図に概略構造図を示す。

6.1 平衡装置

巻線内の電流と巻線に働く電磁力の関係は (4) 式より

$$F = k I_2^2$$

$$\therefore \frac{\Delta I_2}{I_2} = \frac{1}{2} \frac{\Delta F}{F}$$

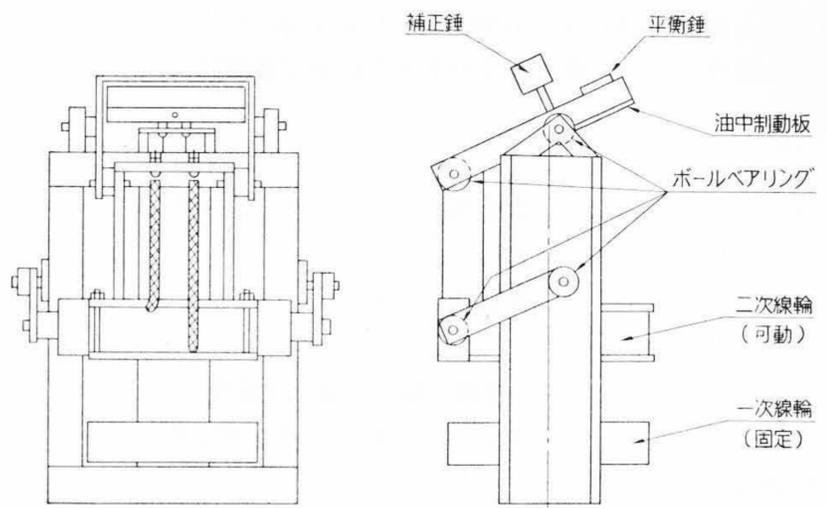
..... (10)

となる。すなわち平衡装置に1%の摩擦抵抗があると1/2%の電流変化が生ずる。定電流変圧器の可動線輪を支持する方法には幾つかの方法があるが、その代表例を第4図に示す。今回完成したものは同図(D)のものである。

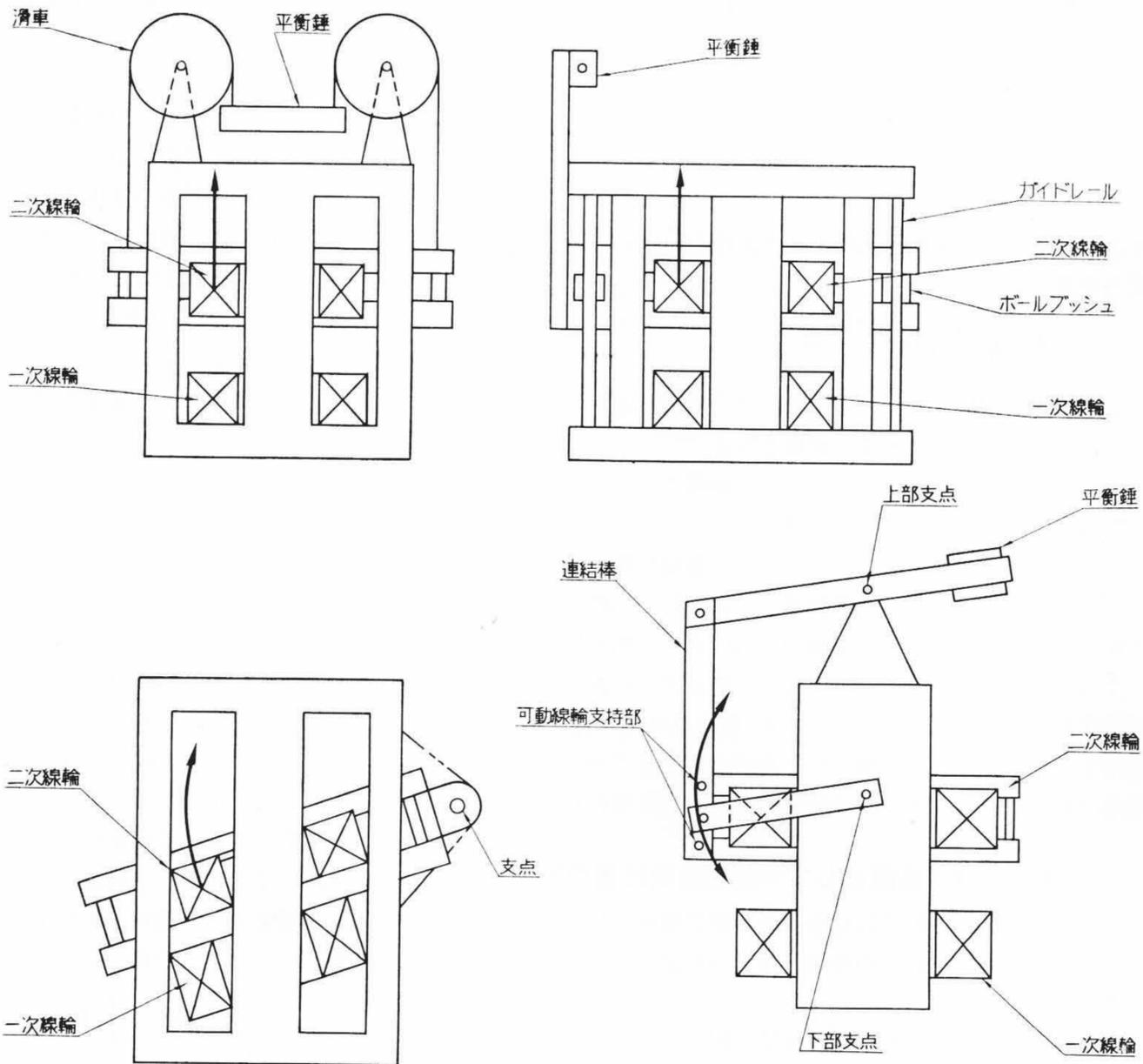
この方式では可動線輪は円弧運動をするが常に水平に保持されるので、平均巻線長が比較的小さく、銅量を節約できる利点を有している。またこの方式では変圧器を所定の場所に設置したとき、若干傾斜して平衡条件が変わっても補正装置を追加することにより容易に電流調整をすることができるので都合が良い。このほかに (3) 式でほぼ一定とみなした漏えいパーミアンス A_0 は、実際には線輪の可動行程の終端でわずかながら変化し、そのため定電流特性のひずむ傾向が認められる。これは漏えい磁束が上部継鉄心に向かって曲るためである。この変化をもこの補正装置により修正することができるので、一石二鳥の効果をうることができる。

6.2 緩衝装置

水銀灯の起動初期の内部インピーダンスはほぼ0に近い値であるため、電源投入の直後は可動線輪が急激に跳躍し、上部に衝突する。この衝撃から巻線を保護するため緩衝装置が必要となるが、緩衝板



第3図 定電流変圧器の概略構造図



第4図 各種定電流変圧器の線輪支持方式

をそう入すると線輪の可動行程が減るので、実際にはその分だけ鉄心を長くして実質的な可動行程が得られるようにしなければならない。緩衝板を大形にするほど、鉄心重量が増加し好ましくないが、水銀灯用定電流装置ではすでに述べたように応答特性のいかによる影響が少ないので可動行程中に制動をかけ、衝突直前の線輪速度を小さくし、緩衝板を小形にする方が好ましい。今回製作した装置では緩衝板として弾性板を用い、制動機としてオイルダッシュポットおよび油中制御板を用いた。その様子を第5, 6図に示す。

7. 試験結果

試験は次の項目について行なわれた。

単体試験

- (1) 損失測定 鉄損および銅損の測定
- (2) 電流測定 (a) 補正なし, 正置, 定格電圧

- (b) 補正付き, 正置, 定格電圧
- (c) 補正付き, ±5度傾斜, 定格電圧
- (d) 補正付き, 正置, 定格電圧 ±5% 電源電圧変化

- (3) インピーダンス測定 最小値および最大値の測定
- (4) 応答特性 電流応答および線輪速度の測定

実負荷試験

- (1) 順次消灯時の特性測定
- (2) 起動時の特性測定

7.1 単体試験結果

完成した定電流変圧器について上記項目の単体試験を行なった。実測値を第1表に示す。

7.2 実負荷試験

負荷としては日立ランプ株式会社製水銀灯40灯および等価インピーダンスを使用し日立ランプ株式会社の協力を得て起動, 消灯試験を行なった。第2表に水銀灯の仕様を示す。点灯中の水銀灯を消灯する方法としては次の3とおりの方法を行なった。

- (1) 直列変圧器の一次側を短絡する。
- (2) 直列変圧器の二次側を短絡する。
- (3) 直列変圧器の二次側を開放する。

直列変圧器の内部インピーダンスは非常に小さいので(1), (2)はほぼ同じ結果となった。

(1)の結果を第10図に, (3)の結果を第11図に示す〔(2)の場合は省略〕。

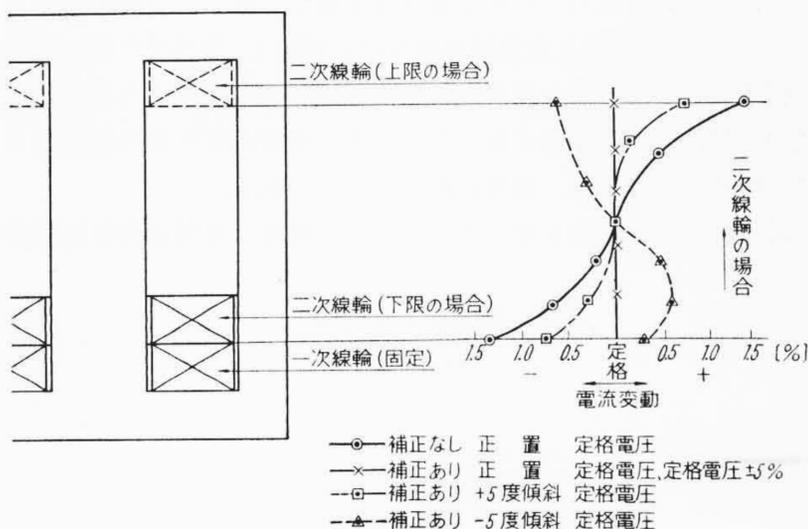
次に起動時の特性試験を行なった結果は第12図のとおりである。試験は直列変圧器の二次側をすべて開放し, 二次端子電圧を測定したこの電圧は水銀灯にアークを発生させるために印加される電圧であるから水銀灯の起動電圧以上でなければならない。すなわちこの結果からは49灯以下の回路であれば点灯できることを示している。

8. 結果の検討

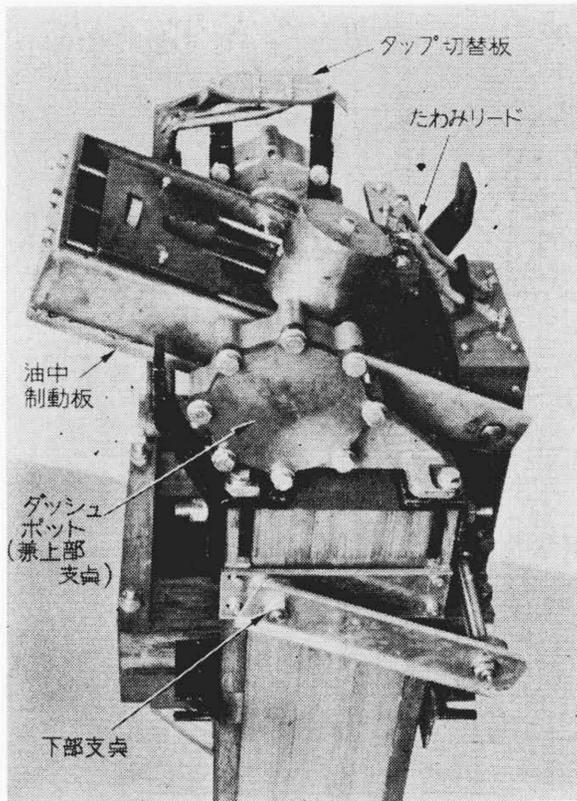
8.1 単体試験結果

電圧, 電流, 損失, インピーダンス電圧ともに所期の結果を得, すべてが正常に動作していることを確認した。

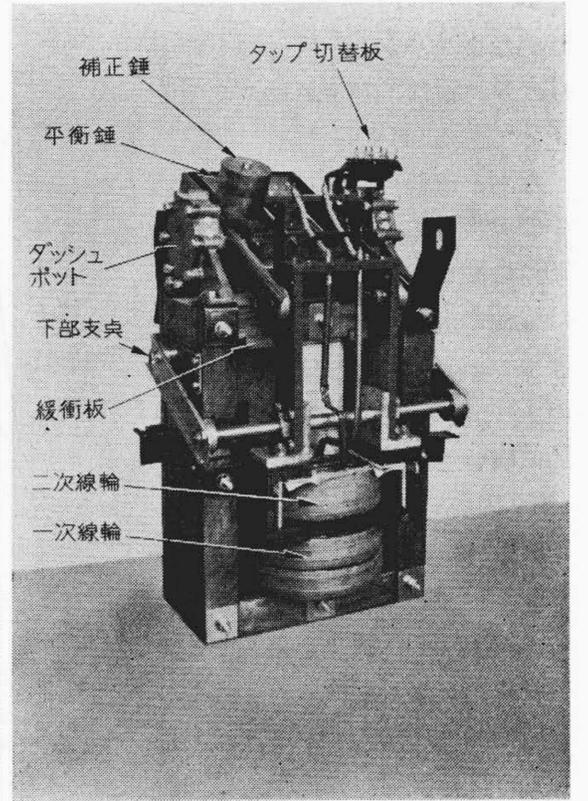
電流特性はきわめて良好で, 第7図に見られるように正置状態では電源電圧を ±5% 変化させても直続し得る電流変化は認められなかった。



第7図 定電流特性の試験結果



第5図 制動装置部分の写真



第6図 定電流変圧器本体の外観写真

第1表 単体試験結果

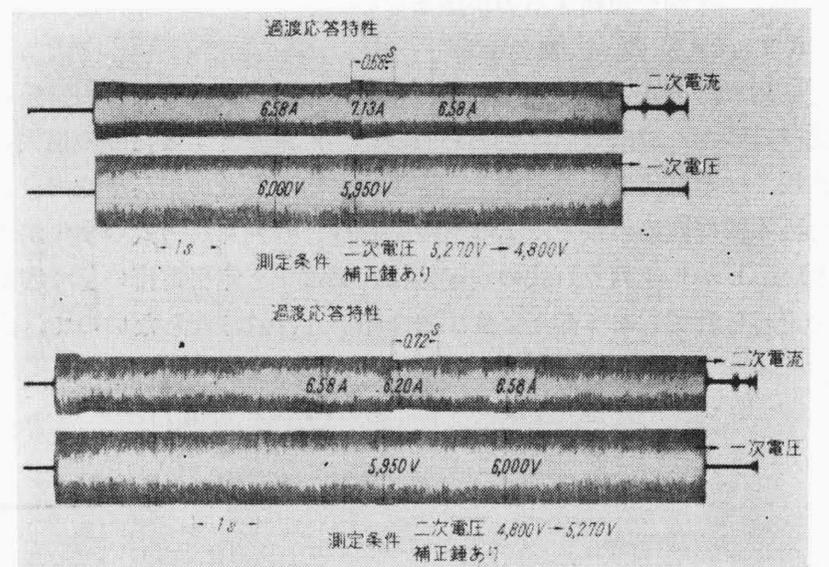
	実 測 値
一 次 電 圧	6,000 (V)
二 次 電 圧	6,000 (V)
鉄 損	288 (W)
銅 損	700 (W)
電 流 特 性	第7図
インピーダンス	最小値 25(%) 最大値 85(%)
応 答 特 性	第8図
線 輪 速 度	第9図

第2表 直列変圧器端子で測定した水銀灯の特性

	起 動 時		安 定 時
一 次 電 圧 [V]	180	105	77
二 次 電 圧 [V]	330	200	130
一 次 電 流 [A]	6.6	2.5	6.6
出 力 [kVA]	1.19	0.33	0.51
力 率 [%]	6.7	—	85

注: 起動時の特性は二次側を開放し, 一次側に定格電流 6.6[A] または起動電流 2.5[A] を流したときの値である。

装置を前後に5度傾斜した場合にも最大電流変化は0.8%以下であり, 一般の定電流装置に要求される電流変化限度1%よりはるかに小さい。参考までに補正装置を取りはずして試験した結果は最大電流変化が1.35%となり補正装置の効果の大きいことを示している。応答特性試験としては6灯分の負荷を瞬間的に短絡または追加し



第8図 400 W 水銀灯 6 灯を急激に増減したときの応答電流

たが、電流値はわずかに10%の過渡的な増減があるだけで約1秒後には定格電流に復するので実用上十分である(第8図参照)。

なお、線輪の最大移動速度は油中制動板を追加することにより約70%に減少し、したがって起動時に線輪が上部緩衝板に衝突するときのエネルギーは制動なしの場合の1/2になって、制動板は十分効果的に働いていることを確認できた(第9図参照)。

8.2 実負荷試験

8.2.1 起動特性

第12図の結果からわかるようにランプが順次点灯するたびに直列変圧器の二次電圧は増加し、2章で述べた直列点灯の利点を明らかに示している。起動しうる灯数は

- 常温定格電圧で 51灯以上
- 20℃定格電圧で 49灯
- 20℃電源電圧5%低下 47灯

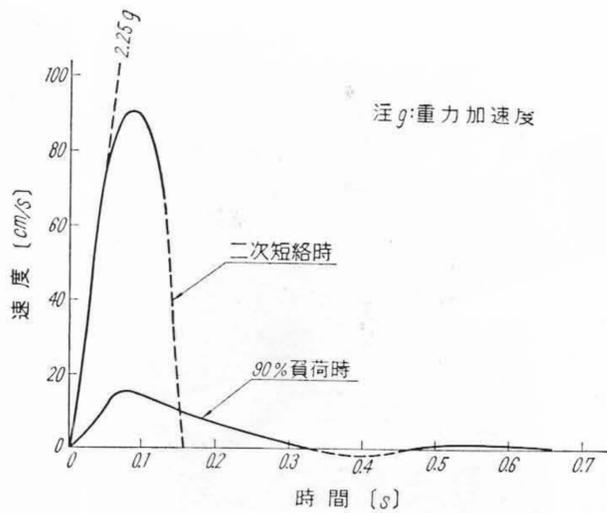
であるが、実際には起動電圧の低いランプもあるので、さらに数灯の追加も可能である。

8.2.2 個別消灯特性

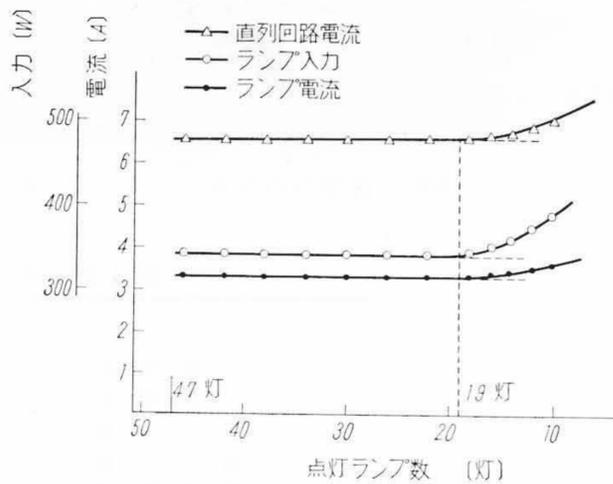
直列変圧器の一次側を短絡して消灯しうる灯数は第10図の最小点灯数が19灯であるから、全灯数47灯の約60%の28灯を消灯することができる。一方、開放して消灯した場合は第11図に示すように最小点灯数が30灯であり、消灯可能灯数は17灯となって“短絡による消灯方式”よりも消灯可能灯数が小さい。一般にランプが故障した場合には直列変圧器の二次側は開放状態となるので、あたかも“二次側開放により消灯”した場合と同一結果になる。この場合“二次側開放により消灯”する方式では故障ランプ数だけ消灯可能灯数が減るが、“短絡により消灯”する方式ではむしろ消灯可能灯数は増加する。さらに“開放により消灯”されたランプの直列変圧器は回路電流がすべて励磁電流となるので過励磁となり、鉄損および温度上昇が大きくなる。以上を総合すると“短絡により消灯する方式”が有利である。一次、二次いずれを短絡しても特性上ほとんど差はないが、安全の見地からすれば二次側を短絡する方が望ましい。

8.3 その他

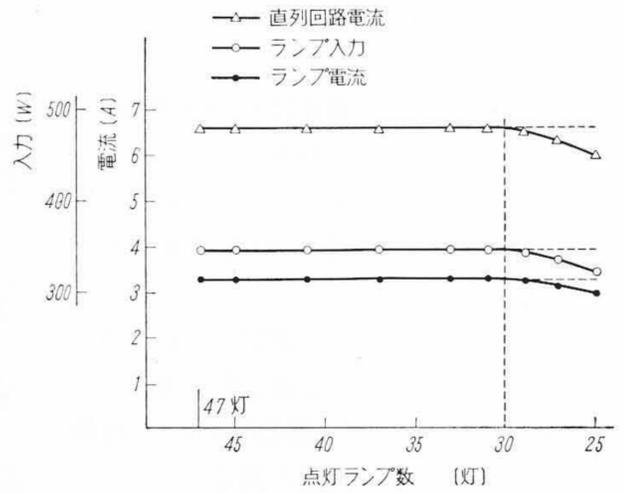
並列点灯方式との損失比較は使用する電線、安定器などの影響を受けるので一概に数値は定められないが、電源変圧器だけの損失の比較では定電流変圧器の漏えい磁束による漂遊負荷損がやや大きい。そのため本器程度の容量では130ワット程度、直列点灯方式の損失が大きい。しかし並列点灯式の安定器は起動電圧と定格電流の積で容量を定められてしまう漏えい変圧器を用いなければならないので、直



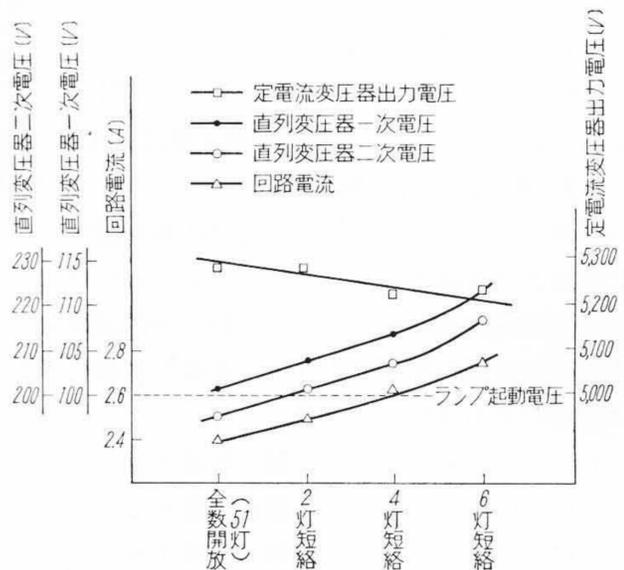
第9図 可動線輪応答速度



第10図 直列変圧器の一次側を短絡してランプを個別消灯したときの特性



第11図 直列変圧器の二次側を開放してランプを個別消灯したときの特性



第12図 順次二次開放による起動特性の試験結果

列変圧器よりも1灯につき数ワットずつ損失が増加する。さらに配電線の銅量は並列点灯方式の方が格段に多いので総合損失は直列点灯の方がはるかに少なくなる。

次に深夜の電力節減または照度調節のため回路電流を随時減少する場合、従来の定電流装置はタップ切替方式であるため連続的な減流ができない。水銀灯は一度消灯すると数分間は照度が回復しないからタップ切替方式では具合が悪いので電圧調整器が必要となる。このほか間引き点灯して全体的な出力を低下するには操作線およびリレーが必要となるから、いずれにしても高価になる。これに対し定電流変圧器では平衡錘に小形電動操作機構を追加するだけで容易かつ円滑な制御を安価に行なうことができる。さらに光電池を用いて照度の自動制御を行えば高級な照度調整も可能である(特許申請中)。

9. 結 言

今回、水銀灯直列点灯用定電流変圧器を完成し、各種の測定を行なったが、最も重要な定電流特性をはじめとし、すべての面で好結果を得ることができ、今後急速に普及が進展するであろう直列点灯方式の需要に応ずる態勢が整った。以上、定電流変圧器の概要ならびに実験結果を報告し、参考に供するものである。

最後に終始ご協力を頂いた日立ランプ株式会社関係各位に感謝の意を表す。