安定器内蔵形水銀ランプの高効率化

専門会員 下垣光太郎* 正会員 越智 雅文* 柵木 教一*

High Efficacy Self-ballasted Mercury Lamps and their Operating Circuits

Kōtarō Shimogaki (Fellow Member) Masahumi Ochi (Member)
and Kyouichi Maseki

(R & D Division, Iwasaki Electric Co., LTD.)

ABSTRACT

The self-ballasted mercury lamps are now being widely used for the convenience to replace an incandescent lamp without using external ballast.

However, their lamp efficacy is relatively low for the reason that more than half of the lamp power is consumed in the ballast filament inside the lamp.

Moreover, the lamp used on the 100 V AC line requires the hot cathode filament in its arc tube for the initiation of the lamp.

It seems that DC operation could improve the lamp efficacy by reducing the filament loss, however, other difficulties might arise, especially on the maintenance of the lamp and its operating circuit.

In this paper, the authors present the lamp and its new operating circuit to solve the problems.

The newly designed lamp with its operating circuit doubles the lamp efficacy of the current self-ballasted mercury lamps, and yet requires no hot cathode arc tube.

At least 20,000 hours are expected as for the circuit life.

1. はじめに

安定器内蔵形水銀ランプは、高圧水銀ランプの発光管と直列に白熱フィラメントを接続して電流を制限するとともに、水銀ランプの光と白熱電球の光を混合したランプである。したがって、一般の放電ランプのように安定器を必要とせず、簡便に白熱電球と交換することができるので広く使用されている。寿命は主に白熱フィラメントの寿命設定により決まるため、効率の高いフィラメントを使用すると短くなるが、効率の低いフィラメントを用いると、10,000時間以上の長寿命を得ることもできる。効率は低効率の白熱フィラメントが約半分の電力を消費するため、水銀ランプより低くなり、特に低容量の安定器内蔵形水銀ランプでは立ち消え特性のために、発光管電圧を相対的に低くする必要があり、ランプ効率は、1,000時間寿命の白熱電球より低くなるという結果となる。

これらの欠点を克服するため若干の実験を行ない、効率を約2倍に改善する見通しがついたので報告する。

2. 現安定器内蔵形水銀ランプ

2.1 点灯回路と始動方式

図1(a)、(b)に、市販の安定器内蔵形水銀ランプの一般的な点灯回路¹⁾を示す。電源電圧が200V以上の場合には図(a)の回路となるが、電源電圧が100Vクラスになると始動に要する電圧

図1 安定器内蔵形水銀ランプの点灯回路

* 岩崎電気開発部

が不足するため、図(b)のようにコイル状フィラメントによる熱陰極を用いて始動を容易にしている。しかしこの方式ではランプの製造や、バイメタルスイッチの信頼性のうえで注意が必要であった。

2.2 効 率

安定器内蔵形水銀ランプの効率を決定する要因を分析する。

今、ランプ電力が W_l のランプを考え、発光管およびフィラメントへの電力配分がそれぞれ W_b 、 W_f であるとする。

すなわち、

$$W_l = W_b + W_f \quad \cdots (1)$$

ここで、

$$W_b = V_b \cdot I_l \cdot P_{fl} \quad \cdots (2)$$

$$W_f = V_f \cdot I_l \quad \cdots (3)$$

ただし、 V_b は発光管電圧、 V_f はフィラメント電圧、 I_l はランプ電流、 P_{fl} は発光管の力率を示す。

一方、発光管およびフィラメントの発光効率をそれぞれ、 η_b および η_f とおけば、ランプ効率 η_l は

$$\eta_l = (W_b \cdot \eta_b + W_f \cdot \eta_f) / W_l \quad \cdots (4)$$

となるが、ランプ電力に対する発光管電力の比、 W_b / W_l (以後、発光管電力比と呼ぶ) を K ($0 < K < 1$) とすれば、

$$\eta_l = K \cdot (\eta_b - \eta_f) + \eta_f \quad \cdots (5)$$

と表わすことができる。 η_b は η_f よりも大きいから η_b は K が大きいほど大きくなる。

一方、発光管電力比 K は、(2)式および(3)式を用いて

$$K = W_b / W_l = \frac{1}{1 + \left(\frac{V_f}{V_b} \right) \cdot \left(\frac{1}{P_{fl}} \right)} \quad \cdots (6)$$

となるが、 K を大きくするためには V_f に対して V_b を大きくする必要がある。

ところが、 V_b を大きくすると放電灯は立ち消えを起こしやすくなるという性質があるので V_b 値には上限がある。

図2 安定器内蔵形水銀ランプの立ち消え特性

図2に100V-160Wランプの立ち消え特性の測定例を示す。図から電源電圧変動が $\pm 10\%$ あることを予想し、点灯姿勢を考慮し、さらに寿命中の V_b の上昇を3~5V見込むと V_b の値として42V程度となる。この値はランプ電圧の1/2に及ばない。このように現状のランプでは、フィラメント電力 W_f が発光管電力 W_b を上まわる設計となる。このようなランプでは発光管の効率が30lm/Wくらいであるのに対し、フィラメントの効率は長寿命とするため6lm/W程度にしかできないので、ランプ効率は13lm/W程度の低効率になり、白熱ランプよりむしろ低いという結果となっている。

2.3 ランプ効率改善への検討

このランプの低効率の原因は、上述のようにランプ電力 W_l に

図3 100V-160W安定器内蔵ランプの発光管電圧の差による発光管電圧-電流波形
(縦:電圧50V/div, 電流1A/div)
(横:2ms/div)
(a) 発光管電圧42V (b) 発光管電圧52V

対して効率の高い発光管への入力 W_b が小さく、低効率のフィラメントへの入力 W_f が大きいことに起因している。

そこで効率を向上させるためには、 K (W_b / W_l) を大きくするかフィラメント効率を上げるかであるが、後者の方法では寿命を短くするわりには効果が少ない。前者の方法において問題になるのは放電灯の立ち消えである。抵抗バラストで交流点灯するとき発光管電圧が高いと、図3のようにランプの電流休止期間が長くなり、ランプ電圧と電光管電圧のピーク値との差が小さくなるので、発光管電圧 V_b をあまり高くできない。また蛍光体を外球に塗付し効率を改善する方法²⁾もあるが、その改善率は小さく抜本的解決策にはならない。大幅な効率改善を計るためには点灯方式そのものを工夫して、 V_b を大きくとれるような設計を考える必要がある。

今回、発光管電力比を大きくする方法として直流点灯方式について二、三検討したので以下に述べる。

3. 高効率点灯方式の検討

3.1 放電灯の直流点灯

放電灯を十分に平滑化された直流電源にて点灯すれば、抵抗バラストにおいても、交流点灯時に見られるような再点弧による発光管電圧のピークが生じない。それゆえ発光管電圧を上げて発光管電力比を大きくした高効率設計が可能となる。これに適する点灯回路を見いだすために、筆者らは二、三の直流点灯回路について比較検討した。

3.2 直流点灯回路の比較

図4にダイオードブリッジ整流を用いた直流点灯回路の代表例を示す。図4(a)はブリッジ整流器の後にコンデンサを設けて平滑化してランプを点灯するもので最も一般的な方式である。この回路の無負荷出力電圧は入力電源電圧の $\sqrt{2}$ 倍となり、水銀

図4 直流点灯回路の例
(a) 全波整流方式 (b) 倍電圧方式

ランプを始動させる場合、電源電圧が 200 V 以上の系統では十分な値となるが、100 V クラスのときには不足する。一方、低い電源電圧に対応する方式として、図 4 (b) のような倍電圧点灯方式が発表されている^{3)~4)}。

この回路の無負荷出力電圧は電源電圧の $2\sqrt{2}$ 倍となるため、100 V 程度の電源電圧においても、始動のために十分な無負荷電圧を供給できるという利点がある。筆者らもこの方式で設計・試験したところ始動に関しては長所が認められたが、設計上注意すべき点もあることがわかったので以下に述べる。

図 5 (a), (b) は、倍電圧回路に抵抗を負荷したときの負荷

図 5 倍電圧方式の負荷電圧 (a), (b)

図 6 全波整流方式の負荷電圧 (a), (b)

電圧および負荷電力の特性であり、コンデンサの容量値との関係を測定したものである。

一方、図 6 (a), (b) はこれに対応する全波整流方式の場合の特性である。これらの図から倍電圧方式は全波整流方式に比較して負荷の電圧、および電力に対するコンデンサ容量値の影響が大きいことがわかる。このことはコンデンサとして電解コンデンサを用いたときに問題となる。

まず、回路設計においてはコンデンサの容量ばらつきや、ライフを通しての容量変化にも注意が必要である。次に容量値の選択の問題がある。図 5 (a) のように負荷電力をある値に固定して考えると、負荷電圧は容量値によって大幅に変化する。このことは発光管電力比を定めたとき、発光管電圧が決まれば容量値が一義的に決定されることを意味する。実用的な発光管電圧の範囲では、この容量値は負荷電力を同じにして比較すると、全波整流方式における平滑コンデンサの容量値よりかなり小さい値に選ばれることになる²⁾。逆に全波整流方式の場合は、容量値が発光管電圧設定に与える影響がかなり小さいので、容量値をいくらかでも大きくした設計が可能である。このことは電解コンデンサを使用するとき、その温度上昇に対して大きな差となって現われる。一般的にいえることであるが、電解コンデンサの許容リップル電流値は容量値とともに大きくなる^{5)~6)}。すなわち、全波整流方式では容量値を大きく選定することによりコンデンサの発熱の問題を軽減できる。

電解コンデンサの発熱に関してもう一つの重要な問題は、リップル電流の周波数である。電源の周波数が 50 Hz のとき全波整流方式の場合、平滑コンデンサに流れる基本周波数は 100 Hz となるが、倍電圧整流方式の場合、一方のコンデンサに流れる電流のそれは 50 Hz である。

電解コンデンサの発熱の主要因は、等価直列抵抗 (ESR) であると考えられるが、ESR 値の周波数特性は 1 kHz より下の範囲では周波数が下がるほど上昇する傾向にある。これは倍電圧回路の場合コンデンサの発熱が大きくなり、寿命の面でさらに不利になることを意味する。これを確かめるために実際に両者の点灯回路を設計、試作し、コンデンサの温度上昇を比較してみた。ランプ電力を 260 W にしたときの両者の比較を表 1 にまとめる。

表 1 両整流方式の比較試験結果

項目	方式	全波整流	倍電圧
入力電圧		100 V	100 V
ランプ電力		260 W	260 W
使用した電解コンデンサ	(注) 1	220 μ F 160 WV	47 μ F/47 μ F 160 WV
コンデンサ	電流値	3.1 A	1.4 A
	周波数	100 Hz	50 Hz
コンデンサの (注) 2 温度上昇値		35 deg	100 deg
コンデンサの寿命		約 3,000 時間のライフテスト実績有り	点灯後 2 時間程度で破壊する

(注) 1. コンデンサは JIS の CW クラスに相当する一般品。

(注) 2. ランプ点灯後 1.5 時間経過したときの値。

この結果、倍電圧方式のコンデンサの温度上昇値は異常に高く、一般に市販されているグレードの電解コンデンサでは、ほとんど実用にならないことが判明した。

一方、全波整流方式の平滑コンデンサの温度上昇値もやや大きい、容量値設定やコンデンサのグレードを上げることで解決できそうな程度のものである。しかしながら全波整流方式の場合、電源電圧が 100 V のとき、始動に要する電圧が不足するという

図 7 変形した点灯回路

問題があった³⁾。

そこで、倍電圧と全波の両者を合わせた図 7 のような回路が考えられる。この回路の C_1 には容量値の比較的小さい、低損失のコンデンサを用いることができるが、倍圧作用が生じるので主コンデンサ C_m を倍電圧に充電する。こうすれば始動時に十分な電圧が得られると同時に、点灯時は C_1 が小容量であるから回路の負荷特性は、ほぼ全波整流方式と同一となり、その長所を生かすことができる。しかし主コンデンサ C_m の耐電圧を 2 倍にしなければならないことのほか、 C_1 の容量値もある程度大きくしないと十分な電圧が得られないという難点も生ずる。

3.3 新しい直流点灯回路

上述の問題点を解決するために考案した新点灯回路を図 8 に示す。この回路の特徴はダイオード D を用いて倍圧コンデンサ C_1 と主コンデンサ C_m を分離した点にある。出力端の無負荷電圧波形は図 9 のようになり、ピークとして倍電圧がランプに印加される。ダイオード D のため C_1 は大容量の C_m を充電する必要がないので小さくてもよく、低損失のフィルムコンデンサなどが使用できる。実験の結果、 C_1 の容量値としては、 $1\mu\text{F}$ 程度でも始動に対して十分であることを確認した。また C_m に対しては通常の全波整流方式の動作となるのでその長所を生かせる。

図 8 新点灯回路

図 9 無負荷電圧波形

4. 高効率点灯回路の設計

前節で述べた新点灯回路を用いて、高効率安定器内蔵形水銀ランプの設計、試作を行なった。ランプ定格は 100 V-170 W 級と 100 V-250 W 級の 2 品種について述べる。

4.1 ランプ効率の推定

設計を始めるに当たり、発光管の寸法および入力電力と発光効率との関係を実験的に調べた。その結果得られたデータをもとにして安定器内蔵形ランプとしたときの、ランプ効率と発光管電力比 K との関係プロットすれば図 10 を得る。 K を 0.7 以上にすれば 30lm/W を越す効率が得られるが、 K を大きくしていくとやはり立ち消えの問題が生ずると思われ、立ち消え特性を調査する必要がある。

図 10 K と発光効率との関係

4.2 立ち消え特性

全波整流直流点灯における放電ランプの立ち消え特性は、平滑の度合い、すなわち平滑コンデンサの相対的大きさによって変化することがわかった。コンデンサの容量値を種々変えて測定した立ち消え特性の例を図 11 に示す。

図 11 立ち消え特性

この例から容量をある程度大きくすれば、立ち消え特性が改善できる。しかし実用的な設計を行なう上では容量値とともに発光管電圧上限値に制限ができる。この図から容量値を $270\mu\text{F}$ 程度に選んだ場合、10%の電源電圧降下を許容するためには発光管電圧の上限値は 90V 以下にしなければならないことがわかる。なお今回の測定では、ランプ点灯姿勢による立ち消え特性差は判然とは出なかった。

4.3 電解コンデンサと回路設計

平滑コンデンサは大容量となるので、実用的には電解コンデンサが選ばれる。電解コンデンサを使用するにおいては、許容リップル電流や素子の温度上昇、さらには周囲温度と寿命の関係など設計上留意すべき点がある。

まず、リップル電流のおよその大きさを知るために可変抵抗器を負荷として、負荷電力とリップル電流との関係を調べた。この結果を図 12 に示す。負荷電力が 250W 程度になると、リップル電流は 3A を越えるようになる。一般市販品の中からこのような大きな電流許容値のものを選ぶとすると、容量値を相当大きくしなければならない。さもないとコンデンサの温度上昇が大きくなり寿命が短縮される。

一方、容量値は電源部の大きさなどの実用的問題のため、あまり大きな値を選択できない。そこでコンデンサは耐リップルグレードの高いものを選択したり、温度上昇と寿命の関係についても

図 12 負荷電力とコンデンサ電流

十分知る必要が生ずる。コンデンサの周囲温度と寿命についてはメーカー、品種により種々あるが、代表的なものについて温度上昇と寿命の関係をプロットすると図 13 のようになる。推定寿命はアレニウスの法則を適用して得た⁷⁾。

図 13 コンデンサの寿命推定

この図は電源部の設置雰囲気温度最大値を 40°C と考え、その値に電源部の発熱による温度上昇を加算して、コンデンサの周囲温度として寿命を推定したものである。ランプの寿命を 6,000 時間に設定し、回路部の寿命をその 3 倍以上の 20,000 時間と考えると、85°C、1,000 時間程度の市販品ではほとんど温度上昇が許容できない。図 14 にこのクラスのコンデンサのケース表面温度上昇を測定した例を示す。

図 14 コンデンサの表面温度上昇

測定は回路部をアルミ製の金属ケース内に実装し、コンデンサのケース表面に熱電対を設置して行なった。この例では 3 A のコンデンサ電流値において約 30 deg の温度上昇があることになる。なおこの温度上昇値は、コンデンサの ESR によるオーミックスな損失のほか、ダイオードなどの発熱などの周辺からの熱の影響

も含めて考えている。当然のことながら温度上昇値は回路外装ケースや内部の部品設置構造などの実装状態によって変化する。

図 15 コンデンサ雰囲気温度上昇

図 15 は直方体のアルミ製外装ケース内に回路部を実装して、同ケースの大きさを変えた場合に、コンデンサの温度上昇がどうなるかを調べたものである。この例では外装ケースの表面積を 400 cm² 以上にすれば、温度上昇値を 20 deg 程度まで下げ得ることがわかるが、いずれにしても目標の回路寿命 20,000 時間を得るためには、高リップル電流用の耐熱コンデンサを必要とする。筆者らは目標の寿命水準を 65°C、20,000 時間とした。

すなわち図 13 の破線で示される水準のもので、これを用いて電源部の試作を行なったときに、コンデンサの表面温度上昇値が 25 deg を越えないことを一つの目安とした。このため試作にあたっては外装ケースの寸法、形状、材質、内部構造、特にダイオードなどの発熱源との分離に注意を払った。

5. 特 性

試作したランプの電気および光学的特性データを、表 2 および表 3 にまとめる。100 V-250 W クラスでは、ランプ効率で 33 lm/W、回路部を含めた総合効率で 32 lm/W を得、ほぼ設計どおりの結果となった。一方、100 V-150 W クラスでは、ランプ効率が 23 lm/W とやや低くなったが、これは発光管電圧比が小さいためと思われる。発光管電圧比を 0.7 以上にすればもう少し改善されよう。

表 2 ランプ部特性

電力クラス	ランプ電力 (W)	発光管電力 (W)	発光管電圧比	発光管電圧 (V)	立ち消え電源電圧 (V)	全光束 (lm)	ランプ効率 (lm/W)	総合効率 (lm/W)
170 W	162	107	0.66	82	84	3,700	22.8	21.9
250 W	233	170	0.73	85	86	7,700	33.0	31.7

表 3 回路部特性

電力クラス	入力電力 (W)	入力電圧 (V)	入力電流 (A)	ランプ電力 (W)	C _m 容量 (μF)	C ₁ 容量 (μF)	一次効率	回路効率
170 W	169	100	2.5	162	330	1.0	0.68	0.96
250 W	243	100	3.5	233	330	1.0	0.69	0.96

各部電力の入力電圧に対する変動特性を図 16 に、容量に対する変動特性を図 17 におおの示す。これらより電圧変化に対する影響はやや大きい、容量変化に対する影響はきわめて小さいことが確認された。試作ランプの低温始動性能については -20°C においても問題ないものであった。

回路部は、ダイオードと電解コンデンサの損失のために 7~10 W の電力損が生じ変換効率は 0.96 程度となる。またコンデンサ

図 16 入力電圧変動特性

図 17 容量値変動特性

図 18 回路部の構造例 (回路別置方式)

の容量値が大きいのので一次力率が0.68~0.69となる。

回路常数および使用部品は両クラスとも同一とした。

回路部の外装ケースとして円柱状の樹脂ケースを用いた例を、その内部構造とともに 図 18 に示す。ダイオード部を樹脂で充てんした上、仕切り板により熱的にコンデンサを分離する。この試作品の周囲温度上昇値は約 26 deg であった。

6. ま と め

直流点灯方式とすることにより、発光管電圧比を 0.7 程度に選ぶことが可能となり、安定器内蔵形水銀ランプの効率を 2 倍程度に向上させることができた。また、整流回路を工夫することによって 100 V の電源電圧においても、熱陰極発光管を用いることなく十分な始動性能を得るとともに、従来の倍電圧整流点灯に起きる電解コンデンサの発熱に基づく寿命短縮の問題も解決できる見通しである。このような回路は比較的小型軽量であるので、設置場所としては別置方式、照明器具に内蔵する方式、ランプロ金部に内蔵する方式などいろいろ考えられる。

参 考 文 献

- (1) 高須 啓次: GS-News 31-2 (昭47) 80
- (2) Dobrusskin, A., Kühl, B.: Lichttechnik 15-11 (1963) 554
- (3) Lake, W. H.: Light. Des. Appl. 5-10 (1975) 33
- (4) 特公昭 54-3311
- (5) JIS C5140-1970
- (6) JIS C5141-1982
- (7) 矢口ほか: 「コンデンサの性能と使い方」東京電機大学出版局第2版 (昭41) 52~53

(受付1984年2月6日)

著 者 紹 介

越智 雅文君 (正会員)

昭和20年10月25日生まれ、昭和43年3月名古屋工業大学電子工学科卒業。昭和44年4月岩崎電気株式会社に入社、以来開発部にて、主に放電灯点灯回路の開発に従事し、現在に至る。

桐木 教一君

昭和23年4月24日生まれ、昭和46年3月相模工業大学電気工学科卒業。昭和46年4月岩崎電気株式会社に入社、以来開発部にて、主に放電灯の開発に従事し、現在に至る。

下垣 光太郎君 (専門会員)

昭和59年2月号参照。

水野 銆章君 (正会員)

昭和57年4月号参照。

矢橋 清二君 (正会員)

昭和57年10月号参照。

石川 太郎君 (専門会員)

昭和57年4月号参照。