高圧放電灯用電子式点灯回路の研究

正 会 員 永瀬 春男* 正 会 員 西村 広司*
正 会 員 内橋 聖明* 正 会 員 塩見 務*

Study of Electronic Ballast for High Intensity Discharge Lamps

Haruo Nagase (Member) Hiroshi Nishimura (Member)

Kiyoaki Uchihashi (Member) and Tsutomu Shiomi (Member)

(Lighting Research & Development Center Matsushita Electric Works, Ltd.)

ABSTRACT

High frequency operation of HID lamps causes acoustic resonance phenomenon, and several countermeasures to avoid it have been studied and reported.

We focusing our attention to the balance of stable frequency and destabilizing frequency, experimented to find on what condition the arc is kept stable.

We reached a result that even if some arc destabilizing frequency exists in the lamp current, an unstable condition will not grow so long as its ratio is small enough.

We proposed the rectangular waveform operating method as a concrete operation circuit to apply this experiment result to actual use.

We have found good characteristics in its operation, when applied to a 70W metal halide lamp.

Here, we report our study on it.

1. ま え が き

一般に、HID ランプは白熱灯に比べ発光効率およびランプ寿命の点で優れている。また、HID ランプは蛍光灯に比べ発光管体積が小さいので照明器具における配光制御が容易である。

上記のような HID ランプの特長を活かして、屋内で店舗のスポットライトやダウンライト用光源として HID ランプを積極的に使う例が、ここ数年増えている。したがって、HID ランプ用安定器も小型なものへの要求が強く、それに答える一つの道が安定器の電子化である。

HID 安定器の一部を電子化した位相制御式安定器の実用化した例はあるが¹⁾、完全に電子化された実用化例はなかった。

蛍光灯用電子安定器はすでに全電子化され、実用化しているが、蛍光灯用電子安定器と同じように数十 kHz の正弦波で HID ランプを高周波点灯すると、いわゆる音響的共鳴現象が生じ放電アークが不安定になることは衆知の事実である²⁾。

音響的共鳴現象の回避方法は、すでにいくつか報告されている^{3) 4)}。また 20~50 kHz の範囲のなかで共鳴の生じない安定な周

波数を用いた水銀灯 100 W 用の点灯回路の例があり、この中でメタルハライドランプ 100 W は、20~50 kHz の全周波数範囲でアークは不安定でしばしば立ち消えを生じると述べている⁵⁾。

筆者らは、点灯回路として回路効率、雑音等の点で有利な数十 kHz を用いた回避方法に関して、安定な周波数成分と不安定を生じさせる高周波の成分の割合に着目し、アークの安定条件を実験により求めた。そして、ランプに流れる高周波成分をランプと並列に接続したコンデンサによってバイパスしその割合を低減させてアークの安定化を図ると同時に、限流素子は高周波動作で小型化した低周波の矩形波点灯方式を提案した。この方式をメタルハライドランプ 70 W 用に試作したところ、良好な特性を得た。

本報では、その研究内容について報告する。

2. 放電アークの安定化のための基礎検討

放電アークを安定化する方法として、不安定を生じる高周波のランプ電流に共鳴の全く存在しない安定な周波数成分を徐々に増やしていくと、ある割合からアークは安定になると推測できる。すなわち、安定な周波数によって共鳴を弱め、アークが不安定となるまで共鳴が成長しないと考えられる。

そこで、この考え方をもとに安定条件を実験により求めた。具体的な手段として、

* 松下電工照明開発研究所

本論文の一部は、昭和61年および62年度照明学会全国大会、昭和61年電気学会関西支部大会、昭和62年 IES Annual Conference '87 において発表した。

(1) 直流時分割印加方式⁶⁾

(2) 直流重畳方式

(3) 1 kHz 時分割印加方式

(4) 矩形波重畳方式 (以下 矩形波点灯方式)

を検討した。時分割印加方式とは、不安定を生じる高周波と共鳴の存在しない安定な周波数を時分割的にランプに印加する方式であり、重畳方式とは不安定を生じる高周波に共鳴の存在しない安定な周波数を重畳する方法である。

なお、上記(1)~(4)の高周波は回路効率、雑音など点灯回路への展開のしやすさの点から、40~50 kHz とした。対象ランプは、100 W および 250 W とした。アークの安定性の評価は、アークのゆらぎ、ちらつき度合いから判断し、安定、やや不安定、不安定の3段階とした(以下、水銀灯をH、メタルハライドランプをMとし、例えば、水銀灯 100 W は、H 100 とする。)

2.1 直流時分割印加方式

直流時分割印加方式とは、不安定を生じる高周波と直流を時分割的にランプに印加する方式である。高周波成分の時間的割合とアークの安定性との関係を実験により求めた。図 1 に実験回路を示す。高周波電源は 40 kHz とした。

トランジスタ Q_1 とスイッチ S_1 とが交互に周期的にオンオフす

図 1 時分割印加方式の実験回路

ることにより、ランプには時分割された電圧が印加される。限流素子は直流側には抵抗 R_1 、高周波側にはインダクタンス L_1 を用い、インダクタンス L_S とコンデンサ C_S は高周波フィルターであり、コンデンサ C_1 は直流をブロックする。時分割の周期は数 ms~10ms とした。ランプ電流波形の一例を図 2 に示す。

図 2 ランプ電流波形

Q_1 がオン (S_1 はオフ) してランプに直流を与える期間 T_{DC} と S_1 がオン (Q_1 はオフ) して高周波を与える期間 T_{HF} とを変化させてアークの安定性を評価した。H 100 の結果を図 3 に示す。ここで高周波の割合を $K_1 = T_{HF}/T_{DC}$ とすれば、

$$K_1 < 2$$

で、安定領域があった。

2.2 直流重畳方式

直流重畳方式とは不安定を生じる高周波に直流を重畳する方法である。高周波成分の振幅の割合とアークの安定性との関係を実験で求めた

図 4 に実験回路を示す。高周波 f は 40~50 kHz とした。図 5

図 3 アークの安定性

図 4 直流重畳方式の実験回路

図 5 ランプ電流波形 (M250)

は、ランプ電流波形の一例である。高周波リップル I_{p-p} と、直流成分 I_{DC} の比を $K_2 = I_{p-p}/I_{DC}$ とし、 I_{p-p} を変化させて K_2 とアークの安定性を評価した。

M 100 の結果を図 6 に示す。ここで、図 6 に示したランプ電圧変動幅 ΔV_L について説明すると、 ΔV_L は正弦波だけの高周波

図 6 アークの安定性

で点灯したときの一定時間内の実効値の変動幅を示す。測定時間は5秒ごとに1回測定し、これを10回繰り返したときの最大値と最小値との差である。共鳴が強いほど、アークのゆれが大きくランプ電圧の変化が激しい。すなわち、 ΔV_L の大きさによって共鳴の強さを定量的に示すことができる。

図6では安定領域は50 kHzに近づくにつれ狭くなっている。これは、 ΔV_L が上昇していることから共鳴の強さが高まったことに起因していると考えられる。

図7にM250におけるアークの安定性を示す。40~50 kHzでは ΔV_L は低いので安定領域は広がっている。

図7 アークの安定性

2.3 1 kHz 時分割印加方式

安定な周波数 f_1 に低周波1 kHzを用い、高周波 f_2 と交互にランプに印加する点灯回路を検討した。基本回路を、図8に示す。フルブリッジインバータ構成で、 $Q_1 \sim Q_4$ は周波数 f_1 と f_2 とでスイッチングし一定の周期で切り替わる。 f_1 のときは、

$$\frac{1}{\omega C_1} \gg \omega L_2 \quad \text{ただし, } \omega = 2\pi f_1$$

となるように定数を選定すると主たる電流は、 L_1-L_2 -ランプの経路で流れる。 f_2 のときは、

$$\frac{1}{\omega C_1} \ll \omega L_2 \quad \text{ただし, } \omega = 2\pi f_2$$

とすると主たる電流は、 L_1-C_1 -ランプの経路で流れる。 L_1, L_2, C_1 の合成インピーダンスを、 f_1 および f_2 に対し同一となる定数を設定すれば、電流の実効値は同じになる。

図8 時分割印加方式の基本回路

そこで、回路解析によって L_1, L_2, C_1 の定数を検討した。解析に使用した回路は図9に示す。ランプは等価抵抗 R 、 $Q_1 \sim Q_4$ のスイッチング動作は矩形波電源に置き換えた。矩形波電圧 E を基本波と高調波の正弦波電圧に変換し解析を行なった。

矩形波電 E の各高調波の最大値 A_n は、

$$A_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} E \sin n\omega t dt = \frac{4E}{n\pi}$$

図9 解析の回路構成

ただし、 $n=1, 3, 5, \dots$

で表わされ、各高調波の実効値 $V_{S(n)}$ は、

$$V_{S(n)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4E}{n\pi} = \frac{2\sqrt{2}E}{n\pi}$$

各高調波のインピーダンス $Z_{(wn)}$ は

$$Z_{(wn)} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{\omega_n L_1 (1 - \omega_n^2 L_2 C_1) + \omega_n L_2}{1 - \omega_n^2 L_2 C_1} \right)^2}$$

ただし、 $\omega_n = 2\pi f \cdot n$

R に流れる各高調波の実効値 $I_{R(n)}$ は、

$$I_{R(n)} = \frac{V_{S(n)}}{Z_{(wn)}} = \frac{2\sqrt{2}E}{n\pi} \cdot \frac{1}{Z_{(wn)}}$$

全電流 I_R は

$$I_R = \sqrt{I_{R(1)}^2 + I_{R(3)}^2 + \dots + I_{R(n)}^2}$$

となる。これらの式を、 f_1, f_2 の両者についてそれぞれ計算し、電流の実効値が同じとなる L_1, L_2, C_1 を算出した。

図10 ランプ電流・電圧波形 (H100)

算出した定数を用い図8の回路を試作し、アークの安定条件を見出した。図10はランプ電流、電圧波形の一例である。 f_1 は1 kHz、 f_2 は40~50 kHz、周期 T は約8 msとした。 f_2 のランプ電流の期間 T_{HF} と f_1 の期間 T_{LF} との比を $K_1 = T_{HF}/T_{LF}$ とする。

アークの安定状況を示す代表例として、M250の結果を図11に示す。高周波が40~50 kHzの範囲では $K_1 < 0.2$ がアークの安定領域である。なお、ランプの種類がかわると、アークが安定となる K_1 の領域が異なる。たとえば、M100は $K_1 < 0.3$ 、H100は $K_1 < 0.6$ であった。

ここで、H100を用いた2.1の直流時分割印加方式は、アークが安定となるのは $K_1 < 2$ であるのに対し上記1 kHz時分割印加方式は、 $K_1 < 0.6$ であり、安定領域が狭い。言い換えれば、同じ安定要素でありながらアークが安定となる K_1 の値が異なっている。この点について考察すると、

図 11 アークの安定性

(1) 直流時分割では高周波と直流のランプ電流の振幅を同一にして実験しているため、時間の比 (K_1) 以上に直流成分の電流が大きくなっている (図 5)。

(2) 1 kHz の電流は図 10 のように三角状で高調波歪を多く含み安定要素としての効果を弱めている。

の点から、1 kHz 時分割の安定領域が狭くなると考えられる。

2.4 矩形波点灯方式

安定な周波数として矩形波の低周波 120 Hz を使い、高周波に重畳する点灯回路を検討した。基本回路を 図 12 (a) に示す⁷⁾。

図 12 矩形波点灯方式の基本回路と I_{L1} 波形

Q_1 および Q_2 は高周波用スイッチング素子、 Q_3 および Q_4 は低周波用スイッチング素子である。 L_1 は限流素子、 C_1 は高周波成分をバイパスする。つまり、高周波 f では、

$$R \gg \frac{1}{\omega C_1} \quad \text{ただし、} R \text{ はランプの等価抵抗} \quad \omega = 2\pi f$$

となるように、 C_1 の値を設定する。たとえば高周波における C_1 のインピーダンスを数 Ω にすると、ランプのインピーダンスの数百 Ω と比べて非常に小さいので、電流の高周波成分のほとんど C_1 側にバイパスされる。

動作は、 Q_4 がオン状態のとき、 Q_1 がオンすると $Q_1-L_1-C_1$ 、ランプ- Q_4 の経路で電流が流れる。このときの L_1 の電流 I_{L1} は、下式で表わされる。 I_{L1} の波形を図 12 (b) に示す。

$$I_{L1} = \frac{V_{DC} - V_L}{L_1} t + I_0$$

ただし、 I_0 は Q_1 オン時 (t_1) の電流

t は Q_1 オン時 (t_1) からの時間

つまり、 V_{DC} 、 V_L 、 L_1 を定数として I_{L1} は時間 t に対して直線的に増加する。 Q_1 がオフすると L_1-C_1 、ランプ- Q_4-D_3 の経路となる。このときの I_{L1} は下式で表わされる。

$$I_{L1} = I_m - \frac{V_L}{L_1} t$$

ただし、 I_m は Q_1 オフ時 (t_2) の電流

t は Q_1 オフ時 (t_2) からの時間

つまり、 I_{L1} は直線的に減少する。 Q_3 がオン状態のときは、 I_{L1} は反対方向となる。ランプは Q_1 および Q_2 のスイッチング周波数のリップルを含んだ電流が流れ、かつ、この電流は、 Q_3 および Q_4 の低周波スイッチング周期に合わせて交番する。いわゆる矩形波点灯である。

図 12(a) に示す回路を試作し、ランプを M 100 としてアークの安定性を評価したがその結果、図 6 と同様であった。

2.5 回路方式の決定

放電アークの安定化の条件はランプの種類、 W 数によって安定条件は異なるが、適切に安定な周波数の成分を高周波に印加すれば、アークを安定させることができる。一方、点灯回路として安定な要素に交流を用いた 1 kHz と矩形波の二つの方式を比較すると、矩形波点灯方式が優れていると言える。なぜなら、

(1) 限流素子として、1 kHz 時分割印加方式では図 8 の如く低周波、高周波のインダクタンスおよびコンデンサが必要であるが、矩形波点灯方式では図 12 のごとく高周波インダクタンスおよびコンデンサだけで良い。

(2) スwitching 素子は低周波用と高周波用とが区別されているので制御しやすい。

したがって、図 12 の方式についてさらに詳細な検討を加えた。

3. 点灯回路としての詳細検討

3.1 回路上の問題点

矩形波点灯方式を点灯回路としてより具体化するには、次の 3 点の問題点がある。

3.1.1 トランジスタの同時オン

ランプ電流の極性反転時に例えば、 Q_1 、 Q_4 から Q_2 、 Q_3 の動作へ移るとき、その時間が短いと Q_2 と Q_4 とがオンし電源を短絡し破壊に至ることがある。対策として、 $Q_1 \sim Q_4$ すべてがオフとなるデッドタイムを十分長く設定すればよいが、ランプ電流に休止期間が生じ再点弧電圧が上昇して立ち消える問題が起こる。

3.1.2 スwitching ロスの増大

アークの安定化のために L_1 の電流 I_{L1} を 図 13(a) の如く連続にすると、ランプ電流は高周波リップルが少なくなる (各電流の向きは図 12(a) に示す)。しかし、 t_1 の時点で Q_1 、ダイオード D_3 にサージ電流が流れる。すなわち、ダイオード D_3 の順方向に電流を流しているとき Q_1 がオンして、急に逆バイアス状態にすると (t_1 の時点) この時、 $DC-Q_1-D_3$ の回路にサージ電流が流れ、 Q_1 、 D_3 のスイッチングロスが増大する。 Q_2 、 D_4 も同様のことが起こり、回路効率が大幅に低下することになる。

3.1.3 放電アークの安定条件

上記の改善のために 図 13(b) の如く不連続にすると、サージ電流は押えられるが、ランプ側に流れ込む高周波が増える。アークを安定に保つには、 C_1 の静電容量を増大しインピーダンスを下げ高周波をバイパスしやすくしなければならない。したがって C_1 が大型化する。

(a) I_{L1} が連続の場合 (b) I_{L1} が不連続の場合

図 13 各部の電流波形

3.2 問題の解決方法

トランジスタの同時オンを避けながら、ランプ電流は休止期間をなくす問題は、 C_1 と並列に L_2 とランプの直列回路を接続することにより解決した。電源からの電力の供給のないデッドタイムの期間において、 $Q_1 \sim Q_4$ がすべてオフする直前の C_1 の電圧はランプ電圧とほぼ同じ値である。この点は、 L_2 がない場合と同じであるが、 C_1-L_2 ランプの閉回路を形成させることによって、 C_1 の電荷は共振電流を流しながらゆっくり放出していく。したがって、十分なデッドタイムを設けても共振電流がランプ電流となり休止期間が生じない。スイッチングロスに関しては、 I_{L1} を図13(b)の如く不連続にしてサージ電流を抑える。これに伴って増大する I_{L1} の高周波成分は、 L_2 でブロックされ高周波リップルの少ないランプ電流が流れる。また、

$$\sqrt{R^2 + (\omega L_2)^2} \gg \frac{1}{\omega C_1}$$

とするための C_1 の静電容量は小さくできる。

3.3 電子安定器の設計例

以上の検討で得られた矩形波点灯方式をメタルハライドランプ70 Wに应用展開した事例を紹介する。

図14は、電子安定器の主要回路構成の一例である⁸⁾。

図 14 電子安定器の主要回路構成

ランプは超コンパクトなメタルメライドランプ70 Wで、始動には4 kVの高圧パルスが必要である。 L_2 をイグナイタのパルストランスと兼用している。また、 C_1 によってトランジスタ等への高圧パルスの印加を防止している。

電源はAC 100 Vで50 Hz/60 Hz共用である。倍電圧整流回路によって、直流電圧282 Vをインバータ部に与えている。 Q_1 および Q_2 のスイッチング周波数は42 kHz、 Q_3 および Q_4 のスイ

図 15 ランプの電流・光出力波形

チング周波数は120 Hzである。

図15は、ランプ電流および光出力波形を示す。アークの安定性に関して、メタルハライドランプ70 Wは40~50 kHzにおいて、 $K_2 < 0.2$ で安定領域があった。なお、 $L_1 = 1$ mH、 $C_1 = 0.07$ μ F、 $L_2 = 3$ mHで K_2 は0.1となり音響的共鳴は完全に防止できた。

表 1 電子安定器の特性

入 力 電 圧 (V)		電 子 式	銅 鉄 型
入力電流 (A)	安 定 時	1.4	2.3
	始 動 時	0.6	2.8
入 力 電 力 (W)		83	92
重 量 (kg)		0.6	2.6

表1は、電子安定器と銅鉄型安定器の特性比較である。重量と入力電力に電子安定器の特長が見出せ、重量は1/4、同一の光出力で入力電力は10%の省電力となっている。

上記以外の特長として

- (1) ランプ電流が矩形波であり、光出力波形がフラットになり、良質な光が得られる(図15)。
- (2) 従来のような高い再点弧電圧が現われないので立ち消えに対して強い。
- (3) 安定時、始動時、無負荷時を含めた入力電流の最大値が約1/2となるので、配線容量、ブレーカ容量の点で有利である。等をあげることができる。

4. む す び

(1) 実験結果を要約すると、

不安定を生じる高周波を40~50 kHzにしたとき、高周波に安定な周波数を時間方向に分割的に印加する方式と振幅方向に重畳する方式は、いずれの場合も安定点灯が得られる高周波成分の含有は20%程度が限度であることがわかった。

(2) 回路の実用面からの評価において、高周波の振幅方向に矩形波を重畳する方法が有効である。

なお、HID用電子安定器として具体化のしやすさという観点で今回の研究を眺めると、最も安定化しにくいといわれる小型メタルハライドランプに対し前述の矩形波を重畳する矩形波点灯方式が、一つの有効な方式であり今後のHIDランプの屋内展開への対応範囲は広いものと期待できる。

参 考 文 献

- (1) 西村、永瀬、塩見、水野：演色本位形高圧ナトリウム灯用電子安定器、松下電工技報 No. 31 (昭60) 7~11

- (2) J. H. Campbell : Initial characteristics of High-Intensity Discharge Lamps on High-Frequency Power, J. Illum. Engng. Soc. (1969) 713~723
- (3) 岡田, 和田, 森井 : 有限要素法による HID ランプの音響的共鳴現象の防止技術の検討, 照学全大 (昭 61) 36
- (4) 越村, 青池, 野村 : HID ランプの高周波点灯における放電安定化方法, 照学誌 67-2 (昭 58) 55~61
- (5) 高須啓次 : HID ランプ用ブリッジインバータ方式半導体安定器, GS NEWS VOL. 40. No. 2 (1981) 37~44
- (6) 永瀬, 西村, 内橋, 塩見 : HID ランプの高周波点灯による放電の安定化・時分割印加方式について, 照学全大 (昭 61) 37
- (7) 内橋, 西村, 永瀬, 塩見 : HID ランプ用電子安定器の開発, 電気学会関西支部大会 (昭 61) G13-6
- (8) 永瀬, 西村, 内橋, 塩見 : メタルハライドランプ 70 W 用電子安定器の開発, 照学全大 (昭 62) 41
- (受付 1987 年 5 月 7 日)

3 月号掲載予定目次

「四国支部」特集

- 講演** ○インテリジェントビルと照明
- 技術総説** ○可変色放電の原理とディスプレイ装置への応用
- 資料** ○四国の照明30年の歩み
- 施設報告** ○香川県高松片原町西部商店街アーケード照明
- 香川県議会議事堂の照明
- 愛媛県・丸亀橋橋梁照明
- 高知県・窪川町立総合グラウンドナイター照明
- 総合結婚式場一寿司会館の照明
- 国分寺勤労者野外活動施設テニスコートの照明
- 第一号南予レクリエーション都市公園日本庭園の照明
- 研究室紹介** ○徳島大学工学部
- 愛媛大学工学部
- 株式会社四国総合研究所
- 寄書** ○阿波踊りの起源について
- 照明と設備設計事務所
- 若き日の空海

その他