高圧水銀ランプバイパス回路共用複数灯点灯回路 —始動特性と消灯ランプ発生時の特性—

非会員 野 中 正 綱 (株式会社九電工) 正会員 家 村 道 雄 (崇城大学, 旧名: 熊本工業大学)

**The Operating Circuits with a Common By-pass Circuit
for Multiple High-pressure Mercury Discharge Lamp
—Characteristics of Circuit during Start-up and When a Lamp does not Light—**
Non-Member **Tadatsuna Nonaka** (Kyudenko Co. Ltd.) and
Member **Michio Iemura** (Sojo University, Formerly: Kumamoto Institute of Technology)

ABSTRACT

Using both simulation and experiments, we investigated cause to ensure that the supply current in an electrical circuit with a common by-pass circuit can be kept approximately constant from start-up to reaching steady state. In such circuit, the supply current can be distorted by about 2% when the power factor reaches 100%. We found that an approximately constant supply current can be achieved, thus making these circuits practical for use with multiple high-pressure mercury discharge lamps, even when a lamp does not light.

KEYWORDS : multiple operating circuits, common by-pass circuit, starting characteristic

1. はじめに

高圧水銀ランプ等の HID ランプの高周波点灯回路は音響的共鳴現象を伴うので、それを回避できる点灯回路にする必要がある。したがって、高価格になり形状も大きくなるため、HID ランプの高周波点灯回路の実用化は小容量のランプについては実用化が徐々に進んでいるが、大容量のランプについては、現在も磁気回路式点灯回路が多く用いられている。

磁気回路式の高圧水銀ランプ点灯回路の中では、遅相形点灯回路が安価で安定器損失が少ないため、道路や野球場、体育館等の照明として広く用いられている。しかし、基本波電流に対して第3、第5調波電流の和が10～15%ほど流れ、力率は60～70%程度である。このため、1kWないし2kWのランプ定格電力の大きい点灯回路やランプ灯数が増えると、HID ランプ用の専用変圧器の磁気飽和作用により電源電流波形のひずみが著しくなることがある。このような場合、高力率にするために入力端子にコンデンサを接続する方法があるが、電源電流の高調波成分がさらに大きくなり、結果として電源電圧波形のひずみが大きくなり、力率改善が難しくなる。そこで、専用変圧器の電源電圧波形に著しいひずみが生じないように変圧器容量を大きくする必要がある。また、遅相形点灯回路では、定格電流の1.5倍～1.8倍の始動電流が流れるため、必然的に電源の開閉器の電流容量が大きくなる。

したがって、点灯回路の電源側の電流波形の高調波成分を小さく抑制し、力率改善用コンデンサなしに力率をほぼ100%に改善できれば、専用変圧器の電源電圧波形をひずませる恐れがなく、適

正な容量の専用変圧器を選定できる。また、始動電流が定格電流とほぼ等しい点灯回路が実現できれば、電源の開閉器の電流容量を小さくすることが可能で、省エネルギー上も有利である。

著者の一人は、さきに高圧水銀ランプ遅相形点灯回路を工夫した同相形点灯回路について報告したり、定格インダクタンスの値よりやや大きい自己インダクタンス分をもつ安定器巻線の途中からバイパス回路を設け、バイパス回路のタップ位置と回路定数を適正に定めることで、電源電流のひずみ率が小さく、力率がほぼ100%の理想的な点灯回路を示した。

さらに、著者らはそれぞれの安定器巻線の途中から1つのバイパス回路を共用した複数灯点灯回路について報告した²⁾³⁾。すなわち、回路定数、タップ位置を適正值に定め、安定器巻線の電源側に適正值の抵抗を接続することによりすべてのランプが同時に放電を開始し、安定時のひずみ率が2%、力率がほぼ100%のバイパス回路共用複数灯点灯回路の実現が可能であることを示した。また、1つのバイパス回路を複数の点灯回路で共用することにより、個々の点灯回路にバイパス回路を設けるより安価にすることができ

る。本論文では、高圧水銀ランプバイパス回路共用複数灯点灯回路の電源電流の大きさが始動時から安定時までほぼ一定となる起因を示すとともに、従来の遅相形点灯回路との比較を示す。また、シミュレーション及び実験により、この複数灯点灯回路に消灯ランプが発生した場合の特性などについても示す。

2. 始動特性

2.1 始動時の点灯回路理論

図1に高圧水銀ランプバイパス回路共用複数灯点灯回路の回路図を示す。ランプ灯数を K ，安定器のタップから電源側，ランプ側の巻数をそれぞれ N_1, N_2 ，同じく電源側，ランプ側のインダクタンス，直流抵抗をそれぞれ L_1, R_1, L_2, R_2 ，バイパス回路のチョークコイルのインダクタンス，直流抵抗をそれぞれ L_b, R_b ，コンデンサ容量を C_b とし，ランプのみ非線形素子とする。また，電源の始動時の電圧，電流をそれぞれ v_s, i_s とし，ランプの始動時の電圧，電流をそれぞれ v_L, i_L とする。なお， R_s は複数灯のランプを同時に始動することを可能にする始動抵抗で，点灯した瞬間にスイッチ SW により短絡する。

いま，安定器の始動時の磁束 ϕ を

$$\phi = g(i) \quad \dots\dots\dots(1)$$

とする。

関数 $g(i)$ は励磁電流 $i(t)$ が決まると，磁束 $\phi(t)$ が決まるものとし，ヒステリシス特性を示す関数とする。この場合，起磁力は $N_1 i_s + N_2 i_L$ であるので，

$$i \cong \frac{1}{N_1 + N_2} (N_1 i_s + N_2 i_L) \quad \dots\dots\dots(2)$$

と i を定義すれば，(1)式が成立する。

図1の回路において次式が成立する。

図1 バイパス回路共用複数灯点灯回路

Fig.1 The operating circuits with a common by-pass circuit for multiple lamps.

$$\left. \begin{aligned} v_s &= N_1 \frac{d\phi}{dt} + R_1 i_s + K L_b \frac{d(i_s - i_L)}{dt} \\ &\quad + K R_b (i_s - i_L) + \frac{K}{C_b} \int (i_s - i_L) dt \\ v_L &= -N_2 \frac{d\phi}{dt} + R_2 i_L + K L_b \frac{d(i_s - i_L)}{dt} \\ &\quad + K R_b (i_s - i_L) + \frac{K}{C_b} \int (i_s - i_L) dt \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで，

$$\tau = \omega t, \quad \omega = 2\pi f \quad \dots\dots\dots(4)$$

とおく。ただし， ω は電源 $e(t)$ の角周波数で f は周波数である。

(4)式より(3)式は，次式となる。

$$\left. \begin{aligned} v_s &= \omega N_1 \frac{d\phi}{d\tau} + R_1 i_s + K \omega L_b \frac{d(i_s - i_L)}{d\tau} \\ &\quad + K R_b (i_s - i_L) + \frac{K}{\omega C_b} \int (i_s - i_L) d\tau \\ v_L &= -\omega N_2 \frac{d\phi}{d\tau} - R_2 i_L + K \omega L_b \frac{d(i_s - i_L)}{d\tau} \\ &\quad + K R_b (i_s - i_L) + \frac{K}{\omega C_b} \int (i_s - i_L) d\tau \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(5)$$

図2にバイパス回路共用複数灯点灯回路の始動特性を示す。ただし，ランプの定格電力は200W，ランプ灯数は4灯，バイパス回路のタップ位置は1/5である。始動時のランプ電圧，電流は水銀蒸気圧の上昇とともに時間変化し，図2のように緩やかに変化するもので，電圧，電流の各調波の時間振幅のみゆっくり変化するものとして，近似解法を行う。

ランプの特性を考慮して，電源電圧・電流，ランプ電圧・電流は次式で表せる。

$$\left. \begin{aligned} v_s(\tau) &= \sum_{n=0}^{\infty} v_{s,2n+1}(\tau) \sqrt{2} \cos\{(2n+1)\tau + \psi_{s,2n+1}\} \\ v_L(\tau) &= \sum_{n=0}^{\infty} v_{L,2n+1}(\tau) \sqrt{2} \cos\{(2n+1)\tau + \psi_{L,2n+1}\} \\ i_s(\tau) &= \sum_{n=0}^{\infty} i_{s,2n+1}(\tau) \sqrt{2} \cos\{(2n+1)\tau + \theta_{s,2n+1}\} \\ i_L(\tau) &= \sum_{n=0}^{\infty} i_{L,2n+1}(\tau) \sqrt{2} \cos\{(2n+1)\tau + \theta_{L,2n+1}\} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(6)$$

ただし， $n=0, 1, 2, \dots$ 。 $\psi_{s,2n+1}, \psi_{L,2n+1}, \theta_{s,2n+1}, \theta_{L,2n+1}$ は，電源電圧・電流，ランプ電圧・電流の電源電圧基本成分に対する位相角を示す。また，(1)式より，

図2 バイパス回路共用複数灯点灯回路の始動特性

Fig.2 The start characteristics of the operating circuits with a common by-pass circuit for multiple lamps.

$$\phi(\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \Phi(\tau) \sqrt{2} \cos\{(2n+1)\tau + \alpha_{2n+1}\} \quad \dots\dots\dots(7)$$

ただし、 $n=0, 1, 2, \dots$ 。

(6), (7)式を複素表現を用いると、次式となる。

$$\left. \begin{aligned} v_s(\tau) &\cong \operatorname{Re} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \dot{V}_{s,2n+1}(\tau) \sqrt{2} e^{j(2n+1)\tau} \right] \\ v_L(\tau) &\cong \operatorname{Re} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \dot{V}_{L,2n+1}(\tau) \sqrt{2} e^{j(2n+1)\tau} \right] \\ i_s(\tau) &\cong \operatorname{Re} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \dot{I}_{s,2n+1}(\tau) \sqrt{2} e^{j(2n+1)\tau} \right] \\ i_L(\tau) &\cong \operatorname{Re} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \dot{I}_{L,2n+1}(\tau) \sqrt{2} e^{j(2n+1)\tau} \right] \\ \phi(\tau) &\cong \operatorname{Re} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \dot{\Phi}_{2n+1}(\tau) \sqrt{2} e^{j(2n+1)\tau} \right] \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(8)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{s,2n+1}(\tau) &= V_{s,2n+1}(\tau) \sqrt{2} e^{j\psi_{s,2n+1}} \\ \dot{V}_{L,2n+1}(\tau) &= V_{L,2n+1}(\tau) \sqrt{2} e^{j\psi_{L,2n+1}} \\ \dot{I}_{s,2n+1}(\tau) &= I_{s,2n+1}(\tau) \sqrt{2} e^{j\theta_{s,2n+1}} \\ \dot{I}_{L,2n+1}(\tau) &= I_{L,2n+1}(\tau) \sqrt{2} e^{j\theta_{L,2n+1}} \\ \dot{\Phi}_{2n+1}(\tau) &= \Phi_{2n+1}(\tau) \sqrt{2} e^{j\alpha_{2n+1}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここで、ランプ電圧 v_L 、電流 i_L の振幅の変化が緩やかであるので、電源電流 i_s 、磁束 ϕ のそれぞれの振幅変化も緩やかであると考えられる。したがって、次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} (2n+1) \Phi_{2n+1} &\gg \frac{d\Phi_{2n+1}(\tau)}{d\tau} \\ (2n+1) I_{s,2n+1} &\gg \frac{dI_{s,2n+1}(\tau)}{d\tau} \\ (2n+1) I_{L,2n+1} &\gg \frac{dI_{L,2n+1}(\tau)}{d\tau} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(10)$$

(8), (9), (10)式より、(5)式は、

$$\left. \begin{aligned} &\sum_{n=0}^{\infty} \dot{V}_{s,2n+1}(\tau) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \left[j(2n+1) \omega N_1 \dot{\Phi}_{2n+1}(\tau) + R_1 \dot{I}_{s,2n+1}(\tau) \right. \\ &\quad \left. + \left\{ K \cdot R_b + j(2n+1) K \cdot \omega L_b + \frac{K}{j(2n+1) \omega C_b} \right\} \right. \\ &\quad \left. \times \{ \dot{I}_{s,2n+1}(\tau) - \dot{I}_{L,2n+1}(\tau) \} \right] \\ &\sum_{n=0}^{\infty} V_{L,2n+1}(\tau) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \left[-\{ j(2n+1) \omega N_2 \dot{\Phi}_{2n+1}(\tau) + R_2 \cdot I_{L,2n+1}(\tau) \} \right. \\ &\quad \left. + \left\{ K \cdot R_b + j(2n+1) K \cdot \omega L_b + \frac{K}{j(2n+1) \omega C_b} \right\} \right. \\ &\quad \left. \times \{ \dot{I}_{s,2n+1}(\tau) - \dot{I}_{L,2n+1}(\tau) \} \right] \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(11)$$

となる。また、(2), (6)式より、

$$\dot{I}_{2n+1}(\tau) = \frac{N_1}{N_1 + N_2} \dot{I}_{s,2n+1}(\tau) + \frac{N_2}{N_1 + N_2} \dot{I}_{L,2n+1}(\tau) \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここで、回路的な意味をはっきりさせるために、次の量を定義する。

$$\left. \begin{aligned} \dot{L}_{2n+1}(\tau) &\cong \frac{\dot{\Phi}_{2n+1}(\tau)}{\dot{I}_{2n+1}(\tau)} \\ \dot{L}_{1,2n+1}(\tau) &\cong \frac{N_1^2}{N_1 + N_2} \dot{L}_{2n+1}(\tau) \\ \dot{L}_{2,2n+1}(\tau) &\cong \frac{N_2^2}{N_1 + N_2} \dot{L}_{2n+1}(\tau) \\ \dot{M}_{2n+1}(\tau) &\cong \frac{N_1 N_2}{N_1 + N_2} \dot{L}_{2n+1}(\tau) \\ \dot{L}_{b,2n+1}(\tau) &\cong \frac{N_b \Phi_{b,2n+1}(\tau)}{\dot{I}_{1,2n+1}(\tau) - \dot{I}_{2,2n+1}(\tau)} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(13)$$

ただし、 $n=0, 1, 2, \dots$ 。

また、 N_b 、 $\Phi_{b,2n+1}$ は、それぞれバイパス回路のコイル L_b の巻数と磁束である。

したがって、(12), (13)式を用いると、(11)式は、

$$\begin{aligned} &\sum_{n=0}^{\infty} \dot{V}_{s,2n+1}(\tau) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \left[\dot{I}_{s,2n+1}(\tau) \{ R_1 + j(2n+1) \omega (\dot{L}_{1,2n+1}(\tau) + \dot{M}_{2n+1}(\tau)) \} \right. \\ &\quad \left. + \left\{ K \cdot R_b + j(2n+1) \omega (K \dot{L}_{b,2n+1} - \dot{M}_{2n+1}) + \frac{K}{j(2n+1) \omega C_b} \right\} \right. \\ &\quad \left. \times \{ \dot{I}_{s,2n+1}(\tau) - \dot{I}_{L,2n+1}(\tau) \} \right] \quad \dots\dots\dots(14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\sum_{n=0}^{\infty} \dot{V}_{L,2n+1}(\tau) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \left[-\dot{I}_{L,2n+1}(\tau) \{ R_2 + j(2n+1) \omega (\dot{L}_{1,2n+1}(\tau) + \dot{M}_{2n+1}(\tau)) \} \right. \\ &\quad \left. + \left\{ K \cdot R_b + j(2n+1) \omega (K \dot{L}_{b,2n+1} - \dot{M}_{2n+1}) + \frac{K}{j(2n+1) \omega C_b} \right\} \right. \\ &\quad \left. \times \{ \dot{I}_{s,2n+1}(\tau) - \dot{I}_{L,2n+1}(\tau) \} \right] \quad \dots\dots\dots(15) \end{aligned}$$

となる。

2.2 ヒステリシス損を考慮した点灯回路理論

安定器及びバイパス回路のチョークコイル L_b は始動時もヒステリシス特性を示す⁴⁾。したがって、

$$\left. \begin{aligned} \dot{L}_{2n+1} &= L_{2n+1}(\tau) - i L'_{2n+1}(\tau) \\ L_{2n+1}(\tau) &> 0, \quad L'_{2n+1}(\tau) > 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(16)$$

ただし、 $n=0, 1, 2, \dots$ 。

(13)式より、 $\dot{L}_{1,2n+1}(\tau)$ 、 $\dot{L}_{2,2n+1}(\tau)$ 、 $\dot{M}_{2n+1}(\tau)$ 及び $\dot{L}_{b,2n+1}(\tau)$ も複素数となり、次式で表せる。

$$\left. \begin{aligned} j(2n+1) \omega \dot{L}_{1,2n+1}(\tau) &= (2n+1) \omega L'_{1,2n+1}(\tau) + j(2n+1) \omega L_{1,2n+1}(\tau) \\ j(2n+1) \omega \dot{L}_{2,2n+1}(\tau) &= (2n+1) \omega L'_{2,2n+1}(\tau) + j(2n+1) \omega L_{2,2n+1}(\tau) \\ j(2n+1) \omega \dot{M}_{2n+1}(\tau) &= (2n+1) \omega M'_{2n+1}(\tau) + j(2n+1) \omega M_{2n+1}(\tau) \\ j(2n+1) \omega \dot{L}_{b,2n+1}(\tau) &= (2n+1) \omega L'_{b,2n+1}(\tau) + j(2n+1) \omega L_{b,2n+1}(\tau) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(17)$$

ただし、 $n=0, 1, 2, \dots$ 。

すなわち、周波数によって変化する実効抵抗が生じる。また、図3に示すように安定器及びバイパス回路のチョークコイルは線形性の強いヒステリシス特性を示す。したがって、

$$\left. \begin{aligned} L_{1,2n+1}(\tau) &= L_1(\tau) = L_1 \\ L_{2,2n+1}(\tau) &= L_2(\tau) = L_2 \\ M_{2n+1}(\tau) &= M(\tau) = M \\ L_{b,2n+1}(\tau) &= L_b(\tau) = L_b \\ L'_{1,2n+1}(\tau) &= L'_{1,2n+1} \\ L'_{2,2n+1}(\tau) &= L'_{2,2n+1} \\ M'_{2n+1}(\tau) &= M'_{2n+1} \\ L'_{b,2n+1}(\tau) &= L'_{b,2n+1} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(18)$$

とおける。ただし、 $n=0, 1, 2, \dots$ 。

(17), (18)式より、(14), (15)式は、入力端子に基本波正弦電圧 E を印加している時、次式で表せる。

$$\begin{aligned} \dot{E} &= \sum_{n=0}^{\infty} \dot{I}_{s,2n+1}(\tau) \{ r_{1,2n+1} + j(2n+1) \omega (L_1 + M) \} \\ &\quad + \left\{ K \cdot r_{b,2n+1} + j(2n+1) K \cdot \omega \left\{ L_b - \frac{M}{K} \right\} \right. \\ &\quad \left. + \frac{K}{j(2n+1) \omega C_b} \right\} \times \{ \dot{I}_{s,2n+1}(\tau) - \dot{I}_{L,2n+1}(\tau) \} \quad \dots\dots\dots(19) \end{aligned}$$

横軸：電流 1A/div, 縦軸：鎖交磁束 0.025wb/div

図3 安定器のヒステリシス特性

Fig. 3 Hysteresis Characteristic of ballast.

$$\sum_{n=0}^{\infty} \dot{V}_{L,2n+1}(\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \left[-\dot{I}_{L,2n+1}(\tau) \{ r_{L,2n+1} + j(2n+1)\omega(L_2 + M) \} + \left\{ K \cdot r_{b,2n+1} + j(2n+1)K\omega \left\{ L_b - \frac{M}{K} \right\} + \frac{K}{j(2n+1)\omega C_b} \right\} \times \{ \dot{I}_{S,2n+1}(\tau) - \dot{I}_{L,2n+1}(\tau) \} \right] \quad \dots\dots\dots(20)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} r_{L,2n+1} &= R_1 + (2n+1)\omega(L'_{L,2n+1} + M'_{2n+1}) \\ r_{L,2n+1} &= R_2 + (2n+1)\omega(L'_{L,2n+1} + M'_{2n+1}) \\ r_{b,2n+1} &= R_b + (2n+1)\omega \left(L'_{b,2n+1} - \frac{M'_{2n+1}}{K} \right) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(21)$$

いま、入力端子に基本波電圧 $\dot{E}$ のみ存在するものとし、(19)式において調平衡法を適用すると、基本波回路と第3, 5, $2n+1$ 調波回路の1灯分の近似等価回路はそれぞれ図4(a), (b)のようになる。

ここで、ランプより発生する第3, 第5調波などの高調波電流は主にバイパス回路に流れる。また、実験により始動時から安定時まで電源電流のひずみ率は2.5%以下であることがわかった。したがって、電源電流にはほぼ基本波のみが流れていると考えてよいので、電源電流の始動特性は図4(a)の基本波回路を用いて考察する。

2.3 始動特性の考察

図4(a)の基本波回路において、ランプの基本波インピーダンスを $\dot{Z}_{L,1}(\tau)$ とすると、(c)-(c')端子よりランプ側のアドミタンス $\dot{Y}_{2,1}(\tau)$ 、バイパス回路のアドミタンス $\dot{Y}_{b,1}$ は(22)式で表せる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{Y}_{2,1}(\tau) &= \frac{1}{r_{2,1} + j\omega(L_2 + M) + \dot{Z}_{L,1}(\tau)} \\ \dot{Y}_{b,1} &= \frac{1}{K r_{b,1} + jK\omega \left(L_b - \frac{M}{K} \right) + \frac{K}{j\omega C_b}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(22)$$

(b)-(b')端子よりランプ側の基本波アドミタンス $\dot{Y}_{r,1}(\tau)$ と基本波インピーダンス $\dot{Z}_{r,1}(\tau)$ は、(22)式より、

$$\left. \begin{aligned} \dot{Y}_{r,1}(\tau) &= \dot{Y}_{2,1}(\tau) + \dot{Y}_{b,1} \\ \dot{Z}_{r,1}(\tau) &= 1 / \dot{Y}_{r,1}(\tau) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(23)$$

となり、入力端子(a)-(a')からランプ側をみた基本波インピーダンスは、

(a)基本波回路

(b)第3, 5, ..., 2n+1調波回路

図4 始動時の等価回路 (1灯分)

Fig. 4 Equivalent circuit of starting condition.

$$\dot{Z}_1(\tau) = r_{1,1} + j\omega(L_1 + M) + \dot{Z}_{r,1}(\tau) \quad \dots\dots\dots(24)$$

で表せる。

また、従来の遅相形点灯回路の入力端子から負荷側を見た基本波インピーダンス $\dot{Z}'_1(\tau)$ は、安定器の自己インダクタンスを L [H]とすると、次式となる。

$$\dot{Z}'_1(\tau) = r + j\omega L + \dot{Z}_{L,1}(\tau) \quad \dots\dots\dots(25)$$

表1に200Wバイパス回路共用4灯点灯回路の回路定数を示す。なお、安定器の自己インダクタンスは0.24[H]である。この回路に200V, 60Hzを印加したときのランプの基本波インピーダンス $\dot{Z}_{L,1}(\tau)$ は、ランプ電圧、電流の波形分析より図5のようになる。図5より、ランプの基本波インピーダンス $\dot{Z}_{L,1}(\tau)$ は、始動から安定状態に近づくにつれて、ランプのリアクタンス成分の大きさより抵抗成分の大きさの増加量が大きくなっている。

(22)式から $\dot{Y}_{2,1}(\tau)$ のベクトル軌跡は図6のようになる。安定状態に近づくにつれてランプの基本波インピーダンス $\dot{Z}_{L,1}(\tau)$ が大きくなるため、 $\dot{Y}_{2,1}(\tau)$ の大きさは小さくなり、容量性方向に変化している。また、(23)式から、(b)-(b')端子よりランプ側の基本波

表1 200W バイパス回路共用4灯点灯回路の回路定数

Table 1 Circuit constants of 200W in the Operating Circuits with a Common By-pass Circuit for multiple lamps.

$r_{1,1}$ [Ω]	$R_{2,1}$ [Ω]	L_1 [H]	L_2 [H]
1.444	5.785	0.0096	0.1536
M [H]	$R_{b,1}$ [Ω]	L_b [H]	C_b [μF]
0.0384	2.0	0.019	80

図5 始動時のランプの基本波インピーダンス $\dot{Z}_{L1}(\tau)$ の変化
Fig.5 Variation of on $\dot{Z}_{L1}(\tau)$ starting condition.

図6 始動時の基本波アドミタンス $\dot{Y}_{21}(\tau)$ と $\dot{Y}_{r1}(\tau)$ の変化
Fig.6 Variation of $\dot{Y}_{21}(\tau)$ and $\dot{Y}_{r1}(\tau)$ on starting condition.

アドミタンス $\dot{Y}_{r1}(\tau)$ の軌跡は、同図のようになる。適正なバイパス回路の回路定数を定めることでバイパス回路のアドミタンス $\dot{Y}_{b1}$ が $\dot{Y}_{r1}(\tau)$ の大きさをほぼ一定にする作用をしている。

(24), (25)式から、バイパス回路共用4灯点灯回路の基本波インピーダンス $\dot{Z}_1(\tau)$ 及び従来の遅相形点灯回路の基本波インピーダンス $\dot{Z}'_1(\tau)$ のベクトル軌跡を図7に示す。図7より、従来の遅相形点灯回路の基本波インピーダンス $\dot{Z}'_1(\tau)$ は、安定状態に近づいてもリアクタンス成分は増加を続け、始動から安定状態まで常に誘導性の状態にある。それに対しバイパス回路共用4灯点灯回路の基本波インピーダンス $\dot{Z}_1(\tau)$ は、始動時はランプの抵抗成分が小さいため誘導性であるが、安定状態に近づくにつれリアクタンス成分は減少し容量性の方向に変化し、安定状態では抵抗成分のみになる。したがって、バイパス回路共用4灯点灯回路の電源電流は始動時においては遅れの状態であるが安定状態に近づくにつれ進みの方向に変化し、安定状態では力率はほぼ100%となる。

また、始動時から安定状態までの基本波インピーダンスの大きさの変化は、図8より従来の遅相形点灯回路の基本波インピーダンス $\dot{Z}'_1(\tau)$ の大きさが始動から安定状態に近づくにつれ徐々に大きくなるのに対して、バイパス回路共用4灯点灯回路の基本波インピーダンスの大きさは始動から安定状態まで常にはほぼ一定である。したがって、バイパス回路共用4灯点灯回路の電源電流は始動時から安定状態まではほぼ一定値となる。

図7 始動時のバイパス回路共用4灯点灯回路の基本波インピーダンス $\dot{Z}_1(\tau)$ と従来の遅相形点灯回路の基本波インピーダンス $\dot{Z}'_1(\tau)$ の変化
Fig.7 Variation of $\dot{Z}_1(\tau)$ and $\dot{Z}'_1(\tau)$ on starting condition.

図8 始動時のバイパス回路共用4灯点灯回路の基本波インピーダンス $|\dot{Z}_1(\tau)|$ と従来の遅相形点灯回路の基本波インピーダンス $|\dot{Z}'_1(\tau)|$ の変化
Fig.8 Variation of $|\dot{Z}_1(\tau)|$ and $|\dot{Z}'_1(\tau)|$ on starting condition.

これらのことより、バイパス回路共用複数灯点灯回路は、従来の遅相形点灯回路にバイパス回路を設け回路定数を適正に定めることにより、入力端子の基本波インピーダンス $\dot{Z}_1(\tau)$ の大きさを一定にし、力率を100%に近づける作用をしている事が分かる。したがって、従来の遅相形点灯回路は、始動時に定格の1.5~1.8倍の始動電流が流れ、安定時の力率も60~70%であるが、バイパス回路共用複数灯点灯回路は、始動から安定状態まではほぼ一定の電流となり、安定時には力率が100%になることが分かる。また、 K 灯点灯回路においても、同様のことが言える。

図9に200W バイパス回路共用4灯点灯回路の電源電圧が30V、60V、123Vのときの電源電流波形を、図10に従来の遅相形点灯回路(4灯分)の電源電圧が30V、60V、124Vのときの電源電流波形をそれぞれ示す。

3. 消灯ランプ発生時の特性

3.1 消灯ランプ発生時のシミュレーション

バイパス回路共用複数灯点灯回路において、ランプが点灯中に寿命や故障等により消灯した場合の回路に成立する式を以下に示す。 K 灯点灯回路において、 K' 灯のランプが消灯した場合の回路図を図11に示す。ここで、点灯しているランプのバイパス回路電流を i_{b1} 、消灯しているランプのバイパス回路電流を i_{b2} とする。

図11より求めた安定時の微分方程式は(26)~(29)式となる。

(a) ランプ電圧30 V

(b) ランプ電圧60 V

(c) ランプ電圧123 V

図9 200W バイパス回路共用4灯点灯回路の電源電圧 e と電源電流 i_s の波形
($e: 100V/div, 4 \times i_s: 4A/div$)

Fig.9 Supply voltage and supply current waveforms for 200W operating circuits of four lamps on common by-pass circuit.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{J_1} (J_2 \times i_c + J_3 \times i_{b1} + J_4 \times i_{b2} + J_5 \times V_{cb} + J_6 \times e + J_7 \times \frac{1}{G} \times i_L) \quad (26)$$

$$\frac{di_{b1}}{dt} = \frac{1}{J_8} (e - J_9 \frac{di_L}{dt} - J_{10} \times i_L - \frac{i_L}{G} - R_2 \times i_{b1}) \quad (27)$$

$$\frac{di_{b2}}{dt} = \frac{1}{J_{11}} \left[J_{22} \frac{di_L}{dt} + \left\{ J_{13} + (K - K') L_b \frac{1}{G} \right\} i_L + J_{14} \times i_{b1} - J_{15} \times i_{b2} - J_8 \times V_{cb} - J_{16} \times e \right] \quad (28)$$

$$\frac{dV_{cb}}{dt} = \frac{(K - K') i_{b1} + K' i_{b2}}{C_b} \quad (29)$$

ただし、 G はランプの等価コンダクタンスで、 $J_1 \sim J_{16}$ は次式と

(a) ランプ電圧30 V

(b) ランプ電圧60 V

(c) ランプ電圧124 V

図10 200W 遅相形点灯回路の電源電圧 e と電源電流 i_s の波形 (4 灯分)
($e: 100V/div, 4 \times i_s: 4A/div$)

Fig.10 Supply voltage and supply current waveforms for 200W lag type operating circuit.

する。

$$J_1 = \frac{1}{(L_2 + M)(L_2 + K' L_b)} \{ (L_2 + K' L_b)(L_1 L_2 - M^2) + (K - K') L_2 L_b (L_1 + L_2 + 2M) \}$$

$$J_2 = \frac{1}{(L_2 + M)(L_2 + K' L_b)} (L_2 + K' L_b) \times \{ R_2 M - (R_1 + R_s) L_2 \} - (K - K') L_2 L_b (R_1 + R_s + R_2)$$

$$J_3 = \frac{1}{(L_2 + M)(L_2 + K' L_b)} \times \{ (L_2 + K' L_b) \{ R_2 M - R_{Mb} (L_2 - M) \} + (K - K') L_2 \{ -R_2 L_b + R_b (L_2 + M) \} \}$$

図11 消灯ランプ発生時の点灯回路
Fig.11 Operating circuit in case of the non-lighting lamp occurrence.

$$\begin{aligned}
 J_4 &= \frac{K'}{(L_2 + K'L_b)} (L_2 R_b - R_2 L_b) \\
 J_5 &= \frac{L_2}{(L_2 + K'L_b)} \\
 J_6 &= \frac{L_2}{(L_2 + M)(L_2 + K'L_b)} \{ (K - K') L_b - M + K'L_b \} \\
 J_7 &= \frac{-L_2}{(L_2 + M)(L_2 + K'L_b)} \{ (K - K') L_b + L_2 + K'L_b \} \\
 J_8 &= L_2 + M \\
 J_9 &= L_1 + L_2 + 2M \\
 J_{10} &= R_1 + R_s + R_2 \\
 J_{11} &= (L_2 + M)(L_2 + K'L_b) \\
 J_{12} &= (K - K') L_b (L_1 + L_2 + 2M) \\
 J_{13} &= (K - K') L_b (R_1 + R_s + R_2) \\
 J_{14} &= (K - K') \{ L_b R_2 - (L_2 + M) R_b \} \\
 J_{15} &= (L_2 + M)(R_2 + K'R_b) \\
 J_{16} &= (K - K') L_b - (L_2 + M)
 \end{aligned}
 \quad \dots (30)$$

また、安定時には次式が成り立つ⁵⁾。

$$\frac{dG}{dt} = A_A \times i_L^2 - C_C \times G^2 \dots (31)$$

ただし、 A_A 、 C_C はモデル定数である。

(26)~(29)及び(31)式の五元連立微分方程式に E や A_A 、 C_C 等の値を与える。さらに、演算開始時間 $t=0$ における等価コンダクタンス G_0 の初期値を与え、ルンゲ・クッタ法等を用いて、安定時のステップ時間 Δt ごとの i_L 、 i_{b1} 、 i_{b2} などを求めることができる。

表2に定格ランプ電力200Wのバイパス回路共用4灯点灯回路に200Vの正弦波電圧を印加した時、安定状態において1灯の消

表2 消灯ランプ発生時のシミュレーションと実測結果
Table 2 Simulation and experimental results in case of the non-lighting lamp occurrence.

タップ位置	L_1 (H)	L_2 (H)	R_1 (Ω)	R_2 (Ω)	L_b (H)	C_b (μF)
1 / 5	0.0096	0.1536	1.446	5.784	0.019	80
消灯ランプ数	1 灯		消灯ランプなし			
	シミュレーション		実測	実測		
電源電流 (A)	4.98		4.85	4.61		
電源電力 (W)	920.8		945	910		
ランプ電圧 V_L (V)	123.8		118	121.5		
ランプ電流 i_L (A)	1.95		2.5	1.95		
ランプ電力 (W)	218.7		260	220		
バイパス電流 i_b (A)	6.92		6.75	6.5		
力率 (%)	92.5		97.4	98.7		
電源電流ひずみ率 (%)	1.14		1.67	2.03

図12 消灯ランプ発生時のシミュレーション
Fig.12 Simulation waveforms in case of the non-lighting lamp occurrence.

図13 消灯ランプ発生時の実測波形
(e : 100V/div, i_s : 5A/div)

Fig.13 Experimental waveforms in case of the non-lighting lamp occurrence.

灯ランプが発生した場合のシミュレーション結果と実測結果を示す。なお、モデル定数 A_A 、 C_C は、それぞれ8.77、 13.5×10^4 である。また、図12に消灯ランプが発生した時のシミュレーション波形を、図13に電源電圧、電流の実測波形を示す。

バイパス回路共用複数灯点灯回路において安定状態で消灯ランプが発生した場合、他のランプは点灯を続けることが実験により確認された。表2より、シミュレーションより求めた電源電流、電源電力などの値は、実測値とほぼ一致している。また、図12、図13より、シミュレーションと実測の波形を比較すると電源電圧 e と電源電流 i_s の位相差は若干異なるが、その形状はほぼ一致している。また、消灯ランプが発生していない時と比べ、力率が若干悪くなるが、電源電流ひずみ率や電源電流の大きさ等には大きな変化はない。したがって、バイパス回路共用複数灯点灯回路は、使用中に消灯ランプが発生しても実用上は支障がないと言える。

4. 安定器損失の低減対策

これまでに、バイパス回路共用複数灯点灯回路において複数ランプを同時に始動することを可能にするためには、安定器巻線の電源側の抵抗を大きくする必要があり、図11に示すように始動抵抗 R_s を接続しなければならないことを報告した²⁾³⁾。しかし、この抵抗による損失が発生するため、効率が悪くなることが考えられる。そこで、今回、新たに抵抗 R_s を点灯直後に直後に短絡するためのスイッチ(SW)を設けた。

表3に200W バイパス回路共用4灯点灯回路(タップ位置1/5)を用いて、抵抗 R_s を点灯直後に短絡した場合としなかった場合の実測結果の比較を示す。その結果、始動抵抗 R_s が8Ωのとき、始動抵抗 R_s を短絡することにより効率(P_L/P_1)が4%向上することが分かった。すなわち、始動抵抗 R_s を短絡することにより、 R_s による損失がなくなるため、点灯回路全体の効率が向上すると言える。

5. まとめ

著者らは、高圧水銀ランプバイパス回路共用複数灯点灯回路の始動特性及び消灯ランプ発生時の諸特性などを明らかにした。すなわち、始動特性については、調和平衡法により始動時の等価回路を求め、点灯回路の基本波インピーダンスのベクトル軌跡をもとに始動時から安定状態までの始動電流特性を示した。消灯ランプ発生時の諸特性については、シミュレーションと実測結果より諸特性を求め、消灯ランプ発生時も実用上支障がないことを明らかにした。

本研究の結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) ランプの基本波インピーダンスは、ランプ電圧の上昇と共に大きくなるが、バイパス回路の働きにより入力端子の基本波インピーダンスの大きさは始動時から安定状態までほぼ一定である。したがって、始動時から安定状態まで電源電流はほぼ一定となる。
- (2) 入力端子のインピーダンスは、始動時には誘導性であるが、安定状態に近づくにつれて容量性の方向に変化し、安定状態では抵抗成分のみとなり、力率はほぼ100%となる。
- (3) 従来の遅相形点灯回路と比較して、始動電流が小さいこと、

表3 始動抵抗 R_s の短絡効果
Table 3 The effect by short circuit of starting resistance.

始動抵抗 $R_s(\Omega)$	電源電流 $I_s(A)$	電源電力 $P_1(W)$	ランプ電流 $I(A)$	ランプ電力 $P_L(W)$ ($\times 4$ 灯)	P_L/P_1
3.3	4.61	910	1.95	880	96.7
8.0	4.59	900	1.85	840	93.3
短絡	4.68	925	2.05	900	97.3

力率が良いことなどから省エネルギーにつながるほか、回路の電流容量の縮小などの利点がある。

- (4) 安定状態で消灯ランプが発生すると、力率が数%悪くなるが、他のランプには影響がなく実用上問題はない。
- (5) 始動時の同時点灯を可能にするために接続した始動抵抗を点灯直後に短絡することにより、安定器損失が低減でき、点灯回路全体の効率が向上する。

参考文献

- (1) 家村, 中村, 黒住, 山口: 高圧水銀ランプ同相形点灯回路の考察, 電学論A, 115-11, pp.1062-1071 (1995).
- (2) 家村, 野中, 黒住, 武内, 押方, 須永, 高妻, 山口: 高圧水銀ランプバイパス回路共用複数灯点灯回路に関する考察, 電学論A, 120-7, pp.741-749 (2000).
- (3) Nonaka, T. and Iemura, M.: The Plural Operating Circuits of Plural Lamps on Common By-pass Circuit for High-pressure Mercury Discharge, Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference, Volume 5, pp.3407-3414 (2000).
- (4) 家村, 黒住, 山口: バイパス回路付き高圧水銀ランプ遅相形点灯回路の最適タップ位置, 電学論A, 114-5, pp.361-369 (1994).
- (5) 梶見, 坊: 水銀ランプ点灯回路のシミュレーションによる解析, 照学誌, 59-5, p.194 (1975).

(受付日2001年2月5日/採録日2001年5月31日)

野中 正綱 (非会員)

株式会社九電工研究開発センター

家村 道雄 (正会員)

崇城大学(旧名:熊本工業大学)電気工学科

1970年12月1日生。1995年3月大分大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月(株)九電工入社。主として、高圧水銀ランプ点灯回路の高調波電流低減化と力率改善に関する研究に従事。電気学会会員、電気設備学会会員。

1937年1月4日生。1961年3月鹿児島大学工学部電気工学科卒業。1964年~92年宮崎県立日向工業高校、都城工業高校、宮崎工業高校(生徒指導主事、電気科科长)。同年4月崇城大学講師、1994年4月同助教授、1997年4月同教授となり、現在に至る。この間、放電ランプ点灯回路の高調波電流低減化に関する研究に従事。工学博士。1981年オーム奨学賞、1992年電気設備学会賞受賞。電気学会会員、電気設備学会会員。