各種定格高圧水銀ランプ点灯回路の一高調波分析法

正会員 家村道雄 (熊本工業大学)

田中政幸 (北九州工業高等専門学校)

正会員 黒住正明 (宮崎工業高等学校) 専門会員 山口純一 (熊本工業大学)

Analysis of Harmonic Waves in the Operating Circuit for High-Pressure Mercury Arc Lamps of Various Ratings

Michio Iemura (Member) (Kumamoto Institute of Technology)

Masayuki Tanaka (Kitakyushu National College of Technology)

Masaaki Kurosumi (Member) (Miyazaki Technological High School)

Junichi Yamaguchi (Fellow Member) (Kumamoto Institute of Technology)

ABSTRACT

In the operating circuits of high-pressure mercury arc lamps of various ratings, the voltage and current characteristics of the lamps exhibit some analogous properties inherent in their respective characteristics pairs.

In this paper, we first replace the lamp, treated as a circuit element by a equivalent conductance. Then, based on the model constants of the equivalent conductance of the lamp's operating circuit having specified ratings, we obtain from the analogous properties of the lamp's voltage and current characteristics the corresponding model constants of the equivalent conductance for the lamp in operating circuits having various other ratings. This makes possible waveform analysis of the voltage and current characteristics of each circuit element by simulation, which is described in this paper.

1. まえがき

放電ランプ点灯回路の回路解析には理論的な方法と実験的な方法がある。

理論的な方法としては、進相形点灯回路について、ランプ電圧を矩形波の定電圧、または電源電圧より位相が進んでいる台形波独立定電圧として電流を求めて、波形分析する方法等が発表されている^{1),2)}。また、シミュレーションにより解析する方法としては、放電ランプの電気特性を瞬時等価コンダクタンスでモデル化し解析する方法³⁾、アークプラズマ柱内の電界、アークプラズマ柱の長さを考慮に入れて解析する方法⁴⁾等がある。しかし、これらの発表ではいずれも高調波分析については言及されていない。

半導体応用機器の普及、或いは放電ランプ等の非線形負荷が増加し、電力系統の電圧ひずみが拡大し高調波障害が増加しつつある今日、より早くて簡単な高調波分析手法が望まれている。

実験的に高調波分析する場合、各素子の電圧、電流の記録を取り、計算機で高調波解析する方法、さらに、正確に分析するには高精度な高調波分析器を用いる方法がある。

筆者等は高圧水銀ランプ点灯回路において、ランプの等価コンダクタンスのモデル定数を用いたシミュレーションにより、各素子の電圧、電流が高調波分析できることを示す。また、200W以上の各種定格高圧水銀ランプ点灯回路においては、ランプの電圧、電流波形はそれぞれほぼ相似性を示すので、ある一種の水銀ランプの等価コンダクタンスのモデル定数より他の定格のモデル定数

が簡単に求められることを示す。このモデル定数を用いシミュレーションにより他の定格の各素子の電圧、電流が簡単に高調波分析可能であることを示す。さらに、入力端子電圧が変化してもランプの電圧、電流波形の相似性より、各素子の電圧、電流が簡単に高調波分析できることを示す。

遅相形点灯回路と進相形点灯回路を並列に接続した高圧水銀ランプフリッカレス点灯回路の進相形点灯回路の素子のチョークコイルのLとコンデンサのCの組合せの値は無数に存在する。しかし、ランプの電圧、電流についてJIS規格を満たす範囲でチョークコイルのLとコンデンサのCの値の組合せを定めねばならない。

200W点灯回路で等価コンダクタンスのモデル定数を用いたシミュレーションにより、チョークコイルのLとコンデンサのCの組合せの各値の変化による電流のひずみ率、波高率等を求める。さらに、フリッカレス点灯回路の電源電流のひずみ率、力率等を求め、L、Cの各組み合わせのいずれにおいても電源電流のひずみ率がランプ電流のひずみ率より大きくなり、電源電流の力率が100%にならないことを示す。

2. ランプの電圧、電流の相似性による高調波分析理論

2.1 等価コンダクタンスを用いたシミュレーションによる点灯回路の高調波分析法

放電ランプ内での電子密度の単位時間当たりの変化割合は、電子密度の単位時間当たりの発生割合と消失割合の差で表せると仮

定し、放電ランプの電気的特性を等価コンダクタンスGで表すと、次のような式が成り立つ³⁾。

$$G = \frac{i_L}{u_L} \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{dG}{dt} = A \cdot i_L^2 - C_c \cdot G^2 \dots\dots\dots(2)$$

ただし、Gは時間tにおける等価コンダクタンスの瞬間値、 u_L 、 i_L はランプの電圧、電流の瞬間値とし、A、 C_c は定数である。

図1の進相形点灯回路において、安定器（チョークコイル）の抵抗、自己インダクタンス及びコンデンサの容量をそれぞれR、L及びCとする。 $e = E \sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi)$ の電圧を印加したとすれば、

$$\frac{di_L}{dt} = \{E \sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi) - (1/G + R) \cdot i_L - u_c\} / L \dots\dots\dots(3)$$

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{i_L}{C} \dots\dots\dots(4)$$

ただし、 φ は電源電圧eとランプ電流 i_L との位相差で、 u_c はコンデンサ電圧の瞬時値である。

(2)～(4)式の三元連立微分方程式のE、A、 C_c 、L、R、C、 ω 、 φ にそれぞれ値を与える。さらに、演算開始時間t=0の値として、等価コンダクタンス G_0 、コンデンサ電圧 u_{c0} 、ランプ電流 i_{L0} を定めると、ルンゲ・タッタ・ギル法などによる計算機演算によって、ステップ時間 Δt ごとのG、 i_L 、 u_c を求めることができる。

チョークコイル及びチョークコイル・コンデンサの端子電圧の瞬時値をそれぞれ u_{ch} 、 u_{ch-c} とすれば次の式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} u_{ch} &= L \frac{di_L}{dt} + Ri_L \\ u_{ch-c} &= u_{cn} + u_c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

(1)式により、ランプ電圧の瞬時値、(5)式より、チョークコイル及びチョークコイル・コンデンサのそれぞれの端子電圧の瞬時値 u_{ch} 、 u_{ch-c} は求まる。後述の(13)式により各素子の電圧、電流の各調波の大きさ及び位相が求まる。

図1 進相形点灯回路

2.2 ランプ電圧、電流の相似性にもとづくモデル定数の算出法

図2に示すように時間tに対して u_L 、 i_L が点線のように変化するものとする。

モデル定数A、 C_c 、 $i_{L1} (du_L/dt)_2$ の間には、次式が成り立つ³⁾。

$$\left. \begin{aligned} (A \cdot i_{L1}^2 - C_c \cdot G_1^2) u_{L1} &= (di_L/dt)_1 \\ (A \cdot i_{L2}^2 - C_c \cdot G_2^2) u_{L2} + G_2 (du_L/dt)_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(6)$$

ただし、ランプ電圧、電流が最大となる時刻をそれぞれ t_1 、 t_2 とし、 $i_{L1} \sim (du_L/dt)_2$ はそれぞれのときの各値を添字1、2で示す。

また、次式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= i_{L1} / u_{L1} \\ G_2 &= i_{L2} / u_{L2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(7)$$

(6)、(7)式より、モデル定数A、 C_c は次式で与えられる³⁾。

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{-\frac{1}{v_{L2}^2} \left\{ \frac{i_{L2}^2}{v_{L1}} \cdot \left(\frac{di_L}{dt} \right)_1 + i_{L2} \cdot \left(\frac{dv_L}{dt} \right)_2 \cdot \left(\frac{i_{L1}}{v_{L1}} \right)^2 \right\}}{-i_{L1}^2 \cdot i_{L2}^2 \left\{ \left(\frac{1}{v_{L2}} \right)^2 - \left(\frac{1}{v_{L1}} \right)^2 \right\}} \\ C_c &= \frac{-\frac{1}{v_{L2}^2} \left\{ i_{L2} \cdot i_{L1}^2 \cdot \left(\frac{dv_L}{dt} \right)_2 + v_{L2}^2 \cdot i_{L2}^2 \cdot \frac{1}{v_{L1}} \cdot \left(\frac{di_L}{dt} \right)_1 \right\}}{-i_{L1}^2 \cdot i_{L2}^2 \left\{ \left(\frac{1}{v_{L2}} \right)^2 - \left(\frac{1}{v_{L1}} \right)^2 \right\}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(8)$$

ランプに関する数値の $i_{L1} \sim (du_L/dt)_2$ を(8)式に代入すると、モデル定数A、 C_c は求まる。

各種定格の進相形点灯回路のランプの電圧、電流のそれぞれの波形について、横軸方向、縦軸方向の大きさをそれぞれ一定の比で変化することにより、ほぼ重ねることができるとき、ランプの電圧、電流波形はそれぞれの相似であると定義する。

ランプ電圧、電流のそれぞれの波形が相似で、電圧、電流の最大値がそれぞれ α_v 、 α_i 倍のときは、図にの実線で示すようにいずれの瞬時においてもランプ電圧、電流 u_L' 、 i_L' はそれぞれ $\alpha_v u_L$ 、 $\alpha_i i_L$ となる。

この場合の等価コンダクタンスのモデル定数A'、 C_c' は(8)式と同様に

$$\left. \begin{aligned} A' &= \frac{-\frac{1}{v_{L2}'^2} \left\{ \frac{i_{L2}'^2}{v_{L1}'} \cdot \left(\frac{di_L'}{dt} \right)_1 + i_{L2}' \cdot \left(\frac{dv_L'}{dt} \right)_2 \cdot \left(\frac{i_{L1}'}{v_{L1}'} \right)^2 \right\}}{-i_{L1}'^2 \cdot i_{L2}'^2 \left\{ \left(\frac{1}{v_{L2}'} \right)^2 - \left(\frac{1}{v_{L1}'} \right)^2 \right\}} \\ C_c' &= \frac{-\frac{1}{v_{L2}'^2} \left\{ i_{L2}' \cdot i_{L1}'^2 \cdot \left(\frac{dv_L'}{dt} \right)_2 + v_{L2}'^2 \cdot i_{L2}'^2 \cdot \frac{1}{v_{L1}'} \cdot \left(\frac{di_L'}{dt} \right)_1 \right\}}{-i_{L1}'^2 \cdot i_{L2}'^2 \left\{ \left(\frac{1}{v_{L2}'} \right)^2 - \left(\frac{1}{v_{L1}'} \right)^2 \right\}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(9)$$

ただし、ランプ電圧、電流が最大となる時間をそれぞれ t_1 、 t_2 とし、それぞれの各値を添字1、2で表す。

図2より、次式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} i_{L1}' &= \alpha_i i_{L1} \\ i_{L2}' &= \alpha_i i_{L2} \\ (\alpha_i di_L/dt)_1 &= \alpha_i (di_L/dt)_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(10)$$

同じく、次式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} v_{L2}' &= \alpha_v v_{L2} \\ v_{L1}' &= \alpha_v v_{L1} \\ (\alpha_v dv_L/dt)_2 &= \alpha_v (dv_L/dt)_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(11)$$

モデル定数A'、 C_c' は(10)、(11)式を(9)式に代入し、さらに、(8)式より、

$$\left. \begin{aligned} A' &= \frac{-\frac{1}{v_{L2}^2} \left\{ \frac{i_{L2}^2}{v_{L1}} \cdot \left(\frac{di_L}{dt} \right)_1 + i_{L2} \cdot \left(\frac{dv_L}{dt} \right)_2 \cdot \left(\frac{i_{L1}}{v_{L1}} \right)^2 \right\}}{-\alpha_i \cdot \alpha_v \cdot i_{L1}^2 \cdot i_{L2}^2 \left\{ \left(\frac{1}{v_{L2}} \right)^2 - \left(\frac{1}{v_{L1}} \right)^2 \right\}} = \frac{A}{\alpha_i \cdot \alpha_v} \\ C_c' &= \frac{-\frac{\alpha_v}{v_{L2}^2} \left\{ i_{L2} \cdot i_{L1}^2 \cdot \left(\frac{dv_L}{dt} \right)_2 + v_{L2}^2 \cdot i_{L2}^2 \cdot \frac{1}{v_{L1}} \cdot \left(\frac{di_L}{dt} \right)_1 \right\}}{-\alpha_i \cdot i_{L1}^2 \cdot i_{L2}^2 \left\{ \left(\frac{1}{v_{L2}} \right)^2 - \left(\frac{1}{v_{L1}} \right)^2 \right\}} = \frac{\alpha_v}{\alpha_i} C_c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(12)$$

となる。

A'、 C_c' はそれぞれA、 C_c の $1/(\alpha_i \alpha_v)$ 、 α_v/α_i 倍となり、ある一種の定格点灯回路のモデル定数A、 C_c と α_v 、 α_i から、各種定格点灯回路のモデル定数は簡単に求まることになる。したがって、2.1で記述した方法で各種定格点灯回路の各素子の電圧、電流

を高調波分析できることになる。

図2 ランプの電圧、電流、コンダクタンスの波形

3. 高圧水銀ランプ点灯回路のシミュレーションによる高調波分析

3.1 各種定格進相形点灯回路の高調波分析

以下、安定点灯時の高調波分析について述べる。

各種定格進相形点灯回路のランプの電圧、電流波形をそれぞれ図3に示す。ただし、入力端子電圧は200V、60Hzとする。

ランプ定格電力200W点灯回路のランプ電圧、電流のそれぞれの波形に対して、ランプ定格電力250, 300, 400, 700, 1000Wのそれぞれの点灯回路のランプの電圧、電流波形の横軸、縦軸方向の大きさをそれぞれ一定の比で小さくすることにより、ほぼ重ねることができる。したがって、ランプ定格電力200W点灯回路のランプ電圧、電流波形とほぼ相似であると考えてよい。また、これらの各種定格点灯回路のそれぞれのランプ電圧、電流波形は互いにほぼ相似であることを意味している。

図3の200W点灯回路のランプ電圧、電流の波形より求めた表1の $u_{L1} \sim (du_L/dt)_2$ のランプに関する数値を(8)式に代入してモデル定数 A, C_c を求めると、

$$\left. \begin{aligned} A &= 8.26 \\ C_c &= 12.3 \times 10^4 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

となる。

200W進相形点灯回路の表2のE~φの回路に関する数値及び(13)式を(2)~(4)式に代入し、さらに演算開始時間 $t=0$ の値として、表3の数値を与え、1Hzを180等分する。

(2)~(4)式の三元連立微分方程式及び(5)式からシミュレーションによる各素子の電圧、電流の瞬時値を電源電圧ベースに直して求め、さらに、

$$\left. \begin{aligned} a_n &= \frac{1}{m} \sum_{s=0}^{2m-1} y(s \cdot \Delta t) \cos(s \cdot n \cdot \Delta t) \\ b_n &= \frac{1}{m} \sum_{s=0}^{2m-1} y(s \cdot \Delta t) \sin(s \cdot n \cdot \Delta t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

($n=0, 1, 2, \dots \dots$)

により、各調波フーリエ係数を算出し、各調波の大きさ及び位相角を求める。

200W点灯回路のランプの各調波電圧、電流の成分及びランプ電力についてシミュレーションにより求めた値及び実測により求めたそれらを表4に示す。ただし、 V_{L1} と I_1 、 V_{L3} と I_3 、 V_{L5} と I_5 はそれぞれランプの基本波、第3、第5調波電圧と電流の大きさを、 ϕ_{L1} と θ_1 、 ϕ_{L3} と θ_3 、 ϕ_{L5} と θ_5 はそれらの位相角を示すが、以下表8, 12, 14及び17も同じ。

図3 各種定格進相形点灯回路のランプ電圧、電流波形

表1 モデル定数算出のためのランプに関する数値 (200W 進相形点灯回路)

v_{L1} [V]	i_{L1} [A]	$[di_L/dt]_1$ [A/S]	v_{L2} [V]	i_{L2} [A]	$[dv_L/dt]_2$ [V/S]
157	1.07	588.0	123.0	2.97	-6000

表2 回路に関する数値 (200W 進相形点灯回路)

E [V]	L [H]	C [μF]	R [Ω]	ω [rad/s]	ϕ [°]
200	0.181	15.5	3.19	$2\pi \times 60$	56

表3 シミュレーションのための初期値 (200W 進相形点灯回路)

等価コンダクタンスG[s]	コンデンサ電圧[V]	ランプ電流[A]
0.01	-315	0

表4 シミュレーション、実測のそれぞれにより求めたランプの各調波電圧、電流及びランプ電力 (200W 進相形点灯回路)

	基本波電圧 V_{L1} [V] 電流 I_{L1} [A]	ϕ_{L1} [°] θ_1 [°]	第3調波電圧 V_{L3} [V] 電流 I_{L3} [A]	ϕ_{L3} [°] θ_3 [°]	第5調波電圧 V_{L5} [V] 電流 I_{L5} [A]	ϕ_{L5} [°] θ_5 [°]	ランプ 電力
シミュレーション	116.0 1.89	68.2 52.1	34.71 0.235	178.7 -90.1	13.67 0.0445	-76.1 14.5	210
実測	116.4 1.89	69.6 54.4	33.76 0.239	182.3 -81.0	13.68 0.0438	-61.1 34.8	211

シミュレーションにより求めた各調波電圧、電流の大きさ、ランプ電力はそれぞれほぼ実測値に等しい、即ち、各調波電圧、電流の大きさ及びランプ電力に関してはシミュレーションによる算出結果の精度が高いことを示している。また、シミュレーションにより求めた各調波電圧、電流の位相角はそれぞれ実測値との誤差は小さいが次数が大きくなるにつれて大きくなっている。

200W 点灯回路について、シミュレーションより求めたチョークコイル、コンデンサのそれぞれの各調波の電圧の成分及び実測により求めたそれらを表5に示す。ただし、 V_{ch1} と ϕ_{ch1} 、 V_{ch3} と ϕ_{ch3} 、 V_{ch5} と ϕ_{ch5} はそれぞれチョークコイルの基本波、第3、第5調波電圧の大きさとそれらの位相角を示す。また、 V_{c1} と ϕ_{c1} 、 V_{c3} と ϕ_{c3} 、 V_{c5} と ϕ_{c5} はそれぞれコンデンサの基本波、第3、第5調波

表5 シミュレーション、実測のそれぞれにより求めたチョークコイルとコンデンサの各調波電圧 (200W 進相形点灯回路)

	基本波電圧 V_{ch1} [V] 電流 I_{ch1} [A]	ϕ_{ch1} [°] θ_{ch1} [°]	第3調波電圧 V_{ch3} [V] 電流 I_{ch3} [A]	ϕ_{ch3} [°] θ_{ch3} [°]	第5調波電圧 V_{ch5} [V] 電流 I_{ch5} [A]	ϕ_{ch5} [°] θ_{ch5} [°]
シミュレーション	128.9 1.89	138.6 52.1	48.1 0.235	-3.9 -90.1	15.19 0.0445	99.0 14.5
実測	128.9 1.89	140.7 54.4	47.2 0.239	5.6 -81.0	16.08 0.0438	122.1 34.8

	基本波電圧 V_{c1} [V] 電流 I_{c1} [A]	ϕ_{c1} [°] θ_{c1} [°]	第3調波電圧 V_{c3} [V] 電流 I_{c3} [A]	ϕ_{c3} [°] θ_{c3} [°]	第5調波電圧 V_{c5} [V] 電流 I_{c5} [A]	ϕ_{c5} [°] θ_{c5} [°]
シミュレーション	322.9 1.89	-37.9 52.1	13.41 0.235	179.9 -90.1	1.52 0.0445	-75.5 14.5
実測	319.2 1.89	-35.6 54.4	12.24 0.239	187 -81.0	2.27 0.0438	-52.3 34.8

電圧の大きさとそれらの位相角を示す、以下表9、11及び15も同じ。
この場合もシミュレーションにより求めた各調波電圧の大きさはそれぞれほぼ実測値に等しい、即ち、各調波電圧の大きさに関してはシミュレーションによる算出結果の精度が高いことを示している。また、シミュレーションにより求めた各調波電圧の位相角はそれぞれ実測値との誤差が小さいが次数が大きくなるにつれて僅かだけ大きくなっている。

図4 シミュレーションによる各素子の電圧、電流波形(L=0.181H、C=15.5 μF)(ただし、 V_c のスケールは2倍)

シミュレーションによる各素子の電圧、電流波形を図4に示す。
高圧水銀ランプ点灯回路の各種定格のランプ電力、電流、電圧と本論文で用いた各種定格進相形点灯回路に対するチョークコイルの自己インダクタンスL[H]、コンデンサのC[μF]を表6に示す。また、ランプ電力、電流、電圧を同じく表6に示すがそれぞれほぼ定格値に近い。

表6 高圧水銀ランプ点灯回路の定格ランプ電力、電流、電圧と本論文で用いたチョークコイルのL[H]、コンデンサのC[μF]とランプ電力、電流、電圧

定格ランプ電力[W]	200	250	300	400	700	1000
定格ランプ電流[A]	1.9	2.1	2.5	3.3	5.9	8.3
定格ランプ電圧[V]	120	120	130	130	130	130
チョークコイルL[H]	0.181	0.152	0.1335	0.0919	0.0606	0.0437
コンデンサ[μF]	15.5	17.5	21.2	28.5	49.5	70.5
ランプ電力[W]	213	236	313	415	712	950
ランプ電流[A]	1.9	2.1	2.5	3.3	6.0	8.3
ランプ電圧[V]	125	125	135	127	127	124

各種定格点灯回路について、200W 点灯回路に対する α_v 、 α_i を求めるも表7のようになる。 α_v 、 α_i のそれぞれの値を(12)式に代入して求めたモデル定数A、 C_c を同じく表7に示す。

各種定格点灯回路のそれぞれのモデル定数を用いて、200W 点灯回路のときと同様にシミュレーションにより求めた各種定格点灯回路のランプの各調波電圧、電流の成分及び実測により求めた

それらを表8に示す。表8によると、ランプの各調波電圧に関して、何れの定格の場合も、大きさ位相角の両方共にシミュレーション及び実測により求めたそれぞれの値はほぼ等しい。また、各種定格共に、大きさ位相角の両方とも互いにはほぼ等しく、ほぼ同じ電圧波形であることを意味している。

ランプの各調波電流に関しては定格が大きくなるに伴って大きくなっており、位相角は各種定格共ほぼ等しく互いにはほぼほぼ相似性を保っていることを意味している。

250, 300W 点灯回路について、シミュレーション、実測のそれぞれにより求めたチョークコイル、コンデンサの各調波の電圧の成分を表9に示す。

シミュレーションにより求めた各調波電圧の大きさはそれぞれほぼ実測値に等しい。即ち、各調波電圧の大きさに関してはシミュレーションによる算出結果の精度が高いことを示している。シミュレーションにより求めた各調波電圧の位相角はそれぞれ実測値と誤差が小さいが次数が大きくなるにつれて僅かだけ大きくなっている。

1000W 点灯回路について、ランプ電圧、電流の相似性により200, 400W 基準にしてそれぞれ求めたモデル定数及び実測により求めたモデル定数を表10に示す。これらのモデル定数はほぼ等しい。

1000W 点灯回路について、シミュレーション(400W 基準)、実測のそれぞれにより求めたチョークコイル、コンデンサの各調波の電圧の成分を表11に示す。

表7 各種定格点灯回路ランプの電流、電圧の乗数とモデル定数(200W)基準

定格ランプ 電力[W]	モデル定数		α_i	α_v
	A	C_c		
200	8.26	12.30×10^4	1	1
250	8.48	11.13×10^4	1.105	1.000
300	5.81	10.09×10^4	1.316	1.080
400	4.68	7.19×10^4	1.737	1.016
700	2.57	3.96×10^4	3.158	1.016
1000	1.91	2.79×10^4	4.368	0.992

250, 300W 点灯回路のときと同様にシミュレーションにより求めた各調波電圧の大きさはそれぞれほぼ実測値に等しい。即ち、各調波電圧の大きさに関してはシミュレーションによる算出結果の精度が高いことを示している。シミュレーションにより求めた各調波電圧の位相角はそれぞれ実測値と誤差が小さいが次数が大きくなるにつれて僅かだけ大きくなっている。

100W 点灯回路(L=0.358H, R=9.0Ω, C=8.57μF)のモデル定数A、 C_c を図3(a)のランプ電圧、電流の波形より求めると、

$$\left. \begin{array}{l} A=21.19 \\ C_c=25.4 \times 10^4 \end{array} \right\} \dots\dots\dots(15)$$

200W 点灯回路(L=0.181H, R=3.19Ω, C=15.5μF)の100W 点灯回路に対するランプ電圧、電流のそれぞれの乗数 α_v 、 α_i は100W 点灯回路のランプ電圧、電流がそれぞれ110V, 1.11Aであるので、 $\alpha_v=125/110=1.136$ 、 $\alpha_i=1.9/1.11=1.712$ となる。

これらを(12)式に代入して200W 点灯回路のモデル定数A'、 C_c' を求めると、

$$\left. \begin{array}{l} A'=10.89 \\ C_c'=16.8 \times 10^4 \end{array} \right\} \dots\dots\dots(16)$$

となる。

200W 点灯回路(L=0.181H, R=3.19Ω, C=15.5μF)について、(16)式のモデル定数を用いてシミュレーションにより求めたランプ

表8 各種定格点灯回路のシミュレーション〔200W 基準〕及び実測のそれぞれにより求めたランプの各調波の電圧、電流及びランプ電力

定格ランプ 電力[W]	方法	基本電圧 V_{L1} (V) 電流 I_1 (A)	ϕ_{L1} (°) θ_1 (°)	第3調波電圧 V_{L3} (V) 電流 I_3 (A)	ϕ_{L3} (°) θ_3 (°)	第5調波電圧 V_{L5} (V) 電流 I_5 (A)	ϕ_{L5} (°) θ_5 (°)	ランプ 電力
250	シミュレーション	116.3 2.06	68.4 51.8	33.9 0.279	178.3 -90.2	12.72 0.049	-75.2 15.5	230
	実測	119.6 2.09	68.2 52.3	34.3 0.287	176.1 -86.6	12.84 0.050	-64.9 29.9	238
300	シミュレーション	125.5 2.54	64.9 48.4	37.0 0.338	168.5 -100.0	14.18 0.063	-91.8 -1.1	305
	実測	130.0 2.57	65.3 47.2	36.3 0.337	160.5 -102.1	13.48 0.060	-93.3 1.2	313
400	シミュレーション	119.1 3.33	68.1 51.2	34.8 0.476	178.2 -90.4	13.08 0.085	-74.3 16.3	400
	実測	121.3 3.40	67.2 50.3	33.5 0.468	173.8 -95.1	12.88 0.084	-70.7 3.4	388
700	シミュレーション	117.7 6.19	66.0 50.5	35.6 0.701	171.4 -96.5	14.23 0.137	-88.6 2.1	702
	実測	121.6 6.13	66.9 51.2	35.4 0.690	160.5 -103.4	14.11 0.136	-82.7 6.4	713
1000	シミュレーション	114.6 8.82	66.5 51.2	35.3 0.960	174.5 -93.9	14.64 0.196	-84.9 5.9	974
	実測	118.2 8.91	69.4 47.4	35.7 0.957	168.2 -100.1	14.36 0.189	-82.4 2.9	975

表9 250, 300W 点灯回路のシミュレーション〔200W 基準〕、実測のそれぞれにより求めたチョークコイルとコンデンサの各調波電圧

定格ランプ 電力[W]		基本電圧 V_{Ch1} (V) ϕ_{Ch1} (°)	第3調波電圧 V_{Ch3} (V) ϕ_{Ch3} (°)	第5調波電圧 V_{Ch5} (V) ϕ_{Ch5} (°)
250	シミュレーション	118.5 137.7	48.0 -4.2	14.22 99.9
	実測	119.6 139.6	48.0 2.0	15.40 119.3
300	シミュレーション	128.0 134.2	51.2 -14.0	15.70 83.3
	実測	129.6 134.1	48.0 -15.6	16.00 89.2
		基本電圧 V_{C1} (V) ϕ_{C1} (°)	第3調波電圧 V_{C3} (V) ϕ_{C3} (°)	第5調波電圧 V_{C5} (V) ϕ_{C5} (°)
250	シミュレーション	312.8 -38.2	14.09 -180.0	1.50 -74.5
	実測	310.4 -37.2	13.08 -176.2	2.20 -57.2
300	シミュレーション	317.4 -41.6	14.13 170.0	1.57 -91.1
	実測	310.8 -42.9	12.36 167.2	1.89 -88.6

表10 1000W 点灯回路のモデル定数の比較

算出方法		A	C_c
実測		1.886	2.76×10^4
相似性 より	200W 基準	1.910	2.79×10^4
	400W 基準	1.780	2.64×10^4

の各調波の電圧、電流の成分及びチョークコイルとコンデンサの各調波の電圧の成分を表12に示す。

表12を表4と比較すると、ランプの基本波電圧、電流は大きさ、位相角共に実測値にほぼ等しい。表12の第3、第5調波の電圧、電流は表4のシミュレーションにより求めた結果と比較して実測値との誤差が大きくなっている。チョークコイルとコンデンサの電圧についても同様なことが言える。

100W 点灯回路を基準にして求めたモデル定数を用いた他の各種定格点灯回路のシミュレーションによる結果についても同様なことが言える(冗長になるので表は略す)。

このことは図3に示すように100W 点灯回路のランプの電圧の波形が電極の太さ等の違いから他の各種定格点灯回路のランプの電圧波形と少し相似性に欠けることによるものと思われる。

表11 1000W 点灯回路のシミュレーション(400W 基準)、実測のそれぞれにより求めたチョークコイルとコンデンサの各調波電圧

	基本波電圧 V_{oh1} [V] ϕ_{oh1} [°]		第3調波電圧 V_{oh3} [V] ϕ_{oh3} [°]		第5調波電圧 V_{oh5} [V] ϕ_{oh5} [°]	
シミュレーション	145.1	136.1	46.8	-11.9	15.08	83.6
実測	146.8	137.3	47.2	-10.4	15.26	94.5
	基本波電圧 V_{c1} [V] ϕ_{c1} [°]		第3調波電圧 V_{c3} [V] ϕ_{c3} [°]		第5調波電圧 V_{c5} [V] ϕ_{c5} [°]	
シミュレーション	334.3	-39.3	12.0	172.3	1.39	-90.6
実測	331.6	-40.8	11.3	170.5	1.56	-86.2

表12 200W 点灯回路のシミュレーション(100W 基準)により求めたランプの各調波電圧、電流及びチョークコイルとコンデンサの各調波電圧

基本波電圧 V_{L1} [V] ϕ_{L1} [°]		第3調波電圧 V_{L3} [V] ϕ_{L3} [°]		第5調波電圧 V_{L5} [V] ϕ_{L5} [°]	
電流 I_1 [A] θ_1 [°]		電流 I_3 [A] θ_3 [°]		電流 I_5 [A] θ_5 [°]	
117.4 68.2		36.8 182.5		15.86 -68.9	
1.89 51.7		0.249 -86.2		0.0516 21.7	
基本波電圧 V_{oh1} [V] ϕ_{oh1} [°]		第3調波電圧 V_{oh3} [V] ϕ_{oh3} [°]		第5調波電圧 V_{oh5} [V] ϕ_{oh5} [°]	
129.2 138.0		51.1 0		17.62 106.2	
基本波電圧 V_{c1} [V] ϕ_{c1} [°]		第3調波電圧 V_{c3} [V] ϕ_{c3} [°]		第5調波電圧 V_{c5} [V] ϕ_{c5} [°]	
323.5 -38.3		14.2 183.8		1.76 -68.3	

3.2 入力端子電圧を変化させたときの高調波分析

ランプ定格電力200W 以上の点灯回路の定常状態では、入力端子電圧が180~220V の範囲で、ランプの電圧、電流のそれぞれの波形はほぼ相似になる。この相似性より、入力端子電圧が180~220V まで10V おきに变化したときの各種定格の点灯回路における各素子の電圧、電流を200V のときのランプのモデル定数を基準にして求めることが可能である。

200W の進相形点灯回路の入力端子に200V、60Hz の定格電圧を印加し、安定状態に達した後、入力端子電圧を180~220V まで10V おきに变化したときのランプの電圧、電流の波形を図5に示す。

図5より、入力端子電圧が200V のときのランプの電圧、電流波形の最大値電圧160V 及び最大値電流2.95A に対する180、190、210、220V のときのランプの電圧、電流波形の最大値電圧及び最大値電流より、ランプ電圧、電流の乗数 α_v 、 α_i を求めると表13のようになる。ただし、定常状態では、ランプ電圧の大きさは入力

端子電圧の大きさに拘らずほぼ一定であるので $\alpha_v=1$ となる。 α_v 、 α_i より求めた各入力端子電圧のときのモデル定数を同じく表13に示す。

各入力端子電圧のときの表13のモデル定数を用いて、入力端子電圧200V のときと同様にシミュレーションにより求めた各入力端子電圧のときのランプの各調波電圧、電流の成分を求めることが可能である(冗長になるので表は略す)。

ランプの各調波電圧に関して各入力端子電圧共に大きさはほぼ

図5 200進相形点灯回路のランプ電圧、電流波形 ($L=0.181H$, $C=15.5\mu F$)

表13 200W 進相形点灯回路の入力端子電圧を変化させたときのランプの電流、電圧の乗数とモデル定数(200V 基準)

入力端子電圧 [V]	A	C_c	α_i	α_v
180	9.19	13.69×10^4	0.898	1
190	8.64	12.87×10^4	0.956	1
200	8.26	12.30×10^4	1.000	1
210	7.87	11.71×10^4	1.050	1
220	7.24	10.79×10^4	1.140	1

等しく、位相角は入力端子電圧が大きくなるにつれて僅かだけ大きくなっている。

ランプの基本波電流に関しては入力端子電圧が大きくなるに伴って大きくなっており、第3、第5調波電流に関しては僅かだけ大きくなっている。位相角は各調波共に進みの方向に変化している。入力端子電圧220V のときのランプの各調波電圧、電流の成分及

びランプ電力についてシミュレーションにより求めた値及び実測により求めたそれらを表14に示す。シミュレーションにより求めた各調波電圧、電流の大きさ、ランプ電力はそれぞれほぼ実測値に等しい。即ち、各調波電圧、電流の大きさ及びランプ電力に関してはシミュレーションによる算出結果の精度が高いことを示している。

シミュレーションにより求めた各調波電圧、電流の位相角はそれぞれほぼ実測値との誤差は小さいが次数が大きくなるにつれて大きくなっている。

表14 入力端子電圧が220V のときのシミュレーション(200V 基準)、実測のそれぞれにより求めたランプの各調波電圧、電流及びランプ電力(200W 進相形点灯回路)

	基本波電圧 V_{L1} (V) 電流 I_1 (A)	ϕ_{L1} (°) θ_1 (°)	第3調波電圧 V_{L3} (V) 電流 I_3 (A)	ϕ_{L3} (°) θ_3 (°)	第5調波電圧 V_{L5} (V) 電流 I_5 (A)	ϕ_{L5} (°) θ_5 (°)	ランプ電力
シミュレーション	115.9 2.10	71.0 55.5	35.01 0.237	186.9 -81.9	14.04 0.046	-63.9 26.7	235
実測	116.8 2.10	71.9 57.5	34.08 0.242	189.4 -73.0	14.08 0.045	-49.2 45.6	236

入力端子電圧が200, 220V のときの表4, 14の基本波電圧の大きさは互いにほぼ等しい。他の入力端子電圧のときも基本波電圧の大きさは表4, 14の基本波電圧の大きさとほぼ等しい。即ち、実測、

シミュレーションのそれぞれの結果、共に、入力端子電圧が変わっても基本波電圧の大きさはほぼ等しいことを示している。

シミュレーションにより求めた各入力端子電圧のときのランプの基本波電流、インピーダンスのそれぞれの大きさ及び位相角を図6に示す。図6によると入力端子電圧の増加に伴い、水銀ランプのインピーダンスの大きさは次第に小さくなっており、水銀ランプが非線形性であることを示している。また、実測により求めた各入力端子電圧のときのランプの基本波電流、インピーダンスのそれぞれの大きさ及び位相角もほぼ同じような変化を示す(冗長になるので図は略す)。

入力端子電圧220V のときのシミュレーションより求めたチョークコイル、コンデンサのそれぞれの各調波の電圧の成分及び実測により求めたそれらを表15に示す。この場合もシミュレーションにより求めた各調波電圧の大きさはそれぞれほぼ実測値に等しい。即ち、各調波電圧の大きさに関してはシミュレーションによる算出結果の精度が高いことを示している。シミュレーションにより求めた各調波電圧の位相角はそれぞれ実測値と誤差が小さいが次数が大きくなるにつれて僅かだけ大きくなっている。

他の入力端子電圧についてもシミュレーションによりチョークコイル、コンデンサの各調波の電圧、電流が求めることが可能である。

以上により、シミュレーションによる各素子の電圧、電流の高調波分析結果の精度が高いことが分かったので以下、フリッカレス点灯回路のシミュレーションによる高調波分析に基づく特性について述べる。

図6 ランプの基本波電流、インピーダンスの変化

表15 入力端子電圧220V のときのシミュレーション、実測のそれぞれにより求めたチョークコイルとコンデンサの各調波電圧(200W 進相形点灯回路)

	基本波電圧 V_{ch1} (V) 電流 I_{c1} (A)	ϕ_{ch1} (°) θ_{c1} (°)	第3調波電圧 V_{ch3} (V) 電流 I_{c3} (A)	ϕ_{ch3} (°) θ_{c3} (°)	第5調波電圧 V_{ch5} (V) 電流 I_{c5} (A)	ϕ_{ch5} (°) θ_{c5} (°)
シミュレーション	143.8 142.0	48.6 4.2	48.6 4.2	4.2 -171.9	15.6 1.57	111.2 -63.3
実測	142.4 145.0	47.60 13.1	47.60 13.1	13.1 -165.2	16.68 2.31	133.7 -39.2

3.2 フリッカレス点灯回路の特性

図7の200W のフリッカレス点灯回路の進相形点灯回路のL, Cの組合せの値の変化による、定常状態に達したときの特性変化について述べる。ただし、入力端子電圧は200V, 60Hz とする。

進相形点灯回路のランプ電圧、電流をそれぞれ120V, 2.0A (JISは120±15V, 1.9±0.36A)に保ちながらLを0.0919, 0.109, 0.125, 0.139, 0.1476, 0.1668, 0.186Hと変化させるときのCの値は図8のようになる(L, Cの基本波に対するインピーダンス

は $-j95 \sim -j100\Omega$ の間を変化する)。

Lの各値のときのランプ電圧、電流の波形は図9のようになる。

Lの各値のときのランプのモデル定数を3.1と同様にして求めると表16のようになる。また、遅相形点灯回路のLは0.18Hを用い、このランプ電圧、電流の波形より求めたモデル定数の $A=8.015$ 、 $C_c=11.089 \times 10^4$ を用いる。

図7 高圧水銀ランプ200W フリッカレス点灯回路

図8 L, Cの組み合わせの値

L, Cの組合せの値の変化に対するランプの基本波、第3、第5調波電圧、電流の大きさの変化を図10に示す。Lの増加に対してランプの基本波電圧、電流はほぼ一定の大きさを保っているが、Lの増加に伴って第3、第5調波電圧は僅かだけ増加の傾向を示す。しかし、L, Cの組合せの第3、第5調波インピーダンスが大きくなるため第3電流は小さくなり、第5調波電流はほぼ一定の大きさを示す。

L, Cの組合せの値の変化に対するランプの電力、電流のひずみ率、波高率を図11に示す。Lの増加に対してランプの電力はほぼ一定値を示すが、ランプ電流のひずみ率は第3、第5調波電流が減少するので小さくなる。一方、ランプの寿命に関係するランプ電流の波高率はLが大きくなるにつれて小さくなる。

L, Cの組合せの値の変化に対する電源の基本波、第3、第5調波電流の大きさの変化、力率及び電源電流のひずみ率を図12に示す。Lの増加に対してフリッカレス点灯回路の電源の基本波電流の大きさはほぼ一定であるが、第3、第5調波電流が小さくなるので、電源電流のひずみ率は小さくなる。また、このために力率は少し

づつ良くなるが $L=0.186H$ のときでも電源電流のひずみ率が進相形、遅相形のそれぞれのランプ電流のひずみ率より大きく16.5%であるために100%にはならない。電源電流のひずみ率が16.5%と大きいのは電源の第3調波電流が進相形、遅相形のそれぞれの第

図9 L, Cの組合せのときのランプの電圧、電流波形

表16 各L, Cのときのモデル定数

L, C の値 [H], [μF]	モデル定数	
	A	C_c
0.0919, 18.5	9.3518	14.5×10^4
0.109, 18.4	8.5885	13.2×10^4
0.125, 18.0	10.623	16.4×10^4
0.139, 17.5	9.5387	14.7×10^4
0.1476, 17.0	7.6107	11.0×10^4
0.1668, 16.4	8.4931	12.3×10^4
0.1860, 16.0	8.9558	13.4×10^4

図10 L, C の組合わせの変化 (ただし, L で示す) に対するランプの基本波, 第3, 第5調波電圧, 電流

図11 L, C の組合わせの変化 (ただし, L で示す) に対するランプの電流のひずみ率, 波高率及びランプ電力

図12 L, C の組合わせの変化 (ただし, L で示す) に対するフリッカレス点灯回路の電源の基本波, 第3, 第5調波と電源電流のひずみ率, 力率

3調波電流より大きくなるためである。

$L=0.186\text{H}$, $C=16.0\mu\text{F}$ の進相形点灯回路, $L=0.18\text{H}$ の遅相形点灯回路を用いた200W フリッカレス点灯回路の電源電圧, 電流の実測及びシミュレーションのそれぞれより求めた波形を図13に示す。さらに, 同じ点灯回路の各端子の実測及びシミュレーションのそれぞれより求めた各調波電流の成分を表17に示す。

(a) 実測

図13 200W フリッカレス点灯回路の電源電圧, 電流波形

(b) シミュレーション

表17 シミュレーション, 実測のそれぞれにより求めたフリッカレス点灯回路の各端子電流(200W フリッカレス)

		基本波電流 I_1 [A]	θ_1 [°]	第3調波電流 I_3 [A]	θ_3 [°]	第5調波電流 I_5 [A]	θ_5 [°]
シミュレーション	進相形点灯回路	2.02	52.1	0.232	-89.5	0.0480	14.6
	遅相形点灯回路	2.01	-57.0	0.173	-64.3	0.0428	174.5
	電源	2.33	-2.5	0.392	-78.9	0.0167	76.6
実測	進相形点灯回路	2.02	52.9	0.230	-86.6	0.0489	23.0
	遅相形点灯回路	2.05	-54.7	0.159	-54.1	0.0436	183.9
	電源	2.39	-1.4	0.369	-73.2	0.0147	113.0

4. まとめ

筆者等は高圧水銀ランプの等価コンダクタンスのモデル定数をランプの電圧, 電流波形より求め, シミュレーションにより点灯回路の安定点灯時の各素子の電圧, 電流の高調波分析を行なった。また, 高圧水銀ランプ各種定格点灯回路のランプの電圧, 電流波形のそれぞれの相似性に着目した。ほぼ相似性が保たれているとき, ある一種の定格のモデル定数より他の定格のモデル定数が求められ, シミュレーションにより点灯回路の各素子の電圧, 電流の高調波分析が簡単にできることを示した。同じく, シミュレーションによりフリッカレス点灯回路の進相形点灯回路の L, C の組合わせの変化に対する特性について示した。本研究の結果を要

約すると次のとおりである。

- (1) シミュレーションによる点灯回路の各素子の電圧、電流の高調波分析結果は実測値との誤差が小さい。
- (2) ランプの電圧、電流波形がそれぞれほぼ相似であるとき、ある一種の定格のモデル定数より他の定格のモデル定数が簡単に求められる。これらのモデル定数を用い、シミュレーションにより各種定格点灯回路の各素子の電圧、電流を高調波分析した結果は実測値との誤差が小さい。
- (3) 入力端子に200Vの定格電圧を印加し定常状態に達した後、入力端子電圧を180~220Vまで変化したとき、200Vのときのモデル定数を基準にして他の入力端子電圧のときのモデル定数を簡単に求められる。シミュレーションにより、各素子の電圧、電流を高調波分析した結果は実測値との誤差が小さい。
- (4) シミュレーション、実測のそれぞれの結果、共に、入力端子電圧の増加にかかわらず、ランプの基本波電圧はほぼ一定である。
- (5) シミュレーション、実測のそれぞれの結果、共に、入力端子電圧の増加につれ、水銀ランプの基本波インピーダンスは次第に小さくなっている。
- (6) フリッカレス点灯回路の進相形点灯回路のLが小さくなると、波高率が大きくなる。Lが大きくなると電源電流のひずみ率は小さくなり、力率も良くなる。しかし、電源電流のひずみ率がランプ電流のそれより大きく16.5%であるため力率は100%にならない。

最後にランプの電圧、電流の相似性による各種定格の等価コンダクタンスのモデル定数算出法のご教示を賜った京都大学板谷良平名誉教授に衷心より謝意を表す。また、実験と資料の整理に協力された本学の大学院生藤本直樹、松田吉輝君に謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) H. Strauch.: Theorie der Schaltungen für Gasentladungslampen III, Archiv für Electrotechnik. Heft 9 pp. 561~572 (1939)
- (2) 青池, 野村: 放電灯進相形点灯回路の理論解析(1), 照明学会誌第58巻5号 pp.206~214 (昭49)
- (3) 榎見, 坊: 水銀ランプ点灯回路のシミュレーションによる解析, 照明学会誌第59巻5号 pp.194~202 (昭50)
- (4) E.L. Laskowski: A Model of a Mercury Arc Lamp's Terminal V-I Behavior, IEEE Transaction on Industry Applications. Vol. 1A-17, No.4, July/August pp.418~426 (1981)
(受付日1993年12月6日/採録日1994年6月9日)

いまい みちお
家村 道雄 (正会員)

1973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。1964~1992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、電気科主任)。同年4月熊本工業大学講師、1994年4月同助教授となり、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(京都大学)1981年第1種電気主任技術者国家試験合格によりオーム奨学賞、1992年6月第3回電気設備学会賞受賞。電気学会、電気設備学会会員。(熊本工業大学〒860熊本市池田4-22-1)

たなか まさゆき
田中 政幸 (非会員)

1939年1月15日生。1966年3月九州工業大学工学部第2部電気工学科卒業。1966年4月北九州工業高等専門学校電気工学科文部教官助手。1970年4月同講師、1974年4月同助教授、1979年5月文部省内地研究員として、京都大学工学部電気工学第2学科木嶋研究室(木嶋昭教授)に非線形振動現象の基礎的研究で国内留学、1985年4月同教授、1988年4月~1994年3月 電気工学科主任兼任。1993年10月~現在 北九州工業高等専門学校専攻科設立準備委員兼任、この間、電気回路振動現象の発生と挙動に関する研究、非線形回路の解と精密化と安定性に関する研究に従事。工学博士(京都大学)。電気学会会員。(北九州高等専門学校〒803北九州市小倉南区志井5丁目20-1)

くろすみ まさあき
黒住 正明 (非会員)

1963年10月17日生。
1986年 宮崎大学工学部電気工学科卒業
1986年 新日本製鐵㈱電気計装設計部勤務、電子制御機器の開発に従事。1991年 宮崎県公立学校教諭に採用、宮崎県立宮崎工業高等学校電気科勤務、放電ランプ点灯回路の高調波電流低減化の研究に従事。電気設備学会会員。(宮崎工業高校〒880宮崎市天満町9-1)

やまぐち じゅんいち
山口 純一 (専門会員)

1925年12月22日生。1948年3月鹿児島県立工業専門学校電気科卒業。同年8月同助手、同校昇格国立移管により、1958年5月鹿児島大学工学部電気工学科講師、1961年4月同助教授、1984年同教授(電力工学講座担当)。1991年3月定年退職。同年4月熊本工業大学教授、現在に至る。鹿児島大学名誉教授。工学博士。主として、各種放電ランプ点灯回路の試作および、ひずみ波の発生と挙動に関する研究に従事。1992年6月電気設備学会賞受賞。電気学会、電気設備学会会員(熊本工業大学〒860熊本市池田4-22-1)