

高圧水銀ランプ進相形点灯回路の等価回路

前田 純雄・松山 幹男・山口 純一
(受理 昭和60年5月31日)

EQUIVALENT CIRCUIT OF A LEAD TYPE OPERATING CIRCUIT FOR A HIGH PRESSURE MERCURY ARC LAMP

Sumio MAEDA, Mikio MATUYAMA and Junichi YAMAGUCHI

The starting characteristics in a system that includes a non-linear load was studied. The research was conducted in the following sequence. First, a Fourier series was developed on voltage and current waveforms at each element of the lead type operating circuit for a high pressure mercury discharge lamp. Then using the Fourier expansion, each harmonic character at each element of the circuit was obtained theoretically and experimentally. From the voltage and current of the distorted wave at each element of the operating circuit, the vector diagram, the impedance (and its resistance and reactance component), and the equivalent circuit were obtained for each harmonic, and their characteristics charified.

1. ま え が き

商用周波数電源で高圧水銀ランプを点灯する回路は、大きく分類して遅相形と進相形点灯回路の2方式である。筆者らは、入力正弦波電圧を変動させたときの高圧水銀ランプ遅相形点灯回路の高調波解析¹⁾、および高圧水銀ランプ進相形点灯回路の高調波電力について²⁾報告した。これらはいずれも点灯回路の各素子の電圧電流波形をフーリエ級数に分析し、基本波および高調波の電気的特性を検討したものである。本論文も上述の観点に立って、

高圧水銀ランプ進相形点灯回路で、入力として正弦波定電圧を印加し水銀ランプが始動してから安定な点灯状態になるまでの過程で、水銀ランプ電圧の変化を基準にとり実験および波形分析を行ない、下記について考察したので報告する。

(1) 始動過程および安定時における高圧水銀ランプ進相形点灯回路の、各素子のひずみ波電圧および電流の波形分析を行ない、これより各調波ごとの電圧および電流のベクトル図を求めた。

(2) (1)の波形分析の結果より高圧水銀ランプ進相形

点灯回路の、各調波のインピーダンスの抵抗分およびリアクタンス分を求め、各調波ごとの等価回路を求めた。

2. 電圧、電流の波形分析とインピーダンス算定法

図1の高圧水銀ランプ進相形点灯回路の、各素子のひずみ波電圧および電流の波形分析は前報¹⁾と同じ方法で、ひずみ波形の1ヘルツの間を24等分しフーリエ係数を計算した。

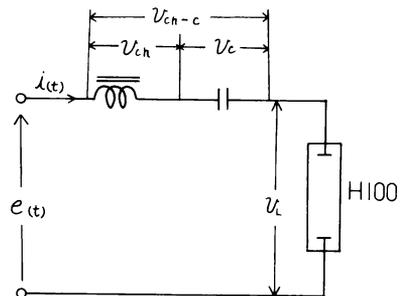


図 1 高圧水銀ランプ進相形点灯回路

各調波のインピーダンス Z_n は、その抵抗分を R_n 、リアクタンス分を X_n とおいて

$$Z_n = \frac{E_n}{I_n} = \frac{b_{nv} + ja_{nv}}{b_{ni} + ja_{ni}} = R_n + jX_n \quad \dots\dots(1)$$

から求めた。ここで E_n 、 I_n は n 次調波の電圧および電流の実効値のベクトルを表わす。

3. 進相形点灯回路の L-C 素子の決定

本実験で用いる水銀ランプ (H100) は、JIS 規格によれば定格電圧 $115 \pm 10V$ 、定格電流 $1 \pm 0.12A$ であるから、水銀ランプの安定点灯時には、これらの定格値を満たすように L と C の値を決定する必要がある。L と C の値の組み合わせは無数に存在するが、L の値としては、進相形点灯回路の諸特性を得るため行った遅相形点灯回路の場合の $318mH$ を用いた。L と C は線形素子のものを用いても水銀ランプは非線形負荷であるため、素子の電圧、電流波形もひずみ波となるが、これらの等価正弦波の電圧、電流の値を用いて近似のコンデンサ C の値を、図式解²⁾で求めたところ、 $8.23\mu F$ が得られた。

この値を使用し安定時の、ランプの定格電圧、電流をデジタルメータで測定したところ電流は $1 \pm 0.12A$ 内におさまらなかったため、C の値を若干変化したら、表 1 の結果が得られた。したがって水銀ランプ (H100) の定格電圧、定格電流を満足する L-C 組み合わせの素子は、 $L=318mH$ 、 $C=8.04\mu F$ と決定して実験した。

4. 点灯回路各素子のひずみ波電圧、電流の分析結果

図 1 の高圧水銀ランプ (H100) 進相形点灯回路の入力端子に、実効値 $E=200V$ の正弦波電圧を印加すると、水銀ランプの電圧 V_L は水銀の蒸発に伴い、し

表 1 L-C 素子の設定値

L	(mH)	318	318
C	(μF)	8.23	8.04
ランプ電圧 (V)		114	114
ランプ電流 (A)		1.16	1.10

だいに上昇して光度も増し、約 4 分で安定な点灯状態になる。

デジタルメータで測ったランプ電圧の実効値 v_L が、20, 40, 60, 80, 100 V と、定常状態の 115V に達したとき、その各々の瞬時における各素子のひずみ波の電圧、電流波形を波形分析し、基準ベクトルの入力端子電圧に換算してフーリエ級数で表わすと次のようになる。

4. 1 水銀ランプのひずみ波の電圧 v_L 、電流 i_L

$$\begin{aligned}
 v_{L20} &= 19.81\sqrt{2}\sin(\omega t + 87^\circ) + 4.125\sqrt{2}\sin(3\omega t - 105^\circ) \\
 &\quad + 2.809\sqrt{2}\sin(5\omega t + 64^\circ) + 2.07\sqrt{2}\sin(7\omega t - 128^\circ) \\
 i_{L20} &= 1.094\sqrt{2}\sin(\omega t + 82^\circ) + 0.101\sqrt{2}\sin(3\omega t + 56^\circ) \\
 &\quad + 0.006\sqrt{2}\sin(5\omega t - 169^\circ) + 0.011\sqrt{2}\sin(7\omega t + 11^\circ) \\
 v_{L40} &= 37.65\sqrt{2}\sin(\omega t + 89^\circ) + 13.75\sqrt{2}\sin(3\omega t - 113^\circ) \\
 &\quad + 8.69\sqrt{2}\sin(5\omega t + 48^\circ) + 5.595\sqrt{2}\sin(7\omega t - 147^\circ) \\
 i_{L40} &= 1.104\sqrt{2}\sin(\omega t + 77^\circ) + 0.125\sqrt{2}\sin(3\omega t + 30^\circ) \\
 &\quad + 0.01\sqrt{2}\sin(5\omega t + 172^\circ) + 0.014\sqrt{2}\sin(7\omega t - 21^\circ) \\
 v_{L60} &= 53.91\sqrt{2}\sin(\omega t + 91^\circ) + 22.38\sqrt{2}\sin(3\omega t - 118^\circ) \\
 &\quad + 12.71\sqrt{2}\sin(5\omega t + 34^\circ) + 7.731\sqrt{2}\sin(7\omega t - 167^\circ) \\
 i_{L60} &= 1.123\sqrt{2}\sin(\omega t + 73^\circ) + 0.157\sqrt{2}\sin(3\omega t + 13^\circ) \\
 &\quad + 0.012\sqrt{2}\sin(5\omega t + 160^\circ) + 0.015\sqrt{2}\sin(7\omega t - 47^\circ) \\
 v_{L80} &= 74.02\sqrt{2}\sin(\omega t + 86^\circ) + 28.82\sqrt{2}\sin(3\omega t - 132^\circ) \\
 &\quad + 15.48\sqrt{2}\sin(5\omega t + 8^\circ) + 8.261\sqrt{2}\sin(7\omega t + 154^\circ) \\
 i_{L80} &= 1.126\sqrt{2}\sin(\omega t + 68^\circ) + 0.18\sqrt{2}\sin(3\omega t - 6^\circ) \\
 &\quad + 0.012\sqrt{2}\sin(5\omega t + 138^\circ) + 0.014\sqrt{2}\sin(7\omega t - 87^\circ) \\
 v_{L100} &= 93.5\sqrt{2}\sin(\omega t + 80^\circ) + 32.84\sqrt{2}\sin(3\omega t - 147^\circ) \\
 &\quad + 16.0\sqrt{2}\sin(5\omega t - 18^\circ) + 7.358\sqrt{2}\sin(7\omega t + 120^\circ) \\
 i_{L100} &= 1.11\sqrt{2}\sin(\omega t + 62^\circ) + 0.193\sqrt{2}\sin(3\omega t - 25^\circ) \\
 &\quad + 0.012\sqrt{2}\sin(5\omega t + 122^\circ) + 0.013\sqrt{2}\sin(7\omega t - 123^\circ) \\
 v_{L115} &= 106.8\sqrt{2}\sin(\omega t + 76^\circ) + 35.59\sqrt{2}\sin(3\omega t - 159^\circ) \\
 &\quad + 16.0\sqrt{2}\sin(5\omega t - 39^\circ) + 6.613\sqrt{2}\sin(7\omega t + 95^\circ) \\
 i_{L115} &= 1.094\sqrt{2}\sin(\omega t + 58^\circ) + 0.199\sqrt{2}\sin(3\omega t - 39^\circ) \\
 &\quad + 0.011\sqrt{2}\sin(5\omega t + 108^\circ) + 0.012\sqrt{2}\sin(7\omega t - 150^\circ)
 \end{aligned} \dots\dots(2)$$

4. 2 チョークコイルのひずみ波電圧 v_{ch} 、電流 i_{ch}

$$\begin{aligned}
 v_{ch20} &= 155.7\sqrt{2}\sin(\omega t + 168^\circ) + 12.57\sqrt{2}\sin(3\omega t + 129^\circ) \\
 &\quad + 3.09\sqrt{2}\sin(5\omega t - 114^\circ) + 2.26\sqrt{2}\sin(7\omega t + 61^\circ)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 i_{ch20} &= 1.088\sqrt{2}\sin(\omega t + 82^\circ) + 0.1\sqrt{2}\sin(3\omega t + 56^\circ) \\
 &\quad + 0.006\sqrt{2}\sin(5\omega t - 168^\circ) + 0.011\sqrt{2}\sin(7\omega t + 10^\circ) \\
 v_{ch40} &= 156.4\sqrt{2}\sin(\omega t - 163^\circ) + 24.32\sqrt{2}\sin(3\omega t + 93^\circ) \\
 &\quad + 9.364\sqrt{2}\sin(5\omega t - 132^\circ) + 6.04\sqrt{2}\sin(7\omega t + 35^\circ) \\
 i_{ch40} &= 1.098\sqrt{2}\sin(\omega t + 77^\circ) + 0.124\sqrt{2}\sin(3\omega t + 29^\circ) \\
 &\quad + 0.009\sqrt{2}\sin(5\omega t + 169^\circ) + 0.013\sqrt{2}\sin(7\omega t - 24^\circ) \\
 v_{ch60} &= 158\sqrt{2}\sin(\omega t + 159^\circ) + 36.82\sqrt{2}\sin(3\omega t + 78^\circ) \\
 &\quad + 13.61\sqrt{2}\sin(5\omega t - 147^\circ) + 8.154\sqrt{2}\sin(7\omega t + 12^\circ) \\
 i_{ch60} &= 1.118\sqrt{2}\sin(\omega t + 73^\circ) + 0.155\sqrt{2}\sin(3\omega t + 11^\circ) \\
 &\quad + 0.011\sqrt{2}\sin(5\omega t + 160^\circ) + 0.014\sqrt{2}\sin(7\omega t - 52^\circ) \\
 v_{ch80} &= 158.5\sqrt{2}\sin(\omega t + 154^\circ) + 45.18\sqrt{2}\sin(3\omega t + 61^\circ) \\
 &\quad + 15.93\sqrt{2}\sin(5\omega t - 171^\circ) + 8.708\sqrt{2}\sin(7\omega t - 27^\circ) \\
 i_{ch80} &= 1.124\sqrt{2}\sin(\omega t + 67^\circ) + 0.176\sqrt{2}\sin(3\omega t - 8^\circ) \\
 &\quad + 0.012\sqrt{2}\sin(5\omega t + 141^\circ) + 0.014\sqrt{2}\sin(7\omega t - 98^\circ) \\
 v_{ch100} &= 156.7\sqrt{2}\sin(\omega t + 148^\circ) + 51.72\sqrt{2}\sin(3\omega t + 44^\circ) \\
 &\quad + 17.05\sqrt{2}\sin(5\omega t + 161^\circ) + 8.032\sqrt{2}\sin(7\omega t - 65^\circ) \\
 i_{ch100} &= 1.112\sqrt{2}\sin(\omega t + 62^\circ) + 0.191\sqrt{2}\sin(3\omega t - 26^\circ) \\
 &\quad + 0.011\sqrt{2}\sin(5\omega t + 117^\circ) + 0.013\sqrt{2}\sin(7\omega t - 128^\circ) \\
 v_{ch115} &= 154.6\sqrt{2}\sin(\omega t + 144^\circ) + 55.44\sqrt{2}\sin(3\omega t + 29^\circ) \\
 &\quad + 16.82\sqrt{2}\sin(5\omega t + 138^\circ) + 7.195\sqrt{2}\sin(7\omega t - 92^\circ) \\
 i_{ch115} &= 1.092\sqrt{2}\sin(\omega t + 57^\circ) + 0.197\sqrt{2}\sin(3\omega t - 42^\circ) \\
 &\quad + 0.01\sqrt{2}\sin(5\omega t + 103^\circ) + 0.012\sqrt{2}\sin(7\omega t - 158^\circ)
 \end{aligned} \dots(3)$$

4. 3 コンデンサのひずみ波電圧 v_c 、電流 i_c

$$\begin{aligned}
 v_{c20} &= 355\sqrt{2}\sin(\omega t - 9^\circ) + 11.2\sqrt{2}\sin(3\omega t - 34^\circ) \\
 &\quad + 0.43\sqrt{2}\sin(5\omega t + 87^\circ) + 0.506\sqrt{2}\sin(7\omega t - 90^\circ) \\
 i_{c20} &= 1.086\sqrt{2}\sin(\omega t + 82^\circ) + 0.104\sqrt{2}\sin(3\omega t + 55^\circ) \\
 &\quad + 0.005\sqrt{2}\sin(5\omega t - 177^\circ) + 0.011\sqrt{2}\sin(7\omega t + 5^\circ) \\
 v_{c40} &= 358.8\sqrt{2}\sin(\omega t - 14^\circ) + 13.46\sqrt{2}\sin(3\omega t - 62^\circ) \\
 &\quad + 0.626\sqrt{2}\sin(5\omega t + 82^\circ) + 0.615\sqrt{2}\sin(7\omega t - 117^\circ) \\
 i_{c40} &= 1.098\sqrt{2}\sin(\omega t + 77^\circ) + 0.124\sqrt{2}\sin(3\omega t + 28^\circ) \\
 &\quad + 0.009\sqrt{2}\sin(5\omega t + 169^\circ) + 0.013\sqrt{2}\sin(7\omega t - 29^\circ) \\
 v_{c60} &= 364.9\sqrt{2}\sin(\omega t - 18^\circ) + 16.64\sqrt{2}\sin(3\omega t - 79^\circ) \\
 &\quad + 0.619\sqrt{2}\sin(5\omega t + 63^\circ) + 0.671\sqrt{2}\sin(7\omega t - 143^\circ) \\
 i_{c60} &= 1.116\sqrt{2}\sin(\omega t + 73^\circ) + 0.154\sqrt{2}\sin(3\omega t + 10^\circ) \\
 &\quad + 0.01\sqrt{2}\sin(5\omega t + 153^\circ) + 0.014\sqrt{2}\sin(7\omega t - 56^\circ) \\
 v_{c80} &= 365.9\sqrt{2}\sin(\omega t - 23^\circ) + 19.10\sqrt{2}\sin(3\omega t - 98^\circ) \\
 &\quad + 0.685\sqrt{2}\sin(5\omega t + 41^\circ) + 0.626\sqrt{2}\sin(7\omega t + 177^\circ)
 \end{aligned} \dots(4)$$

$$\begin{aligned}
 i_{c80} &= 1.119\sqrt{2}\sin(\omega t + 67^\circ) + 0.177\sqrt{2}\sin(3\omega t - 9^\circ) \\
 &\quad + 0.01\sqrt{2}\sin(5\omega t + 130^\circ) + 0.014\sqrt{2}\sin(7\omega t - 95^\circ) \\
 v_{c100} &= 360.2\sqrt{2}\sin(\omega t - 29^\circ) + 20.61\sqrt{2}\sin(3\omega t - 117^\circ) \\
 &\quad + 0.644\sqrt{2}\sin(5\omega t + 17^\circ) + 0.578\sqrt{2}\sin(7\omega t + 139^\circ) \\
 i_{c100} &= 1.102\sqrt{2}\sin(\omega t + 62^\circ) + 0.191\sqrt{2}\sin(3\omega t - 28^\circ) \\
 &\quad + 0.01\sqrt{2}\sin(5\omega t + 111^\circ) + 0.013\sqrt{2}\sin(7\omega t - 132^\circ) \\
 v_{c115} &= 354.7\sqrt{2}\sin(\omega t - 34^\circ) + 21.57\sqrt{2}\sin(3\omega t - 133^\circ) \\
 &\quad + 0.669\sqrt{2}\sin(5\omega t + 2^\circ) + 0.522\sqrt{2}\sin(7\omega t + 110^\circ) \\
 i_{c115} &= 1.085\sqrt{2}\sin(\omega t + 57^\circ) + 0.199\sqrt{2}\sin(3\omega t - 43^\circ) \\
 &\quad + 0.009\sqrt{2}\sin(5\omega t + 95^\circ) + 0.011\sqrt{2}\sin(7\omega t - 162^\circ)
 \end{aligned}$$

4. 4 チョークコイルとコンデンサのひずみ波電圧 v_{ch-c} 、電流 i_{ch-c}

$$\begin{aligned}
 v_{ch-c20} &= 202.6\sqrt{2}\sin(\omega t - 6^\circ) + 4.071\sqrt{2}\sin(3\omega t + 69^\circ) \\
 &\quad + 2.852\sqrt{2}\sin(5\omega t - 122^\circ) + 2.026\sqrt{2}\sin(7\omega t + 47^\circ) \\
 i_{ch-c20} &= 1.098\sqrt{2}\sin(\omega t + 82^\circ) + 0.1\sqrt{2}\sin(3\omega t + 56^\circ) \\
 &\quad + 0.006\sqrt{2}\sin(5\omega t - 168^\circ) + 0.011\sqrt{2}\sin(7\omega t + 10^\circ) \\
 v_{ch-c40} &= 204.5\sqrt{2}\sin(\omega t - 11^\circ) + 13.72\sqrt{2}\sin(3\omega t + 66^\circ) \\
 &\quad + 8.398\sqrt{2}\sin(5\omega t - 134^\circ) + 5.441\sqrt{2}\sin(7\omega t + 28^\circ) \\
 i_{ch-c40} &= 1.105\sqrt{2}\sin(\omega t + 78^\circ) + 0.124\sqrt{2}\sin(3\omega t + 30^\circ) \\
 &\quad + 0.008\sqrt{2}\sin(5\omega t + 173^\circ) + 0.013\sqrt{2}\sin(7\omega t - 23^\circ) \\
 v_{ch-c60} &= 208.8\sqrt{2}\sin(\omega t - 15^\circ) + 21.82\sqrt{2}\sin(3\omega t + 59^\circ) \\
 &\quad + 12.81\sqrt{2}\sin(5\omega t - 151^\circ) + 7.588\sqrt{2}\sin(7\omega t + 6^\circ) \\
 i_{ch-c60} &= 1.123\sqrt{2}\sin(\omega t + 73^\circ) + 0.152\sqrt{2}\sin(3\omega t + 12^\circ) \\
 &\quad + 0.01\sqrt{2}\sin(5\omega t + 158^\circ) + 0.014\sqrt{2}\sin(7\omega t - 51^\circ) \\
 v_{ch-c80} &= 211.7\sqrt{2}\sin(\omega t - 21^\circ) + 28.69\sqrt{2}\sin(3\omega t + 45^\circ) \\
 &\quad + 15.66\sqrt{2}\sin(5\omega t - 175^\circ) + 8.316\sqrt{2}\sin(7\omega t - 32^\circ) \\
 i_{ch-c80} &= 1.133\sqrt{2}\sin(\omega t + 68^\circ) + 0.177\sqrt{2}\sin(3\omega t - 7^\circ) \\
 &\quad + 0.01\sqrt{2}\sin(5\omega t + 136^\circ) + 0.014\sqrt{2}\sin(7\omega t - 89^\circ) \\
 v_{ch-c100} &= 207.1\sqrt{2}\sin(\omega t - 27^\circ) + 32.91\sqrt{2}\sin(3\omega t + 28^\circ) \\
 &\quad + 16.33\sqrt{2}\sin(5\omega t + 153^\circ) + 7.369\sqrt{2}\sin(7\omega t - 73^\circ) \\
 i_{ch-c100} &= 1.114\sqrt{2}\sin(\omega t + 62^\circ) + 0.187\sqrt{2}\sin(3\omega t - 28^\circ) \\
 &\quad + 0.01\sqrt{2}\sin(5\omega t + 114^\circ) + 0.012\sqrt{2}\sin(7\omega t - 130^\circ) \\
 v_{ch-c115} &= 204.9\sqrt{2}\sin(\omega t - 31^\circ) + 35.98\sqrt{2}\sin(3\omega t + 18^\circ) \\
 &\quad + 16.60\sqrt{2}\sin(5\omega t + 136^\circ) + 6.826\sqrt{2}\sin(7\omega t - 94^\circ) \\
 i_{ch-c115} &= 1.102\sqrt{2}\sin(\omega t + 58^\circ) + 0.197\sqrt{2}\sin(3\omega t - 40^\circ) \\
 &\quad + 0.01\sqrt{2}\sin(5\omega t + 98^\circ) + 0.011\sqrt{2}\sin(7\omega t - 153^\circ)
 \end{aligned} \dots(5)$$

4. 5 入力端子電圧 e , 電流 i

$$\begin{aligned}
 e_{20} &= 202.6\sqrt{2}\sin\omega t + 0.21\sqrt{2}\sin(3\omega t - 36^\circ) \\
 &\quad + 0.123\sqrt{2}\sin(5\omega t - 177^\circ) + 0.094\sqrt{2}\sin(7\omega t - 142^\circ) \\
 i_{20} &= 1.097\sqrt{2}\sin(\omega t + 83^\circ) + 0.1\sqrt{2}\sin(3\omega t + 58^\circ) \\
 &\quad + 0.006\sqrt{2}\sin(5\omega t - 163^\circ) + 0.011\sqrt{2}\sin(7\omega t + 14^\circ) \\
 e_{40} &= 202.6\sqrt{2}\sin\omega t + 0.313\sqrt{2}\sin(3\omega t - 84^\circ) \\
 &\quad + 0.149\sqrt{2}\sin(5\omega t - 170^\circ) + 0.175\sqrt{2}\sin(7\omega t - 158^\circ) \\
 i_{40} &= 1.11\sqrt{2}\sin(\omega t + 78^\circ) + 0.124\sqrt{2}\sin(3\omega t + 31^\circ) \\
 &\quad + 0.009\sqrt{2}\sin(5\omega t + 177^\circ) + 0.013\sqrt{2}\sin(7\omega t - 19^\circ) \\
 e_{60} &= 202.6\sqrt{2}\sin\omega t + 0.434\sqrt{2}\sin(3\omega t - 100^\circ) \\
 &\quad + 0.164\sqrt{2}\sin(5\omega t + 159^\circ) + 0.211\sqrt{2}\sin(7\omega t - 173^\circ) \\
 i_{60} &= 1.13\sqrt{2}\sin(\omega t + 74^\circ) + 0.154\sqrt{2}\sin(3\omega t + 13^\circ) \\
 &\quad + 0.011\sqrt{2}\sin(5\omega t + 162^\circ) + 0.014\sqrt{2}\sin(7\omega t - 46^\circ) \\
 e_{80} &= 202.6\sqrt{2}\sin\omega t + 0.42\sqrt{2}\sin(3\omega t - 108^\circ) \\
 &\quad + 0.087\sqrt{2}\sin(5\omega t + 154^\circ) + 0.15\sqrt{2}\sin(7\omega t + 160^\circ) \\
 i_{80} &= 1.137\sqrt{2}\sin(\omega t + 68^\circ) + 0.177\sqrt{2}\sin(3\omega t - 5^\circ) \\
 &\quad + 0.011\sqrt{2}\sin(5\omega t + 141^\circ) + 0.014\sqrt{2}\sin(7\omega t - 84^\circ) \\
 e_{100} &= 202.6\sqrt{2}\sin\omega t + 0.455\sqrt{2}\sin(3\omega t - 127^\circ) \\
 &\quad + 0.052\sqrt{2}\sin(5\omega t + 101^\circ) + 0.013\sqrt{2}\sin(7\omega t + 140^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 i_{100} &= 1.116\sqrt{2}\sin(\omega t + 62^\circ) + 0.19\sqrt{2}\sin(3\omega t - 27^\circ) \\
 &\quad + 0.011\sqrt{2}\sin(5\omega t + 120^\circ) + 0.013\sqrt{2}\sin(7\omega t - 127^\circ) \\
 e_{115} &= 202.6\sqrt{2}\sin\omega t + 0.544\sqrt{2}\sin(3\omega t - 147^\circ) \\
 &\quad + 0.039\sqrt{2}\sin(5\omega t - 128^\circ) + 0.089\sqrt{2}\sin(7\omega t + 117^\circ) \\
 i_{115} &= 1.102\sqrt{2}\sin(\omega t + 58^\circ) + 0.196\sqrt{2}\sin(3\omega t - 40^\circ) \\
 &\quad + 0.01\sqrt{2}\sin(5\omega t + 105^\circ) + 0.012\sqrt{2}\sin(7\omega t - 152^\circ)
 \end{aligned}$$

以上各素子の電圧および電流を、波形分析した計算値(2)~(6)式から、水銀ランプの起動から安定するまでのベクトル図の変化を考察する。

5. 点灯回路の各調波ごとの電圧、電流ベクトル図

5. 1 基本波電圧、電流のベクトル図

図2は波形分析の式より、点灯回路各素子の電圧および位相角の変化を作図したもので、入力端子電圧 E を基準ベクトルにとれば、水銀ランプ電圧 V_L の上昇に伴い次のように変化する。

(1) 水銀ランプの基本波電圧 V_{L1} はしだいに上昇し、 E に対して進み位相角であるが、しだいにその進み角度が減少する。

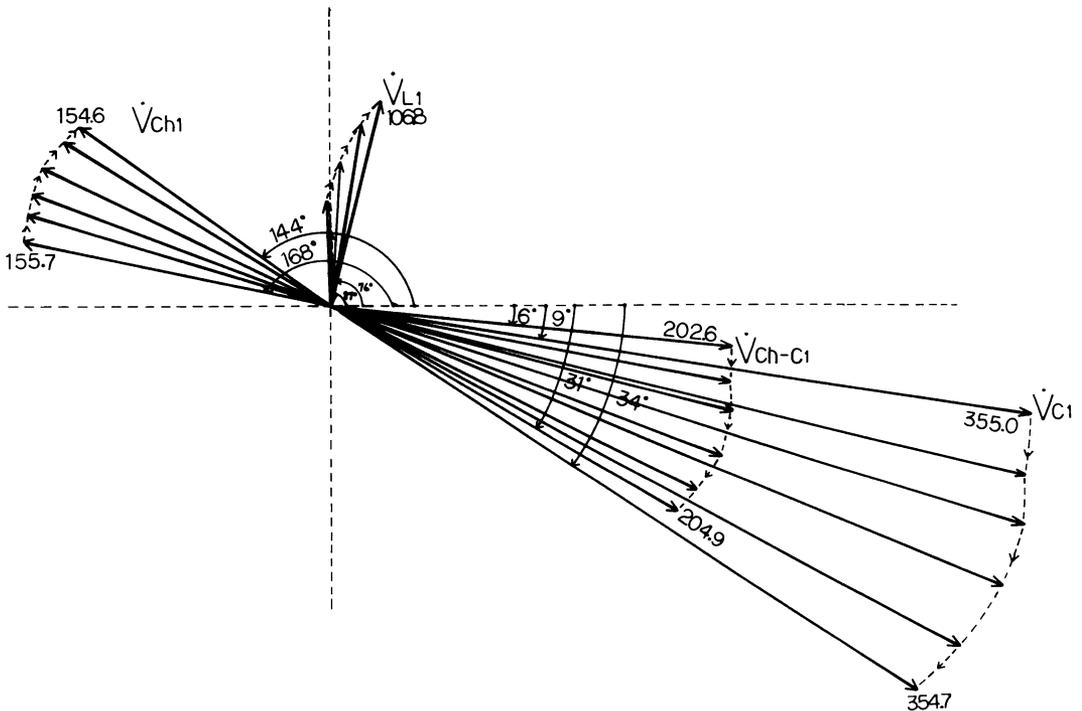


図 2 各素子の基本波電圧ベクトル図

(2) チョークコイルの基本波電圧 V_{ch1} は、ほぼ一定でその変動幅は約 3V、 E に対し進み位相角であるが、20V ごとの変化に対し 4~5° 進み角度が減少する。

(3) コンデンサの基本波電圧 V_{c1} は他の素子より電圧が高く、その変動幅は 11V くらいであるが安定時における電圧に対する変動率は約 3% であるから、ほぼ一定とみなせる。位相角は E に対し遅れ位相角であり、遅れの方向に増大する。

(4) L-C 素子のチョークコイル・コンデンサ間の基本波電圧 V_{ch-c1} の変動幅は約 9V で、安定時における電圧に比べて小さくほぼ一定電圧とみなせる。 E に対し 6° の遅れ位相角から 31° まで増大する。 V_{c1} と V_{ch1} の差が L-C 素子の基本波電圧 V_{ch-c1} となるが、約 3° の位相差が生じている。

(5) 図 3 で、各素子に共通なランプ電流の基本波すなわち入力電流の基本波成分 I_1 は、ほぼ一定で起動から安定時まで定電流となる。一方位相は基準ベクトル E に対し、83° の進み位相から減少して 58° で定常状態となる。

(6) 図 4 は、水銀ランプを起動してから安定するまでの各素子の基本波電圧、電流のベクトルの軌跡を示

す。ランプが始動してランプ電圧の基本波成分 V_{L1} が上昇すると、入力電圧の基本波成分 E_1 は(6)式より常に一定であるので、ほぼ一定のチョークコイル・コンデンサ間の電圧 V_{ch-c1} は遅れ位相角を増大して、 V_{L1} と V_{ch-c1} のベクトル和は常に一定電圧 E_1 となる。

ランプの基本波電流 I_1 は、起動より安定時まで基準ベクトル E に対する進み位相角は減少するが、電流の絶対値は約 1.1A の定電流となる。

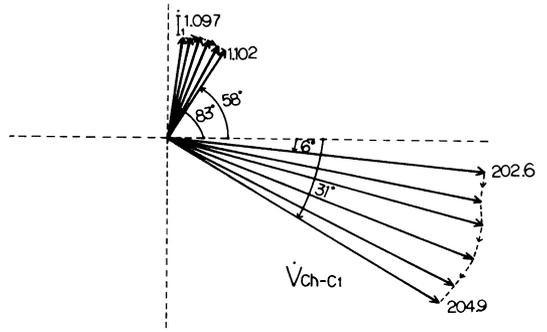


図 3 チョーク・コンデンサ電圧と電流の基本波ベクトル図

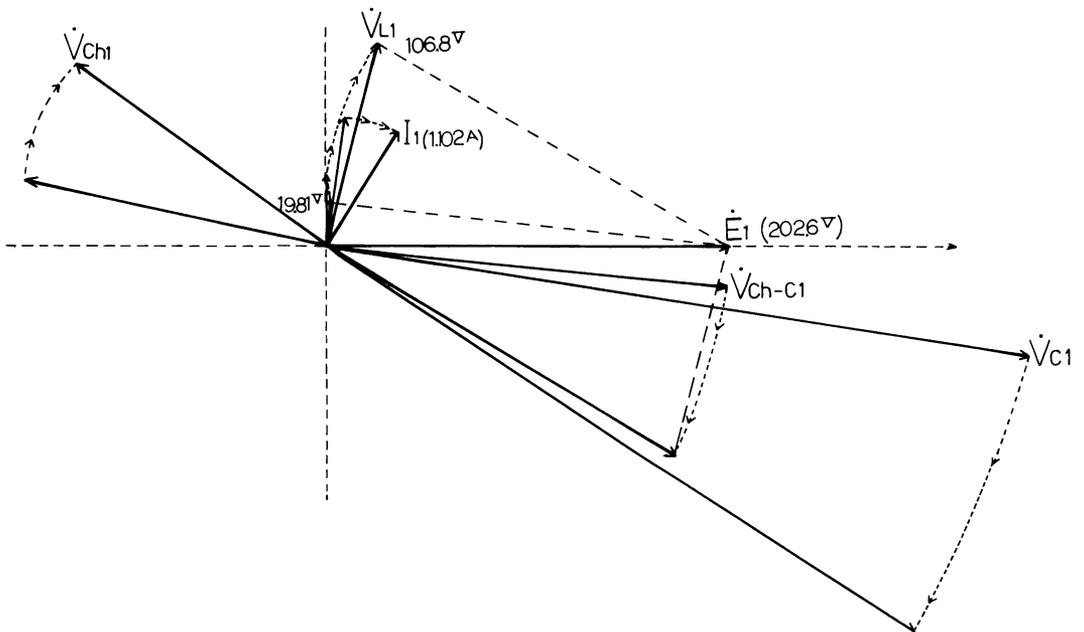


図 4 起動より安定時までの、各素子の基本波電圧・電流ベクトル図

5. 2 第3調波電圧, 電流のベクトル図

入力端子の第3高調波の電圧は, (6)式より基本波電圧の0.2%以下のため無視することにする。水銀ランプは半周期ごとに点弧および消弧を繰り返すため, そのつど入力の基本波エネルギーの一部は第3高調波のエネルギーに変換され, このため水銀ランプは第3高調波の起電力を発生し点灯回路に第3高調波の電流を流す。したがってL-C素子のチョークコイル・コンデンサ間の端子には第3高調波の電圧降下を生じる。しかし点灯回路の入力端子電圧は正弦波であり, 第3高調波の電圧は存在しないので, チョークコイル・コンデンサ端子間の第3高調波の電圧降下 V_{cn-c3} は, 水銀ランプ端子の第3高調波の電圧 V_{L3} と同値で, 逆位相でなければならない。これらの第3高調波の電圧, 電流のベクトル図を, 図5に示す。

図5は, 水銀ランプが起動してランプ電圧 V_L が,

それぞれ20, 40, 60, 80, 100, 115Vと上昇したときの, 点灯回路の第3高調波の電圧, 電流および位相角の変化を, 入力端子電圧Eを基準ベクトルに作図したもので, V_L の上昇に伴って V_{cn-c3} と V_{L3} は, それぞれほぼ同値の逆位相に近いベクトルとなり, 互いに時計方向に回転する。また各素子に共通な第3高調波の電流 I_3 は, 始動より安定まではほぼ2倍となり, その位相角は, L-C素子間の第3高調波電圧 V_{cn-c3} に対しては, 始動から安定まで 11° から 58° までの 90° 以下の遅れ電流となり, 電力の消費を示す¹⁾正(+)となる。水銀ランプの第3高調波電圧 V_{L3} に対しては, 始動から安定まで 163° から 119° までの 90° 以上の進み電流となり, 電力の発生を示す負(-)となる。したがって, 水銀ランプとL-C素子のチョークコイル・コンデンサ間では, 第3高調波の電力の授受が行なわれていることがわかる。

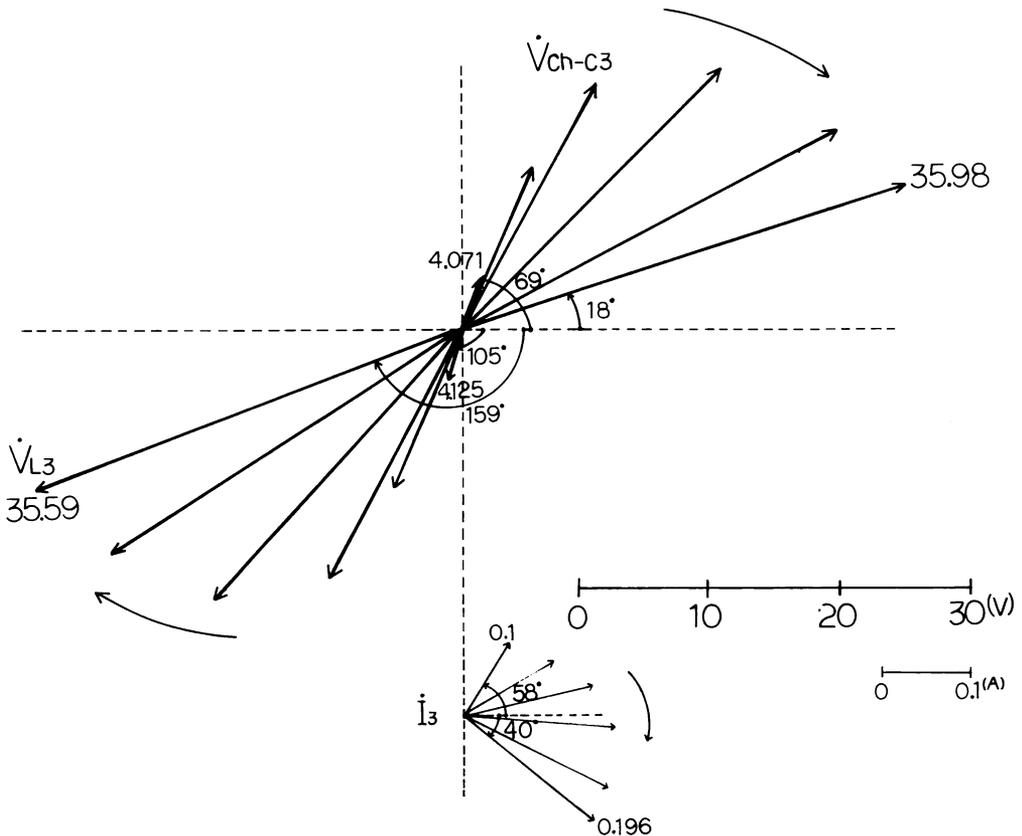


図 5 第3調波電圧・電流ベクトル図

5. 3 第5調波電圧，電流のベクトル図

入力端子電圧は正弦波であるので，第5高調波の電圧も存在しない。波形分析の式より第5高調波の電圧，電流のベクトル図は，図6のようになる。第3高調波

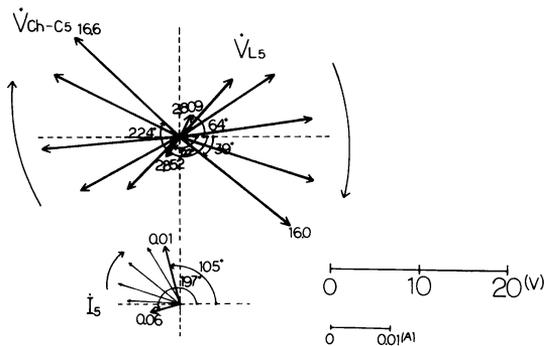


図 6 第5調波電圧・電流ベクトル図

のとくと同じように，第5高調波の電流 I_5 は L-C 素子間の第5高調波電圧 V_{cn-c5} に対しては，始動から安定まで 90° 以下の遅れ電流となり，電力消費を示す正 (+) となる。水銀ランプの第5高調波に対しては，始動から安定まで 90° 以上の進み電流となり，電力発生を示す負 (-) となる。したがって，水銀ランプと L-C 素子のチョークコイル・コンデンサ間で，第5高調波電力の授受が行なわれる。

5. 4 第7調波電圧ベクトル図

ひずみ電圧は主として基本波，第3および第5高調波から成り，第7高調波の成分は小さいが電圧ベクトル図のみを，図7に示した。

以上，第3，第5，第7高調波の各素子の電圧ベクトルはいずれも時計方向に回転する。

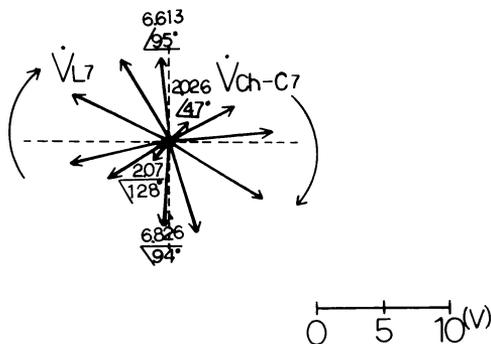


図 7 第7調波電圧ベクトル図

6. 各調波ごとの等価回路

(2)~(6)式の基本波，第3，第5，第7高調波の電圧，電流の実効値と位相角を用いて極座標表示を行ない，複素平面上で(1)式を用いて n 次調波のインピーダンス Z_n ，その抵抗分 R_n ，リアクタンス分 X_n の値を計算することができる。

高圧水銀ランプ進相形点灯回路の入力端子に 200V を印加すると，水銀ランプは始動しランプ電圧 V_L はしだいに上昇して安定点灯状態にいたる。表2は，ランプ電圧が 80V，安定時の 115V に達したときの各調波の，水銀ランプの抵抗分 R_L ，リアクタンス分 X_L と，L-C 素子のチョークコイル・コンデンサ間の抵抗分 R_{cn-c} ，リアクタンス分 X_{cn-c} の値を示したものである。

表2 高圧水銀ランプ進相形点灯回路の各調波インピーダンス

ランプ電圧	素子 各調波	チョークコイル とコンデンサ		水銀ランプ	
		Rch-c(Ω)	Xch-c(Ω)	R _L (Ω)	X _L (Ω)
80	基本波	3.31	-190	62.51	20.31
	第3調波	99.68	127.72	-93.98	-129.52
	第5調波	1027.29	1181.0	-828.18	-998.0
	第7調波	323.49	498.0	-286.06	-516.0
115	基本波	3.24	-185.89	92.83	30.16
	第3調波	96.61	154.87	-89.42	-154.87
	第5調波	1308.08	1021.89	-1219.77	-792.14
	第7調波	351.53	585.05	-232.88	-499.44

表2は，チョークコイル・コンデンサ間を示したが，これを分割してチョークコイルとコンデンサ素子の各調波における，抵抗分，リアクタンス分を次のようにおけば

- $R_{cn1}, R_{cn3}, R_{cn5}, R_{cn7}$: チョークコイルの基本波，第3，5，7調波に対する抵抗分
- $X_{cn1}, X_{cn3}, X_{cn5}, X_{cn7}$: チョークコイルの基本波，第3，5，7調波に対するリアクタンス分
- $R_{c1}, R_{c3}, R_{c5}, R_{c7}$: コンデンサの基本波，第3，5，7調波に対する抵抗分
- $X_{c1}, X_{c3}, X_{c5}, X_{c7}$: コンデンサの基本波，第3，5，7調波に対するリアクタンス分

$R_{L1}, R_{L3}, R_{L5}, R_{L7}$: 水銀ランプの基本波,

第3, 5, 7調波に対する抵抗分

$X_{L1}, X_{L3}, X_{L5}, X_{L7}$: 水銀ランプの基本波,

第3, 5, 7調波に対するリアクタンス分

高圧水銀ランプ進相形点灯回路の点灯中の等価回路は、図8のように、入力端子電圧 E に等しい周波数の基本波回路(1), 第3高調波回路(2), 第5高調波回路(3), 第7高調波回路(4)の和で表わされる。

等価回路で、高圧水銀ランプは

(1) 基本波の周波数に対しては、誘導性インピーダンスとして動作し、

(2) 第3, 5, 7高調波に対しては、負性抵抗と直列の容量リアクタンスとして動作する。これらの意味は水銀ランプが電力を発生して負(-)の符号、チョークコイル・コンデンサ間で電力を消費して正(+)の符号で表わされることである。したがって、

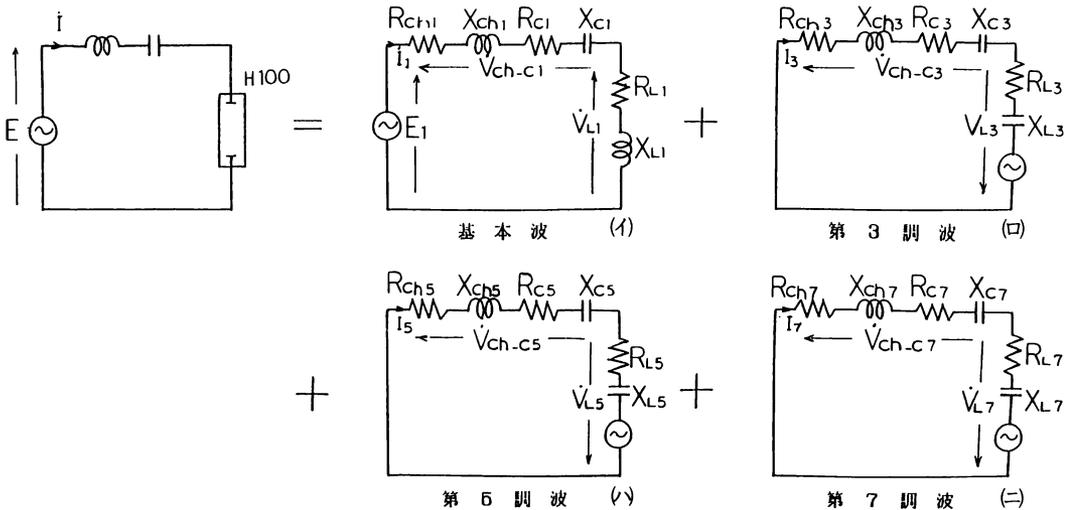


図8 進相形点灯回路の等価回路

各調波ごとに両者間で電力の授受が行なわれる。表2の、各調波に対する抵抗分とリアクタンス分の数値は正確に一致していないが、チョークコイル・コンデンサ間の各成分は、正(+)の値を示し、水銀ランプの各成分は、負(-)の値を示している。

7. あとがき

高圧水銀ランプ進相形点灯回路に正弦波の定電圧を印加し、ランプが始動して安定点灯に達するまでランプ電圧の上昇ごとに実験を行なった。これらに対する各素子のひずみ波の電圧、電流の波形分析を行ない、解析した結果を、以下に示す。

高圧水銀ランプ進相形点灯回路を始動すると

(1) 水銀ランプは、基本波の周波数に対しては、抵抗と直列の誘導リアクタンスとして動作する。

(2) ランプ電圧の上昇に伴って基本波電圧も上昇し、チョークコイル・コンデンサ間の基本波電圧は遅れ位相角が増大して、電源の基本波電圧と平衡する。

(3) 基本波電力は、大部分が水銀ランプの基本波電

力であり、これに僅かのチョークコイル・コンデンサの基本波電力を加えたものは、ともに入力端子の電源より供給される。

(4) 第3, 5, 7高調波において、水銀ランプは各調波において電力を発生して、チョークコイル・コンデンサ間で電力を消費する。したがって、これら各調波に対し、水銀ランプは負性抵抗と直列の容量リアクタンスとして動作する。

以上のことから、高圧水銀ランプ進相形点灯回路の等価回路は、基本波、第3、第5、第7高調波回路の和から成り立ち、ランプ電圧の上昇に伴って、等価回路の成分の大きさも大きく変化する。

終わりに、実験と資料の整理に協力された卒論学生、永家三郎(現鹿児島大院生)、奥村賢治(日本電気アイシーマイコンシステム)の両君に謝意を表します。

文献

- 1) 山口・前田・家村: 照学誌 68-6 (昭59)
- 2) 山口: 照学誌 65-10 (昭56)