

# 無電極ランプ点灯回路に関する研究

岡本 太志\*

## An Electronic Ballast for Electrodeless Fluorescent Lamps

Futoshi Okamoto\*

### Abstract

We experimentally investigated an electronic ballast for electrodeless fluorescent lamps operated at 150, 200, and 400 kHz in order to achieve high efficiency, low cost, and low EMI. An efficiency of around 96% was obtained, and the EMI at 200 kHz was lower than that at 2.65 MHz. The EMI from lamps with the coil inside was lower than from those with the coil outside at the same driving frequency.

**Keywords :** Electrodeless fluorescent lamp, Electronic ballast, Halfbridge inverter, Radiated noise

### 1. はじめに

長寿命, 省メンテナンスを特徴とする無電極ランプにおいて, 誘導コイル外巻型ランプの点灯回路には, これまで国際的なISMバンド (工業用: Industrial, 科学用: Scientific, 医療用: Medical) である13.56MHzの駆動周波数が用いられてきた<sup>1)</sup>。回路方式としてはハードスイッチングのC級増幅回路から零電圧スイッチングのE級インバータ等へと高効率化が図られているが, 10MHz超の高周波動作に伴う電力損失や部品・回路コストの増加は避けられないのが現状である。一方, 誘導コイル内装型の無電極ランプに関しては, 2.5MHz程度の動作周波数を用いた点灯回路が実用化されているが<sup>2)</sup>, ノイズ規制等の面から, 点灯周波数の更なる低周波化が望まれる。

そこで本論文では, 低周波点灯可能な無電極ランプを開発し, 点灯回路の高効率化, 低コスト化および低ノイズ化を図るため, 数100kHzの点灯周波数における零電圧スイッチングハーフブリッジインバータを用いた無電極ランプ点灯実験と解析を行い, その諸特性の検討を行う<sup>3)</sup>。

### 2. 無電極ランプの構造

無電極ランプの構造を図1に示す。(a)は磁心を有する誘導コイルがランプ内部に収納された誘導コイル内装型, (b)は空心の誘導コイルがランプ外側

の赤道部に接するように巻かれた誘導コイル外巻型である。

今回開発した低周波点灯可能な無電極ランプの具体的な構造を図2に示す。低周波化に際して, 誘導コイルの巻数を最適化している。

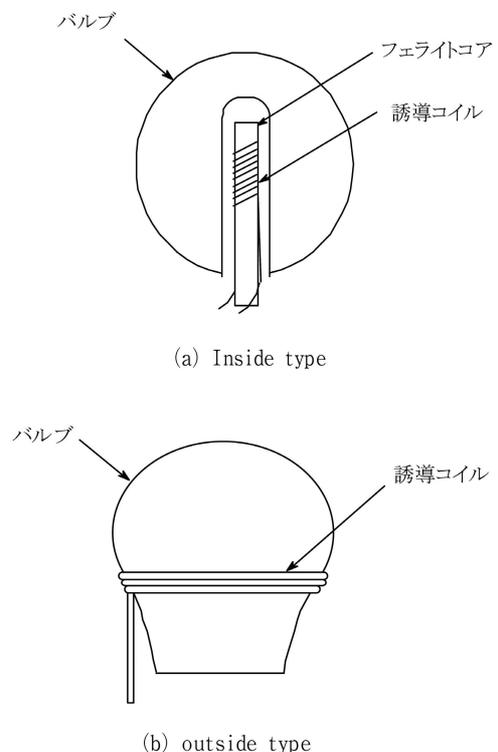


図1 無電極ランプの一般的構造  
(a) コイル内装型, (b) コイル外巻型

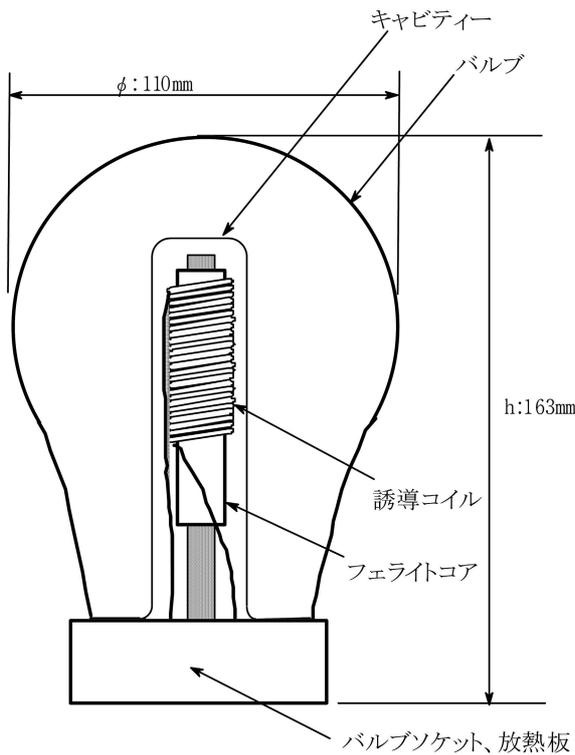


図2 無電極ランプの具体化構造

無電極ランプの概要を以下に記す。

- (1) バルブ形状：高さ：163mm，外径110mm
- (2) キャビティ：高さ：145mm，外径：28mm
- (3) アマルガム：有り
- (4) コイル：145μH，フェライトコアの周りにリッツ線で40ターン
- (5) フェライトコア：Mn-Zn，高さ107mm，外径24mm
- (6) 定格出力：50W
- (7) 駆動周波数：450kHz以下

### 3. 無電極ランプ点灯回路

#### 3.1 点灯回路構成

今回検討した無電極ランプ点灯回路の基本回路を図3に示す。本回路はランプの誘導コイル $L_0$ に並列に接続したキャパシタと、それに直列に接続したインダクタとで直列共振回路を構成するハーフブリッジインバータである。無電極ランプ始動時には共振回路によりランプ始動電圧以上の高周波高電圧を誘導コイルの両端に印加し、無電極ランプを始動させる。始動後はランプのインピーダンスが大きく変化する、電圧・電流の振幅が減少するため、回路素子に過大な電流・電圧ストレスがかかることなく無電極ランプの定格電力による安定点灯が行われる。

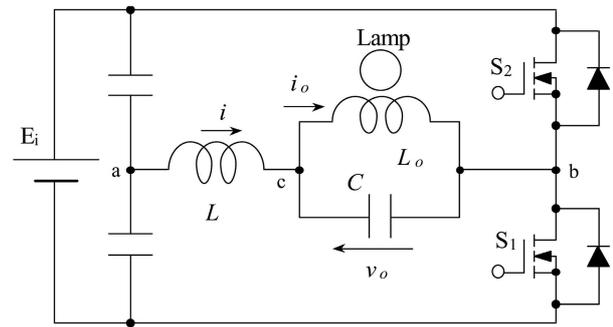


図3 零電圧スイッチング無電極ランプ点灯回路

#### 3.2 等価回路

無電極ランプは、誘導コイルに高周波高電圧を印加することにより始動し、放電開始後は等価的にはほぼ純抵抗とみなすことができる。誘導コイルと放電路との結合係数を $k$ 、放電路の抵抗、即ちプラズマ抵抗を $R_p$ 、誘導コイルの巻数を $n$ とすると、無電極ランプと誘導コイルは、等価的に $n:1$ の空心トランスに $R_p$ なる抵抗が接続されたものとして表わすことができる<sup>4) 5)</sup>。さらに、誘導コイルの両端b-c間のインピーダンス $Z_L$ を、抵抗 $R$ とインダクタ $L_r$ を並列接続したものに变换すると無電極ランプ点灯時における等価回路は図4で与えられ<sup>6)</sup>、スイッチング角周波数を $\omega_s$ として次式のように示される。

$$R = R_l + \frac{\omega_s^2 L_l^2}{R_l} \dots\dots\dots(1)$$

$$L_r = L_l + \frac{R_l^2}{\omega_s^2 L_l} \dots\dots\dots(2)$$

但し

$$R_l = \frac{(kn)^2 R_p k^4 \omega_s^2 L_0^2}{(kn)^4 R_p^2 + k^4 \omega_s^2 L_0^2} \dots\dots\dots(3)$$

$$L_l = \frac{(kn)^4 R_p^2 k^2 L_0}{(kn)^4 R_p^2 + k^4 \omega_s^2 L_0^2} + (1 - k^2) L_0 \dots\dots\dots(4)$$

である。

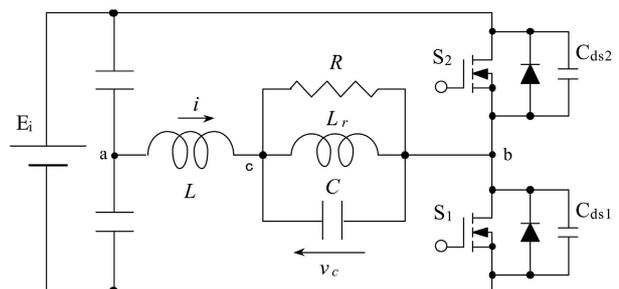


図4 無電極ランプ点灯時における等価回路

### 3. 3 基本動作

無電極ランプ点灯回路の放電開始前における共振回路部全体のリアクタンス $X$ は、並列共振周波数 $f_{ox}$ 付近で急激に大きくなり、直列共振周波数 $f_{rx}$ で0になる。ここで、共振回路の並列共振周波数 $f_{ox}$ と直列共振周波数 $f_{rx}$ は、

$$f_{ox} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{CL_0}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$f_{rx} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C} \left( \frac{1}{L_0} + \frac{1}{L} \right)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

と表される。また、放電開始後のランプ点灯時における並列共振周波数 $f_o$ と直列共振周波数 $f_r$ は、

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{CL_r} - \frac{1}{(2CR)^2}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C} \left( \frac{1}{L_r} + \frac{1}{L} \right) - \frac{1}{(2CR)^2}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

と求められる。

本回路においてスイッチング周波数 $f_s$ は直列共振周波数 $f_r$ より高く設定する。よって負荷は誘導性インピーダンスとなるため、両スイッチがオフとなるデッドタイム期間中も蓄積されたリアクトルエネルギーにより共振電流 $i$ が流れ続ける。この電流によりスイッチの寄生容量 $C_{ds1}$ 、 $C_{ds2}$ の充放電を行ない零電圧スイッチングを実現する。

### 3. 4 回路設計

文献6における解析式を基に、今回実験に用いたランプの定格出力50Wを得るための設計例を記す。まずスイッチング周波数を223kHzとする。誘導コイル $L_0$ はランプ内側に収納されているフェライトコアの周りにリッツ線で40ターン巻き、 $n=40$ とすると、測定により、

$$L_0 = 155 \mu\text{H}$$

となる。また、誘導コイルとプラズマの結合係数 $k$ 、プラズマ等価抵抗 $R_p$ をそれぞれ

$$k = 0.9, R_p = 0.55 \Omega$$

とすると式(1)、式(2)で表される $R$ と $L_r$ は、

$$R = 1089 \Omega, L_r = 153.5 \mu\text{H}$$

と求められる。入力電圧 $E_i$ を350Vとして、

$$L = 473.4 \mu\text{H}$$

$$C = 4550 \text{pF}$$

とすると出力電力 $P \approx 50\text{W}$ を得る。

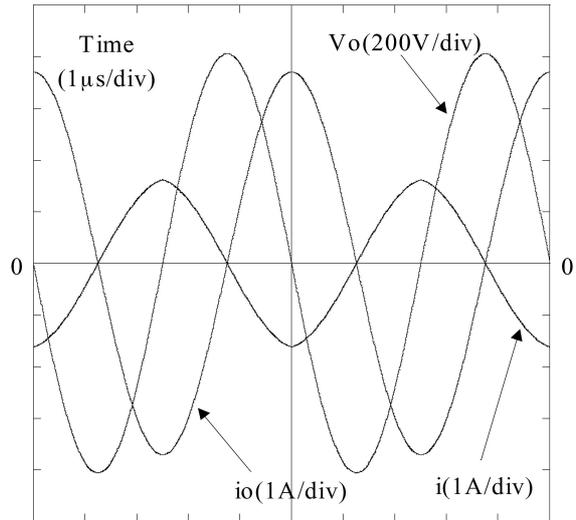
この時の放電開始前の直列共振周波数 $f_{rx}$ 、特性インピーダンス $Z_x$ および放電開始後の直列共振周波数 $f_r$ は次のように求められる。

$$f_{rx} = 218.4 \text{kHz},$$

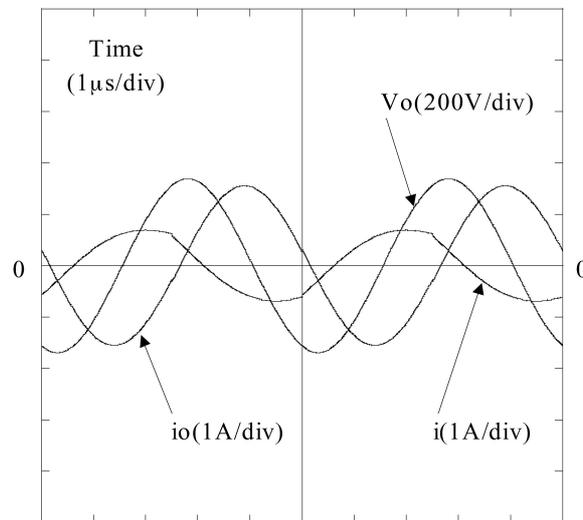
$$Z_x = 649.5 \Omega,$$

$$f_r = 218.6 \text{kHz},$$

これらの回路定数を用いた場合の解析による放電開始前と放電開始後の無電極ランプ点灯時における回路の誘導コイルを流れる電流 $i_0$ 、誘導コイル間電圧 $V_0$ および共振電流 $i$ の各解析波形をそれぞれ図5に示す。



(a) Before discharging



(b) Lighting

図5 解析波形

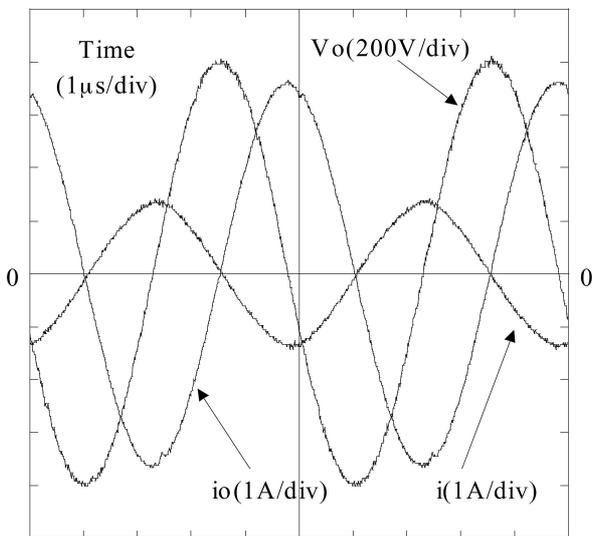
## 4. 点灯実験

### 4. 1 解析による設計値での点灯実験

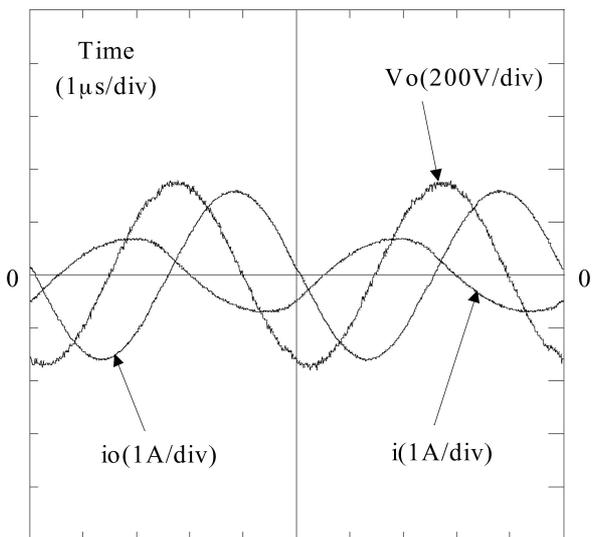
解析により得られた回路定数に基づいて、無電極ランプの223kHz点灯実験を行った。実験に用いた無電極ランプは、図2に示されるようなフェライト

コアを有する誘導コイル内装型の試作ランプであり、定格出力は50Wである。誘導コイル $L_0$ はフェライトコアの周りにリッツ線で40ターン巻き、限流用インダクタ $L$ には磁心としてフェライトEIコアを用い、 $C$ にはディップマイカコンデンサ数個を並列接続したものをを用いた。

図6にランプ点灯時および点灯前における実験波形を示す。このとき、出力電力 $P_o$ は定格の50Wが得られている。さらに図5の解析波形と比較して各電流、電圧のピーク値および位相差は点灯前、点灯時いずれの場合においてもほぼ一致しており、解析の妥当性が確認できる。



(a) Before discharging



(b) Lighting

図6 実験波形

#### 4. 2 低周波点灯実験

スイッチング周波数を150kHz, 200kHz, または400kHzとする点灯回路により無電極ランプの点灯実験を行う。実験に用いた回路定数を表1に示す。ここで表中の $Z_x$ は特性インピーダンスであり次式で表される。

$$Z_x = \sqrt{\frac{L}{C} \left( \frac{L+L_0}{L_0} \right)} \dots\dots\dots (9)$$

特性インピーダンス $Z_x$ を変化させた場合の始動時における誘導コイルピーク電圧 $V_{opeak}$ 、誘導コイルを流れるピーク電流 $I_{opeak}$ を図7に示す。これより、点灯周波数の低い方がランプ始動のために大きな電圧、電流の必要なことが判る。

次に特性インピーダンスに対して出力電力 $P_o=50W$ となるようにスイッチング周波数 $f_s$ を調整して実験を行なった。特性インピーダンスに対する始動時および点灯時のスイッチング周波数 $f_s$ を図8に、誘導コイル間ピーク電圧 $V_{opeak}$ 、誘導コイルを流れるピーク電流 $I_{opeak}$ を図9に、インダクタ $L$ を流れるピーク電流 $I_p$ を図10に、効率を図11に示す。

図8より150kHz点灯においては $Z_x=630\Omega$ 、200kHz点灯においては $Z_x=650\Omega$ 、400kHz点灯においては $Z_x=600\Omega$ のときに始動時のスイッチング周波数が出力電力50Wの定常時のスイッチング周波数とほぼ等しくなる。したがって上記の値以上の特性インピーダンスを用いることにより始動時と定常時でほぼスイッチング周波数を変化させることなく無電極ランプの始動、定格出力による点灯が行える。

また、図9より点灯時の誘導コイルピーク電圧 $V_{opeak}$ は出力電力一定のとき特性インピーダンスや点灯周波数に関わりなく一定であることが判る。また、誘導コイルを流れるピーク電流 $I_{opeak}$ は出力電力一定のとき特性インピーダンスに依存せず一定であるが、点灯周波数に依存し、周波数の低い方がピーク値は大きくなることが判る。

また、図11の効率特性を見ると、特性インピーダンスが高くなると、効率の向上が見られる。これは図10に示すように点灯時インダクタ $L$ を流れる共振電流ピーク $I_{opeak}$ が特性インピーダンスの増加とともに低くなっていることから、スイッチやインダクタ $L$ での素子ストレスが減少したためであると考えられる。

点灯周波数に関しては周波数が低い方が効率も低くなっている。この原因として、インダクタ $L$ を流れる電流が図10に示すように周波数にほぼ関わりなく一定であり、図9に示すように誘導コイルを流れる電流ピークが点灯周波数が低くなるに従い大きくなることからキャパシタ $C$ での誘電損失、ESRによる損失であると考えられる。

表1 点灯実験における回路定数

(a)  $f_s=150[\text{kHz}], L_o=149.2[\mu\text{H}]$

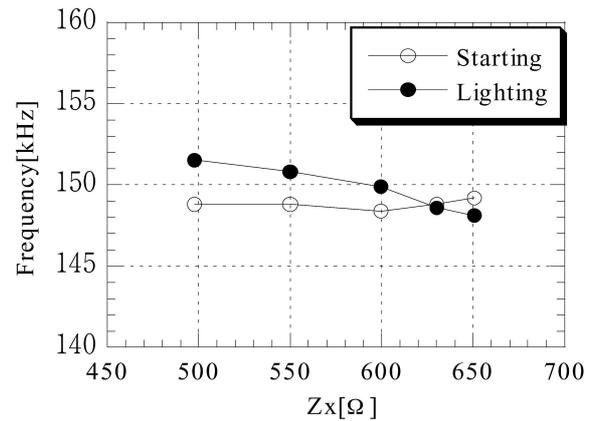
$Z_x[\Omega]$	$L[\mu\text{H}]$	$C[\text{nF}]$	$f_{rx}[\text{kHz}]$
498	541	10.1	146
550	595	9.83	147
600	650	9.68	147
630	682	9.58	147
651	703	9.50	147

(b)  $f_s=200[\text{kHz}], L_o=155[\mu\text{H}]$

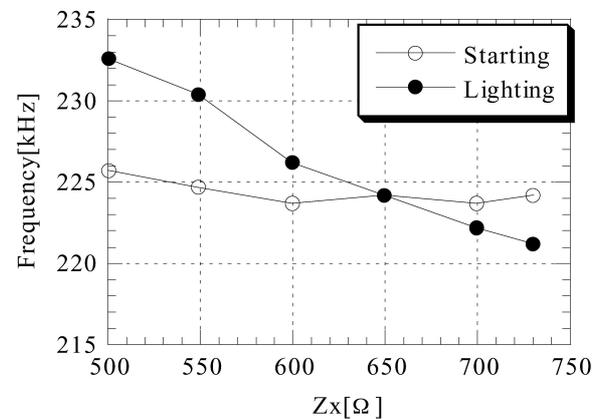
$Z_x[\Omega]$	$L[\mu\text{H}]$	$C[\text{nF}]$	$f_{rx}[\text{kHz}]$
501	364	4.87	219
549	401	4.77	218
598	437	4.66	218
650	473	4.55	218
699	510	4.47	218
730	532	4.42	219

(c)  $f_s=400[\text{kHz}], L_o=176[\mu\text{H}]$

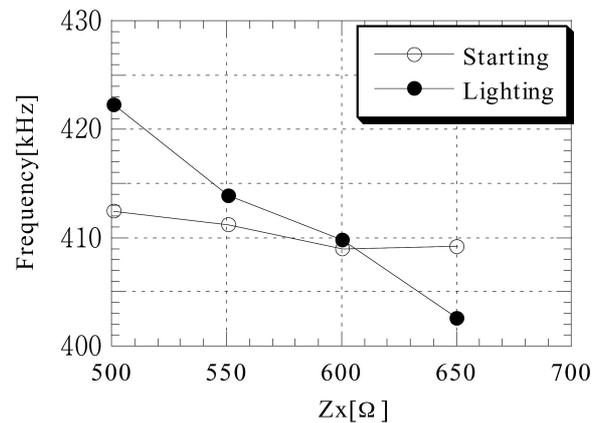
$Z_x[\Omega]$	$L[\mu\text{H}]$	$C[\text{nF}]$	$f_{rx}[\text{kHz}]$
501	203	1.74	393
551	223	1.67	393
601	244	1.61	392
650	264	1.56	392



(a) At 150kHz



(b) At 200kHz



(c) At 400kHz

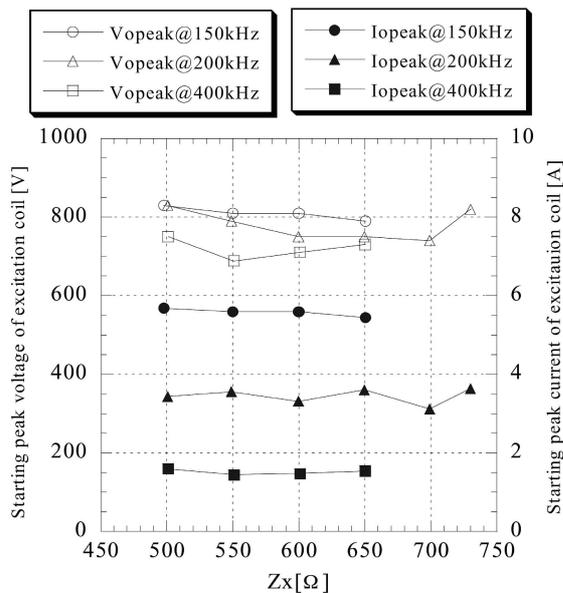


図7 始動時の誘導コイル間ピーク電圧, 電流

図8 始動時, 点灯時のスイッチング周波数  
(a) 150kHz点灯実験, (b) 200kHz点灯実験,  
(c) 400kHz点灯実験

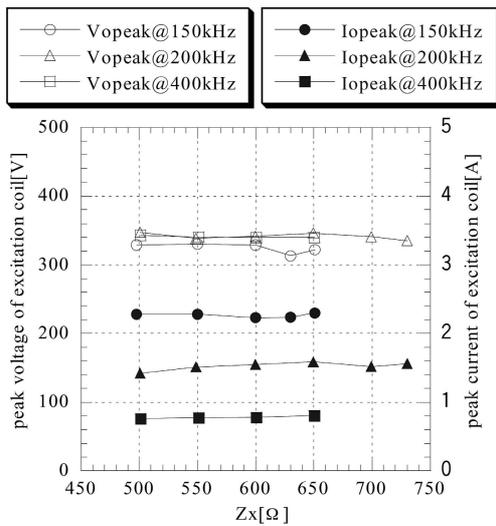


図9 点灯時の誘導コイル間ピーク電圧, 電流

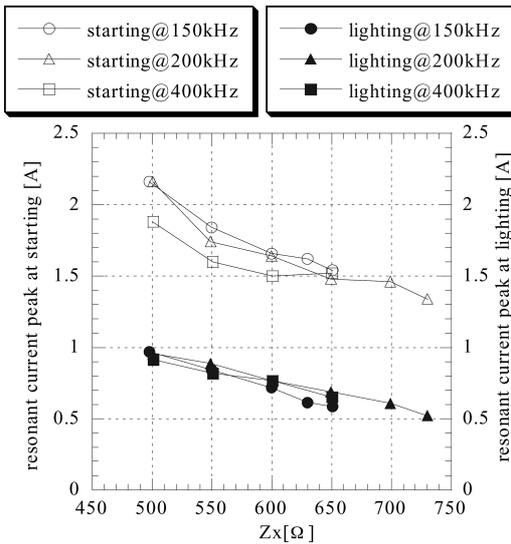


図10 始動時, 点灯時の共振ピーク電流

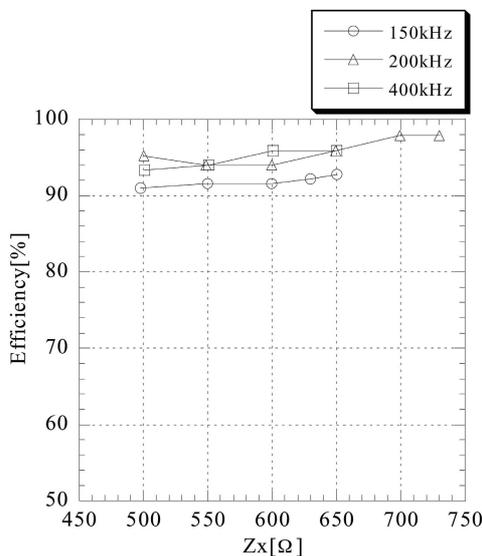


図11 効率特性

今回の実験において, 回路の特性インピーダンスとして始動時の誘導コイル間電圧と定常時の定格出力を両立させる値を用いた場合200kHz点灯時において95.9%の高効率が得られている。

### 4. 3 誘導コイルの損失分析

点灯回路の損失分析を行った。なお, 実験はスイッチング周波数224kHz, 特性インピーダンス650Ωで行い, 各素子の電圧・電流波形をデジタルオシロスコープ (Tektronix DSA602A型) で読み取り, 損失を算出した。得られた回路全体の損失2.15Wに対する各部品の損失の割合を図12に示す。インダクタLやキャパシタC等の共振素子での損失が目立つが, 特にインダクタに関しては, 磁心, 巻線の最適設計を行うことにより損失の低減は可能であると考えられる。

また, 先の実験における回路の出力電力には, ランプの消費電力以外に誘導コイルにおける損失も含んでいる。すなわちランプの消費電力を $P_R$ , 誘導コイルの鉄損を $P_{iron}$ , 銅損を $P_{copper}$ とおくと, 回路の出力電力 $P$ は次式で表される。

$$P = P_R + P_{iron} + P_{copper} \dots\dots\dots(10)$$

そこで, 誘導コイルにおける損失についてプラズマ等価抵抗を用いた測定により検討を行う。

まず, 図13に示すように誘導コイル $L_0$ に巻数 $n_2=10$ ターンの2次巻線を施し, プラズマ等価抵抗 $R_p'$ を接続した。なお,  $R_p'$ はランプ点灯時と等しい誘導コイル電圧を印加した場合に, 点灯時と等しいコイル電流となるように調整した。次にランプ点灯時と等しい電力を1次側に入力し, その時の1次側, 2次側電力の差より誘導コイルの損失を求めた。また, 鉄損 $P_{copper}$ の測定は, 図14に示す通り2次側を開放

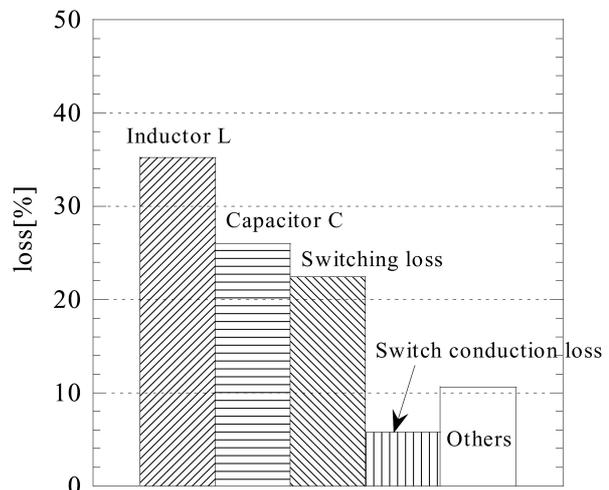


図12 損失分析

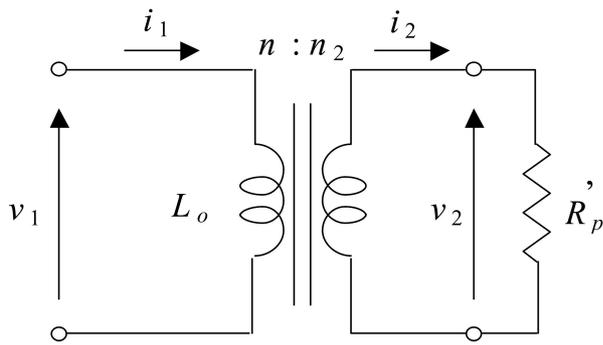
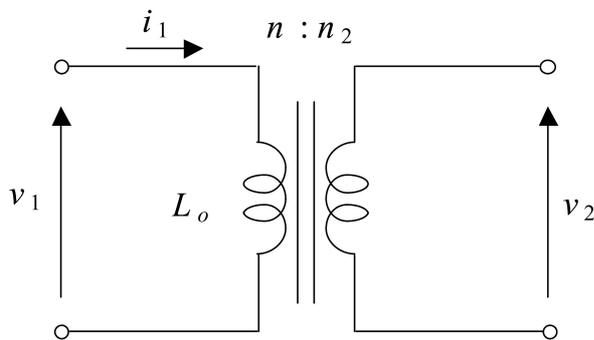


図13 プラズマ等価抵抗における消費電力測定



(b) Iron loss

図14 鉄損の測定

表2 誘導コイルの損失分析結果

周波数 $f_s$ [kHz]	224	409
ランプの消費電力 $P_R$ [W]	43.7	44.8
鉄損 $P_{iron}$ [W]	2.64	2.63
銅損 $P_{copper}$ [W]	3.66	2.57

とし $v_1$ にランプ点灯時と等しい電圧を印加したときの1次電流 $i_1$ 、2次電圧 $v_2$ より求めた。なお銅損は誘導コイルの損失から鉄損を引いて求めているため2次巻線の銅損も含んでいる。

測定結果を表2に示す。点灯周波数が変化しても鉄損に関してはほぼ変化がないのに対し、銅損は224kHzの低い点灯周波数の方が大きくなることが判る。これは図9を見て判るように誘導コイルに流れる電流ピークが409kHzのときと比べて約2倍となっているためである。したがって、誘導コイルにおける損失(鉄損・銅損)は、409kHz点灯時の方が224kHz点灯時より小さい。

### 5. まとめ

本論文では、低周波化された誘導コイル内装型無電極ランプにおいて、零電圧スイッチングインバータを用いた点灯周波数150kHz、200kHzおよび400kHzでの点灯実験を行った。

その結果、スイッチング周波数を変化させることなく無電極ランプの始動および定格出力による安定点灯の行なえる回路を実現し、回路効率約96%の高効率が得られた。

### 参考文献

- (1) 四宮, 小林, 東川, 谷河, 松浦, 明星: 無電極蛍光ランプ, 照学全大, p8 (1990).
- (2) Louis Robert Nerone: Design of a 2.5MHz, softswitching, Class-D Converter of Electrodeless Lighting, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.12, pp.507-516 (1997).
- (3) 長谷川, 原田, 石原, 戸高, 岡本: 無電極蛍光ランプ点灯回路に関する一検討, 電子情報通信学会技術研究報告, IEEE99-44 (1999).
- (4) C. I. Babat: Electrodeless Discharges and Some Allied Problems, J. of I. E. E. Part3, 94, pp.27-37 (1942).
- (5) 四宮, 東方, 川口: 無電極蛍光ランプの等価回路モデル, 照明学会東京支部, pp.92-95 (1992).
- (6) 細谷, 原田, 石原, 戸高, 岡本: 10MHz級零電圧スイッチングインバータによる無電極ランプ点灯回路, 照学誌, 79-11, pp.38-45 (1995).

