

論 文

フの字垂下特性を持つ新しいAC高電圧電源の提案と 放電管シマー回路への応用

Dilmurat UPRJIAN*, 山 村 曜 宏**, 十文字 正 憲**,¹

(2001年10月9日受付; 2002年4月22日受理)

A New AC High Voltage Power Supply with Fold-back V-I Characteristics and Its Application to Flashlamp Simmer Circuits

Dilmurat UPRJIAN*, Akihiro YAMAMURA** and Masanori JYUMONJI**

(Received October 9, 2001; Accepted April 22, 2002)

Pre-discharge for laser excitation flashlamps, the so-called simmer discharge, has been applied to solid state lasers, and a significant improvement in the stability of the laser output was observed. Enhancement of the output energy in flashlamp-pumped dye lasers has also been demonstrated by employing an appropriate simmer mode in the flashlamp circuit. A very high ignition voltage, low voltage and sufficient discharge current after ignition are required for stable glow discharge. The DC drive of glow discharge requires for adjustment to the slide transformer to ignite the discharge, and then for a reduction in the voltage in order to determine an appropriate discharge current. A self-starting circuit with a low regulation Cockcroft circuit, which gives a very high voltage before ignition and a low voltage after ignition, and which results in stable glow discharge has been developed. However, as with conventional approaches, the circuit requires for a high voltage and high power series resistor. The purpose of this paper is to propose a self-starting simmer circuit by using a newly developed fold-back V-I characteristic AC circuit that is simple to operate and offers low power dissipation and good laser output stability characteristics.

1. はじめに

グロー放電による予備電離、いわゆるシマー放電は最初固体レーザーに用いられ、レーザー出力の安定度を増すことが報告された¹⁾。また、色素レーザーでは出力安定度が増すだけでなく、レーザー出力エネルギーも向上することが知られている²⁾。シマー放電の具体的方法としては、

- 1) DC放電¹⁻¹⁰⁾
- 2) プレパルス放電¹¹⁾
- 3) 脈流放電 …… 今回の提案¹²⁾

キーワード：シマー回路、グロー放電、脈流点灯、放電管回路、フの字垂下特性

* 新疆大学物理学系 (830046 中国新疆烏魯木齊勝利路14号)

Department of Physics, Xinjiang University, 14 shenle road, Urumuqi, Xinjian, China, 830046

** 八戸工業大学大学院工学研究科電気電子工学専攻 (031-8501 青森県八戸市大字妙字大開88-1)

Department of Electrical and Electronic Engineering, Graduate School of Engineering, Hachinohe Institute of Technology, 88-1 Ohbiraki, Myo, Hachinohe City, Aomori 031-8501, Japan

¹00201@stud.hi-tech.ac.jp

など様々な方式が提案・実用されている。

さて、レーザー励起用フラッシュランプを予備電離（グロー放電）させるには、最初高い電圧、放電してからは低い電圧と或る値以上の放電維持電流が必要である。従来のDC放電ではスライドトランジスタを上げて行き点灯させ、点いたらダイアルを戻して一定の電流値に設定するが、操作が不便であった。そこで、わざとレギュレーションを低く設定したコッククロフト回路を用い、放電前はn倍の高い電圧、放電後は1倍の低い電圧に自動的に切り替わり、安定な放電を得る回路が開発された¹³⁾。プレパルス法はシマー電力損失は少ないが、レーザー出力エネルギー向上がやや小さいうえ、駆動回路自体や付随するタイミング回路が煩雑であるという欠点がある。

我々はフの字垂下特性を持ち、効率も低レギュレーションコッククロフト点灯回路よりも優れた新しい自動点灯シマー回路⁵⁾を考案したので報告する。

2. フの字垂下特性を持つ新しいAC高圧電源の提案

Fig.1 に本研究で提案するACフの字特性トランジスタ回

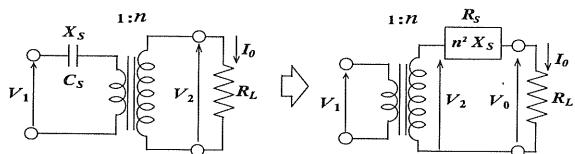
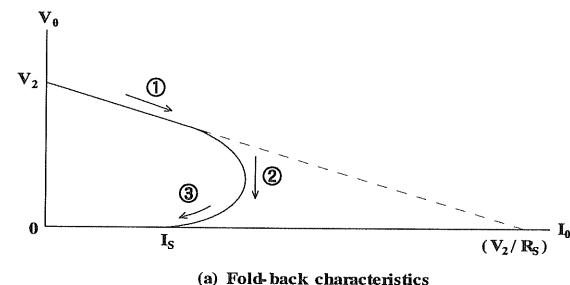
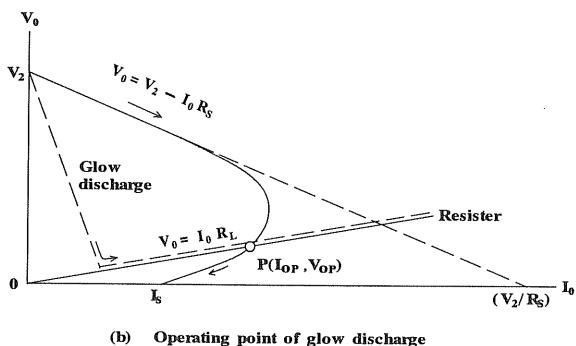


Fig.1 フの字垂下特性を持つトランス回路とその等価回路



(a) Fold-back characteristics



(b) Operating point of glow discharge

Fig.2 フの字垂下特性を示す理由と放電管の動作点

路の原理図を示す。昇圧トランスの一次側に直列にコンデンサを挿入すると、二次側に変換され、放電安定抵抗を入れたのと等価になり、高耐圧大電力抵抗が不要になるばかりでなく、フの字特性を示し、具合がよい。このとき、電流制限素子がリアクタンスのため、電力損失が無い事も特筆される。Fig.2(a)にこの回路のV-I特性を模式的に示す。動作領域は次の3つの領域に分けられる。

①定電圧駆動領域

負荷が軽く、直列コンデンサが無視できる領域。すなわち、

$$V_o = V_2 - I_o R_s \doteq V_2 \quad (R_L > 0) \quad (1)$$

である。ただし、 V_2 はトランス二次電圧、 I_o は負荷電流、 R_s は二次側に変換されたインピーダンス、 R_L は負荷抵抗とした。

②定電流駆動領域

中間領域で、直列コンデンサの効果が現れ始め、 I_o 一定でカーブが鉛直になる領域。

③さらに R_L を下げた場合

R_L を極端に下げると直列コンデンサの働きが顕著になって十分なトランス一次電圧が確保されず、 V_o が低

下し、

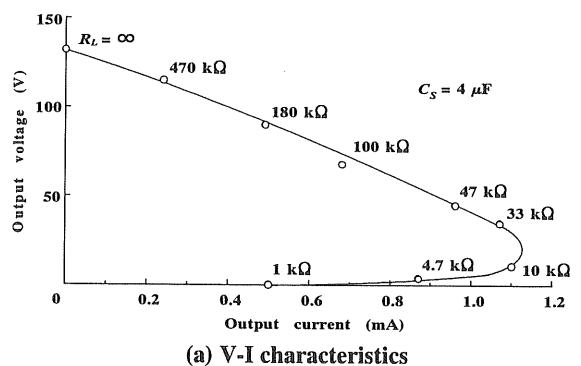
$$V_o = I_o R_L \quad (2)$$

より I_o も低下する領域。

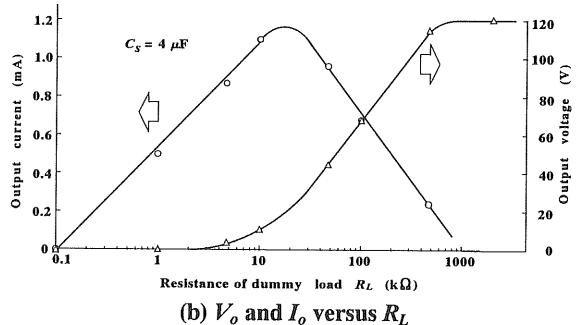
以上より、フの字特性を示す。

また、この回路に負荷（抵抗器または放電管）を接いだ場合、Fig.2(b)に示すように、負荷の動作直線とV-I特性の交点 $P(I_{op}, V_{op})$ が自動的に動作点となり、低い放電維持電圧、適度の放電電流が実現し、自動点灯が容易に実現される。なお、負荷直線は、純抵抗のときは実線、グロー放電管の場合は点線で示した。

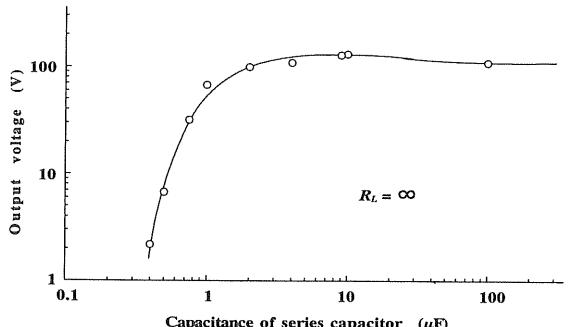
Fig.3(a)～(c)に小型電源トランス（一次側入力 12 V、二次側出力 130 V, 50 mA）を用いたときの実験結果を示す。(a)はV-I特性で予想通り綺麗なフの字特性を示しており、最大取り出し可能電流と短絡電流の比率は約 2.4 であった。(b)は負荷抵抗の値を変えたときの出力電圧と出力電流を示したものである。負荷が重くなるにつれ出力電圧は急激に低下するが、電流はある負荷のとき最大



(a) V-I characteristics



(b) V_o and I_o versus R_L



(c) V_o versus C_s

Fig.3 小型電源トランスを用いたときの実験結果

となっている。これは、負荷の値とトランス一次側の直列コンデンサ C_s が二次側に変換されたインピーダンス X_s (このトランス回路の出力インピーダンスに相当) が等しいとき、すなわちインピーダンスマッチングの条件に対応している。また、(c)は無負荷時の出力電圧を調べたものであり、直列コンデンサ容量 1 μF 以上ではほぼコンデンサ無し (直結時) の場合の出力電圧が得られるが、それ以下の容量では急激に低下する。このクリティカルポイントは、挿入したリアクタンスとトランス一次リアクタンスの等しくなる付近であることが実験的に確かめられた。

3. 高電圧フの字特性回路の試作と動作特性

試作回路は原理図通りのものであるが、さらに電流制限を計るため、高圧トランスには垂下特性を持つネオントランスを用いた。直列コンデンサにはオイルペーパーコンデンサを用いた。出力電圧の設定は回路の一次側にスライドトランスを挿入し行った。

Fig.4 は無負荷時にきちんと目的とする高い電圧が得られているか調べたものである。無負荷出力電圧はコンデンサの容量で大きく変化し、コンデンサ容量が小さいうち、例えば 7 μF ではスライダック電圧を最大限にまで上げても 3 kV しか得られないが、容量を増すと出力電圧は漸増し、940 μF ではコンデンサ無しのときの電圧 (20 kV) 近くまで設定することが可能であった。また、コンデンサ無し、すなわち直結の時に比べ半分の出力電圧でシマーフラッシュが可能なら、コンデンサの値は 50 μF 以上であれば良いことが読みとれる。

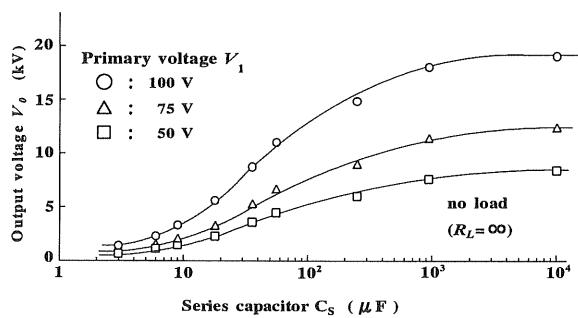


Fig.4 出力電圧の直列コンデンサ依存性

Fig.5に抵抗負荷を用いたときのV-I特性の典型的な一例を示す。設定電圧が低い場合は最大電流と短絡電流の差が小さく、フの字特性と言うよりは垂下特性に近いが、設定電圧または負荷電流が大きくなるにつれ改善され、設定電圧 55 V では綺麗なフの字特性を示した。最大電流と短絡電流の差が小さいのは、電源トランスに垂下特性を示すネオントランスを用いたためであり、普通のト

ランスを利用すると、最大電流は 55mA 程度、最大電流と短絡電流の比率は 2.5 程度になるものと推定される。

最大電流と短絡電流を整理してみると Fig.6 の様になる。ここで、白抜きが最大電流 I_{max} 、黒が短絡電流 I_s である。最大電流はフの字特性カーブの右端の電流、短絡電流は出力端子をショートしたときの電流として定義した。最大電流、短絡電流共に設定電圧を上げると増すが、いずれのコンデンサ容量でも設定電圧 6 kV 以上で強く飽和した。また、コンデンサの容量を増すと最大電流、短絡電流共にやや増大するが、コンデンサ容量による差は少ない。これは、 I_{max} 、 I_s はコンデンサ容量では無く、おおむね設定電圧によって決定されるからである。なお、図中小容量の場合、データが途中までしか記していないのはコンデンサの容量で出力電圧上限が制限されることによる。

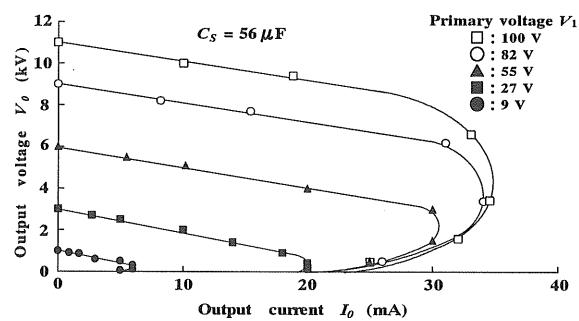


Fig.5 試作回路のV-I特性

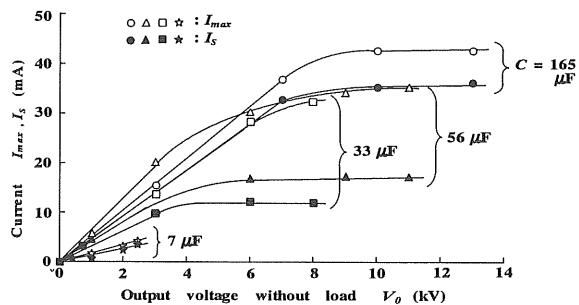


Fig.6 無負荷時設定電圧を変えたときの最大電流と短絡電流

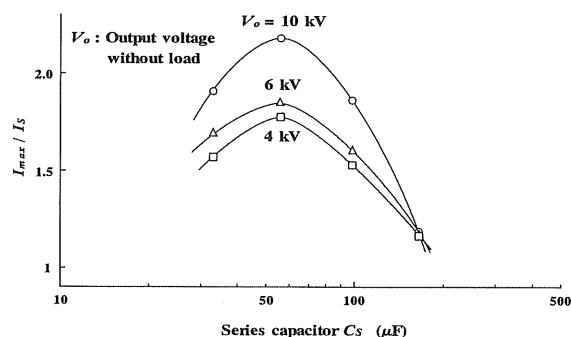


Fig.7 (I_{max} / I_s) の直列コンデンサ容量依存性

実際に放電管を駆動する場合は最大電流と短絡電流の差が大きい方が好ましい。 I_{max} と I_s の比率を求めてみると Fig.7 の様になり、試作回路では $C = 56 \mu F$ のとき最も良い特性を示した。

4. 放電管シマーハイブリッド回路への応用

4.1 新しいシマーハイブリッド回路の提案

以上述べたように試作回路はほぼ予想通りの特性を示すことが判ったが、ここで、レーザー用シマーハイブリッド回路への応用を試みることにした。先に述べた様に、放電管をグロー放電させるためには、最初高い電圧が、放電後は比較的低い電圧が要求され、様々なシマーハイブリッド回路が開発されている^{2,10,13,14)}。ただし、それらはほとんどDC点灯であり、ここで新たに脈流駆動を提案する。脈流駆動にする意味は、一旦平滑してしまうと高抵抗を挿入しないと平滑コンデンサのエネルギーでランプがフラッシュしてしまい、フの字特性回路を用いる意義が無くなってしまうからである。

Fig.8 に示すように、単純な脈流駆動では丸印のところで放電が停止する。それを防ぐためには、同図(b)に示す如く、DC的に嵩上げして放電が持続するようにすれば良い。このとき、ランプの動作点を $P(I_{op}, V_{op})$ とすると、Fig.2(b)およびFig.8(b)を参照して、

$$V_{max} = V_p + V_{DC} \geq V_{ign} \quad (3)$$

$$V_{min} = V_{DC} > V_g \quad (4)$$

$$V_{op} \doteq V_g \quad (5)$$

$$\left\{ P_{d(max)} / V_g \right\} > I_{op} \doteq I_g \geq I_{min} \quad (6)$$

となる様に設計すればよい。ここで、 V_{max} および V_{min} は出力電圧の最大値と最小値、 V_p は脈流分のピーク値、 V_{DC} は嵩上げ直流電圧、 V_{ign} はランプ点灯電圧、 V_{op} はランプ駆動電圧、 V_g はグロー維持電圧、 $P_{d(max)}$ はランプの最大許容入力、 I_{op} はランプ駆動電流、 I_g はグロー電流、 I_{min} はグロー維持に必要な最小電流値である。

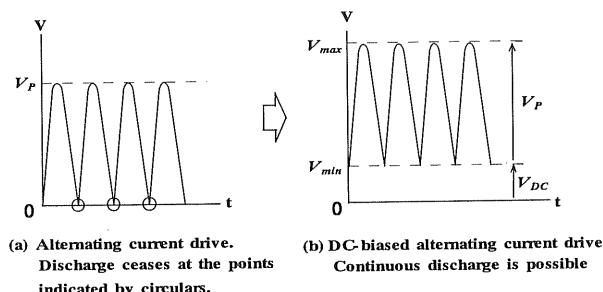


Fig.8 脈流駆動による持続グロー放電

4.2 回路の試作

Fig.9 に試作した脈流駆動シマーハイブリッド回路を示す。主放電回路としては放電管に EG&G 社の Xe フラッシュランプ FX45C-6 を用い、エネルギー蓄積コンデンサ ($C = 1.5 \mu F$, 8 kV) で S.G.S を介して駆動した。シマーハイブリッド回路には、先程のフの字特性トランジスタ回路出力をブリッジ整流し脈流出力を得て、これに別の半波整流DC出力を加えるようにした。なお、トランジスタ一次側の直列コンデンサは、レギュレーションをわざと低くするため、 $C = 36 \mu F$ と小さくした。

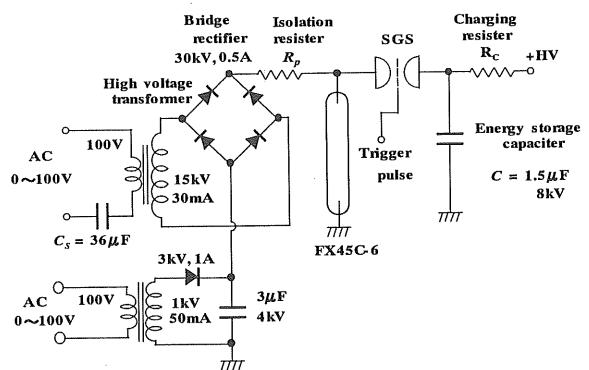


Fig.9 試作した脈流駆動シマーハイブリッド回路

図中には回路定数の一例を示してある。

4.3 回路の動作特性

Fig.10 はDCバイアスを変えたときのランプ電流の測定結果である。ランプ電流はアイソレーション抵抗 R_D 両端電圧の測定結果より実効値を求めた。ランプ電流はDCバイアス電圧で大きく変わり、DCバイアス電圧に対しほとんど直線的に増大する。電流設定可能範囲は 12 ~ 68 mA であった。

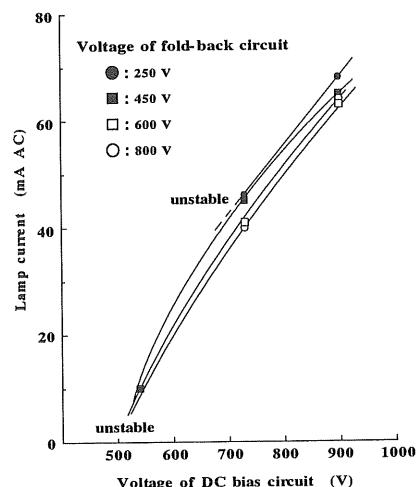


Fig.10 DCバイアス電圧を変えたときのランプ電流

Fig.11 はフの字特性回路電圧を変えたときのランプ電流である。ランプ電流はフの字回路電圧を変えてほとんど変わらない。回路が予想通りに働いているためである。

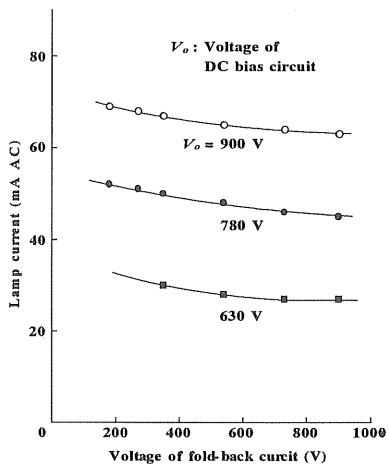


Fig.11 フの字特性回路電圧を変えたときのランプ電流

Fig.12 はフの字回路の出力波形と実際にランプを点灯したときの波形の比較を示すものである。同図(a)に示す如く、フの字回路出力は綺麗な正弦波であった。(b), (c) はランプを接続したときの出力波形であって、(b)の様に十分なDCバイアス電圧を掛けたときは、比較的綺麗な放電波形であるが、バイアスが十分でないときは(c)の様に電圧波形がスパイクを伴った波形で、電流波形もやや歪んだ脈流波形となった。ただし、後者の場合も電流は

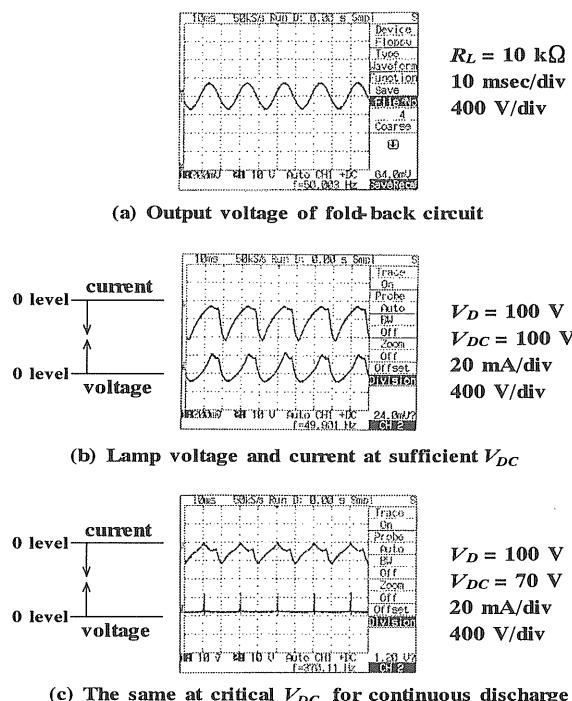


Fig.12 ランプ電圧波形とランプ電流波形

安定なので、シマーモードには支障無い。この様に本回路は放電安定用高耐圧大電力抵抗が不要で電力効率も高いのみならず、波形に鋭いスイッチング箇所がないことから高周波雑音が従来の点灯方式より大きく低減される特徴をも有している。

本方式でシマーモードを掛け、主放電を試みたところ、フラッシュ光強度の安定度は従来方式とほぼ同じであった。詳細は別の論文で報告する。

5. 性能評価と将来展望

Fig.13 に従来方式と本方式の動作状態比較を示す。従来方式では電力損失 P_{loss} は、

$$P_{loss} = I_g^2 \cdot R_s = I_g (V_o - V_g) \quad (7)$$

である。ここで、 I_g はグロー電流値、 R_s は放電安定抵抗の値、 V_o はシマーモード電源電圧、 V_g はグロー維持電圧である。また、低レギュレーションコッククロフト回路方式では、

$$P_{loss} = I_g \times (V'_o - V_g) = I_g \times (V_o/n - V_g) \quad (8)$$

となる。ただし、 V_o は放電前の電源電圧、 V'_o は放電開始後の電源電圧、 n はコッククロフト回路の段数である。従来方式との比率 r は次式で与えられる。

$$r = (V_o/n - V_g)/(V_o - V_g) \quad (9)$$

いま、 $n = 3$ 、 $V_o = 6 \text{ kV}$ 、 $V_g = 1 \text{ kV}$ とすると、 $r = 1/5$ と求まる。つまり、従来方式の $1/5$ の電力で済むことになる。

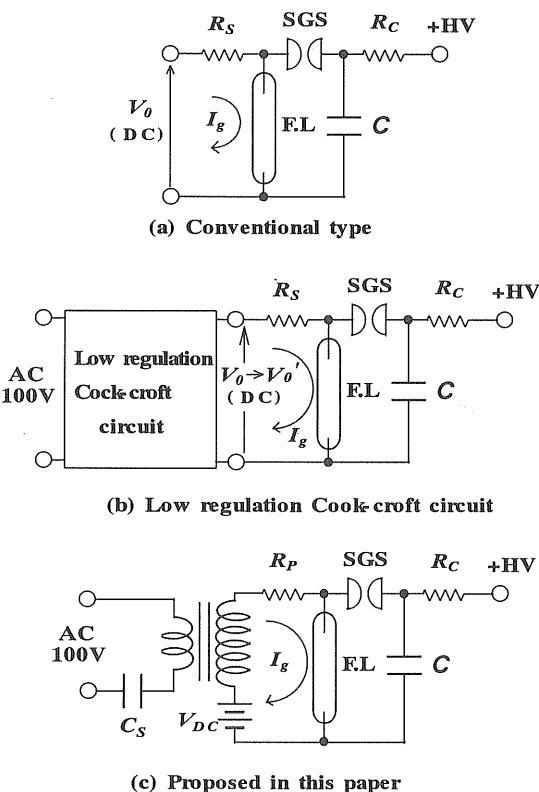


Fig.13 従来方式と本方式の比較

また、 $n = 5$ では $r = 1/25$ と、さらに小さくなる。

本方式では、電力損失 P_{loss} は次式で与えられる。

$$P_{loss} = I_g^2 \cdot R_p \quad (10)$$

ここで、 R_p は主放電回路とのアイソレーション抵抗であり、放電安定抵抗 R_s より遙かに低く設定できる。つまり、

$$R_p \gg R_s \text{ (ランプのアーカー抵抗)} \quad (11)$$

とすればよい。従来方式との比率 r は、

$$r = (I_g^2 \cdot R_s) / (I_g^2 \cdot R_p) = R_s / R_p \quad (12)$$

となる。いま、 $R_s = 250 \text{ k}\Omega$ 、 $R_p = 1 \text{ k}\Omega$ とすれば、 $r = 1/250$ と求まり、従来方式のわずか 1/250 で済み、極めて省エネルギーであることが判る。これらの関係を表にして Table 1 に示しておく。

また、電力効率が高いのみならず、本方式は以下のようない点がある。

- 1) フの字トランス回路としての特徴としては、
 - ①非常に簡単にフの字特性 AC 回路を実現できる。
- 2) シマーハ放電回路としての特徴としては、
 - ①電流制限素子がリアクタンスのため、電力損が少なく、高効率
 - ②高耐圧の大電力抵抗および平滑コンデンサが不要
 - ③回路が簡単で、コンパクト、安価
 - ④高周波ノイズの発生が少ない
 - ⑤操作が容易。

欠点としては、

- 1) DC 駆動より回路がやや複雑。
- 2) 脈流放電のためシマーハの安定度がやや落ちる。

本回路は、将来的には以下のような応用が考えられる。

- 1) フの字特性トランス回路
 - ①グロー放電駆動回路 (蛍光灯など)
 - ②アーカー放電予備電離回路
- 2) DC バイアスしたフの字回路
 - ①レーザーのシマーハ回路
 - ②気体レーザーの駆動回路
 - ③ノイズレス放電管点灯回路 (蛍光灯、ネオンサインなど)

Tabel 1 試作装置の性能評価

	消費電力 P_{loss}	改善率 r	消費電力 数値例
従来方式	$I_g \cdot (V_i - V_g)$	1.0	100 W $r = 1.0$
コッククロフト回路	$I_g \cdot (V_i/n - V_g)$	$\frac{(V_i/n) - V_g}{V_i - V_g}$	4 W $r = 1/25$
本方式	$I_g^2 \cdot R_p$	R_p/R_s	0.4 W $r = 1/250$

6. 結論

本報告では自動点灯可能で、しかも高効率なシマーハ回路を実現するため、フの字特性トランス回路を考案し、それに DC バイアスを加えた新しいシマーハ回路を提案した。AC フの字回路はトランスの一次側に直列にコンデンサを入れることにより実現した。シマーハ回路への応用としては、フの字特性トランス回路に直列に DC バイアスを加えることにより脈流点灯を初めて実現した。この場合、直列コンデンサは二次側で高抵抗として働き、放電安定抵抗が不要となり、電流制限素子がリアクタンスなので電力損失を極めて小さくできる。

本研究で提案した新しいフの字特性トランス回路は様々なグロー放電回路は勿論、将来的には蛍光灯ノイズレス点灯回路など、広く応用可能と考える。

本研究は、執筆者の一人（ディリムラット・ウプルジヤン）が八戸工業大学の客員研究員として招聘されたときに行われたものであり、留学の機会を与えてくれた新疆大学書記王桐先生、学長アニワール・アムト先生、また八戸工業大学学長高橋燐吉先生を始めとする関係各位に深く感謝するものである。

参考文献

- 1) EG&G 社 Xe 放電管カタログ
- 2) 十文字正憲、葛西清和、増田陽一郎：光学, 12 (1983) 206
- 3) 十文字正憲、内山晴夫：レーザー研究, 14 (1986) 128
- 4) 十文字正憲、長峰信雄、内山晴夫：レーザー研究, 17 (1989) 346
- 5) 十文字正憲、内山晴夫：レーザー研究, 17 (1989) 405
- 6) 十文字正憲、長峰信雄、内山晴夫：レーザー研究, 22 (1994) 762
- 7) 十文字正憲、長峰信雄、内山晴夫：レーザー研究, 23 (1995) 288
- 8) 十文字正憲、内山晴夫：レーザー研究, 23 (1995) 1113
- 9) M.Jyumonji and H.Uchiyama : Opt. Rev., 3 (1996) 221
- 10) 山村暁宏、鹿野哲生、内山晴夫、十文字正憲：レーザー研究, 29 (2001) 457
- 11) M.H.Ornstein and V.E.Derr : Appl. Opt., 13 (1974) 2100
- 12) D.Upurujian, 渡部順和、山村暁宏、十文字正憲：平成 13 年度電気関係学会北海道支部連合大会学術講演会講演予稿集, 7aB9, 応用物理学会 (2001)
- 13) 山村暁宏、鹿野哲生、内山晴夫、十文字正憲：レーザー研究, 28 (2000) 50
- 14) 山村暁宏、十文字正憲：電気学会論文誌 C, 121-C (2001) 1790