100 kHz 以上の高周波による HID ランプの点灯

専門会員 中西 宣一郎* 正会員 井上 准一** 小松原 均*
専門会員 姫井 豊治*

High Frequency Operation of HID Lamps Beyond 100 kHz

Sen-ichiro Nakanishi (Fellow Member)

(Faculty of Engineering, Okayama University)

Junichi Inoue (Member)

(Faculty of Education, Okayama University)

Hitoshi Komatsubara and Toyoji Himei (Fellow Member)

(Faculty of Engineering, Okayama University)

ABSTRACT

The ballasts for discharge lamp are desirable to be small size, light weight and energy saving type for general illumination. In addition, the continuous dimming also will meet a demand of suitable illumination. For the purpose, the ballasts of high frequency operation and also the dimming control of fluorescent lamps have been already developed and been practically used. But the practical high frequency operation of HID lamps for general use has not been virtually realized mainly due to the unstable operation of acoustic resonance phenomenon and the difficulty of noise suppression although HID lamps have been used for many field in favor of high efficacy.

The authors have resolved the former problem selecting an operating frequency beyond 100 kHz and then experimentally examined the high frequency operation and its dimming control of HID lamps, for the latter problem presupposing that the conductive glass or plastics, for example, might be adapted for the shield of electromagnetic waves in the future.

This paper describes the circuit configuration consisted of HID lamps, here mainly high pressure sodium lamp and MOS-FET push-pull inverter, and experimental results on high frequency operation from 100 kHz to about 400 kHz and its continuous dimming control over the range from 100 percent to about a few percent.

1. ま え が き

半導体電力変換技術の進展に伴い、一般用途の放電ランプは高周波点灯の研究が盛んに行なわれ、蛍光ランプは 30~50 kHz の高周波点灯回路が開発・実用化されている。また、500 kHz の点灯回路も発表されている¹⁾。しかし、高効率、高照度などの特徴を持つ High Intensity Discharge ランプ（高輝度放電ランプ、以下、HID ランプと略す）の一般用途の高周波点灯は、現時点では実用化されていない。その技術的な理由としては、

(1) 容量数 100 W の HID ランプは、点灯周波数が数 kHz から約 100 kHz の範囲でいわゆる音響的共鳴現象が現われ、ランプの点灯状態が不安定となる²⁾。

(2) 高周波点灯時におけるノイズ抑制が困難である。

(3) HID ランプの効率は、点灯周波数を上げてても蛍光ランプのように向上しないため³⁾、総合効率 (lm/W) の観点から蛍光ランプの場合ほどのメリットは期待できない。

などが考えられる。(1)の問題点に関しては 30~50 kHz の点灯周波数において周波数変調、第三次高調波を重畳するなどにより解決する方法が提案されているが、回路がやや複雑となる。音響的共鳴現象を避けた 100 kHz 以上の周波数で点灯すれば良いが、現在の蛍光ランプ点灯回路に使用されているバイポーラ形トランジスタはスイッチング損失上、100 kHz 以上の高周波動作に向いていない。(2)に関して、回路ではたとえば部品の配置、シールド、フィルタなどの方法により、また、ランプ側では導電性ガラスなどの利用により将来解決できるものと考えられる。(3)に関しては総合効率は同じとしても、高周波点灯によるフリッカの少ない光出力、安定器の小型軽量などのメリットが期待できる。

そこで筆者らは、100 kHz 以上の高周波でも効率良く動作できるパワー metal-oxide semiconductor 形 field-effect transistor (以下、MOS 形 FET と略す) を用いたプッシュプルインバー

* 岡山大学工学部、

** 岡山大学教育学部

この論文の一部は、昭和60年照明学会全国大会、昭和59年電気四学会中国支部連合大会、昭和60年照明学会全国大会にて発表済みである。

タで点灯回路を構成し、平滑直流電源より音響的共鳴現象を避けた 100 kHz 以上の高周波電流を供給することによって、HID ランプの点灯を試みた。その結果、インバータの動作が可能な 100 kHz から約 400 kHz の周波数範囲で、HID ランプを安定に点灯することができた^{3)~5)}。本文では今後の使用拡大が期待され、高周波点灯時の特性が、他の HID ランプに比べて比較的均一な高圧ナトリウムランプの点灯を中心に述べる。また電源電圧あるいは点灯周波数を変えることにより、光出力を定格の 100 % から数 % の範囲で連続的かつ商用周波数点灯時のそれに比べて容易に変化させることができたのであわせて報告する。

2. 100 kHz 以上の HID ランプ用高周波点灯・調光回路

2.1 FET インバータ回路

図 1 に HID ランプを高周波点灯・調光する MOS 形 FET を用いたブツェブルインバータの主回路を示す。今回の実験では電源として直流安定化電源装置を用いた。回路の形式上、負荷から電源に電流を帰還する場合もあるが、電源装置は電流を回生することができないので、キャパシタ C_5 を挿入してその電流を処理した。 R_{10} 、 C_6 は FET のオン・オフスイッチ時に生ずる高周波振動を除去するフィルタである。変圧器の鉄心はフェライトコアを用いた。なお調光することを考慮して二次開放電圧は比較的大きな値にした。点線で示している C_7 は高圧ナトリウムランプ用の始動器で、点灯後はスイッチ S を開き切り離れた。

図 1 HID ランプの高周波点灯回路

なお、MOS 形 FET は次のような特徴を持っている。

- (1) 小数キャリアによる蓄積効果がなく高速化が可能であり、スイッチング損失が小さい。
- (2) 負の温度係数を持ち、二次破壊が起り難く破壊に強い。
- (3) 入力が比較的高インピーダンスで電圧ドライブが可能であり、入力電力損失が小さい。
- (4) オン状態の電圧降下は、パワートランジスタのそれに比べて少し大きい。
- (5) 素子が浮遊容量を持つためゲートに加えるオン・オフ信号をそれに対応さすよう若干の注意を要する。

本実験で用いた FET の制御回路を図 2 (a), (b) に示す。同図(a)は発振回路で、 IC_1 において基準発振を行ない、その発振パルスを IC_2 においてパルス幅変調し、 IC_3 において二相分割を行ない、 IC_4 から増幅回路へ出力する。(b)は増幅ならびに FET の入力容量の電荷を放電する回路であり、発振回路からの入力を Tr_1 と Tr_2 で増幅し、絶縁と電圧マッチングを兼ねたパルス変換器を介して FET のゲートに加える。また Tr_3 は FET のターンオフ時にフライバック電圧によりオンして、FET の入力容量の電荷を急速に放電させる。これにより FET のターンオフ時間を短くして、スイッチ損失を小さくすることができる。

図 2 FET 駆動回路
(a) 発振回路, (b) 増幅制御回路

2.2 HID ランプの点灯、調光動作

上記 FET インバータで、HID ランプを周波数 100 kHz で点灯したときの波形を図 3 に示す。同図(a)は FET のドレイン・ソース間電圧 v_d 、電流波形 i_d である。電圧は FET のオフ直後に高周波振動を発生しているが、適切なスナバ回路を挿入することにより抑制できるものと考えられる。調光を考慮してインダクタンス L を大きくしたため、電流は三角波となり、FET 導通後短時間の間は負の値を示している。同図(b), (c)は水銀ランプとメタルハライドランプの電圧 v_l 、電流波形 i_l である。両者ランプの波形は若干異なるがそれぞれ再点弧現象も無く、電圧-電流波形はいずれもほぼ相似の波形となり、ランプは一定抵抗と見なすことができる。

図 3 100 kHz の点灯動作波形
(a) FET のドレイン・ソース電圧-電流波形、
(b) 水銀ランプの電圧-電流波形、(c) メタルハライドランプの電圧-電流波形

図 4 は回路定数を一定として、周波数だけを約 100 kHz から約 400 kHz まで変えた場合の高圧ナトリウムランプの調光特性

図4 周波数変化による高圧ナトリウムランプの調光

を示したものである。これより光出力は100%から約5%まで連続的に変化できることがわかる。

3. HID ランプの高周波点灯諸特性

上記FETインバータにより、HIDランプを高周波点灯したときの特性を述べる。まず使用計器、測定方法の説明をしておく。ランプ電圧の実効値はウェーブメモリに取り込んだ波形から計算により求めた。ランプ電流は熱電対形電流計*で測定した。ランプ電力は、波形からランプの力率を1と仮定して、電圧実効値と電流測定値の積から求めた。ランプの光出力は、ランプを暗箱に入れ周波数60Hz、定格電力で点灯したときの照度を小さな窓から測定しそれを基準とし、高周波点灯時の測定照度との比から光束比として求めた。

3.1 高圧ナトリウムランプ

3.1.1 点灯波形

高圧ナトリウムランプ点灯時の電圧-電流波形を図5に示す。点灯周波数100kHzでは両者相似であるが、350kHzになると電圧波形にひずみが見られる。

図5 高圧ナトリウムランプの電圧-電流波形
(a) 100 kHz (b) 350 kHz

図6 高圧ナトリウムランプの点灯時 $v-i$ リサージュ図
 v_1 : 200 V/div., i_1 : 2 A/div.
(a) 60 kHz (b) 100 kHz

* 横河電機製 高周波電流計 Type 2016, 周波数特性 DC, 10 Hz~1 MHz で $\pm 1\%$ 誤差。

図6は高圧ナトリウムランプの電圧電流のリサージュ図であり、従来安定器で周波数60Hzで点灯した場合と、FETインバータにより100kHzで点灯した場合とを比較して示したものである。60Hzの場合はリサージュは脹らみを持ち、電流の小さい部分で電圧がピーク値を示し、再点弧電圧が掛かっていることがわかる。これに対し100kHzの場合は、ほとんど直線的で再点弧電圧も見あらず一定抵抗の特性を呈している。

3.1.2 ランプの効率

図7は、インバータ回路の周波数だけを変えた場合の高圧ナトリウムランプの効率 (lm/W) を示したものである。周波数の増加とともに効率はかなり低下しているが、これは周波数とともに ωL が変わり、ランプ入力電力も変化したためであると考えられる。

図7 周波数制御時の高圧ナトリウムランプの効率 (lm/W , 相対値)

3.1.3 その他の特性

本回路による高圧ナトリウムランプ NH 110 の点灯実験では、音響的共鳴現象は見あたらなかった。音響的共鳴現象を避けた100kHz以上の周波数のためであると考えられる。

ここでは、低電圧始動形ではなく普通の高圧ナトリウムランプを用いて実験をしたため始動時に高電圧を必要とした。そこで2節で述べたようにキャパシタ C を挿入して、 LC 共振により高電圧を発生してランプを始動し、ランプ点灯後は C を切り離した。始動電圧の低い高圧ナトリウムランプを使用すれば、この C は不要となるであろう。

なお、ランプが始動を開始して安定な光出力になるまでの始動時間は、高周波点灯時と商用周波数点灯の場合とも同程度であった。

3.2 その他のランプ

高圧ナトリウムランプ以外の HID ランプ、すなわち水銀ランプとメタルハライドランプについても、本回路により高周波点灯実験を行なった。水銀ランプ点灯時の電気的特性は高圧ナトリウムランプと同様の特性を示し、また音響的共鳴現象も見あたらなかった。

次にメタルハライドランプは、周波数変化時にランプの電圧特性がユニークな特性を示した。それを図8に示す。点灯周波数 f を増加するとランプ電流は一樣に減少する。これに対し、ランプ電圧は当初は減少するが、300kHz以上の周波数で再び増加する。電力の変化もこの電圧の影響が現われている。ランプの電圧-電流波形を観測してみると、100kHzでは電圧電流ともほぼ同じ波形であるが、350kHzでは両者の波形が異なっていた。特に電圧波形にひずみが現われており、この結果、電圧上昇が起こるものと考えられる。またメタルハライドランプは、入力電力を絞

図 8 周波数変化時のメタルハライドランプの電圧、電流、電力特性

ると光の色が若干青みを帯びた。しかし蛍光塗料を塗布したランプのため、その程度は比較的軽かった。また音響的共鳴現象も他のランプ同様起こらなかった。

4. HID ランプの高周波調光、制御特性

4.1 調光制御方式

MOS 形 FET インバータにより、HID ランプを調光する方式としては、電源電圧制御方式と周波数制御方式が考えられる。

図 9 電源電圧制御時の高圧ナトリウムランプの電源電流に対する調光特性

図 9 は、電源電圧制御方式により高圧ナトリウムランプ NH 110 を調光したときの電源電流に対する光出力特性で、光出力は定格 100% から約 5% の間で変化している。ここに測定は十分な時間を掛けて行ない、各測定点で光出力が定常になった後に計測した。なお同図において光出力 100% のとき電源電圧は 95 V、光束最低の 5% のとき 45 V であった。電源電圧が 95 V から約 60 V 範の範囲内では電圧を急速に変化してもランプは立ち消えを起こさなかったが、それ以下の電圧では、急速な電圧変化に対してランプは不安定な点灯状態と成り、しばしば立ち消えを起こした。なお周波数制御方式による調光時での光出力特性は図 4 に示している。この方式では、急速な周波数変化をして調光しても立ち消えは起こらなかった。

図 10 (a) は、電源電圧制御方式での電源電流に対するランプ電圧実効値、電流実効値、電力特性である。調光に伴い各特性は減少傾向にある。同図 (b) は周波数制御時の高圧ナトリウムランプ電圧実効値、電流実効値、電力特性である。これより周波数の増加とともに、ランプ電流、電力はほぼ滑らかに減少しているが、ランプ電圧は 300 kHz 以上で増加する傾向を示している。これはランプ、点灯回路などの周波数特性によるものと考えられる。なお、水銀ランプ、メタルハライドランプの調光結果も高圧ナトリウムランプとはほぼ同様の傾向を示した。

周波数変化による調光方式は、電圧制御の調光方式に比べてよ

図 10 制御時の高圧ナトリウムランプの電気的特性
(a) 電源電圧制御方式 (b) 周波数制御方式

り安定な点灯特性を得ることができた。この方式では電源電圧が一定であるためランプの再点弧電圧が確保されると同時に、周波数を上げるとインピーダンス ωL が増加して、バラスト作用が大きくなるためであると考えられる。

4.2 制御範囲

電源電圧を制御したときの電源電流に対する高圧ナトリウムランプの効率を図 11 に示す。なお、この効率は商用周波数の点灯時の効率を 1 とした相対値で示している。光束の制御範囲は 100% から 5% とかなり広い。ただしこの図よりランプは電流 1.8 A の付近で効率が良いが（このときランプ入力定格の 110 W）、電源電圧が低く、電源電流の小さな範囲では効率が悪くなることを示している。これは減光時に管内の圧力温度が低くなるためと考えられ、省エネルギーの観点からすれば調光も有意義であるが、ランプ効率の観点からは、ランプの定格付近で使用するほうが望ましい。周波数を制御したときも同様である（図 7 参照）。

図 11 電源電圧制御時の高圧ナトリウムランプの効率 (lm/W, 相対値)

4.3 調光時の時間応答とランプ電圧 - 電流特性

HID ランプの動作は陽光柱の温度圧力に依存しているため、調光制御するとき光束の変化に時間遅れが伴う。図 12 はその実験結果である。

図 12 調光時における高圧ナトリウムランプ
光束の時間応答結果
(a) 減光時 (b) 増光時

高圧ナトリウムランプを 100 kHz で定格の光出力になるよう点灯し、その状態から点灯周波数を 200 kHz, 300 kHz へと急変した場合の光束の変化特性を同図 (a) に示す。いずれの場合も周波数を増加した直後は光束は約 50% まで急速に低下し、その後徐々に減少して約 120 sec で定常状態に成っている。これは周波数とともにインピーダンス ωL が増加し、ランプ電力が押さえられて光束は低下するが、ランプの管内圧力温度は急変することができず、定常に達するまでに数分を要するものと考えられる。同図 (b) は、逆に各周波数から 100 kHz へ変化して増光した場合の特性である。この場合は約 300 sec で定常になっており、減光時に比べて安定までの時間が減光時のそれに比べて若干長く掛かっている。

図 13 (a), (b) は周波数と電源電圧を変化してランプを減光した後の、ランプ電圧 - 電流波形の時間的変化を示したオシログラム写真である。減光直後、電流のピーク値は小さくなり、電圧は大きくなっている。これは放電ランプの負の $V-I$ 特性により電流が減少して電圧が増加したためと考えられる。その後、ランプ電圧は時間とともにしだいに小さくなり、電流は大きくなって数分後に定常となっている。電流が減少するとランプ電力は小さくなるため、熱平衡が崩れて管内の温度圧力はしだいに低下する。そして入力電力に平衡した温度となったとき圧力も安定となり、電圧、電流、光束も安定点に至るものと考えられる⁶⁾。このような電圧の一時的な上昇があるため、調光する場合は十分な電源電圧とバラストの大きさがなければ、ランプは立ち消えを起こすことがあると考えられる。

5. あとがき

以上、MOS 形 FET インバータを用いた安定器により HID ランプを 100 kHz から約 400 kHz の高周波で音響的共鳴現象もなく安定に点灯することができた。また、電源電圧あるいは周波数を変化することにより、光出力を定格の 100% から数% の範囲で連続的にかつスムーズに調整することができた。もちろん、実用

図 13 調光時における高圧ナトリウムランプ
電圧 - 電流波形の時間応答
 v_1 : 200 V/div., i_1 : 2 A/div., 時間
(横軸): 2 μ sec/div
(a) 周波数変化時 (b) 電源電圧変化時

化に際してはコスト、ノイズなど、多くの問題が残されているが、本文が今後、発展の期待される HID ランプ高周波点灯のための出発点となれば幸いである。なお本研究は昭和 59 年度文部省科学研究費を受けた。関係各位に深謝する。また実験やデータ整理に協力してもらった本学卒業生の篠崎 (現豊田自動織機製作所)、竹田 (現東芝電材)、東山 (現シャープ) の諸君に感謝する。

参考文献

- (1) Lutteke, G., Raetes, H. C.: "220 V Mains 500 kHz Class-E Converter using A Bimos" PESC '85 Record (16th Annual IEEE Power Electronics Specialists conference) (1985) 127
- (2) 越村, 青池, 小林, 野村: HID ランプの高周波点灯における放電安定化方法, 照学誌 67 (昭 58) 55
- (3) 中西, 篠崎, 小松原, 姫井: パワー MOS 形 FET インバータによる HID ランプの高周波点灯実験について, 昭 59 照学全大 50 (昭 59)
- (4) 姫井, 中西, 小松原, 竹田, 東山: HID ランプの高周波点灯実験 (M ランプ, NH ランプの場合), 昭 59 電気四学会中国支部連大 100615
- (5) 姫井, 中西, 小松原, 竹田, 東山: HID ランプの高周波点灯・調光時発光効率について, 昭 60 照学全大 35 (昭 60)
- (6) 姫井, 中西, 小松原, 上原: 補助変圧器を用いたサイリスタ HID 式ランプ用連続調光回路, 照学誌 67 (昭 58) 235 (受付 1985 年 9 月 10 日)