

自動車用 HID 式ヘッドライト点灯装置

Ballasts for HID Headlamp Systems for Automobiles

塩見 務* ・ 神原 隆* ・ 永瀬 春男** ・ 木戸 正二郎**
Tsutomu Shiomi Takashi Kambara Haruo Nagase Shojiro Kido

自動車のヘッドライト用光源にHIDランプが用いられ始めた。HIDランプを用いることによってヘッドライトの光量を大幅に増加できるので、自動車の運転者の視認性が向上し、夜間の交通事故の減少に貢献できるからである。筆者らは、店舗用などの一般照明分野で培ったHIDランプの電子点灯回路技術を基本として、自動車用HID式ヘッドライト点灯装置を開発した。HIDランプを安定に点灯する電子点灯回路の技術開発に加えて、ヘッドライト用HIDランプ固有の課題を克服する技術開発を進めて、ヘッドライト点灯装置を実現することができた。

本稿では、この点灯装置に用いた低周波矩形波点灯インバータ回路、光束立上げ促進制御法および瞬時再始動イグナイタ回路について述べ、これらの技術により開発した点灯装置の概要を紹介する。

HID lamps are increasingly being utilized in automotive headlamp systems. The benefit of HID headlamp systems is increased driver visibility leading to a decrease of night-time traffic accidents. This is because HID lamps have greater light output than conventional halogen bulbs. We are well placed to investigate electronic ballasts for HID headlamp systems for automobiles since the new technology which satisfies the requirements of HID headlamp systems has already been developed by us: namely, HID electronic ballasts for general lighting apparatus.

In this paper, the proposed technologies relating to the square-wave inverter, the start-up control, and the hot re-strike igniter are described. The features of the developed electronic ballast for HID headlamp systems are also described.

1. ま え が き

夜間に発生する交通事故を低減するための対策の一つとして、自動車の運転者の視認性向上があげられる。この有力な手段として、自動車のヘッドライト用光源に、高輝度放電灯 (High Intensity Discharge Lamp: 以下、HIDランプと記す) が最近用いられ始めた。これはHIDランプを採用すると、従来のハロゲン電球に比べて少ない電力で多くの光量が得られるので、路面や障害物などを一層見やすくすることができるためである。

しかしHIDランプを点灯させるためには従来のヘッドライトにはなかった点灯装置が必要になる。

筆者らは、店舗用などの一般照明用HIDランプで培ってきた電子点灯装置技術を基本として、自動車のヘッドライトに特有な条件を満たすための新回路技術を検討し、自動車用HIDヘッドライト点灯装置 (Head Light Ballast: 以下

HLBと記す)を開発したので、その技術の概要を述べる。

2. 点灯装置の課題

2.1 HIDランプ

HIDランプは、高効率で大光束が得られることから、競技場・商業施設・道路などの一般照明用途に広く用いられている。とくに近年は、HIDランプの小型化技術が発展し、コンパクトなHIDランプも実用化されるようになり、HIDランプの公称電力は数10W～数kWの広い範囲を網羅している。また、HIDランプには、メタルハライドランプや高圧ナトリウムランプなどの種類があるが、最近ではメタルハライドランプで演色性の高いものが数多く実用化されている。

今回、ヘッドライトに用いるHIDランプは、これらの小型化・高演色化技術が適用された35Wの高演色メタルハライドランプであり、欧州統一規格ECEレギュレーション

* 照明分社 照明R&Dセンター Lighting Products Research & Development Center, Lighting Company

** 照明分社 照明新事業推進部 New Business Promotion Div., Lighting Company

ン99で規格化されたものである（以下、この規格に記載されたカテゴリー名称から、このHIDランプを「D2バルブ」と記す）。D2バルブの主な仕様は表1のとおりである。

比較のため、自動車用ハロゲン電球の例として型式名称H1バルブの仕様を併記した。D2バルブは、従来のハロゲン電球に比べて少ない電力で多くの光量を発生することがわかる。

表1 ヘッドライト用光源の比較

	HIDランプ D2バルブ (D2S-35)	ハロゲンランプ H1バルブ
ランプ電力	35 W	55 W
全光束	3200 lm	15501 lm
色温度	4500 K	3200 K
寿命	2000時間	300時間

ところで、HIDランプには次のような弱点があることが知られている。

- (1) 点灯してから所定の発光量に到達するまでに、数分から数10分の時間がかかる
- (2) 一度消灯すると、再度点灯させるために数分から数10分間待たなければならない

弱点の(1)は、HIDランプの発光が金属蒸気発光によるものであり、所定の光量を得るには発光管内の温度と圧力が規定値まで上昇する必要があるためである。弱点の(2)については、発光管内の温度と圧力が高い状態では、放電を開始するための絶縁破壊電圧が上昇していることによる。これらのHIDランプの弱点は、当然のことながらD2バルブにも当てはまり、自動車のヘッドライトに用いるために克服しなければならない重要な技術課題である。

2.2 点灯方式

D2バルブの定格ランプ電圧は85 Vである。一般に放電灯の放電を維持するためには、ランプ電圧よりも高い電源電圧が必要である。しかし、自動車の電源は普通12 V程度（大型車では24 V）であるので、点灯装置には昇圧作用をもつ電子回路が必須となる。

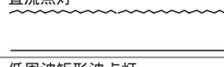
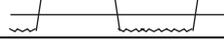
電子回路を用いたHIDランプの点灯装置には、HIDランプに印加する電圧波形によって、以下の点灯方式が実用化されている。

- 正弦波の高周波点灯方式
- 直流点灯方式
- 低周波矩形波点灯方式

表2に、それぞれの点灯方式の概要と特質を示す。

蛍光灯のインバータ照明で用いられるような数10 kHzの周波数領域でHIDランプを高周波点灯させると、音響的共鳴現象が発生し、ちらつき・立消え・ランプ破損などの不具合を生じる可能性がある¹⁾。このため、HIDランプを高周波点灯する場合は、音響的共鳴現象が発生しない数

表2 HIDランプ点灯方式の比較

点灯方式	回路規模	音響的共鳴現象の回避	汎用性
高周波点灯 	○	△	△
直流点灯 	○	○	×
低周波矩形波点灯 	△	○	○

100 kHzから数 MHzの周波数領域を用いることになるが、回路効率が低くなることや不要電磁輻射雑音が増加することなどの不具合を生じる恐れがある。また数10 kHzの周波数領域での高周波点灯で、周波数変調を施して音響的共鳴現象を回避する試みなどがなされているが、HIDランプの経年変化や仕様変更により音響的共鳴現象の発生周波数が変動した場合に対応することが困難である。

直流点灯方式は、HIDランプ内の一対の対向電極のうち一方が陽極、他方が陰極に固定されるため、これに合わせた電極の設計が必要であり、一部の用途で実用化されているが、汎用的な方式ではない。

低周波矩形波点灯方式は、点灯周波数が数100 Hzと低いため、基本的には音響的共鳴現象が発生することがない。また当然ながら、対向電極の双方が交互に陽極と陰極の役割をもつので、特殊な電極構造も必要ない。すなわち、電子点灯装置でのHIDランプの点灯方式としては、低周波矩形波点灯方式が最も有効であり、筆者らはすでに一般照明用としてHIDランプ用電子点灯装置をこの点灯方式で実用化してきた。

以上の観点から、HLBは低電圧直流電源に適した低周波矩形波点灯方式が最適である。

また、前述のECEレギュレーション99によれば、安定時の光束を100%として、始動後1秒で25%、4秒で80%の光量を得る必要がある。このために、D2バルブの始動直後からの一定期間には定格点灯時よりもランプ電流およびランプ電力を大幅に増やす必要がある。これは一般照明用の点灯装置にはないHLB独自の技術課題である。

2.3 始動方式

HIDランプを点灯させるためには、電極間に高電圧を印加して絶縁破壊をさせて放電を開始する必要がある。このために高電圧のパルスが発生する装置（イグナイタ）が必要となる。

一般照明で用いられるイグナイタは、2~5 kV程度のパルス電圧を発生してHIDランプを始動させる。しかし、このパルス電圧では前述のように、HIDランプを再始動させるためには相当の待ち時間が必要である。ところで、HIDランプを瞬時に再始動する方法として、HIDランプに印加するパルス電圧を数10 kVまで高める方法が知られている²⁾。

このことから、HLBとしても数10 kVのパルス電圧を発生できるイグナイタを採用することにした。

2.4 点灯装置への要求事項

以上のことから、HLBは図1のようにD2バルブを始動させるイグナイタ部とD2バルブに電力を供給するインバータ部で構成される。

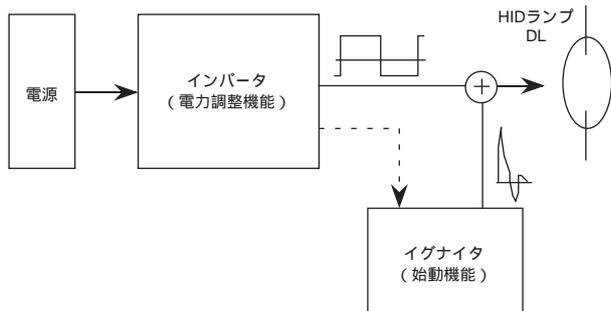


図1 点灯装置の構成

点灯回路に求められる要件は次のとおりである。

- 低電圧直流電源（12 V）で動作可能であること
- 低周波矩形波点灯方式であること
- 光量安定までの時間が短いこと
- 瞬時再始動が可能であること

これらに加えて、自動車特有の環境条件や要求信頼性に適合するように設計する必要があるが、本稿では上記の4点について以下に詳述する。

3. インバータ部の設計

3.1 インバータ回路方式の選定

低周波矩形波インバータ回路は、図2に示すように、直流電源からHIDランプに供給する電力を調整する電力調整回路BLSと電力を低周波矩形波電圧・電流に変換する直流-矩形波変換回路SQRおよびこれらを制御する制御回路CTRで構成される。

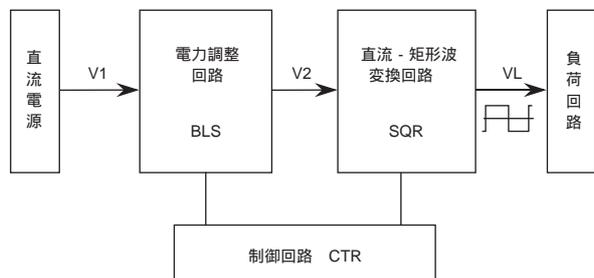


図2 インバータ回路の構成

一般照明の分野で実用化されている最も典型的なインバータ回路を図3に示す。BLSを降圧チョッパ回路で構成し、SQRを四つのスイッチで構成したフルブリッジ回路で構成している。この回路は、BLSで高周波開閉するスイッ

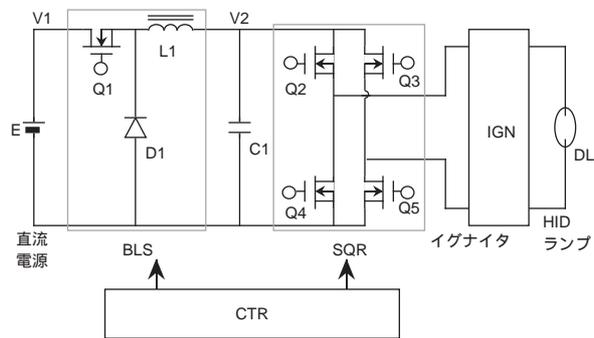


図3 HIDランプ矩形波点灯回路の例

チング素子Q1のスイッチング周波数やON状態の時間比率（以下、デューティと記す）を調整することにより、直流電源Eの電圧V1から負荷であるHIDランプDLの点灯に必要な直流電圧V2に変換し、SQRではQ2、Q5がONでQ3、Q4がOFFの状態と、Q2、Q5がOFFでQ3、Q4がONの状態とを数100 Hzで切り替えることにより、DLに低周波矩形波電圧を供給する。ここで、一般照明のDLは定常点灯時に必要なV2が約100 VであるのでV1は250～300 V程度に選択される。この他にも一般照明用の回路としては、BLSとSQRの回路の一部を共用させて部品数を削減した回路³⁾⁴⁾や、BLSに高周波共振回路を用いて整流した後に矩形波に変換する方法など、いくつかの回路方式がある⁵⁾。

しかし、上記の方式はV1がV2より高い場合において有効であるので、今回のようにV1が12 V程度でV2が85 VのD2バルブを点灯する回路としては使えない。そこで、今回はBLSにフライバック回路を用いてインバータ回路を構成した。その回路構成を図4に示す。

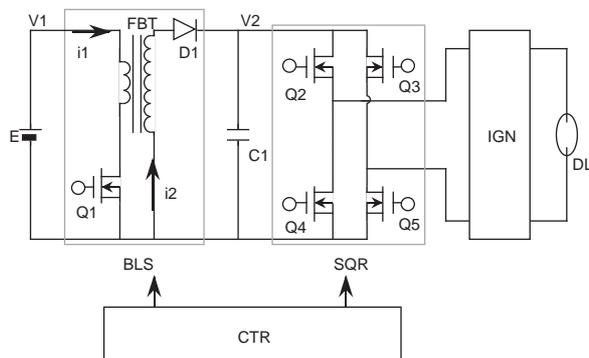


図4 フライバック回路を用いた点灯回路

フライバック回路の動作は、Q1がONすることにより、EからトランスFBTの1次巻線に電流*i*₁を流し、Q1がOFFすると、FBTに蓄積されたエネルギーを、FBTの2次巻線からの電流*i*₂として、ダイオードD1を介してコンデンサC1およびC1に並列な負荷回路に供給する。*i*₁と*i*₂の状態の違いによって、三つの動作モードがある。表2にそれぞれの動作モードを記す。

表3において、時間 t が0から t_1 までの期間はQ1がONであり、 t が t_1 から t_2 までの期間はQ1がOFFである。

表3 フライバック回路の動作モード

動作モード	トランスの1次, 2次電流波形	電流, 電力, 巻数比の式
電流連続モード Continuous Current Mode (CCM)		$i_1(t) = I_{10} + (V_1 / L_1) \cdot t \quad , 0 < t < t_1$ $i_2(t) = I_{20} - (V_2 / L_2) \cdot t \quad , t_1 < t < t_2$ $W_a = d \cdot I_{10} \cdot V_1 + (d^2 \cdot T / 2L_1) \cdot V_1^2$ $n = (V_2 / V_1) \cdot (1 / d - 1)$
電流境界モード Critical Continuous Current Mode (CCCM, BCM)		$i_1(t) = (V_1 / L_1) \cdot t \quad , 0 < t < t_1$ $i_2(t) = I_{20} - (V_2 / L_2) \cdot t \quad , t_1 < t < t_2$ $W_a = (d^2 \cdot T / 2L_1) \cdot V_1^2$ $n = (V_2 / V_1) \cdot (1 / d - 1)$
電流不連続モード Discontinuous Current Mode (DCM)		$i_1(t) = (V_1 / L_1) \cdot t \quad , 0 < t < t_1$ $i_2(t) = I_{20} - (V_2 / L_2) \cdot t \quad , t_1 < t < t_2$ $W_a = (d^2 \cdot T / 2L_1) \cdot V_1^2$ $n = (V_2 / V_1) \cdot (k / d - 1)$ $k = (t_1 + t_2) / T$

また、 $i_1(t)$ 、 $i_2(t)$ はそれぞれFBTの1次巻線電流、2次巻線電流である。 W_a は変換する平均電力である。 L_1 、 L_2 はFBTの1次側、2次側インダクタンスである。 d はQ1のデューティ、 T はQ1のスイッチング周期、 n はFBTの1次巻線数に対する2次巻線数の比である。

一般に電流連続モードは、Q1がONした瞬間に電流 i_{10} が流れているため、Q1のスイッチング損失が大きくなる。電流境界モードでは i_{10} が0であり、また最大電流が電流不連続モードよりも低くなるので、損失はもっとも小さくなる。今回のインバータでは、電源電圧 E の変動やDLの特性ばらつきがあっても電流連続モードにならないように、定常点灯時に電流不連続モードになるように設計した。以下に、今回の設計内容を示す。

(1) 定常定格条件

- 電源電圧： $V_1 = 12 \text{ V}$
- 出力電圧： $V_2 = 85 \text{ V}$
- ランプ電力： $W_a = 35 \text{ W}$

(2) 動作条件の選定

点灯装置各部の損失を6 W程度考慮し、目標とする変換電力 W_a は、

$$W_a = 41 \text{ W}$$

スイッチングノイズや回路効率を考慮し、Q1のスイッチング周波数 f_{sw} は

$$f_{sw} = 60 \text{ kHz} \quad (T = 16.7 \mu\text{s})$$

Q1のデューティ： $d = 0.4$

電流休止期間の割合： $1 - k = 0.2$

(3) FBT諸元の算出

表3の電流不連続モードの諸式より、FBTの諸元は下記となる。

$$n = 7$$

$$L_1 = (d^2 \cdot V_1^2) / (2 \cdot f_{sw} \cdot W_a) = 4.7 \mu\text{H}$$

$$L_2 = n^2 \cdot L_1 = 230 \mu\text{H}$$

図5は、上記の設計によるFBTの1次電流 i_1 、2次電流 i_2 の実測波形であり、所定の動作をしていることがわかる。

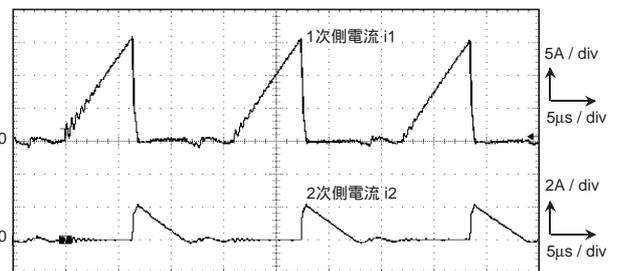


図5 フライバック回路の動作波形

3.2 光束立上げ促進制御

HIDランプを安定な電力で点灯させるために、ランプ電流とランプ電圧を検出し、目標電力になるようにスイッチング素子Q0のデューティを変化させるフィードバック制御方式を開発した。制御回路の構成を図6に示す。

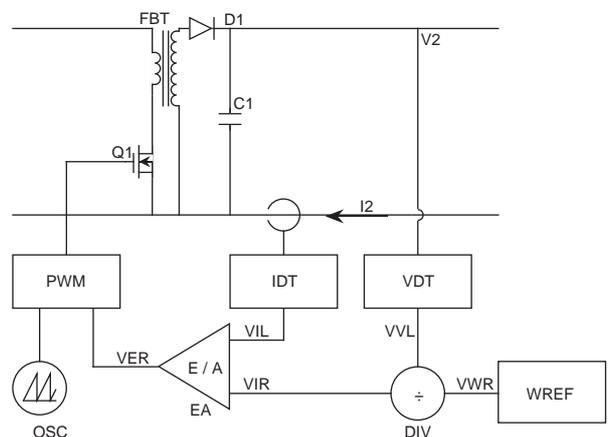


図6 ランプ電力制御回路の構成

制御回路の動作は以下のようなものである。フライバック回路の出力からランプ電圧に相当する V_2 とランプ電流に相当する i_2 を、各々検出器VDT、IDTで検出し、検出信号 VVL 、 VIL を得る。目標電力発生器WREFで目標電力信号

VWRを発生し、除算手段DIVによってVWRをVVLで除して目標電流信号VIRを得る。VILとVIRの誤差信号VERを誤差増幅器E/Aで求め、パルス幅変調器PWMでデューティを調整する。これにより、フライバック回路はWREFで決定した電力を負荷に供給するように動作させることができた。

定格点灯時においては、WREFの発生するVWRは35 Wの一定値である。しかし、D2バルブの始動直後からは、光束を立ち上げるために、点灯経過時間に応じてVWRを変化させるようにした。図7は、HIDランプ始動からの点灯経過時間tとDLに与えるランプ電力Wlaの関係を示す。

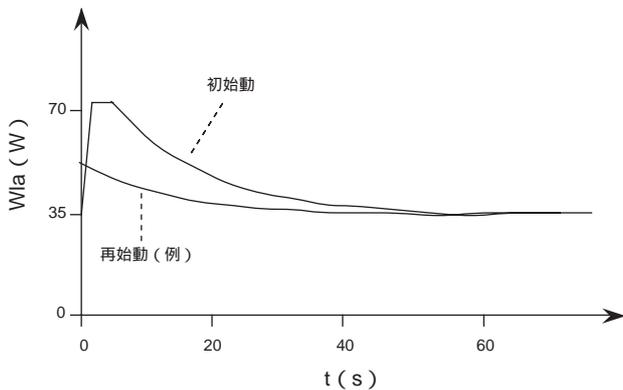


図7 始動後のランプ電力供給曲線

WREFが図7に応じたVWRを発生するように構成することにより、光束をすばやく立ち上げるようにすることができた。

ところで、数秒程度の比較的短い消灯で再始動させるような場合、ランプの温度が高い状態であるため、初始動と同様な過大電力をD2バルブに与えると、再始動直後に過剰な光を発生し、発光管や電極にダメージを与える。このような状態を避けるために、印加電力は、D2バルブの温度に応じて適宜変化させることが必要になる。図7に示したように、再始動ではランプ電力の与え方を低減させている。実際の回路では、点灯時間と消灯時間を計時し、擬似的にランプ温度を推測するようにWREFを構成した。

以上の結果、図8に示すとおり、前述のECEレギュレーション99に規定される安定時の光束を100%として、始動1秒後に25%以上、4秒後に80%以上の光束立ち上げ特性を満たすことができた。

4. イグナイタ部の設計

高電圧パルスが発生するイグナイタ回路の基本構成は、

- パルスエネルギーを蓄積するコンデンサ
- パルストランス
- コンデンサのエネルギーをパルストランスに印加するためのスイッチ素子

で構成される。コンデンサに蓄積されたエネルギーをスイッ

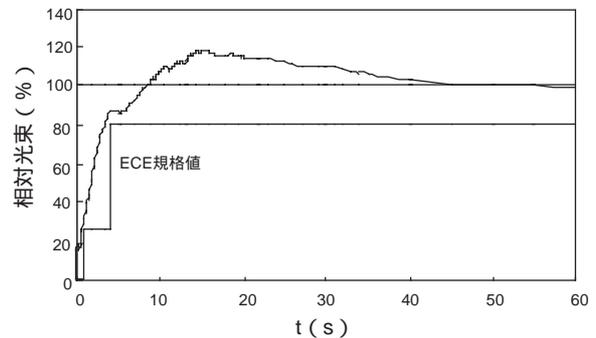


図8 光束立ち上がり特性(初始動)

チ素子を介してパルストランスの1次側に印加して2次側に高電圧パルスが発生させる。

高電圧パルスを効率よく発生させるためには、コンデンサに蓄積する電圧が高いほうがよい。これはパルス発生エネルギーが高くでき、またパルストランスの1次・2次巻数比を下げパルストランスを小型化できるからである。

今回は、インバータの無負荷2次電圧Vo2を倍電圧整流回路に入力し、二つの直列接続されたコンデンサにVo2の約2倍の電圧でエネルギー蓄積をする回路方式を選択した。また、スイッチ素子には動作の安定性を考慮してサイリスタSCRを用いた。このイグナイタ回路を図9に示す。

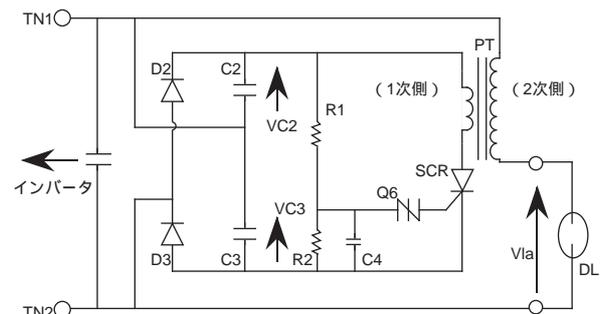


図9 イグナイタ回路

インバータ回路の出力に接続されるイグナイタ回路の入力端子TN1が正極性、TN2が負極性のとき、ダイオードD3を介して、コンデンサC3を充電し、Vo2の極性が反転しTN1が負極性、TN2が正極性のとき、D2を介してC2を充電する。C2とC3の充電電圧Vc2、Vc3の和をR1、R2、C4および電圧感応トリガ素子Q6で検知して、C2とC3が所定の充電状態に達するとSCRをONさせる。これにより、C2とC3の直列回路がパルストランスPTの1次側に印加され、PTで昇圧されて2次側に高電圧パルスが発生する。今回のインバータのVo2は380 Vに設定したので、Vc2とVc3は約350 Vまで充電されPTの1次側には約700 Vが印加される。

図10に実際に得られたパルス波形を示す。

D2バルブを瞬時に再始動させるために必要な約22kVのピーク値が得られた。また、高電圧パルスは、ランプが始

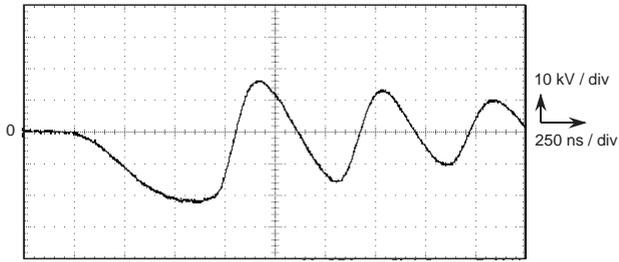


図10 始動パルス電圧波形

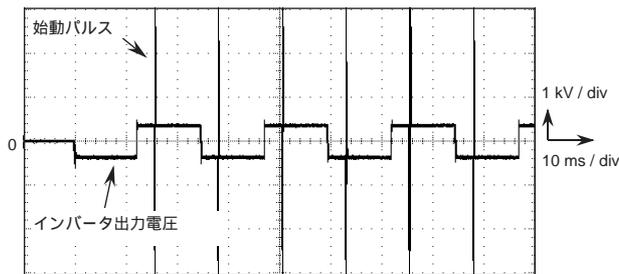


図11 無負荷2次電圧波形

動するまでの間、Vo2の極性が反転するごとに発生し、図11のように矩形波電圧に高電圧パルスが重畳された形状でD2バルブに印加され、始動性能を向上させている。

なお、このイグナイタ回路は、インバータ回路の出力だけで必要な充電電圧が得られるので、インバータ部とイグナイタ部の接続は2線だけの簡易な構成にできる。

5. 開発した点灯装置

HLBの基本回路は、以上のように開発してきたが、これに安全性を確保するための保護機能を加えて、実用的なHLBとして完成させた。付加した保護機能は次のとおりである。

(1) 無負荷停止機能

点灯スイッチ投入後、1秒以内にD2バルブが点灯しない場合に全回路を停止し、始動パルスが継続して発生することによる絶縁劣化などの不具合を防止する。

(2) スローリークランプ停止機能

D2バルブが寿命末期に近づいたときに、発光管に生じた微少なクラックなどから封入物が漏洩するいわゆるスローリークが生じた場合、これを検出し回路を停止させる。

(3) 出力短絡停止機能

万が一インバータ部またはイグナイタ部の出力が短絡したような場合には、電流が流れ続けて短絡部の発熱や発火に至らないように瞬時に全回路を停止する。

さらに、自動車特有の使用環境を考慮し、アルミダイキャストを用いた堅牢な筐体に回路を収め、防湿・防水機能と耐振動・衝撃機能を満たし、かつ放熱性を向上させるために筐体内にシリコンを充填した。

また、開発品の構成をインバータ部とイグナイタ部に分

離したことによって、ヘッドライト本体への取付け性の良好なHLBにすることができた。

開発したHLBの外観を図12に示す。D2バルブを点灯した時のランプ電圧とランプ電流の波形を図13に示す。

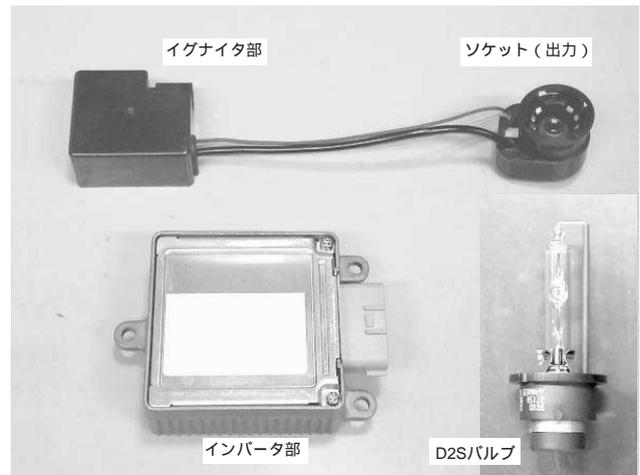


図12 開発品の外観

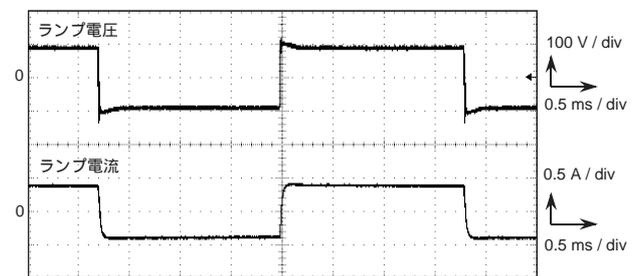


図13 開発品の定格点灯波形

約270Hzの矩形波でD2バルブを安定に点灯させている。

6. あとがき

一般照明用HIDランプ電子バラストの技術をもとにして、ヘッドライト用に最適な回路方式を選択し、瞬時再始動や光束立上げ促進などのHIDランプの弱点を克服する新回路技術を開発した。さらに、自動車用として要求される厳しい品質水準を満たすHLBを商品化することができた。この結果、すでに多くの自動車でこのHLBが採用されてきている。

HIDランプ式ヘッドライトは、夜間交通事故の低減のためにますます多用されていくと考えられるが、現在は点灯装置の大きさや価格面の制約から、中級車以上への採用が中心である。しかし、HID式ヘッドライトが本当に夜間の交通事故の低減に貢献するためには、大衆車や軽自動車にも普及させることが肝要であろう。このため、HLBの一層の小型・軽量・薄型化、ならびに低価格化が必要不可欠である。筆者らは、今後も、より性能を高めたHLBの技術開発、ならびに商品化を推進していく所存である。

*参考文献

- 1) J. H. Campbell : Initial Characteristics of High-Intensity Discharge Lamps on High-Frequency Power, J. Illum. Engng. Soc, p. 713-723 (1969)
- 2) 荒川内 昇, 西村 広司, 鍋島 進, 勝又 雅夫 : 高压ナトリウム灯用瞬時再始動装置の開発, 平成3年照明学会全国大会 (1991)
- 3) H. Nishimura, H. Nagase, K. Uchihashi, T. Shiomi, M. Fukuhara : A New Electronic Ballast for HID Lamps, J-IES, Vol. 17, No. 2, p. 70-76 (1988)
- 4) 永瀬 春男, 西村 広司, 内橋 聖明, 塩見 務, 奥出 章雄 : 音響共鳴を防止したHID電子安定器, 松下電工技報, No. 41, p. 18-22 (1990)
- 5) T. Yamauchi, T. Shiomi : A Novel Charge Pump Power Factor Correction Electronic Ballast for High Intensity Discharge Lamps, 29th IEEE Power Electronics Specialists Conference, F-6-7 (1998)