

# アクティブバッファ回路を用いたLED照明駆動電源の検討 Power Supply With an Active Buffer for LED Floodlight

上 蘭 一 輝 † 山 田 洋 明 ††

Kazuki Uezono † Hiroaki Yamada ††

† 山口大学 工学部 †† 山口大学 大学院創成科学研究科

## 1 はじめに

従来の照明器具として白熱灯や蛍光灯が使われてきた。しかし、白熱灯は電気エネルギーのほとんどが熱として消費され効率が悪い。また水俣条約により、水銀灯の生産は今後できなくなるため、代替照明としてLED照明の普及が今後も促進される見通しである。

一般的なLED照明の駆動電源は、フリッカを防止するために大容量の平滑キャパシタを接続してLED電流リプルを低減している。しかしながら、大容量の平滑キャパシタとして用いられる電解キャパシタは、寿命が短く体積が大きく、LED灯具と電源の一体化の障害となる。

本論文では、100W級のLED照明駆動電源の電解キャパシタレス化を目的として、アクティブバッファ回路 [3] を用いたLED照明駆動電源を提案し、その基本動作を計算機シミュレータPSIMにより確認したので報告する。

## 2 フリッカ規制

LED照明器具の入力電源として単相交流を用いる場合、電源周波数の2倍の周波数で負荷電流は脈動するため、脈動によるちらつき、いわゆるフリッカが体調不良などの原因となる。電気用品安全法 [1] やIEEEの規格 [2] によりフリッカ規制が定められている。表1に電気用品安全法のフリッカ規制、表2にIEEE Stdのフリッカ規制を示す。表2において、フリッカ率は次式で表される。

$$\text{フリッカ率} = \frac{i_{\max} - i_{\min}}{i_{\max} + i_{\min}} \quad (1)$$

ここで、 $i_{\max}$  はLEDに供給される電流の最大値、 $i_{\min}$  はLEDに供給される電流の最大値を表す。

表 1: 別表第八電気用品安全法施行令 [2]

・出力に欠落部（光出力のピーク値の5%以下の部分）がなく、繰り返し周波数が100Hz以上
・出力の繰り返し周波数が500Hz以上

表 2: IEEE Std 1789-2015 によるフリッカ規制 [3]

・フリッカ率 $< 0.08 \times f_{\text{Flicker}}$	低リスク領域
・フリッカ率 $< 0.0333 \times f_{\text{Flicker}}$	無影響領域

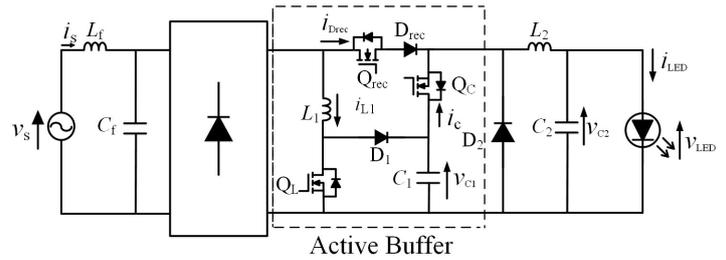


図 1: 提案する回路構成

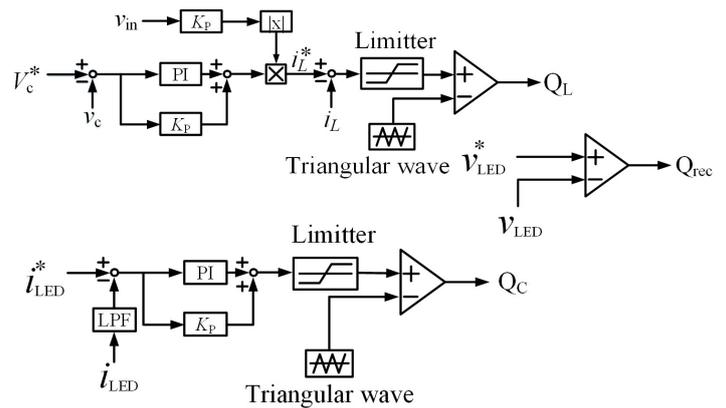


図 2: 制御ブロック

## 3 提案するアクティブバッファ回路を用いたLED駆動電源

図1に提案する回路構成を示す。提案回路は、単相交流を整流するダイオード整流回路、電源側と負荷側にスイッチングリプル除去用のローパスフィルタ、力率改善回路として昇圧チョッパ回路とスイッチと小容量のキャパシタの充電回路と放電回路からなるアクティブバッファで構成される。また、充放電回路の間にダイオード  $D_{\text{rec}}$  を設けることにより、充電動作と放電動作を同時に行うことが可能となる。制御ブロックを図2に示す。スイッチ  $Q_L$  は昇圧 PFC (Power Factor Correction) の電流連続モードにおける制御系を用いている。スイッチ  $Q_C$  については、LED 電流  $i_{\text{LED}}$  を検出し定電流制御を行うようスイッチングを行う。これにより、バッファキャパシタの放電を制御し、LED 電流の変動を抑える。

スイッチ  $Q_{rec}$  は、負荷電流を低電流にする場合に、ダイオード  $D_{rec}$  間が導通するのを防止するために用いる。

#### 4 脈動補償の原理

本節では、電力脈動の補償の原理 [3] について説明する。単相交流の電源電圧および電流を正弦波かつ入力力率を 1 に制御すると、入力瞬时電力は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} P_{in} &= V_m \sin(\omega t) \cdot I_m \sin(\omega t) \\ &= \frac{V_m I_m}{2} - \frac{V_m I_m}{2} \cos(2\omega t) \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 式において、 $V_m$  および  $I_m$  は入力電圧、電流の振幅を表す。(2) 式からわかる通り、入力電力は電源周波数の 2 倍で脈動する。提案するアクティブバッファ回路では充放電回路によってこの脈動分を補償する。補償方法としては、図 2 に示す通り、充放電回路の電力の総和を  $P_{buf}$  とすると、出力電圧  $P_{out}$  は次式で表される。

$$\begin{aligned} P_{out} &= P_{in} + P_{buf} \\ &= \frac{V_m I_m}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

(3) 式より  $P_{buf}$  は次式となるように制御する必要がある。

$$\begin{aligned} P_{buf} &= P_c - P_l \\ &= \frac{V_m I_m}{2} \cos(2\omega t) \end{aligned} \quad (4)$$

入力電力のうち、定常電力も含んだ半分の電力を充電し、充電した電力を  $\pi/2$ rad 遅相して放電することで脈動成分の補償 [3] を行う。このときの充電電力  $P_l$  を (5) 式、放電電力  $P_c$  を (6) 式に示す。

$$\begin{aligned} P_l &= \frac{V_m I_m}{2} \sin^2(\omega t) \\ &= \frac{V_m I_m}{4} - \frac{V_m I_m}{4} \cos(2\omega t) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} P_c &= \frac{V_m I_m}{2} \sin^2(\omega t - \frac{\pi}{2}) \\ &= \frac{V_m I_m}{4} + \frac{V_m I_m}{4} \cos(2\omega t) \end{aligned} \quad (6)$$

充放電回路により充電と放電を同時に行うことにより、キャパシタの補償する電力を半分にすることができる。これによりキャパシタの容量が軽減されるためキャパシタの容量低減に有効であると分かる。

#### 5 回路定数の検討

本節では回路定数の検討を行う。まず、入力側のローパスフィルタの 50kHz をカットオフ周波数となるようにフィルタを設計する。LC ローパスフィルタのカットオフ周波数は次式で表される。

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} \quad (7)$$

ここで、キャパシタ  $C$  の容量が過大であると、力率悪化の原因となるので  $C_f$  は  $1\mu\text{F}$  とした。このとき、 $L_f$  は (4) 式より、 $10\mu\text{H}$  となる。本報告では、線路のインダクタンス分を考慮していいないため、 $L_f$  を  $15\mu\text{H}$  とすることで考慮する。次に、ダイオード整流回路の後段の回路について説明する。インダクタ  $L_1$ 、スイッチ  $Q_L$ 、ダイオード  $D$  よびバッファキャパシタ  $C_1$  で構成される回路は昇圧チョップ回路と同じ回路構成である。本稿では昇圧動作を電流連続モードで行う。昇圧チョップにおけるインダクタ電流  $i_L$  臨界条件は次式で表される。ここで、 $f_s$  はスイッチング周波数、 $R$  は負荷抵抗、 $d$  はデューティ比を表す。

$$L > \frac{R}{2f_s} d \cdot (1-d)^2 \quad (8)$$

LED の定格容量から、負荷抵抗  $R$  は  $1200\Omega$ 、スイッチング周波数  $f_s$  は  $500\text{kHz}$ 、デューティ比は  $0.775$  として計算した。(2) 式に代入すると次式となる。

$$L > 47.1\mu\text{H} \quad (9)$$

連続モードで動作させるため、 $120\mu\text{H}$  とした。ここで、負荷抵抗  $R$  の検討を行う際に LED の順方向電圧および ON 抵抗  $R_{ON}$  を LED チップのデータシート [4] を参考に導出する。データシートより、LED チップ 1 個当たりの順方向電圧は  $2.73\text{V}$  となり、ON 抵抗  $R_{ON}$  は  $0.770\Omega$  となった。実機で用いる場合、この LED チップを 42 個直列に接続するため、順方向電圧および ON 抵抗はそれぞれ  $114.5\text{V}$  および  $32.34\Omega$  とすることによりダイオード負荷で等価的にシミュレーションを行う。負荷側の LC ローパスフィルタは、 $100\text{kHz}$  のカットオフ周波数となるようにフィルタを設計した。最後にバッファキャパシタ  $C$  については、電解キャパシタレスの駆動電源を実現させるために、 $10\mu\text{F}$  とした。回路定数を表 3 に示す。

#### 6 シミュレーション結果

提案するアクティブバッファ回路を用いた LED 照明駆動電源の動作を確認するために、PSIM を用いた計算機シミュレーションを行った。図 3 に、シミュレーション結果を示す。シミュレーション波形は上から、電源電圧  $v_S$ 、電源電流  $i_S$ 、バッファキャパシタ電圧  $v_{C1}$ 、LED 印加電圧  $v_{LED}$ 、LED 電流  $i_{LED}$  である。図 3 のシミュレーション波形から、バッファキャパシタ電圧の平均値を指令値  $400\text{V}$  に制御できていることが分かる。また、電流連続モード PFC 制御によりバッファキャパシタの充電を行うことで、電源電圧と電源電流の力率を  $0.954$  と高力率に制御できている。LED 電流の平均値は指令値  $0.5\text{A}$  に制御されており、最大値は  $0.655\text{A}$ 、最小値は  $0.383\text{A}$  となった。これは、電気用品安全法のフリッカ規制値として規定されている電流最大値の 5% 以下の期間が存在せず、フリッカを生じない LED 照明駆動電源が実現できた。また、フリッカ率は (1) 式より、 $26.2\%$  であると分かる。したがって、IEEE Std 1789-2015 のフリッカ規制を満たしていないことが分かる。

表 3: 回路定数

Item	Symbol	Value
AC source voltage	$V_{rms}$	100 V
Source frequency	$f_s$	60 Hz
Input filter inductance	$L_f$	15.0 $\mu$ H
Input filter capacitance	$C_f$	1.00 $\mu$ F
Inductance	$L_1$	350 $\mu$
Buffer capacitance	$C_1$	10 $\mu$ F
Output filter inductance	$L_2$	50 $\mu$ H
Output filter capacitance	$C_2$	55 nF
Switching frequency of $Q_L$	$f_{sw}$	500 kHz
Switching frequency of $Q_C$	$f_{sw}$	1000 kHz
Buffer capacitor voltage	$V_C^*$	300 V
Output current	$I_{out}^*$	0.5 A

本研究においては、商用電源として実効値 100 V の交流電源を使用する。したがって、国内の高調波電流規制としては、JIS 61000-3-2 が適用される。高調波規制は使用する電気機器によって規制が異なる。表 4 に JIS 61000-3-2 の高調波規制 [5] を示す。

表 4: 高調波規制 (JIS-C-61000-3-2)

クラス	機器
クラス A	<ul style="list-style-type: none"> <li>・平衡三相機器</li> <li>・家庭用機器</li> </ul> (クラス D に分類されるものを除く) <ul style="list-style-type: none"> <li>・電動工作 (手持ち型を除く) etc...</li> </ul>
クラス B	<ul style="list-style-type: none"> <li>・手持ち型電動機</li> <li>・専門家用でないアーク溶接機</li> </ul>
クラス C	<ul style="list-style-type: none"> <li>・照明機器</li> </ul>
クラス D	有効入力電力 600 W 以下である下記の機器 <ul style="list-style-type: none"> <li>・パソコンおよびパソコン用モニター</li> <li>・テレビジョン受信機</li> </ul>

本研究では、LED 照明を用いるため、表 4 においてクラス C が高調波規制の対象となる。表 5 にクラス C における高調波規制 [5] を示す。表 5 の規制は、有効電力が 25 W 超の場合に適用される。

図 4 に解析結果を示す。図 4 より、すべての次数に対して JIS 61000-3-2 の高調波規制を満たすことが確認できる。

表 5: 高調波規制クラス C 限度値

高調波次数	基本波電流に対する高調波百分率として表される最大値 (%)
n	
2	2
3	$30 \times \lambda$ (回路の力率)
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$	3

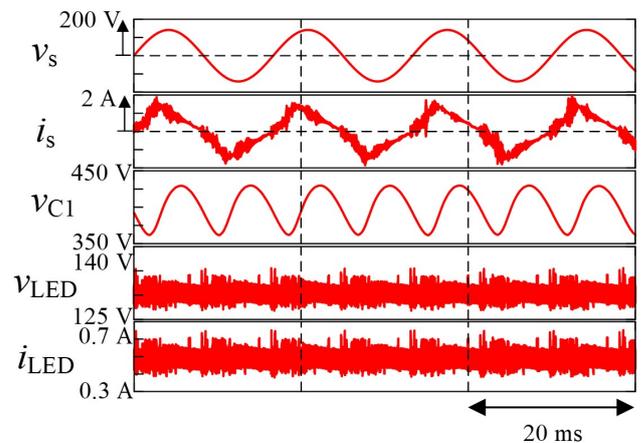


図 3: シミュレーション波形

## 7 むすび

本論文では、アクティブバッファ回路付き LED 駆動電源の制御の検討を行った。シミュレーション結果より電気用品安全法のフリッカ規制を満たすことが確認できた。今後は、LED 側の電力脈動をより低減可能な、制御の検討を行うことにより、IEEE 1789-2015 のフリッカ規制を満たす駆動電源の検討を行っていく予定である。

## 参考文献

- [1] 経済産業省:「電気用品安全法」, 施行令別第二第九号,(2012)
- [2] “IEEE Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs for Mitigating Health Risks to Viewers”, IEEE Std, No.1789, pp.43-45,(2015)
- [3] 中野宏昭, 山下尚也, 加藤利次:「アクティブバッファ付き単相-三相電力変換器のチョップに関する検討」, 平成 30 年電気学会産業応用部門大会,1-24,(2018)

- [4] [Online] CREE <https://www.cree.com/led-components/media/documents/XLampXPE.pdf>
- [5] JIS-C-61000-3-2:「電磁両立性-」-第3部:限度値-高調波電流発生限度値(1相当りの入力電流が20A以下の機器)」, 日本工業標準調査会

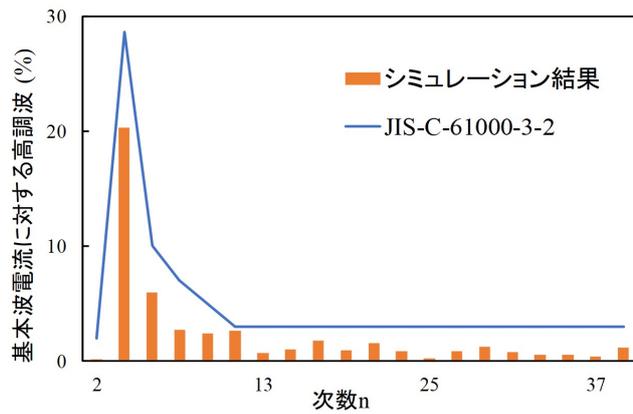


図 4: 高調波電流規制