

doi: 10.7690/bgzd.2016.11.008

# 一种应用于多路大功率LED的无源电流平衡电路

陈燕武, 陈勇

(电子科技大学能源科学与工程学院, 成都 611731)

**摘要:** 为提高系统的效率和简化系统结构, 提出一种应用于多路大功率 LED 的无源电流平衡电路。对传统的 LLC 电路进行改进, 通过在变压器的次级接入电容实现多路 LED 间的电流平衡; 采用软开关技术提高系统的工作效率; 采用基于 uc3863 的 LLC 闭环控制策略来实现 LED 的恒流; 利用 saber 软件搭建了 2 路 LED 仿真模型, 并进行结果验证。仿真结果表明: 该新型拓扑和电流平衡方法是可行的, 能实现软开关以及 2 路 LED 的电流平衡。

**关键词:** 电流平衡; LLC; 软开关技术; uc3863

**中图分类号:** TJ012.3 **文献标志码:** A

## A Novel Passive Current Balancing Circuit for Multiple LED Strings of High Power Application

Chen Yanwu, Chen Yong

(School of Energy Science &amp; Engineering, University of Electronic Science &amp; Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** Proposes a passive current balancing circuit which is applied to multiple LED strings, aiming at improving the efficiency of the system and simplifying its structure. Improve the traditional LLC circuit by connecting the capacitor to the secondary of the transformer to achieve current balancing of multiple LED strings; the efficiency of the system is improved by using the soft-switching technology; then, use the closed-loop of LLC circuit based on uc3863 to make the LED current constant; finally, the simulation model of two LED strings is built based on the saber software, and the simulation results validate the feasibility of the new topology and current balancing method, they can realize soft-switching and 2-ways LED current balancing.

**Keywords:** current balancing; LLC; soft-switching technology; uc3863

### 0 引言

由于 LED 高效的发光性能和较低的生产成本, 使其在照明系统中的应用也越来越广泛。在大功率 LED 照明系统中, 常将 LED 进行并联运用, 为了保证各串 LED 之间的亮度平衡并可靠运行, 各串 LED 之间的电流平衡很有必要。

有源控制方法<sup>[1-5]</sup>将有源器件和相关控制电路组成电流调节器, 并将其串联在 LED 串之中来实现电流平衡。电流调节器既可以是线性模式, 又可以是开关模式<sup>[6]</sup>。然而无论是线性模式还是开关模式调节器都将降低系统的整体效率且成本较高。

无源控制方法<sup>[7-8]</sup>是利用无源元件(如电感或电容)来实现电流平衡。耦合电感法需要大量的耦合电感来实现电流平衡, 显然这会增加整体结构的复杂性。电容法虽然结构简单, 但由于嵌入的电容阻抗很大, 会导致输出电流基本由电容来决定, 不利于输出电流的调节, 并且无源控制方法多数应用在低功率场合。第一级是 PFC 电路, 第二级采用 LLC

谐振电路可以实现高效率以及隔离, 由于前级 LLC 采用的是开环控制电流纹波会很大, 因此第三级采用 TIBuck 电路来实现各 LED 串的恒流; 该方法能实现 LED 的电流平衡, 但在  $n$  串 LED 的应用场合, 该方法需要  $n$  个 TIBuck 电路来实现 LED 的电流平衡, 整个电路的体积会很庞大且成本很高。

针对大功率 LED 串的并联应用, 笔者提出了一种简单、高效率并且能实现精确电流平衡的电路。该方法基于传统的 LLC 拓扑, 通过在变压器次级接入平衡电容可以实现 2 路 LED 的电流平衡; 同时通过采样 LED 输出电流反馈到 uc3863 进行 PFM 调节, 从而实现输出电流的恒定控制。最后, 笔者通过 saber 仿真验证了该电路的有效性。

### 1 工作原理

#### 1.1 电路设计

笔者提出的基于 LLC 拓扑的电流平衡电路如图 1 所示, 该电路的基本结构是 LLC 电路, 通过设

收稿日期: 2016-07-09; 修回日期: 2016-08-18

基金项目: 四川省科技支撑计划项目(2013GZ0054)资助

作者简介: 陈燕武(1991—), 江西人, 在读硕士, 从事电气工程和电力电子技术研究。

恰当的开关频率，实现软开关，从而提高系统的效率并实现隔离；其次，通过采用 PFM 闭环控制策略可以实现输出电流的恒定，从而消除后级的 Buck 恒流电路；最后，将电流平衡电容  $C_b$  嵌入到 LLC 变换器的次级，自动实现 2 路 LED 的电流平衡。

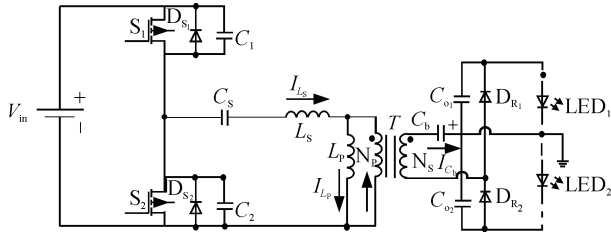


图 1 基于 LLC 拓扑的电流平衡电路

该电路具有结构简单、高效率且低成本的特点，并且很容易扩展成多输出结构。该电路采用的是 LLC 闭环控制策略，可以消除 LED 的后级恒流电路，从而实现大功率多路 LED 驱动器的 2 级结构。

### 1.2 工作原理

笔者针对图 1 的 LLC 电流平衡电路进行分析。为了简化分析，笔者作出如下假设：变压器是理想变压器并忽略漏感； $C_{o1}$  和  $C_{o2}$  的存在，输出电压认为是电压源； $C_b$  的电容量足够大，其两端电压认为是恒定电压。LLC 电路的 2 个谐振频率分别是：

$$f_{r1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S C_S}}, \quad f_{r2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_S + L_p) C_S}}$$

的实现，笔者设计的开关频率范围为： $f_{r1} < f_S < f_{r2}$ 。图 2 给出了 LLC 电流平衡电路的波形图。

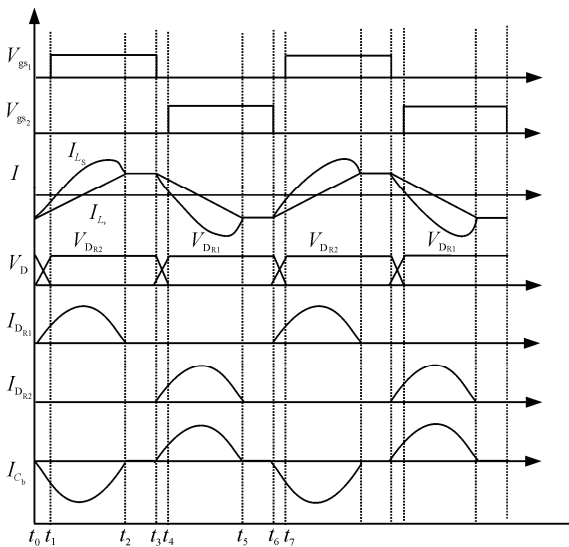


图 2 LLC 电流平衡波形

1) 阶段 1 ( $t_0 < t < t_1$ )。

该阶段工作图如图 3 所示。该阶段发生在开关管死区时间，电感  $L_S$  通过二极管  $D_{S1}$  向电源  $V_{in}$  充电，此时开关管  $S_1$  两端的电压为  $D_{S1}$  电压降，为  $S_1$  的 ZVS 做准备；次级电流通过  $C_b$  向  $LED_1$  供电，此时  $LED_2$  由  $C_{o2}$  供电。由于输出电压和  $C_b$  两端电压为恒压，因此变压器次级也为电压，电流  $I_{Lp}$  呈线性增大，在开关管  $S_1$  开通时，此阶段结束。

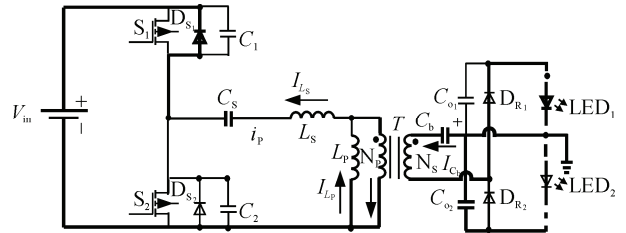


图 3  $t_0 < t < t_1$  阶段的工作电路

2) 阶段 2 ( $t_1 < t < t_2$ )。

该阶段工作图如图 4 所示。此时开关管  $S_1$  导通， $L_S$  与  $C_S$  谐振， $I_{L_S}$  呈正弦增加，由于次级电流方向与阶段 1 相同，因此次级的工作状态与阶段 1 相同；同时由于次级为恒压， $I_{Lp}$  呈线性增大，当  $I_{L_S} = I_{Lp}$  时此阶段结束，并为  $D_{R1}$  的 ZCS 做准备。

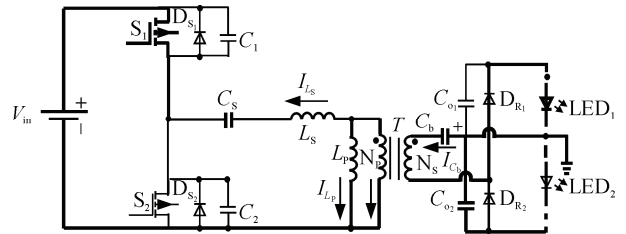


图 4  $t_1 < t < t_2$  阶段的工作电路

3) 阶段 3 ( $t_2 < t < t_3$ )。

该阶段工作图如图 5 所示。在  $t_2$  时刻  $I_{L_S} = I_{Lp}$ ，次级电流为零，实现了  $D_{R1}$  的 ZCS；此阶段  $L_p$  参与谐振，由于  $I_{L_S} \gg I_{Lp}$ ，谐振周期很大，故可认为  $I_{L_S} = I_{Lp}$  且保持恒定；此时次级电流为零，LED 分

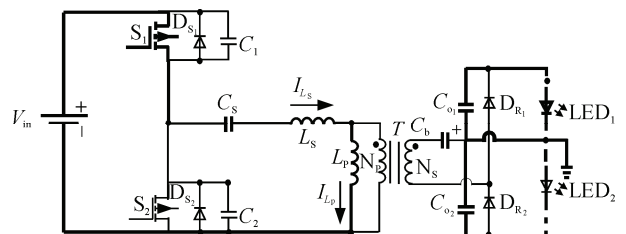


图 5  $t_2 < t < t_3$  阶段的工作电路

别由输出电容供电；当  $S_1$  关断时，此阶段结束。

4) 阶段 4 ( $t_3 < t < t_4$ )。

该阶段工作图如图 6。此时  $I_{L_s}$  经过变压器、 $D_{S_2}$  和  $C_s$  续流，因此  $S_2$  两端电压为零，为  $S_2$  的 ZVS 做准备；由于  $I_{L_s}$  的下降速率大于  $I_{L_p}$ ，因此次级电流方向与前面相反，次级电流通过  $C_b$  向 LED<sub>2</sub> 供电，LED<sub>1</sub> 由  $C_{o_1}$  供电；当  $S_2$  开通时，此阶段结束。

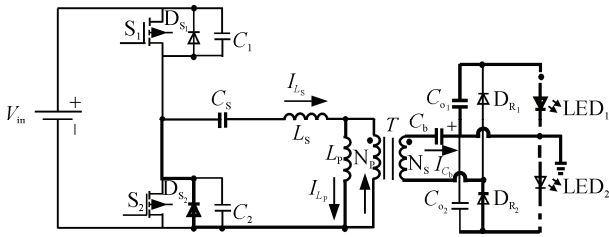


图 6  $t_3 < t < t_4$  阶段的工作电路

5) 阶段 5 ( $t_4 < t < t_5$ )。

该阶段工作图如图 7 所示。此阶段  $C_s$  放电， $I_{L_s}$  反方正弦增加，此阶段仍有反向电流  $I_{L_s} > I_{L_p}$ ，因此次级电流方向仍保持正方向；次级电流仍继续向 LED<sub>2</sub> 供电；在  $t_5$  时刻， $I_{L_s} = I_{L_p}$  此阶段结束。

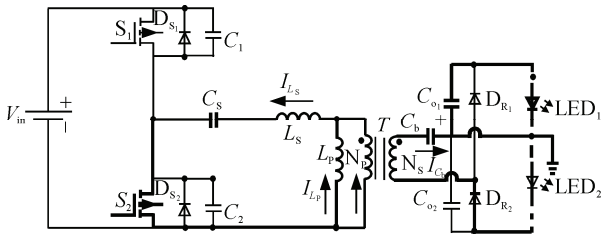


图 7  $t_4 < t < t_5$  阶段的工作电路

6) 阶段 6 ( $t_5 < t < t_6$ )。

该阶段的工作图如图 8 所示。在  $t_5$  时刻  $L_p$  参与谐振，次级电流为零，实现了  $D_{R_2}$  的零电流关断；此时 LED<sub>1</sub> 和 LED<sub>2</sub> 由输出电容为其供电。自此一个开关周期的工作到此结束，后面的工作与其相同。

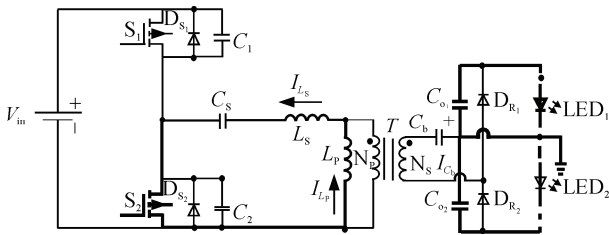


图 8  $t_5 < t < t_6$  阶段的工作电路

从前面的分析可知：该电路具有对称性，因此根据电路的对称性和电容的充放电平衡特性可得

$$I_{o_1} = I_{o_2} \quad (1)$$

式中  $I_{o_1}$  和  $I_{o_2}$  分别为 LED<sub>1</sub> 和 LED<sub>2</sub> 的平均电流。

## 2 LLC 电流平衡电路的设计

文中设计的 LLC 电流平衡电路的性能指标为：输入电压  $V_{in}$ ，380~420 V；输入电流  $I_0$ ，0.6 A；输出功率  $P_0$ ，48 W。所设计的基于软开关技术的 LLC 电流平衡电路如图 9。该电路能实现开关管的 ZVS、次级二极管的 ZCS 以及输出电流的恒流<sup>[9]</sup>。

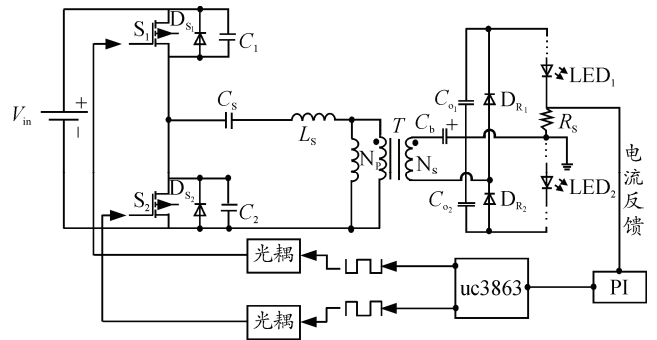


图 9 基于软开关技术的 LLC 电流平衡电路

关键参数为谐振频率  $f_{r1} = 200$  kHz 左右，对此取  $C_s = 0.1 \mu F$ ， $L_s = 5 \mu H$ 。为了保证  $I_{L_s} \gg I_{L_p}$ ，取  $L_p = 2$  mH；由此可得  $f_{r1} = 225$  kHz， $f_{r2} = 11$  kHz。uc3863 的频率设置由  $R_{range}$ 、 $R_{min}$  和  $C_{vco}$  决定，如下：

$$F_{min} = \frac{4.3}{R_{min} \cdot C_{vco}}; F_{max} = \frac{3.3}{(R_{min} \cdot R_{range}) \cdot C_{vco}} \quad (2)$$

为了实现  $f_{r1} < f_s < f_{r2}$  取  $R_{min} = 100$  k $\Omega$ ， $R_{range} = 20$  k $\Omega$ ， $C_{vco} = 1$  nF，根据 LLC 的工作特性，通知设置以上参数可实现开关管的 ZVS 以及二极管的 ZCS<sup>[10]</sup>。

## 3 仿真结果分析

笔者采用 saber 对电路进行仿真分析。该仿真电路的主结构为图 1 所示的 LLC 电流平衡电路。由于  $C_b$  的存在，该反馈电路仅采集一路 LED 的输出电流来实现输出恒流。将输出电流与参考电流值进行误差放大后送入 PI 调节器进行 PI 调节，然后再将其送入到 uc3863 来产生具有一定死区时间的 PWM 波，以驱动半桥电路的 2 个开关管。

由于开关管两端电压  $V_{ds}$  幅值高达 400 V，而其

控制电压只有 10 V 左右;为了便于波形的观察,笔者将  $V_{ds}$  进行相应的缩小,2 路输出电流都将稳定于 0.59 A,且纹波很小,满足 LED 驱动的需要,实现了 2 路 LED 的电流平衡,仅用一路 LED 的反馈控制实现了 2 路 LED 输出电流的共同调节,从而缩减了电路的整体结构,使电路变得更加简洁。

#### 4 结束语

笔者提出了一种基于软开关技术的 LLC 无源电流平衡电路,通过在变压器次级接入平衡电容可以实现 2 路 LED 的电流平衡<sup>[11]</sup>。为了实现开关管的 ZVS 和次级二极管的 ZCS,笔者设计开关频率范围为  $f_{r1} < f_s < f_{r2}$ ;针对输出电流纹波问题,设计了基于 uc3863 的 PFM 闭环控制策略,通过采集输出电流进行反馈控制可以实现输出恒流,从而消除了传统 LED 驱动器的 Buck 电路恒流环节,实现了驱动器三级结构缩减为二级结构。最后, Saber 仿真结果证明,该电路能实现软开关以及两路 LED 的电流平衡。

#### 参考文献:

[1] Hu Y, Jovanovic M. LED driver with self-adaptive drive

(上接第 19 页)

#### 参考文献:

- \*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*
- [1] A. 波普 K. L. 戈因. 高速风洞试验[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 413-416.
  - [2] Peter E, Merkli, ect. The Flow Starting Process in Constant Area Supersonic Diffusers in a Ludwieg Tube[R]. ADA033317, 1977.
  - [3] Maydew R C. Complication and Correlation of Model Starting Loads from Several Supersonic Tunnels[J]. SC-4691, 1962.
  - [4] 任思根. 实验空气动力学[M]. 北京: 宇航出版社, 1996: 144-151.
  - [5] 张文, 周恩民, 刘恺, 等. 基于 Bentley3500 的风洞压缩机轴系监测系统[J]. 兵工自动化, 2015, 34(10): 64-68.
  - [6] 李桦, 范晓楠, 丁猛. 超声速扩压器中激波串结构的数值模拟[J]. 国防科技大学学报, 2002, 24(1): 18-21.
  - [7] 陈吉明, 任玉新. 超音速风洞扩压器激波串现象的数值模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(2): 264-267.
  - [8] 孔令轩, 宋文艳. 超声速二次喉道扩压器流动特性的数值模拟[J]. 电子设计工程, 2014, 22(21): 48-51.
  - [9] 廖达雄, 任泽斌, 余永生, 等. 压混合引射器设计与实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(5): 728-732.

voltage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(6): 3116-3125.

- [2] 李刚, 李文君, 谢瑞莎, 等.  $\Sigma\Delta$ -STAP 对抗有源干扰性能的分析[J]. 兵工自动化, 2015, 34(1): 32-35.
- [3] Jacobs J, Shen J, Hente D. A Simple Digital Current Controller for Solid-State Lighting[C]//IEEE Power Electronics Specialists Conference. 2008: 2417-2422.
- [4] 赵静. 机载有源导弹逼近告警系统试飞方法[J]. 兵工自动化, 2015, 34(4): 5-8.
- [5] Thomas W, Pforr J. A novel low-cost current-sharing method for automotive LED-lighting systems[C]//EPE '09. 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009: 1-10.
- [6] 邹琼, 王嘉, 徐莎. 相位差调制原理在直流小电流传感器中的应用[J]. 兵工自动化, 2014, 33(5): 58-60.
- [7] Choi S, Agarwal P, Kim T, et al. Symmetric current balancing circuit for multiple DC loads[C]//Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010: 512-518.
- [8] 周俊. 基于 DSP 控制的新型 LED 路灯驱动器的研究与设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [9] 王玉珏, 漆德宁. 基于否定选择算法的模拟电路故障诊断[J]. 兵工自动化, 2015, 34(4): 30-32.
- [10] 侯宏录, 辛光泽, 郭淑玲. 一种小型脉冲激光器能量和重复频率测量电路[J]. 兵工自动化, 2014, 33(9): 76-80.
- [11] 李华府, 张尚珠. 一种电路容差分析实施对象选择决策方法[J]. 兵工自动化, 2015, 34(2): 43-45.
- [10] 任泽斌, 廖达雄, 张国彪. 2 m×2 m 超声速风洞引射器气动设计[J]. 空气动力学报, 2014, 29(10): 2288-2292.
- [11] 虞择斌, 廖达雄, 刘政崇, 等. 2 m 超声速风洞总体结构设计[J]. 实验流体力学, 2012, 26(2): 90-96.
- [12] 中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会. 高低速风洞测量与控制系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 148-150.
- [13] 饶正周, 马永一, 杨兴锐. 基于知识规则的 2.4 m 风洞控制开车参数自动生成专家系统[J]. 兵工自动化, 2015, 34(6): 94-96.
- [14] Akatsuka J, Nagai S. The Effect of Diffuser Geometry on the Starting Pressure Ratio of a Supersonic Wind Tunnel[C]. 10.2514/6.2010-4344.
- [15] 王永寿, 陈延辉. 超声速风洞启动特性与流路形状的影响[J]. 飞航导弹, 2012, 7(7): 87-92.
- [16] 杨海滨, 张伟, 罗承友, 等. 模糊控制在风洞主气流压力自动调节系统中的应用[J]. 兵工自动化, 2015, 34(4): 39-42.
- [17] 褚卫华, 汤更生, 王帆. 2 m×2 m 超声速风洞流场控制策略研究与实现[J]. 实验流体力学, 2012, 26(5): 98-102.
- [18] 高川, 刘烽, 周波, 等. 某超声速风洞测控系统[J]. 兵工自动化, 2013, 32(2): 63-66.