

文章编号: 1000-582X(2013)03-065-06

有源纹波补偿 Buck 型 LED 驱动电路及其小信号分析

唐治德¹, 谢小慧¹, 王官涛², 张晓斌¹

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044

2. 山东省电力公司滨州供电局, 山东 滨州 256600)

摘要: 针对在大功率 LED 照明中因滤波电解电容导致的驱动电源与 LED 的长寿命不匹配问题, 提出一种有源纹波补偿的 Buck 型 LED 驱动电源。介绍了有源纹波补偿 Buck 电路的拓扑结构及工作原理, 建立了该新型电路的小信号模型。通过对小信号模型进行相关分析, 得到了输出电流的表达式, 并由此得到了输出电流分别关于输入电压及占空比的传递函数。由传递函数一阶因子的幅频和相频特性分析可知, 在设计电路时只要选择合适的参数, 就可以将输入扰动完全滤除, 使得输出电流为直流。最后通过仿真和实验证实了上述新型电路及其小信号模型的正确性。

关键词: LED 驱动电源; 电解电容; 有源纹波补偿; 小信号分析; 传递函数

中图分类号: TM 46

文献标志码: A

Small-signal analysis of the Buck circuit with active ripple compensation for LED

TANG Zhide¹, XIE Xiaohui¹, WANG Guantao², ZHANG Xiaobin¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Binzhou Power Supply Bureau, Shandong Power Company, Binzhou, Shandong 256600, China)

Abstract: Considering that the lifespan of electrolytic capacitor in power supply doesn't match the LED's, the authors propose a Buck converter which employs active ripple compensation circuit to drive LED. The circuit structure and working principle of the new topology is introduced and an equivalent small-signal model is established. The formula of output current and the transfer functions of output current with input voltage and duty cycle are obtained through the small-signal model. According to the magnitude and phase Bode plot of the transfer functions' first-order factor, the input disturbance can be completely filtered, and the output current is a DC theoretically, provided the appropriate parameters are selected. Finally, the correctness of the new topology and its small-signal model are confirmed by carrying out the simulations and experiments.

Key words: LED power supply; electrolytic capacitor; active ripple compensation; small-signal analysis; transfer function

收稿日期: 2012-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50877082); 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目(2007DA10512709303)

作者简介: 唐治德(1958-), 男, 重庆大学教授, 主要从事大功率 LED 驱动控制、X 光机高压电源技术的研究, (E-mail) tangzhide@cqu.edu.cn。

在目前大功率 LED 照明的驱动电源中,普遍采用 LC 滤波电路来减小电路的输出纹波。电解电容具有能量密度大、价格低等优点,是滤波电容的首选^[1-4]。由于 LC 滤波器的自身特点,导致输出有纹波残留。增大电容值可减小电路输出纹波,但会使得电路输出为电压源,与 LED 为电流型负载相矛盾^[5-6]。更严重的是在 LED 照明应用环境下,电解电容的寿命不超过 5 000 h,导致 LED 驱动电源的寿命与 LED 的长寿命(50 000 h 以上)难以匹配^[7-12]。

针对这种现象,笔者提出一种有源纹波补偿 Buck 型 LED 驱动电源拓扑结构^[13-14]。该方案采用有源纹波补偿电路取代传统的电解电容滤波,将开关电源与线性电源有机融合。该融合型电源中无大容量电解电容,小型电容可以采用可靠性高的聚酯电容等容性元件,因此避免了驱动电源因大电解电容导致使用寿命不匹配问题。而补偿电路可与控制电路、开关管集成一体,使得 LED 驱动电源更易实现小型化和集成化。

笔者介绍了有源纹波补偿 Buck 电路的拓扑结构及工作原理。在此基础上,进一步研究了其主电路的小信号模型,得到了它的相关传递函数,以指导电路的设计:首先通过引入三端开关器件模型得到了有源补偿 Buck 电路的小信号模型。对该模型进行分析,分别得到了电感电流和补偿电流关于输入电压及占空比的传递函数,从而得到了输出电流的表达式。由输出电流表达式推出了输出电流关于输入电压及占空比的传递函数。用 Matlab 分析上述传递函数一阶因子的幅频和相频特性表明,在设计电路时只要参数选择得当,就可以将输入信号扰动完全滤除,使得输出电流扰动为零,得到的输出电流为直流。最后对该有源纹波补偿 Buck 型 LED 驱动电源进行了仿真分析和实验验证,证实了上述新型电路及其小信号模型的正确性。

1 有源纹波补偿 Buck 电路拓扑结构及工作原理

1.1 电路拓扑结构

电路如图 1 所示:在传统的 Buck 电路基础上,去掉滤波电容,用辅助线性有源补偿电路对电感纹波电流进行补偿。图中由开关管 S、电感 L、LED 灯组、续流二极管 D 组成 Buck 电路,工作于连续导通模式;三极管 T 为辅助补偿电路,工作于线性放大状态。

主电路电感电流 i_L 和三极管 T 的集电极电流

i_C 分别为

$$i_L = I_L + i_r,$$

$$i_C = I_C + i_c,$$

式中: I_L 和 I_C 分别为电感电流和三极管 T 的集电极电流的直流分量; i_r 和 i_c 分别为它们的交流分量。

当 $i_C = -i_r$ 时,电路输出电流为

$$i_O = i_L + i_C = I_L + I_C = I_O. \quad (1)$$

通过 LED 的电流 i_O 为恒定直流,实现了对电感纹波电流的全补偿。

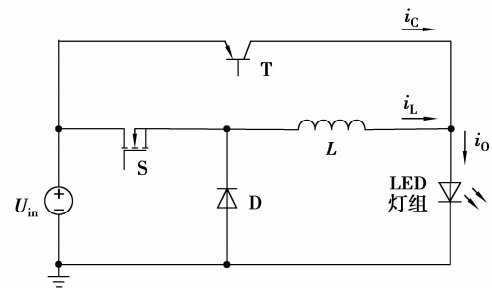


图 1 有源纹波补偿 Buck 电路拓扑

1.2 电感纹波电流检测与补偿

这里采取观测电感两端的电压来检测纹波电流并予以补偿^[15],如图 2 所示。图中检测电路由运算放大器 A_1 、电阻 R 、电容 C 组成差分积分器;运放 A_2 组成减法器用以消除因供电电压 U_{in} 波动而导致的补偿电流变化。假设各元件均为理想器件,电感上电压和电流的关系为

$$u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = L \frac{d(I_L + i_r(t))}{dt} = L \frac{di_r(t)}{dt}. \quad (2)$$

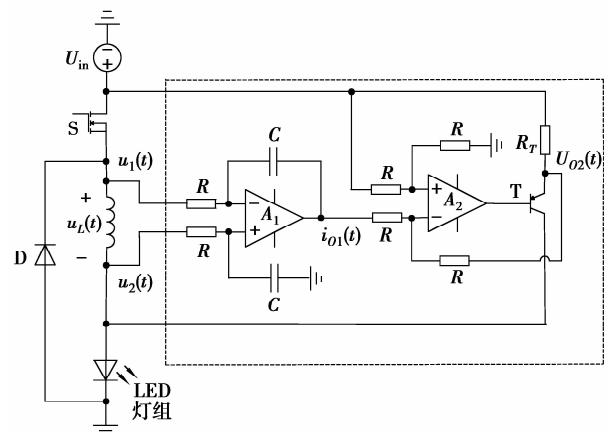


图 2 纹波电流检测补偿电路图

差分积分电路的输出电压为

$$u_{O1}(t) = \frac{1}{RC} \int (u_2(t) - u_1(t)) dt = -\frac{1}{RC} \int u_1(t) dt$$

$$= -\frac{L}{RC} i_r(t) + U_{O1}. \quad (3)$$

由后级减法电路可知:

$$u_{O2}(t) = U_{in} - u_{O1}(t). \quad (4)$$

进而得到三极管 T 中的补偿电流为

$$i_c(t) = \frac{U_{in} - u_{O2}(t)}{R_T} = \frac{u_{O1}(t)}{R_T}. \quad (5)$$

将式(3)代入式(5)得到补偿电流的表达式为

$$i_c(t) = \frac{U_{O1}}{R_T} - \frac{L}{R_T RC} i_r(t)$$

$$= \frac{L}{R_T RC} \left(\frac{RC}{L} U_{O1} - i_r(t) \right). \quad (6)$$

由式(6)可知,补偿电流 $i_c(t)$ 包含一个交流分量和一个直流分量。当选择合适的电路元件参数使得 $L/R_T RC=1$ 时,补偿电流可表示为

$$i_c(t) = \frac{RC}{L} U_{O1} - i_r(t)$$

$$= I_C - i_r(t). \quad (7)$$

由式(7)可以看出,此时补偿电流的交流分量与电感纹波电流呈负比例关系,即 $i_c(t) = -i_r(t)$,实现了电感纹波电流的全补偿,补偿波形如图3所示。

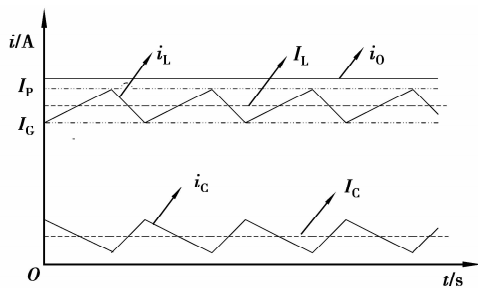


图3 电感电流补偿示意图

由波形图可得电感直流分量 I_L 的表达式为

$$I_L = \frac{1}{2} (I_P + I_G), \quad (8)$$

其中 I_P 和 I_G 分别为电感电流的峰值和谷值。由式(7)可知补偿电流直流分量为

$$I_C = \frac{RC}{L} U_{O1}. \quad (9)$$

补偿电路三极管 T 上的能量损耗为

$$P_{LOSS} = i_c U_{CE} = (1-D) U_{in} I_C. \quad (10)$$

为了减少补偿电路的能耗,提高电源效率,应该使 I_C 的值尽量小。 I_C 的临界最小值为

$$I_C = \frac{1}{2} (I_P - I_G). \quad (11)$$

结合式(8)、(9)和(11),得到运放 A_1 输出的直

流分量 U_{O1} 和 LED 上的直流 I_O 分别为

$$U_{O1} = \frac{L}{2RC} (I_P - I_G), \quad (12)$$

$$I_O = I_L + I_C = I_P. \quad (13)$$

从以上推导可以看出,纹波补偿电路将电感纹波电流完全补偿,使得通过 LED 的电流为恒定直流,其值为 I_P 。

为求取 I_P 的表达式,对传统 Buck 电路进行分析,其电感上的平均电流和纹波分别为

$$I_{L_avg} = \frac{DU_{in}}{R_{eq}}, \quad (14)$$

$$\Delta i_L = \frac{U_{in}(1-D)DT_s}{2L}. \quad (15)$$

式中: D 为开关占空比; T_s 为开关周期; R_{eq} 为 LED 的直流等效电阻。由此可以得到 I_P 的表达式为

$$I_P = I_{L_avg} + \Delta i_L$$

$$= \frac{U_{in} D (2L + (1-D) T_s R_{eq})}{2L R_{eq}}. \quad (16)$$

2 有源纹波补偿 Buck 电路建模

2.1 三端开关器件模型

基于三端开关器件模型建立电路的小信号模型^[16-18]。所谓三端开关器件模型就是把变换器的开关管和二极管作为整体看成一个三端开关器件,用其端口的平均电压、平均电流的关系来表征,然后把它适当地嵌入到具体的变换器中,构成平均值等效电路。如图4所示: a 端为有源端, p 端为无源端, b 端为公共端。

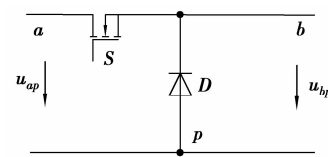


图4 三端开关器件示意图

根据平均开关网络法等理论对开关变换器进行建模可得到 PWM 开关的等效电路模型,如图5所示(R 为等效负载)。令电路中参数的扰动量为零,可得到其直流工作模型;若令电路直流分量为零,则可得到其小信号工作号模型。

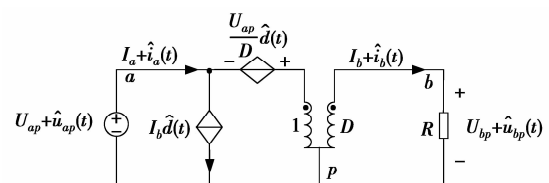


图5 三端开关器件等效模型

2.2 有源纹波补偿 Buck 电路模型

将三端开关器件的等效模型代入到有源纹波补偿 Buck 电路中,得到相应的等效电路模型。如图 6 所示,其中 R_{eq} 为负载 LED 的等效电阻。

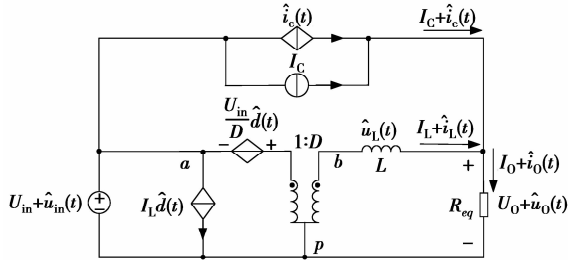


图 6 有源纹波补偿 Buck 等效电路模型

3 电路小信号模型分析

为了求得电路的传递函数,以分析电路的动态特性,令有源纹波补偿 Buck 电路等效模型中的直流分量为零,并将其转化到复频域,得到其交流小信号模型,如图 7 所示。

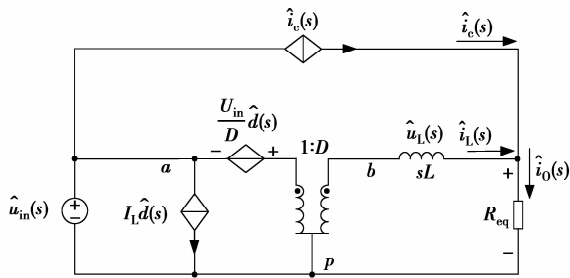


图 7 电路小信号模型

图中 $\hat{i}_c(s)$ 为电感电压 $\hat{u}_L(s)$ 控制的电流源,在复频域下将式(3)代入式(5)中可以得到 $\hat{i}_c(s)$ 的表达式为

$$\hat{i}_c(s) = -\frac{1}{sR_T RC} \hat{u}_L(s) \quad (17)$$

由图 7 所示小信号模型可知:

$$\hat{i}_L(s) = \frac{\hat{u}_L(s)}{sL} \quad (18)$$

$$\hat{i}_O(s) = \hat{i}_c(s) + \hat{i}_L(s) \quad (19)$$

$$D\hat{u}_{in}(s) + U_{in}\hat{d}(s) = \hat{u}_L(s) + \hat{i}_O(s)R_{eq} \quad (20)$$

由上述方程式可知,电路中引入扰动量的参数是输入电压和占空比;输出电流由电感电流和补偿电流共同决定。因此,分别考虑各个扰动信号独立作用时的工作状况,得到电感电流、补偿电流关于输入电压及占空比的 4 个传递函数。进而得到电路的

传递函数框图,如图 8 所示。

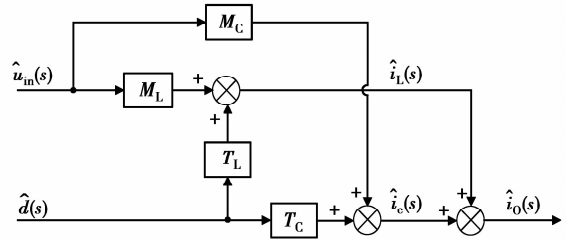


图 8 有源纹波补偿 Buck 电路传递函数框图

图 8 中各传递函数的意义如下:

M_L : 只有输入电压发生扰动时,电感电流对输入电压的传递函数:

$$M_L \equiv \left. \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{u}_{in}(s)} \right|_{\hat{d}(s)=0} = \frac{DR_T RC}{(R_T RC - L)R_{eq} + sLR_T RC} \quad (21)$$

M_C : 只有输入电压发生扰动时,补偿电流对输入电压的传递函数:

$$M_C \equiv \left. \frac{\hat{i}_c(s)}{\hat{u}_{in}(s)} \right|_{\hat{d}(s)=0} = -\frac{DL}{(R_T RC - L)R_{eq} + sLR_T RC} \quad (22)$$

T_L : 仅在占空比发生变化时,电感电流对占空比的传递函数:

$$T_L \equiv \left. \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{u}_{in}(s)=0} = \frac{U_{in}R_T RC}{(R_T RC - L)R_{eq} + sLR_T RC} \quad (23)$$

T_C : 仅在占空比发生变化时,补偿电流对占空比的传递函数:

$$T_C \equiv \left. \frac{\hat{i}_c(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{u}_{in}(s)=0} = -\frac{U_{in}L}{(R_T RC - L)R_{eq} + sLR_T RC} \quad (24)$$

由传递函数框图可得输出电流的表达式为

$$\hat{i}_O(s) = \frac{R_T RC - L}{(R_T RC - L)R_{eq} + sLR_T RC} (D\hat{u}_{in}(s) + U_{in}\hat{d}(s)) \quad (25)$$

根据式(25),分别求取输出电流对输入电压和占空比的传递函数,可以得到:

$$M(s) = \left. \frac{\hat{i}_O(s)}{\hat{u}_{in}(s)} \right|_{\hat{d}(s)=0} = \frac{D(R_T RC - L)}{(R_T RC - L)R_{eq} + sLR_T RC} = k_D \frac{1}{1 + sT} \quad (26)$$

$$T(s) = \left. \frac{\hat{i}_O(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{u}_{in}(s)=0} = \frac{U_{in}(R_T RC - L)}{(R_T RC - L)R_{eq} + sLR_T RC} = k_{in} \frac{1}{1 + sT} \quad (27)$$

其中比例系数 k_D, k_{in} 、时间常数 T 的表达式分别为

$k_D = D/R_{eq}$, $k_{in} = U_{in}/R_{eq}$, $T = LR_T RC/(R_T RC - L)R_{eq}$ 。由此可以看出传递函数 $M(s)$ 和 $T(s)$ 均为比例因子和一阶因子的乘积。一阶因子 $(1+sT)^{-1}$ 具有低通滤波特性,可以将输入信号中的高频成分衰减、滤除。用 Matlab 分析一阶因子 $(1+sT)^{-1}$ 幅频和相频特性,如图 9 所示。

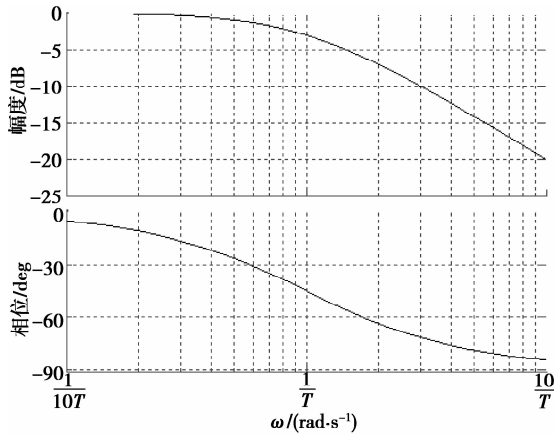


图 9 $(1+sT)^{-1}$ 的波特图

由图 9 可知设计电路时应使得时间常数 T 足够大,从而使得转折频率足够小,以增强传递函数的滤波效果。当选择电路元件参数使得 $R_T RC = L$ 时, T 趋向于无穷大,转折频率为 0。电路可将交流分量完全滤除,输出电流扰动 $\hat{i}_o(s) = 0$,此时电路输出电流将不受占空比和输入电压扰动的影响,输出电流为恒定直流。

4 仿真分析及实验验证

4.1 仿真分析

采用 PSIM 软件对图 2 所示的纹波补偿 Buck 电路进行仿真实验。主电路的参数设置为: $U_{in} = 12\text{ V}$, $L = 100\text{ }\mu\text{H}$, 开关频率 $f_s = 100\text{ kHz}$, 占空比 $D = 85\%$; 补偿电路的参数设置为: $R = 10\text{ k}\Omega$, $C = 0.01\text{ }\mu\text{F}$, $R_T = 1\text{ }\Omega$; LED 是非线性元件,为便于分析,在这里引入 LED 的等效电路模型^[8],如图 10 所示。根据照明 LED 的实际参数,仿真中设定 D 和 D_Z 的电压为: $U_D = 3.0\text{ V}$, $R_{LED} = 0.6\text{ }\Omega$ 。

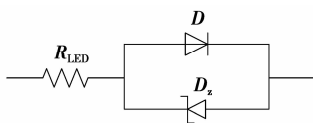
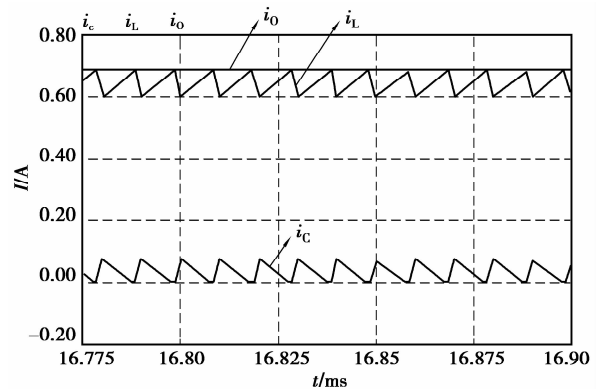


图 10 LED 等效电路模型

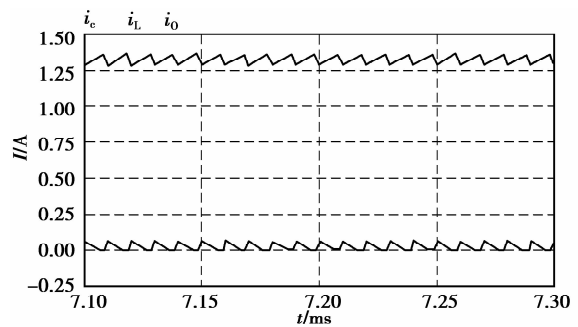
当负载为 3 个 LED 串联的灯组时,仿真得到电感电流、补偿电流和输出电流的波形如图 11(a) 所

示。由图可以看出 $i_c(t) = -i_r(t)$, 补偿电流将电感纹波电流完全补偿,输出为 0.67 A 的直流。

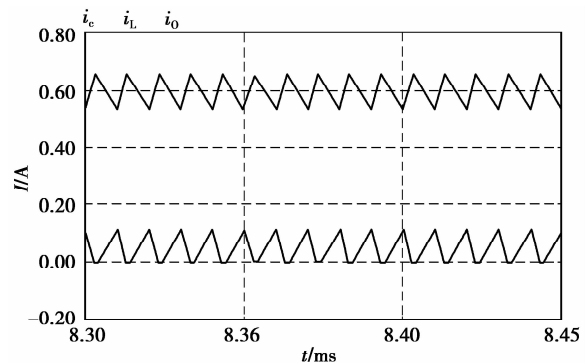
为了进一步验证该补偿电路的适应性,即在不同工况下的补偿效果,改变相关参数,进行后继仿真实验。将负载变为每串 3 个,两串并联的 LED 灯组,仿真得到如图 11(b) 所示的波形图,其中 $I_O = 1.33\text{ A}$; 将负载变为单个 LED, 占空比相应地变为原来的 $1/3$, 即 $D = 28.3\%$, 得到如图 11(c) 所示波形图,此时 $I_O = 0.66\text{ A}$ 。由此可见,在不同的工况下,随着相关参数的改变,主电路电感电流也相应改变,但补偿电路能够很好地跟随补偿电感电流,输出电流为恒定直流。因此,该补偿电路有较好的适应性。



(a) i_L , i_c 和 i_o 的波形 ($U_{in} = 12\text{ V}$, $D = 85\%$, 负载为 3 个 LED 串联)



(b) i_L , i_c 和 i_o 波形 ($U_{in} = 12\text{ V}$, $D = 85\%$, 负载为每串 3 个, 两串并联)

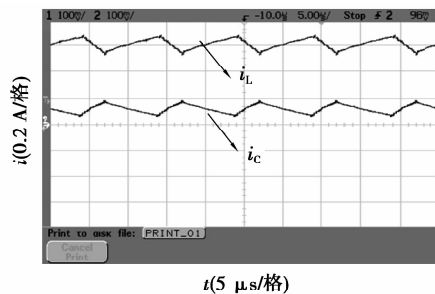


(c) i_L , i_c 和 i_o 的波形 (当 $U_{in} = 12\text{ V}$, $D = 28\%$, 负载为单个 LED)

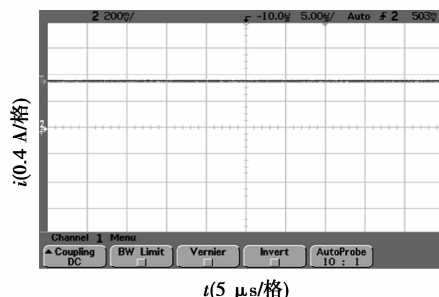
图 11 仿真结果波形图

4.2 实验验证

最后制作了该有源纹波补偿 Buck 电路的样机。主电路、纹波检测和补偿电路元件参数与仿真电路相同;负载 LED 灯组采用 3 个额定功率 $P_w = 3 \text{ W}$ 的大功率 LED 串联连接,每一个 LED 的导通电压范围为 $3.0 \sim 3.5 \text{ V}$,导通电流范围为 $0.6 \sim 1 \text{ A}$;控制电路采用 UC3843 峰值电流控制芯片,并附加射极跟随器实现斜坡补偿。实验结果如图 12 所示。图 12(a)是电感电流 i_L 和补偿电流 i_c 的波形,图 12(b)为电路输出电流 i_o 波形。实测输出电流为 $i_o = 0.73 \text{ A}$ 。在补偿电路上的损耗 $P_{\text{LOSS}} = 0.2 \text{ W}$,在补偿电路上的损耗较小,可以忽略。



(a) 电感电流与补偿电流波形



(b) 输出电流波形

图 12 实验波形图

5 结 语

有源纹波补偿 Buck 型 LED 驱动电源去掉了体积较大、使用寿命较短的电解电容,提高了电源的可靠性和使用寿命,也使之更易小型化和集成化。笔者介绍了该有源纹波补偿 Buck 电路的拓扑结构及工作原理,并在此基础上利用开关管的等效三端模型建立了有源纹波补偿 Buck 型拓扑的小信号模型。由小信号模型得到了输出电流表达式,进而推导出了输出电流关于输入电压及占空比的传递函数。用 Matlab 对传递函数的一阶因子进行幅频和相频特性分析,得到了实现电流纹波全补偿、获得直流输出的条件,即选择适当的元器件参数使 $R_T RC = L$ 。最后对该有源纹波补偿 Buck 电路进行了仿真和实验

验证。实验结果与理论分析及仿真结果基本一致,进一步证实了该新型电路的可行性及其小信号模型的正确性。

参考文献:

- [1] 廖志凌,阮新波. 半导体照明工程的现状与发展趋势[J]. 电工技术学报,2006,21(9):106-111.
LIAO Zhiling, RUAN Xinbo. Present status and developing trend of the semiconductor lighting [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(9):106-111.
- [2] Heffernan B, Frater L, Watson N. LED replacement for fluorescent tube lighting[C]// Proceedings of the 2007 Power Engineering Conference, AUPEC 2007, December 9-12, 2007, Perth, WA. Piscataway: IEEE Press, 2007:1-6.
- [3] 闫晓金,潘艳,陈永真. 开关电源对电解电容器性能的基本要求[J]. 电源世界,2008(4):63-65.
YAN Xiaojin, PAN Yan, CHEN Yongzhen. Basic requires of electrolytic capacitor performance by SMPS[J]. The World of Power Supply, 2008(4):63-65.
- [4] Heinz V D B, Georg S, Matthias W. Power driver topologies and control schemes for LEDs [C] // Proceedings of the 2007 Twenty Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference, February 25-March 1, 2007, Anaheim, CA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2007:1319-1325.
- [5] 裴倩,王正仕,陈辉明. 大功率 LED 驱动电源对光效的影响研究[J]. 电力电子技术,2010,44(3):55-56.
PEI Qian, WANG Zhengshi, CHEN Huiming. Luminous efficiency of ripple current power driving high power LED[J]. Power Electronics, 2010, 44(3):55-56.
- [6] Zhou J M, Yan W. Experimental investigation on the performance characteristics of white LEDs used in illumination application[C]// Proceedings of the 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 17-21, 2007, Orlando, FL. Piscataway: IEEE Press, 2007:1436-1440.
- [7] Han L, Narendran N. An accelerated test method for predicting the useful life of an LED driver[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011,26(8):2249-2257.
- [8] 沈海平. 大功率 LED 可靠性预测机制研究[D]. 杭州:浙江大学博士学位论文,2008.
- [9] Meneghini M, Trevisanello L R, Meneghesso G, et al. A review on the reliability of gan-based LEDs[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2008, 8(2):323-331.

(下转第 76 页)

- Molecular vibrational temperature in Ar/Air dielectric barrier discharge [J]. *Journal of Hebei University; Natural Science Edition*, 2005, 25(6):595-598.
- [15] 董丽芳, 齐玉妍, 高瑞玲, 等. 中等 pd 值介质阻挡放电中等离子体温度研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(11):2175-2177.
- DONG Lifang, QI Yuyan, GAO Ruiling, et al. Study on plasma temperature in dielectric barrier discharge at the middle value of pd[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, 27(11):2175-2177.
- [16] 齐玉妍, 董丽芳, 赵增超. 介质阻挡放电中不同斑图的微放电通道中分子振动温度研究[J]. *河北大学学报: 自然科学版*, 2007, 27(增刊):204-207.
- QI Yuyan, DONG Lifang, ZHAO Zengchao. Investigation of molecular vibrational temperature of individual microdischarge channel in patterns in dielectric barrier discharge [J]. *Journal of Hebei University; Natural Science Edition*, 2007, 27(Sup): 204-207.
- [17] 刘锋. 介质阻挡放电电子激发温度、分子振动温度研究[D]. 河北:河北大学, 2006.
- [18] 张家良. 低温等离子体发射光谱学研究[D]. 大连:大连理工大学, 2002.
- [19] 董丽芳, 刘峰, 李树锋, 等. 大气压氩气/空气介质阻挡放电中分子振动温度[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, 26(5):802-804.
- DONG Lifang, LIU Feng, LI Shufeng, et al. Measurement of molecular vibrational temperature in dielectric barrier discharge in argon/air at atmospheric pressure [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, 26(5):802-804.
- [20] 董丽芳, 李永辉, 陈文军, 等. 空气介质阻挡放电中氮分子离子的转动温度研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(12):2406-2408.
- DONG Lifang, LI Yonghui, CHEN Wenjun, et al. Measurement of N_2^+ rotational temperature in air dielectric barrier discharge [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, 27(12):2406-2408.
- [21] Phillips D M. Determination of gas temperature from unresolved bands in the spectrum from a nitrogen discharge[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1975, 9(3):507-521.
- (编辑 王维朗)
-
- (上接第 70 页)
- [10] Pang H M, Bryan P M H. A life prediction scheme for electrolytic capacitors in power converters without current sensor[C]// *Proceedings of the 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, February 21-25, 2010, Palm Springs, CA. Piscataway: IEEE Press, 2010: 973-979.
- [11] Qin Y X, Chung H S H, Lin D Y, et al. Current source ballast for high power lighting emitting diodes without electrolytic capacitor [C] // *Proceedings of the 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, November 10-13, 2008, Orlando, FL. Piscataway: IEEE Press, 2008:1968-1973.
- [12] Gu L L, Ruan X B, Xu M, et al. Means of eliminating electrolytic capacitor in AC/DC power supplies for LED lightings[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, 24(5): 1399-1408.
- [13] Tang Z D, Wang G T, Xie X H, et al. White LED power supply based on buck converter with active ripple compensation [C] // *Proceedings of the 2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks*, April 16-18, 2011, Xianning, Hubei, China. Piscataway: IEEE Press, 2011: 943-946.
- [14] 唐治德, 王官涛, 杨红, 等. 一种新颖的 BUCK 型 LED 驱动电路[J]. *电气应用*, 2011, 30(6):45-48.
- TANG Zhide, WANG Guantao, YANG Hong, et al. A novel buck circuit for LED [J]. *Electrotechnical Application*, 2011, 30(6):45-48.
- [15] Dallago E, Passoni M, Sassone G. Lossless current sensing in low-voltage high-current DC/DC modular supplies [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2000, 47(6): 1249-1252.
- [16] Erickson R W, Maksimovic D. *Fundamentals of power electronics*[M]. 2nd ed. New York: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [17] 吴国营, 张波. 电流模式变换器的完整小信号模型及环路补偿[J]. *电工技术学报*, 2008, 23(10):83-87.
- WU Guoying, ZHANG Bo. Whole small signal model and compensation for regulators with current programmed mode [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2008, 23(10):83-87.
- [18] 杨明. 电感电流连续状态 BUCK 变换器的小信号分析[J]. *舰船电子对抗*, 2007, 30(2):72-75, 78.
- YANG Ming. Small signal analysis of BUCK converter in the state of continuous inductance current [J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2007, 30(2): 72-75, 78.
- (编辑 王维朗)