

文章编号:1007-2985(2013)03-0039-06

基于多环控制的 Buck-Boost 型 LED 驱动系统设计*

李勇智,王 玲,黄何平

(湖南师范大学物理与信息科学学院,湖南 长沙 410082)

摘 要:在 OCC(One Cycle Control)控制 Buck-Boost 型 LED 照明驱动的基础上提出一种多环控制策略,设计了 Buck-Boost 型高效 LED 照明驱动系统,重点阐述多环控制策略原理,建立系统模型,并分析了控制系统相关性能.系统仿真表明,新型多环控制系统具有功率因数高、输出阻抗低、动态性能好等性能,达到了预期目标.

关键词:LED 照明;Buck-Boost;多环控制;小信号模型;功率因数

中图分类号:TP311;TM464

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1007-2985.2013.03.009

LED 照明具有节能、高效、寿命长、环保等特点,是从白炽灯、荧光灯到高压气体放电灯之后的又一场照明光源革命^[1],也是“绿色照明”理念和半导体发光技术相结合的产物^[2].LED 照明的发展对消费类电子、汽车电子、信息产业及光电子产业产生很大的推动作用,LED 照明的兴起已是 21 世纪照明消费产品的大势所趋^[3],LED 照明驱动控制系统的高效性、快速响应性、高功率因数、稳定性等对该系统工作性能与设计提出了更高的要求.

常用的 OCC 控制 Buck-Boost 型 LED 照明驱动如图 1 所示,其响应速度快,跟随控制能力和抗输入扰动能力较强,但由于滤波器性能的动态特性,整个驱动系统的输出电压波形会受到外界因素干扰,从而降低了驱动变换器的动态性能^[4].

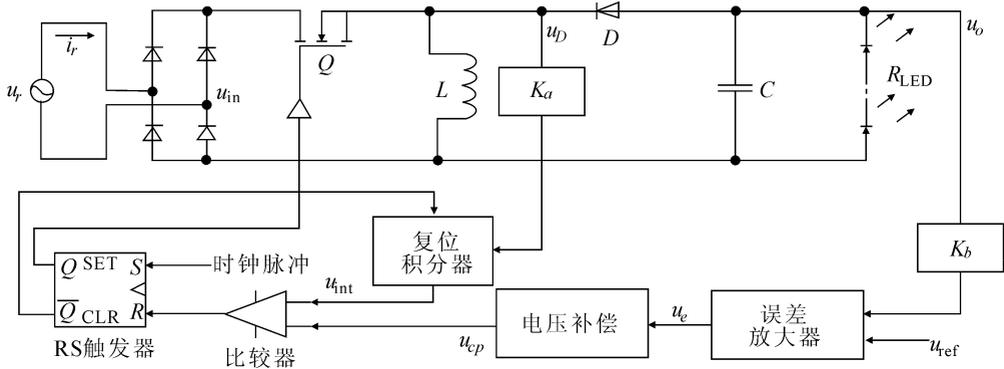


图 1 OCC 控制 Buck-Boost 型 LED 照明驱动

1 LED 驱动系统工作原理

为了提高 Buck-Boost 型驱动系统的功率因数和动态性能,在 OCC 控制策略的基础上,提出了一种新

* 收稿日期:2013-04-11

基金项目:湖南省教育厅科学研究重点资助项目(12C1168)

作者简介:李勇智(1988-),男,湖南常德人,湖南师范大学硕士研究生,主要从事开关电源、LED 驱动、芯片设计及通信与信息技术处理等研究

通讯作者:王 玲(1962-),女,湖南师范大学物理与信息科学学院教授,博导,主要从事现代网通信技术和噪声电子学研究.

型多环控制方法,设计出多环控制 Buck-Boost 型 LED 照明驱动系统,如图 2 所示.与 OCC 控制 Buck-Boost 型 LED 照明驱动相比,结构上主要增加了由电压微分器、增益 K_c 及加法器组成的环路和 OCC 控制的 K_a, K_b 这 2 条环路,故称为多环控制.

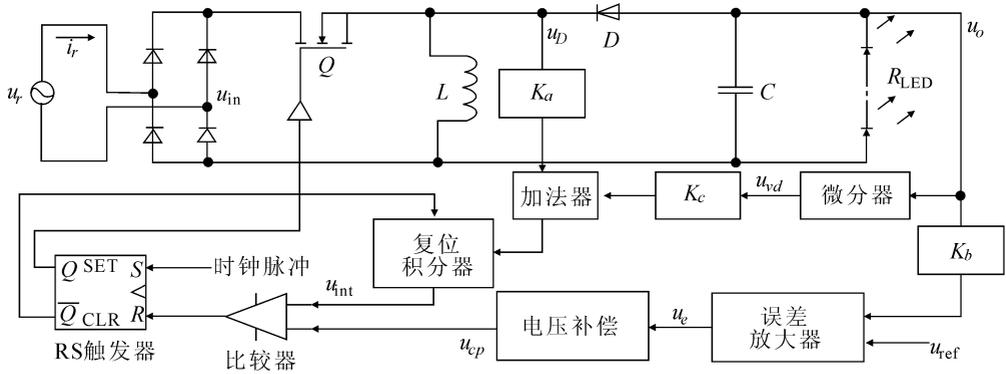


图 2 多环控制 Buck-Boost 型 LED 照明驱动

在图 2 中,交流输入电压为 u_r , 经过二极管整流后得到电压 u_{in} . 开关管 Q 由 RS 触发器控制,在时钟脉冲上升沿到来时,RS 触发器的同相端给开关管 1 个高电平,开关管导通. 输出电压 u_o 经过采样得到 1 个电压信号 $K_b u_o$, 该电压与参考电压信号 u_{ref} 共同输送给误差放大器. u_e 经过电压补偿得到信号 u_{cp} 之后再输送给比较器的反相端. 电压信号 u_D 经过采样得到的信号 $K_a u_D$ 再输送给加法器的 1 个输入端,加法器的另一个输入端是输出电压经过微分器、增益 K_c 后的电压信号 $K_c u_{vd}$, 加法器的输出端接到带复位开关的积分器上,积分器的输出端 u_{int} 与比较器的同相端相连,当积分电压信号 u_{int} 上升到补偿后的电压信号 u_{cp} 后,比较器输出高电平,RS 触发器复位,同相端输出低电平,开关管断开,反相端输出高电平,使复位积分器复位清零,直到下一个时钟脉冲到来,开关管再次导通.

2 LED 驱动系统模型

2.1 主电路小信号模型

采用状态空间平均法^[5]为 Buck-Boost 型大功率 LED 照明驱动主电路建模,取电感电流、电容电压为状态变量,输入输出电压分别为输入输出状态变量. Buck-Boost 型 LED 照明驱动主电路空间状态平均方程为

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_L \\ u_C \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 & \frac{1-D}{L} \\ -\frac{1-D}{C} & -\frac{1}{R_{LED}C} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L \\ u_C \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{D}{L} \\ 0 \end{pmatrix} u_{in}, \\ u_o &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L \\ u_C \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

其中: i_L 为电感电流; u_C 为电容电压; u_{in} 为输入电压; u_o 为输出电压; D 为导通占空比. 对各相关变量施加小信号扰动,去除二阶小信号部分,采用拉普拉斯变换可得传递函数为:

$$\begin{aligned} G_{ii} &= \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{u}_{in}(s)} = \frac{R_{LED}CDs + D}{R_{LED}LCs^2 + Ls + (R_{LED} - 2R_{LED}D + R_{LED}D^2)}, \\ G_{di} &= \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{(R_{LED}Cs + D + 1)U_{in}}{R_{LED}LC(1-D)s^2 + L(1-D)s + R_{LED}(1-D)^3}, \\ G_{io} &= \frac{\hat{u}_O(s)}{\hat{u}_{in}(s)} = \frac{R_{LED}D^2 - R_{LED}D}{R_{LED}LCs^2 + Ls + (R_{LED} - 2R_{LED}D + R_{LED}D^2)}, \\ G_{do} &= \frac{\hat{u}_O(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{[LDs - R_{LED}(1-D)^2]U_{in}}{R_{LED}LC(1-D)^2s^2 + L(1-D)^2s + R_{LED}(1-D)^4}. \end{aligned}$$

根据上述传递函数可以画出 Buck-Boost 型 LED 照明驱动系统主电路小信号模型如图 3 所示。

2.2 多环控制小信号模型

图 2 中的微分器由电阻 R_b 、电容 C_b 构成,则有

$$\frac{u_{vd}}{R_b} = C_b \frac{d(u_o - u_{vd})}{dt},$$

$$u_{int} = \frac{1}{T_{int}} \int_0^{dT_S} (K_a u_D + K_c u_{vd}) dt,$$

其中: u_{vd} 为电压微分器的输出电压; u_o 为输出电压; u_{int} 为积分电压; T_{int} 为积分时间; d 为导通占空比; T_S 为时钟脉冲周期; u_D 为反馈电压; K_a, K_b 为 2 条环路的增益. 令 $T_{int} = T_S$, 当开关管 Q 导通时, 反馈电压 u_D 等于输入整流电压 u_{in} , 并且当积分器的输出电压信号 u_{int} 等于电压补偿器的输出 u_{cp} 时, 比较器发生翻转, 输出高电平, RS 触发器复位, 开关管 Q 断开, RS 触发器的反相端使得带复位开关积分器复位清零, 则

$$u_{int} = (K_a u_{in} + K_c u_{vd}) d = u_{cp}. \tag{1}$$

对(1)式中的基本变量取小信号扰动, 去 2 阶小信号部分, 采用拉普拉斯变换可得

$$\hat{d}(s) = -\frac{D}{U_{in}} \hat{u}_{in}(s) + \frac{1}{K_a U_{in}} \hat{u}_{cp}(s) - \frac{K_c D R_b C_b s}{K_a U_{in} (1 + R_b C_b s)} \hat{u}_o(s),$$

其中

$$F_{in} = \frac{\hat{d}(s)}{\hat{u}_{in}(s)} = -\frac{D}{U_{in}}, F_{cp} = \frac{\hat{d}(s)}{\hat{u}_{cp}(s)} = \frac{1}{K_a U_{in}}, F_o = \frac{\hat{d}(s)}{\hat{u}_o(s)} = -\frac{K_c D R_b C_b s}{K_a U_{in} (1 + R_b C_b s)}.$$

多环控制 Buck-Boost 型 LED 照明驱动系统控制环节小信号模型如图 4 所示。

2.3 系统模型

结合 Buck-Boost 型 LED 照明驱动系统主电路小信号模型和多环控制小信号模型, 可以得到多环控制 Buck-Boost 型 LED 照明驱动系统模型如图 5 所示。

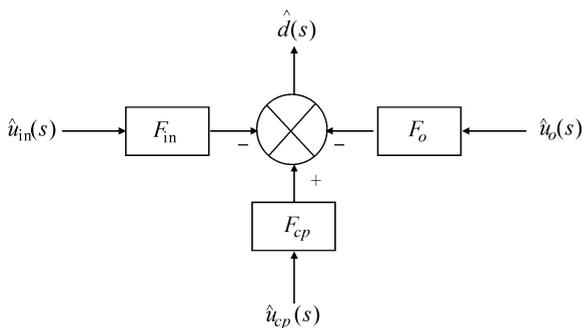


图 4 多环控制小信号模型

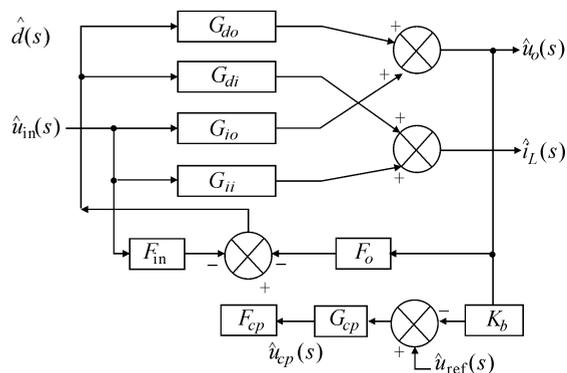


图 5 多环控制 Buck-Boost 型 LED 照明驱动系统模型

运用梅森公式^[6]化简可得输入输出传递函数为

$$G_{uio} = \frac{\hat{u}_o(s)}{\hat{u}_{in}(s)} = \frac{G_{io} - F_{in} G_{do}}{1 - F_o G_{do}} = 0, \tag{2}$$

从(2)式可以看出, 即使输入电压有一个较大的扰动, 输出电压也不会受到影响, 即多环控制 Buck-Boost 型 LED 照明驱动系统有较强的抗输入干扰能力. 多环控制 Buck-Boost 型 LED 照明驱动系统的控制输出传递函数和系统环路增益函数分别为:

$$G_{uco} = \frac{\hat{u}_o(s)}{\hat{u}_{cp}(s)} = \frac{(1 + R_b C_b s) [LDs - R(1 - D)^2]}{K_a (1 + R_b C_b s) [RLC(1 - D)^2 s^2 + L(1 - D)^2 s + R(1 - D)^4] + K_c D R_b C_b s [LDs - R(1 - D)^2]},$$

$$G_{loop} = K_b G_{cp} G_{uco} = \frac{K_b G_{cp} (1 + R_b C_b s) [LDs - R(1 - D)^2]}{K_a (1 + R_b C_b s) [RLC(1 - D)^2 s^2 + L(1 - D)^2 s + R(1 - D)^4] + K_c D R_b C_b s [LDs - R(1 - D)^2]}.$$

3 仿真分析

为了验证文中所提出的多环控制 Buck-Boost 型 LED 照明驱动系统的有效性与合理性,运用 MATLAB 中 Simulink, SimPowerSystems 工具^[7]分别建立 Buck-Boost 型 LED 照明驱动的主电路模型和多环控制模型,以输入、输出端口同名的形式连接,如图 6,7 所示. 主要电路参数:输入电压为 90~270 V(额定 220 V);开关频率为 100 kHz;输出电压为 40 V. 由示波器 Scope1 输出可得多环控制 Buck-Boost 型 LED 照明驱动系统的交流输入电压和输入电流波形,如图 8 所示. 从图 8 可以看出输入电压为 220 V、频率为 50 Hz 的正弦波,输入电流波形近似正弦,即输入电流很好地跟踪输入电压,总谐波失真小,功率因数高. 图 9 为示波器 Scope2 的系统输出电压波形,从图 9 可以看出,系统响应速度快,超调量较小,输出电压稳定为 -40 V,实现了反极性输出,符合输入与输出电压关系.

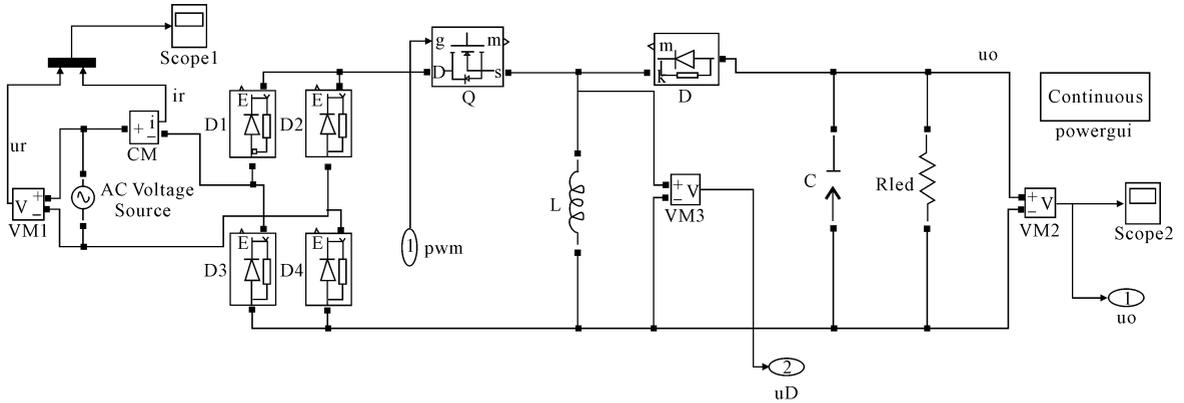


图 6 Buck-Boost 型 LED 照明驱动主电路模型

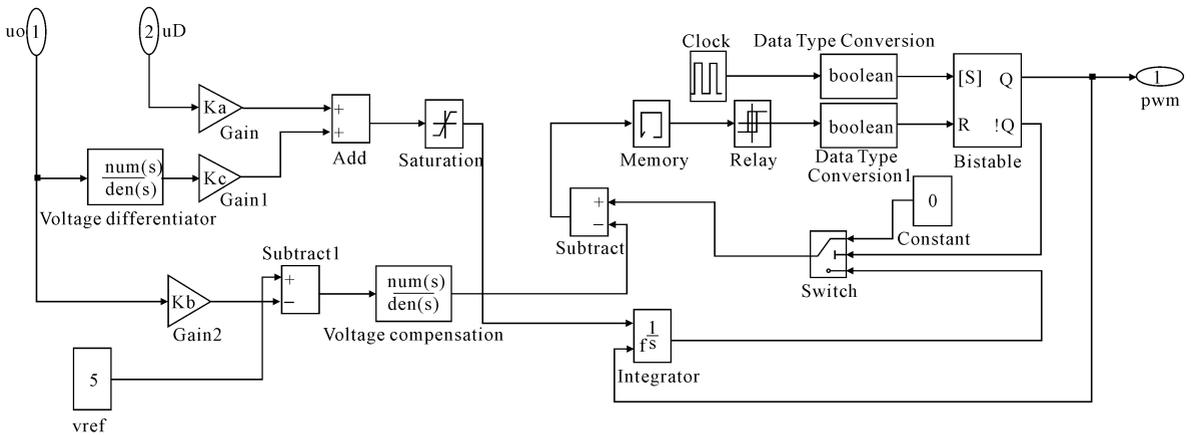


图 7 多环控制模型

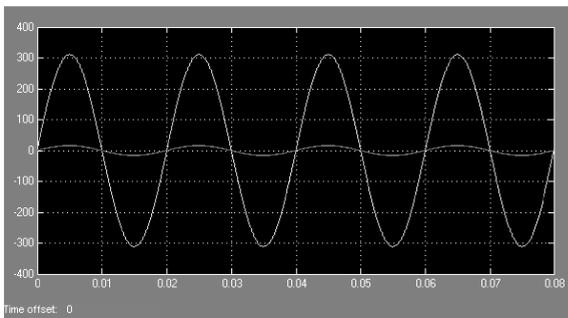


图 8 交流输入电压与电流波形

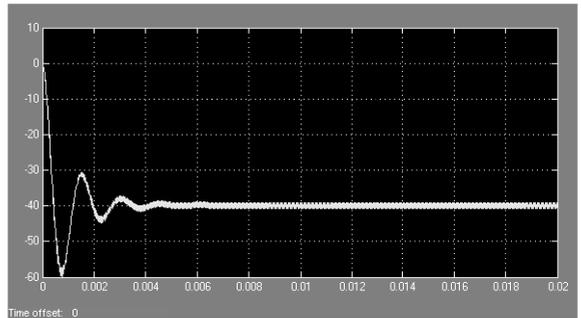


图 9 驱动系统输出电压波形

当 $t=0.01\text{ s}$ 时,在输入电压端施加一个幅值为 25 V、周期为 0.004 s 的方波电压信号扰动,如图 10 所示. 从图 10 可以看出,输入电压发生扰动,输出电压没有受到影响,继续保持稳定输出,和前面输入输出传递函数为 0 的分析结果完全吻合.

当 $t=0.01\text{ s}$ 时,使负载电流瞬间从 1 A 跳变到 0.8 A ,如图 11 所示.由此可知,当负载电流跳变时,输出电压波形也产生一个较大的跳变,但经过相当短的时间,输出电压就恢复稳定,因此,多环控制 Buck-Boost 型驱动系统具有良好的动态负载性能.

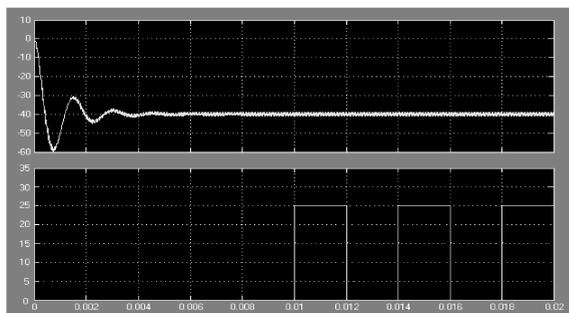


图 10 抗输入电压扰动分析

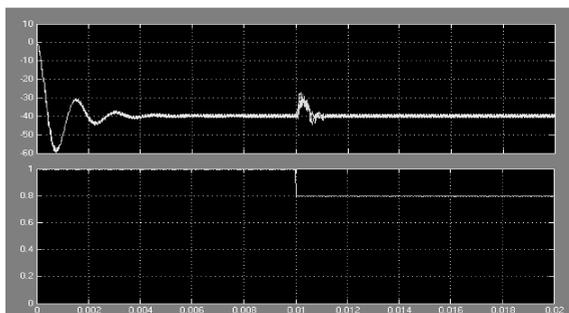


图 11 抗负载扰动能力分析

图 12 为 OCC 控制策略和多环控制策略下 Buck-Boost 型 LED 照明驱动功率因数与占空比的关系,可以看出,这 2 种控制策略在不同占空比下的功率因数均大于 0.9 ,并且多环控制策略的功率因数明显要高于 OCC 控制策略,并达到 0.99 .

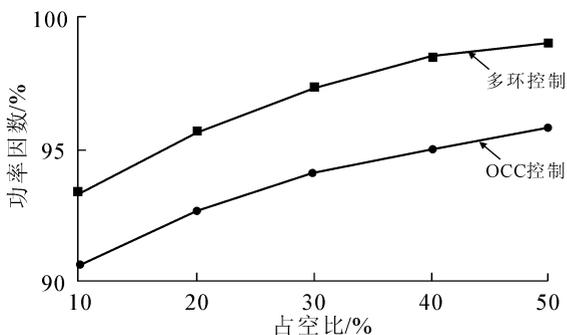


图 12 功率因数与占空比的关系

图 13 为 OCC 控制策略和多环控制策略 Buck-Boost 型 LED 照明驱动系统在宽输入电压范围下的功率因数.从图 13 可以看出,这 2 种策略在 $90\sim 270\text{ V}$ 宽输入电压范围内的功率因数均大于 0.92 ,并且多环控制策略的功率因数要高,从而体现了多环控制策略的优势.

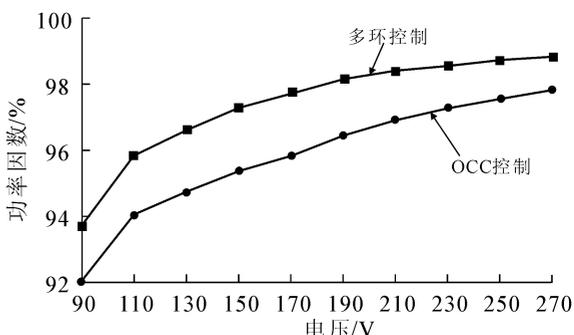


图 13 宽输入电压范围下的功率因数曲线

图 14 为输出阻抗特性.从图 14 可以看出,多环控制策略 Buck-Boost 型 LED 驱动的输出阻抗要比 OCC 控制策略小,因此,多环控制策略 Buck-Boost 型 LED 照明驱动系统受负载电流变化的影响小,动态负载特性好.

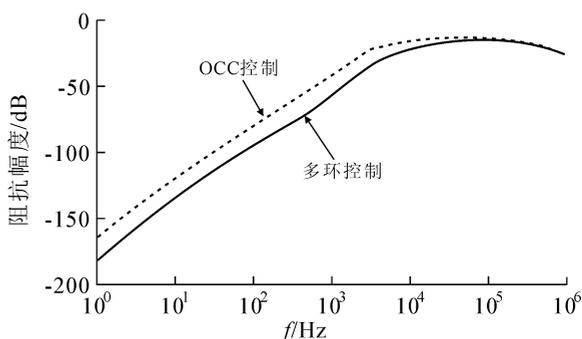


图 14 输出阻抗特性曲线

4 结语

在 OCC 控制 Buck-Boost 型 LED 照明驱动的基础上提出了一种多环控制策略,得到 Buck-Boost 型 LED 照明高效驱动系统,并在多环控制策略基本原理分析的基础上建立了主电路小信号模型、控制环节小信号模型及整个系统模型,通过 MATLAB 软件中 Simulink、SimPowerSystems 工具建模仿真可知:在多环控制 Buck-Boost 型 LED 照明驱动中,输入电流很好地跟踪输入电压,总谐波失真小,功率因数高,系统响应速度快,超调量较小,输出电压稳定在 -40 V ,具有很高的抗输入电压扰动和抗负载扰动能力.和 OCC 控制策略相比,多环控制策略下 Buck-Boost 型 LED 照明驱动在不同占空比和宽输入电压范围下功率因数均高(达到 0.99),从输出阻抗特性曲线可以看出,多环控制下输出阻抗小,动态负载性能要好.

参考文献:

- [1] TSAO J Y. Solid-State Lighting; Lamps, Chips and Material for Tomorrow [J]. IEEE Circuits Devices Magazine, 2009, 20(3): 28 - 37.
- [2] MEHTA R, DESHPANDE D, KULKARNI K. LEDs-A Competitive Solution for General Lighting Applications [J]. IEEE Energy, 2008(9): 1 - 5.
- [3] 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, 2011, 21(9): 106 - 111.
- [4] HWU K, CHOU S. A Simple Current-Balancing Converter for LED Lighting [J]. IEEE Applied Power Electronics, 2012, 16(2): 16 - 19.
- [5] 裴云庆, 杨旭, 王兆安. 开关稳压电源的设计和应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 87 - 90.
- [6] 黄坚. 自动控制原理及其应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 38 - 46.
- [7] 浦锡锋, 王宏华. 基于 MATLAB 的单周期控制 PFC Boost 变换电路建模与仿真 [J]. 电气技术与自动化, 2007, 63(6): 145 - 147.

Design of Buck-Boost LED Lighting Driver Based on Multi-Loop Control

LI Yong-zhi, WANG Ling, HUANG He-ping

(College of Physics and Information Science, Hunan Normal University, Changsha 410082, China)

Abstract: A multi-loop control strategy is proposed based on OCC (One Cycle Control)-controlled Buck-Boost LED lighting driver, and a novel efficient Buck-Boost LED lighting driver is obtained. The multi-loop control strategy principles are analyzed in detail, the system model is built and the control system performance is made in-depth studies. It can be seen through system simulations that the novel multi-loop control system has better performance such as high power factor, low output impedance and good dynamic performance, and it has achieved the desired goal.

Key words: LED lighting; Buck-Boost; multi-loop control; small signal model; power factor

(责任编辑 陈炳权)