

A Combined-Type Boost-Cuk Converter for LED Lighting System

Lin Wang, Jiayan Zhang, Xuefeng Hu

School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan
Email: 407285432@qq.com

Received: May 20th, 2014; revised: Jun. 19th, 2014; accepted: Jun. 28th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

A Combined-type Boost-Cuk converter for LED lighting system was proposed based on the combination of Boost and Cuk topologies. The converter using a switch can simultaneously achieve two kinds of output by sharing the branch of the input side of the two topologies mentioned. One of the outputs for the converter is Boost-type, and the other one is the Cuk-type. The voltage gain of the converter is improved with the output of Boost and Cuk topologies proposed in series connected. In order to control the output, only one controller can achieve the output in various ways. The simulation results are given to verify the consistence between the performance and theoretical analysis of the topology.

Keywords

LED Driver, DC/DC Converter, Topology, Boost, Cuk

一种用于LED照明中的组合式Boost-Cuk变换器

王琳, 章家岩, 胡雪峰

安徽工业大学, 电气与信息工程学院, 马鞍山
Email: 407285432@qq.com

收稿日期: 2014年5月20日; 修回日期: 2014年6月19日; 录用日期: 2014年6月28日

摘要

本文提出了一种基于Boost拓扑与Cuk拓扑有机组合思路的适用于LED照明系统中的组合式Boost-Cuk变换器，Boost环节与Cuk环节共用输入支路，使该变换器通过一个开关管同时实现两路输出，一路输出为Boost型，另一路输出为Cuk型。Boost环节与Cuk环节的输出串联，提高了该变换器的输出电压增益。为了灵活控制输出，只需一个控制器便可以实现多种方式的输出。仿真结果证明该拓扑结构性能与理论分析一致。

关键词

LED驱动，直流变换器，拓扑，Boost电路，Cuk电路

1. 引言

发光二极管(LED)是一种应用于光电子领域的低成本固态光源，具有光效高、寿命长和无污染等优点，现已广泛应用于汽车照明、液晶背光、交通灯以及通用照明[1]-[3]。LED驱动电源作为LED应用推广的重要保障，使得LED驱动技术的研究成为目前电力电子领域研究的热点之一[4]-[9]。目前单颗LED的功率和亮度还不是很高，难以满足应用领域的需求，从而采用将多颗LED按照需要排列组合，以满足较大范围、较高亮度、动态显示、色彩变换等应用要求[10]-[12]。串联方式要求LED驱动器输出较高的电压，并联方式要求驱动器输出较大的电流，因此，LED连接形式的多样性产生了LED负载与其驱动电源的匹配问题。开关变换器结构由于转换效率高，动态响应迅速，拓扑结构丰富以及反馈控制方式多样化，使得开关变换器结构用于驱动LED成为可能。

本文基于Boost拓扑与Cuk拓扑的有机组合，提出一种用于LED照明中的组合式Boost-Cuk变换器(Boost-Cuk Converter, BCC)拓扑(简称为新型组合式Boost-Cuk变换器)。该变换器既可实现不同类型的两路输出，也可以实现两路输出的串联输出。通过一个控制器便能实现对每一条输出支路的调节，从而可使每路分别驱动不同数量与不同类型的LED。

2. 新型组合式 Boost-Cuk 变换器的拓扑结构

图1表示新型组合式Boost-Cuk变换器拓扑结构,Boost变换器与Cuk变换器输入级具有相同的结构,

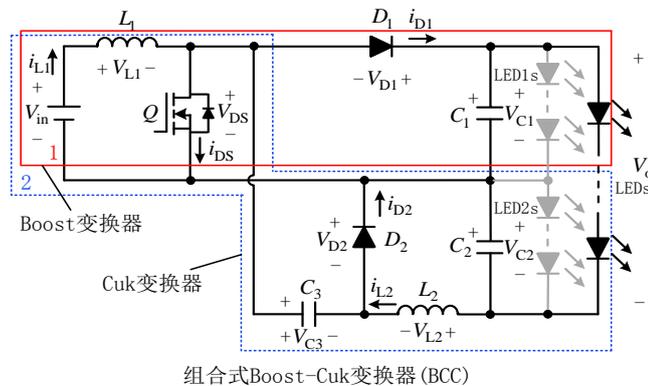


Figure 1. Topology of the proposed combined-type converter
图 1. 新型组合式变换器拓扑结构

将两个变换器的输入级共用、输出级串联则构成了 Boost-Cuk Converter(BCC)。图 1 中, 实线框 1 中为 Boost 变换器, 虚线框 2 中为 Cuk 变换器, 当输出端接发光二极管组合 LED1s、LED2s 时, 输出端为两路输出, 当接发光二极管组合 LEDs 时, 输出端为串联输出。

3. 工作原理分析

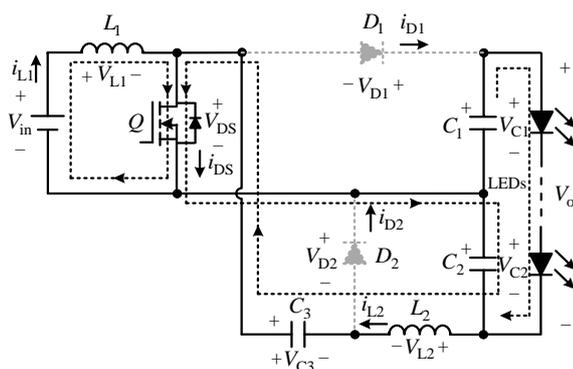
新型组合式 Boost-Cuk 变换器不仅可以实现类型不同的两路输出, 还可以实现两路输出的串联输出, 下面是以两路输出的串联输出为例进行的工作原理分析。

假设电感电流连续, 新型组合式 Boost-Cuk 变换器在一个开关周期内共有 2 个工作模式, 其等效电路如图 2(a)和(b)所示, 图 3 表示稳态工作时的关键波形。设 T_s 为开关周期, T_{on} 为一个开关周期内开关管的导通时间, T_{off} 为开关周期内开关管的截止时间, D 为功率开关管 Q 的导通占空比。其中, $T_{on} = DT_s$, $T_{off} = (1 - D)T_s$ 。

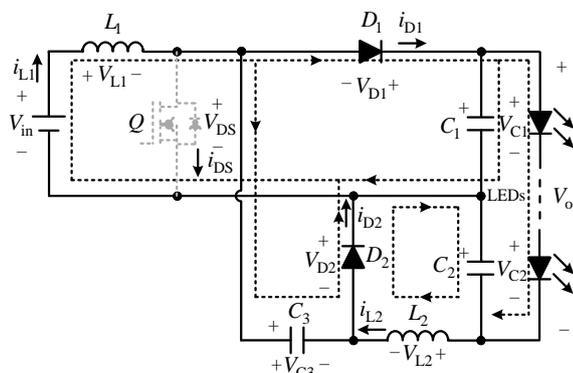
工作模式 I 的等效电路如图 2(a)所示, 开关管 Q 导通, 二极管 D_1 、 D_2 截止, 电源电压加到电感 L_1 上, 电容 C_3 通过开关管 Q 对电感 L_2 放电, 电感电流 i_{L_1} , i_{L_2} 均线性增加, 电感 L_1 、 L_2 两端电压分别为:

$$V_{L_1} = L_1 \frac{di_{L_1}}{dt} = V_{in} \quad (1)$$

$$V_{L_2} = L_2 \frac{di_{L_2}}{dt} = V_{C_3} - V_{C_2} \quad (2)$$



(a) 模式 I



(b) 模式 II

Figure 2. Equivalent circuits of the switching modes

图 2. 各模式的等效电路

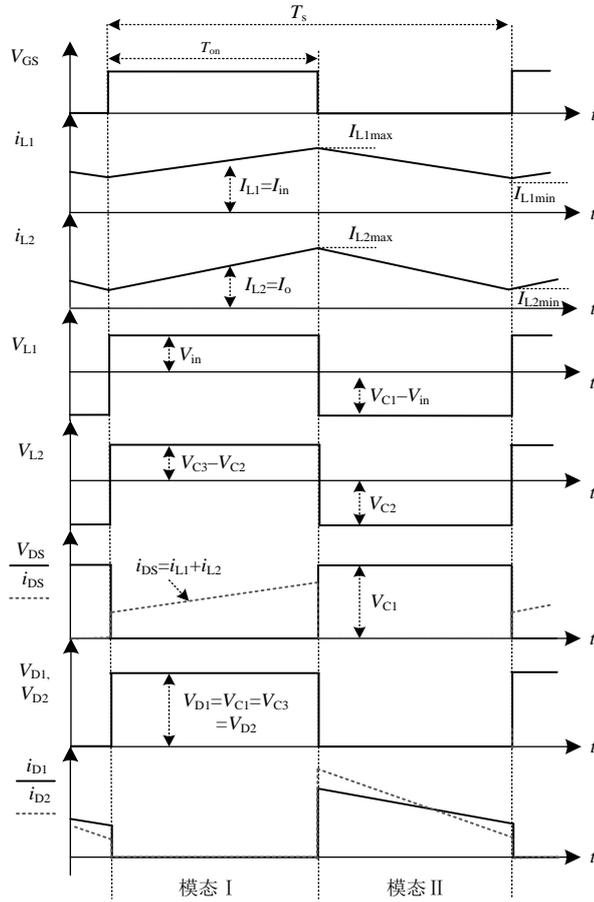


Figure 3. Key waveforms based on complementary control
图 3. 关键工作波形

当 $t = t_{on} = DT_s$ 时, i_{L1} 达到最大值 i_{L1max} , 在开关管 Q 导通期间, 电流 i_{L1} 的增量 $\Delta i_{L1} \uparrow$ 为:

$$\Delta i_{L1} \uparrow = \frac{V_{in}}{L_1} DT_s \quad (3)$$

与此同时, i_{L2} 也达到最大值 i_{L2max} , 电流 i_{L2} 的增量 $\Delta i_{L2} \uparrow$ 为:

$$\Delta i_{L2} \uparrow = \frac{V_{C3} - V_{C2}}{L_2} DT_s \quad (4)$$

此时, LEDs 由电容 C_1 、 C_2 供电, 开关管 Q 中流过的电流为:

$$i_{DS} = i_{L1} + i_{L2} \quad (5)$$

工作模态 II 的等效电路如图 2(b) 所示, 当开关管 Q 截止时, 二极管 D_1 、 D_2 导通, 电源和电感 L_1 同时释放能量, 一方面经二极管 D_1 向 LEDs 和电容 C_1 供电, 另一方面向电容 C_3 充电, 并同电感 L_2 经二极管 D_2 向电容 C_2 充电。电感电流 i_{L1} , i_{L2} 均线性下降, 电感 L_1 、 L_2 两端电压分别为:

$$V_{L1} = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = V_{C1} - V_{in} = V_{C3} - V_{in} \quad (6)$$

$$V_{L2} = L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = V_{C2} \quad (7)$$

此时，流过二极管 D_2 的电流为：

$$i_{D_2} = i_{C_3} + i_{L_2} \quad (8)$$

在开关管 Q 截止期间，电感 L_1 中电流 i_{L1} 的减小量 $\Delta i_{L_1} \downarrow$ 为：

$$\Delta i_{L_1} \downarrow = \frac{V_{C_3} - V_{in}}{L_1} (1-D) T_s \quad (9)$$

由于电感 L_2 释放能量，所以流过 L_2 的电流减小，在此期间其减小量 $\Delta i_{L_2} \downarrow$ 为：

$$\Delta i_{L_2} \downarrow = \frac{V_{C_2}}{L_2} (1-D) T_s \quad (10)$$

由此可见，该电路当 $D > 0.5$ 时，可以实现 Boost 环节和 Cuk 环节同时升压；而当 $D < 0.5$ 时，可以实现 Boost 环节升压的同时 Cuk 环节降压。

4. 稳态工作性能分析

4.1. 稳态电压增益

根据电感 L_1 的伏秒平衡原理，得出以下等式：

$$V_{in} D T_s = (V_{C_1} - V_{in}) (1-D) T_s \quad (11)$$

$$V_{in} D T_s = (V_{C_3} - V_{in}) (1-D) T_s \quad (12)$$

由式(11)，(12)，得出电容 C_1 、 C_3 两端电压：

$$V_{C_1} = V_{C_3} = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (13)$$

根据电感 L_2 的伏秒平衡原理，得出以下等式：

$$(V_{C_3} - V_{C_2}) D T_s = V_{C_2} (1-D) T_s \quad (14)$$

由式(14)得到电容 C_2 两端电压：

$$V_{C_2} = D V_{C_3} = \frac{D}{1-D} V_{in} \quad (15)$$

$$V_o = V_{C_1} + V_{C_2} \quad (16)$$

结合式(13)，(15)及(16)，可推导出该变换器的稳态电压增益：

$$M = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{I_{in}}{I_o} = \frac{1+D}{1-D} \quad (17)$$

图 4 给出了组合式 Boost-Cuk、Boost 以及 Cuk 变换器电压增益与占空比的关系图，从图中可以看出组合式 Boost-Cuk 变换器的电压增益比 Boost 和 Cuk 变换器的电压增益相比，不仅实现输出电压的高增益，而且适用于低压输入源与 LED 相结合的照明系统(如 LED 光伏照明系统)中。

4.2. 器件电压及电流应力

开关管 Q 和二极管 D_1 、 D_2 在截止时承受的电压为：

$$V_{DS} = \frac{V_{in}}{1-D} = \frac{V_o}{1+D} \quad (18)$$

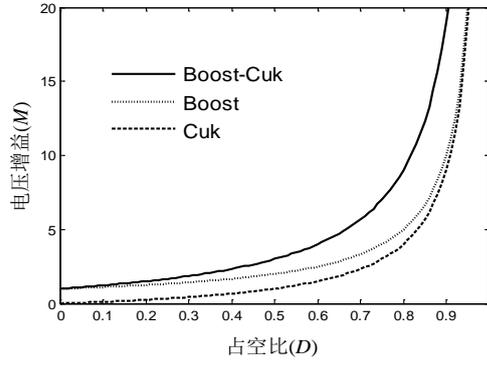


Figure 4. Voltage gain versus duty cycle
图 4. 电压增益与占空比的关系图

$$V_{D_1} = V_{D_2} = \frac{V_{in}}{1-D} = \frac{V_o}{1+D} \quad (19)$$

当开关管导通结束时其电流达到最大值 I_{DSmax} 为:

$$I_{DSmax} = I_{L_1max} + I_{L_2max} \quad (20)$$

电感 L_1 、 L_2 电流达到最大值 I_{L_1max} 、 I_{L_2max} 分别为:

$$I_{L_1max} = I_{in} + \frac{1}{2}\Delta I_{L_1} = \frac{1+D}{1-D}I_o + \frac{V_{in}D}{2L_1f_s} \quad (21)$$

$$I_{L_2max} = I_o + \frac{1}{2}\Delta I_{L_2} = I_o + \frac{V_{in}D}{2L_2f_s} \quad (22)$$

由式(20)、(21)及(22), 开关管电流的最大值 I_{DSmax} 表达式为:

$$I_{DSmax} = \frac{2}{1-D}I_o + \frac{V_{in}D}{2f_sL_d} \quad (23)$$

式中等值电感 $L_d = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}$ 。

由于在一个开关周期中, 流经电容的电流平均值为零, 同时结合图2(b), 可以得出以下关系式:

$$\frac{1}{2}I_{D_1max}(1-D)T_s = I_oT_s \quad (24)$$

由式(24), 可知二极管 D_1 电流最大值 I_{D_1max} 为:

$$I_{D_1max} = \frac{2I_o}{(1-D)} \quad (25)$$

根据图 2(b)可知,

$$I_{D_2max} = I_{L_1max} - I_{D_1max} + I_{L_2max} \quad (26)$$

由式(21)-(22)及(25)-(26), 可知二极管 D_2 电流最大值 I_{D_2max} 为:

$$I_{D_2max} = \frac{V_{in}D}{2f_sL_d} \quad (27)$$

式中等值电感 $L_d = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}$ 。

5. 仿真结果

为验证理论分析的有效性, 对新型组合式 Boost-Cuk 变换器进行仿真, 电路仿真参数如表 1 所示, 考虑到该变换器适用于低压输入源与 LED 相结合的照明系统中, 因此输入电压选为低电压。图 5 给出了

Table 1. Parameters of the main prototype
表 1. 主要电路参数

变量	数值
输入电压 V_{in}	9~16 V
输出电压 V_o	48 V
电感 L_1	1 mH
电感 L_2	0.5 mH
电容 C_1, C_2, C_3	$C_1 = 300 \mu\text{F}, C_2 = 300 \mu\text{F}, C_3 = 150 \mu\text{F}$
开关频率 f_s	20 kHz

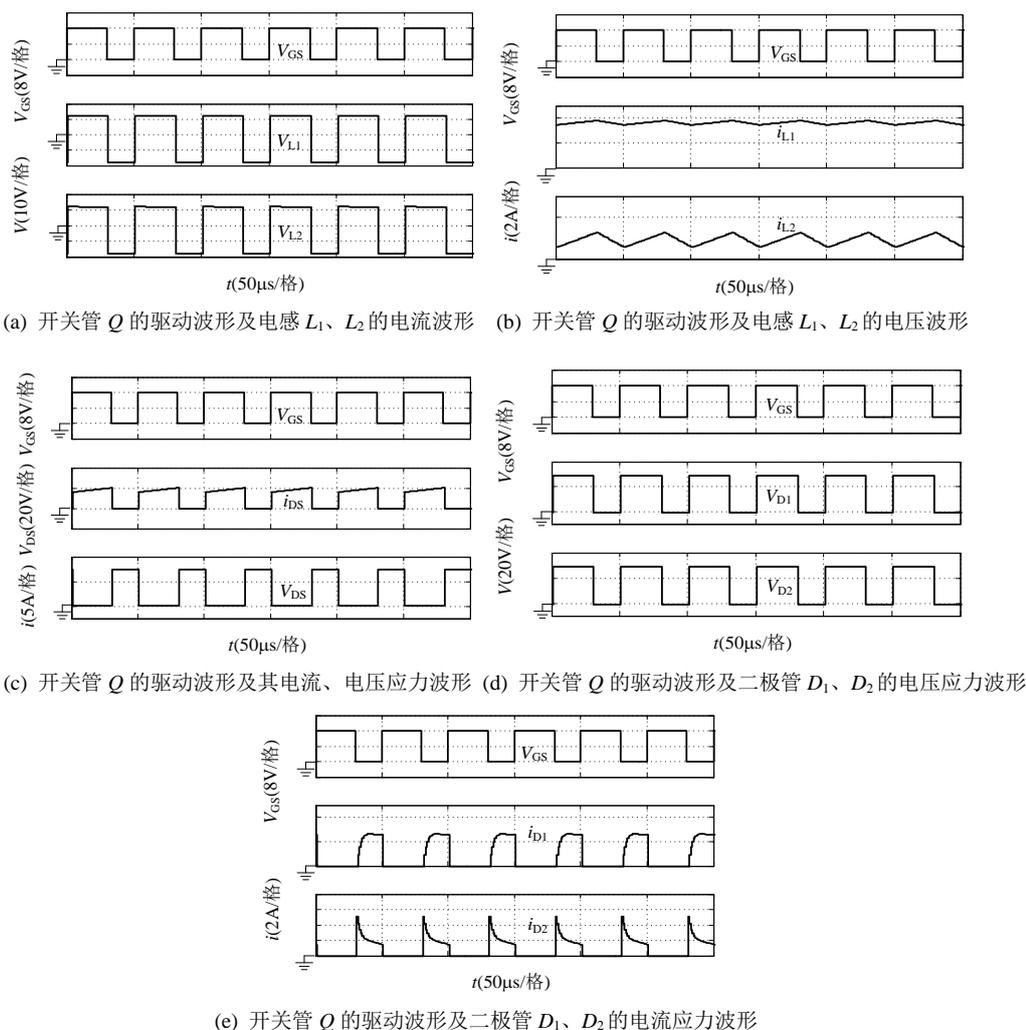


Figure 5. Simulation waveforms
图 5. 仿真波形

新型组合式 Boost-Cuk 变换器的仿真波形, 图 5(a)中分别为开关管 Q 的驱动波形及电感 L_1 、 L_2 的电压波形, 可以看出, 电感 L_1 、 L_2 上的电压近似相等; 图 5(b)中分别为开关管 Q 的驱动波形及流过电感 L_1 、 L_2 的电流波形, 由图可知, 流经电感 L_1 的电流纹波(即输入电流纹波)较低; 图 5(c)分别为开关管 Q 的驱动波形及其对应的电流、电压应力波形, 可以看出, 开关电压应力近似等于输出电压 V_o 的 $5/8$; 图 5(d)中分别为开关管 Q 的驱动波形及二极管 D_1 、 D_2 的电压应力波形, 二极管 D_1 、 D_2 上的电压应力与开关管的电压应力一致近似等于输出电压 V_o 的 $5/8$; 图 5(e)中分别为开关管 Q 的驱动波形和二极管 D_1 、 D_2 的电流应力波形。仿真结果与上述理论分析一致, 验证了该拓扑结构的正确性和有效性。

6. 结论

针对 LED 驱动及其照明等相关系统的特点, 本文提出了一种用于 LED 照明中的组合式 Boost-Cuk 变换器拓扑结构, 并对该变换器的工作原理及稳态特性进行了详细分析。该变换器具有两个特点, 特点一是 Boost 环节和 Cuk 环节共用输入支路, 可以通过一个开关管同时实现两种类型的两路输出; 特点二是该变换器输出端采用串联结构, 实现了变换器的高电压增益。最后通过仿真验证了理论分析的正确性。该电路结构可用于 LED 驱动及照明其相关系统中, 如光伏发电产生多种电压等级的直流照明系统中。

参考文献 (References)

- [1] Hu, Y.Q. and Jovanovic, M.M. (2008) A Novel LED Driver with Adaptive Drive Voltage. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Texas, 24-28 February 2008, 565-571.
- [2] 廖志凌, 阮新波 (2006) 半导体照明工程的现状与发展趋势. *电工技术学报*, **21**, 106-111.
- [3] Krames, M.R., Shchekin, O.B. and Mueller, M.R. (2007) Status and future of high-power light-emitting diodes for solid-state lighting. *Journal of Display Technology*, **3**, 160-175.
- [4] Chuang, Y.C., Ke, Y.L., Chuang, H.-S. and Hu, C.-C. (2010) Single-stage power-factor-correction circuit with flyback converter to drive LEDs for lighting applications. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Houston, 3-7 October 2010, 1-9.
- [5] Patterson, J. and Zane, R. (2008) Series input modular architecture for driving multiple LEDs. *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Rhodes, 15-19 June 2008, 2650-2656.
- [6] Hu, Y.Q., Huber, L. and Jovanovic, M. (2009) Single stage flyback power factor correction front-end for HB LED application. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Houston, 4-8 October 2009, 1-8.
- [7] Van Der Broeck, H., Sauerlander, G. and Wendt, M. (2007) Power driver topologies and control schemes for LEDs. *IEEE Applied Power Electronics Conference*, California, 25 February 2007-1 March 2007, 1325.
- [8] Wang, B.B., Ruan, X.B. and Yao, K. (2010) A method of reducing the peak to average ratio of LED current for electrolytic capacitor less AC-DC drivers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **25**, 592-601.
- [9] Arias, M., Lamar, D.G., Linera, F.F., Balocco, D., Diallo, A.A. and Sebastia, J. (2012) Design of a soft-switching asymmetrical half-bridge converter as second stage of an LED driver for street lighting application. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **27**, 1608-1621.
- [10] Hu, Y. and Jovanovic, M.M. (2008) LED driver with self-adaptive drive voltage. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **23**, 3116-3125.
- [11] 毛兴武, 张艳雯, 周建军 (2008) 新一代绿色光源 LED 及其应用技术. 人民邮电出版社, 北京, 233-266.
- [12] 杨光 (2007) LED 应用的连接形式及特点. *灯与照明*, **31**, 34-36.