

电容电流纹波控制 Buck LED 恒流驱动器研究

张留洋, 徐利梅, 黄影, 王瑶

(西南民族大学 电气工程学院, 四川 成都 610041)

摘要: 为了提高 Buck LED 恒流驱动器的负载瞬态响应速度, 提出了电容电流纹波控制 (capacitive current ripple-controlled, CCRC) Buck LED 恒流驱动器。基于 Buck LED 恒流驱动器的工作原理, 采用状态空间平均法建立了其状态空间平均模型。在此基础上, 结合 CCRC Buck LED 恒流驱动器的工作原理, 建立了其小信号模型, 推导了系统的控制-输出环路增益传递函数, 设计了控制电路的 PI 补偿参数。基于伯德图, 与传统电压型控制 (voltage mode controlled, VMC) Buck LED 恒流驱动器的负载瞬态响应速度进行了对比分析。研究结果表明: 相比于 VMC Buck LED 恒流驱动器, CCRC Buck LED 恒流驱动器的负载瞬态响应速度更快。最后, 时域仿真和实验结果验证了理论分析的正确性。

关键词: Buck LED 恒流驱动器; 电容电流纹波控制; 小信号模型; 补偿参数; 瞬态响应

中图分类号: TM46 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd23445

Study on Capacitive Current Ripple-controlled Buck LED Constant Current Driver

ZHANG Liuyang, XU Limei, HUANG Ying, WANG Yao

(College of Electrical Engineering, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: In order to improve the load transient response speed of Buck LED constant current driver, a capacitive current ripple-controlled (CCRC) Buck LED constant current driver was proposed. Based on the operating principle of Buck LED constant current driver, the state space averaging model of Buck LED constant current driver was established by using the state space averaging method. On this basis, combined with the operating principle of the CCRC Buck LED constant current driver, a small signal model of the driver was established. The control-output loop gain transfer function of the system was deduced, and the PI compensation parameters of the control circuit were designed. Comparing analysis with the load transient response speed of traditional voltage mode controlled (VMC) Buck LED constant current driver was presented by Bode diagram. The analysis results show that the CCRC Buck LED constant current driver has a faster load transient response speed compared with the VMC Buck LED constant current driver. Finally, the correctness of the theoretical analysis was verified by simulation and experimental results.

Key words: Buck LED constant current driver; capacitive current ripple-controlled; small signal model; compensation parameter; transient response

近年来, LED 作为新一代的照明光源由于其自身具有节能环保、发光效率高、使用寿命长等优点, 目前已经涉及到背光源、室内外照明以及汽车照明等多个领域^[1-3]。由 LED 的伏安特性曲线可知, 若 LED 正向压降发生极小变化, 会引起正向电流发生较大变化, 导致 LED 亮度改变。因此, LED 应采用恒流驱动方式^[4-6]。

为保证 LED 高效、可靠工作, 其驱动器应具有快速的瞬态响应速度, 而驱动器的控制方法是影响负载瞬态响应速度快慢的一个重要因素^[7-8]。传统电压型控制 (voltage mode controlled, VMC) 具有控制电路结构简单、抗干扰能力强等优点, 但存在负载瞬态响应速度慢的问题。恒定导通时间 (constant on-time, COT) 控制

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金优秀学生培养工程项目 (2020YYXS55)

作者简介: 张留洋 (1995—), 男, 硕士研究生, Email: z_l_y_pds@163.com

具有控制电路结构简单、负载瞬态响应速度快的优点,但是其开关频率不固定,不利于EMI滤波器的设计与优化^[9-10]。V²型控制的内环含有输出电压的信息,具有快速的负载瞬态响应速度,但是当占空比 $D>0.5$ 时会出现次谐波震荡,虽然可以采用谐波补偿技术消除,但在一定程度上会影响驱动器的负载瞬态响应速度^[11]。电流型控制(current mode controlled, CMC)在VMC的电压反馈环基础上,增加了一个电流反馈环,从而提高了负载瞬态响应速度^[12]。然而CMC一般采用电感电流纹波作为内环控制信号,当负载电流发生变化时,由于电感电流不能突变,对负载瞬态响应速度改善有限。相比电感电流,输出电容的电容电流可以立即变化,因此采用输出电容的电容电流纹波作为内环反馈控制信号,能更快的反应负载变化^[13-16]。

为了提高Buck LED恒流驱动器的负载瞬态响应速度,基于电容电流纹波快速反应负载变化的特点,本文提出了电容电流纹波控制(capacitive current ripple-controlled, CCRC) Buck LED恒流驱动器。首先,分析Buck LED恒流驱动器的工作原理,建立状态空间平均模型。其次,阐述CCRC Buck LED恒流驱动器的工作原理,建立其小信号模型,并推导控制-输出环路增益传递函数,进而设计PI补偿参数。基于伯德图,验证PI补偿参数设计的正确性;并对比分析传统VMC和CCRC Buck LED恒流驱动器的负载瞬态响应速度。最后,通过仿真和实验结果验证理论分析的正确性。

1 Buck LED恒流驱动器

1.1 工作原理

图1为Buck LED恒流驱动器的原理图及稳态时序波形。

如图1a所示,Buck LED恒流驱动器包括:输入电压 v_{in} ,电感 L ,开关管 S ,续流二极管 D_1 ,输出电容 C 和LED负载。其中,LED负载等效为电阻 R 、电压源 v_{LED} 和理想二极管 D_2 的串联。

如图1b所示,Buck LED恒流驱动器在一个开关周期 T 内存在两种工作状态。在 $[t_0, t_1]$ 内,开关管 S 导通,续流二极管 D_1 关断,电感电流线性上升,此为工作状态 I; 在 $[t_1, t_2]$ 内,开关管 S 关断,续流二极管 D_1 导通,电感电流线性下降,此为工作状态 II。

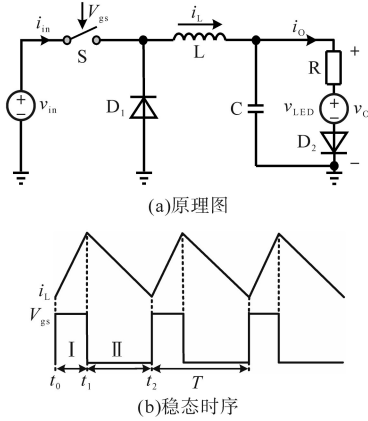


图1 Buck LED恒流驱动器原理图及稳态时序

Fig.1 The schematic and steady-state timing diagram of Buck LED constant current driver

1.2 状态空间平均模型

图1中,选取状态向量 $\mathbf{x}(t) = [i_L(t) \ v_o(t)]^T$, 输入向量 $\mathbf{u}(t) = [v_{in}(t) \ v_{LED}(t)]^T$, 输出向量 $\mathbf{y}(t) = [i_{in}(t) \ i_o(t)]^T$ 。

当驱动器处于工作状态 I 时,其状态方程和输出方程分别为

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{A}_1 \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_1 \mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_1 \mathbf{x}(t) + \mathbf{E}_1 \mathbf{u}(t) \end{cases} \quad (1)$$

当驱动器处于工作状态 II 时,其状态方程和输出方程分别为

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{A}_2 \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_2 \mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_2 \mathbf{x}(t) + \mathbf{E}_2 \mathbf{u}(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_1 = \mathbf{A}_2 &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} & \mathbf{E}_1 = \mathbf{E}_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_1 &= \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{RC} \end{bmatrix} & \mathbf{B}_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{RC} \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R} \end{bmatrix} & \mathbf{C}_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

式中: $\mathbf{A}_1, \mathbf{B}_1, \mathbf{C}_1, \mathbf{E}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{B}_2, \mathbf{C}_2, \mathbf{E}_2$ 分别为工作状态 I 和工作状态 II 的状态方程和输出方程的系数矩阵。

在一个开关周期内对所有变量平均化,得到 Buck LED 恒流驱动器的状态空间平均模型为

$$\begin{cases} \frac{d\bar{x}(t)}{dt} = A\bar{x}(t) + B\bar{u}(t) \\ \bar{y}(t) = C\bar{x}(t) + E\bar{u}(t) \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{d}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{RC} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} d & 0 \\ 0 & \frac{1}{R} \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R} \end{bmatrix}$$

式中: A, B, C, E 为系数矩阵; d 为开关管导通时的占空比。

2 CCRC Buck LED恒流驱动器

2.1 工作原理

图2为CCRC Buck LED恒流驱动器的电路原理图和控制时序波形。

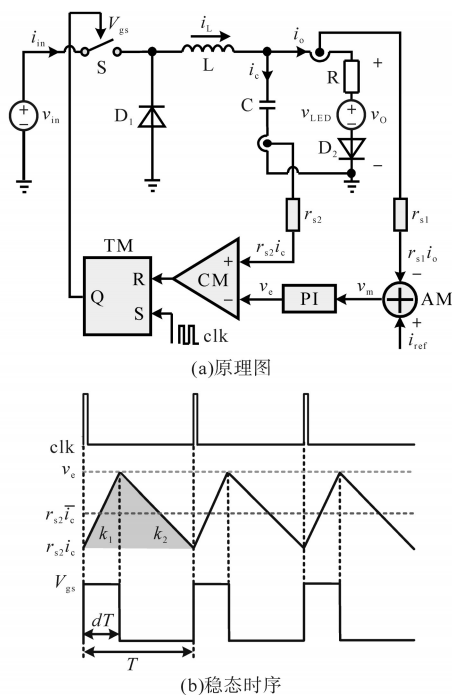


图2 CCRC Buck LED恒流驱动器原理图及控制时序

Fig.2 The schematic and control timing diagram of CCRC Buck LED constant current driver

图2a中,主功率电路同图1a,控制电路采用由电压控制外环和电容电流纹波控制内环组成的CCRC电路,包括:输出电流采样电阻 r_{s1} 、输出电容电流采样电阻 r_{s2} 、运算放大器AM、补偿器PI、比较器CM及RS触发器TM、时钟信号clk。

CCRC电路中,输出电流 i_o 通过采样电阻 r_{s1} 得到输出电流采样信号 $r_{s1}i_o$, $r_{s1}i_o$ 与基准电流 i_{ref} 比

较,得到误差信号 v_m , v_m 通过补偿器PI得到误差放大信号 v_e ,作为CCRC内环的参考信号。CCRC内环通过采样电阻 r_{s2} 得到电容电流采样信号 $r_{s2}i_c$, $r_{s2}i_c$ 与 v_e 通过比较器比较,比较结果和时钟信号clk分别作为RS触发器TM的R端和S端输入信号,RS触发器TM的Q端输出控制信号 V_{gs} 控制开关管S,从而对驱动器的输出电流进行调节,实现LED恒流输出。其中,补偿器PI的传递函数表达式为

$$G_c(s) = k_p + k_i/s \quad (4)$$

式中: k_p, k_i 分别为补偿器PI的比例、积分系数。

如图2b所示,在每个开关周期的起始时刻,时钟信号clk使RS触发器TM的Q端输出高电平,开关管S导通,电容电流采样信号 $r_{s2}i_c$ 以斜率 k_1 上升;当 $r_{s2}i_c$ 上升至误差放大信号 v_e 时,RS触发器TM的Q端输出低电平,开关管S关断, $r_{s2}i_c$ 以斜率 k_2 下降,直到下一个时钟信号到来,电路进入下一个开关周期。

2.2 小信号模型

对式(3)的状态空间平均方程和输出方程变量施加小信号扰动量: $v_{in} = V_{in} + \hat{v}_{in}$, $i_L = I_L + \hat{i}_L$, $v_o = V_o + \hat{v}_o$, $v_{LED} = V_{LED} + \hat{v}_{LED}$, $i_{in} = I_{in} + \hat{i}_{in}$, $i_o = I_o + \hat{i}_o$, $d = D + \hat{d}$ 。其中, v_{in} 为输入电压, i_L 为电感电流, v_o 为负载LED两端的电压, v_{LED} 为负载LED的等效电压源, i_{in} 为输入电流, i_o 为负载电流, d 为开关管导通时的占空比;且大写参数为相应变量的直流分量,上标“^”为相应变量的小信号扰动量。由此可得Buck LED恒流驱动器的小信号模型表达式:

$$\begin{cases} \hat{i}_L(s) = -\frac{1}{sL} \hat{v}_o(s) + \frac{D}{sL} \hat{v}_{in}(s) + \frac{1}{sL} V_{in} \hat{d}(s) \\ \hat{v}_o(s) = \frac{1}{sC} \hat{i}_L(s) - \frac{1}{sRC} \hat{v}_o(s) + \frac{1}{sRC} \hat{v}_{LED}(s) \\ \hat{i}_{in}(s) = D \hat{i}_L(s) + \frac{DV_{in} - V_{LED}}{R} \hat{d}(s) \\ \hat{i}_o(s) = \frac{1}{R} \hat{v}_o(s) - \frac{1}{R} \hat{v}_{LED}(s) \end{cases} \quad (5)$$

由图2b所示电容电流采样信号 $r_{s2}i_c$ 的纹波波形可得:

$$v_e - r_{s2}i_c = k_1 dT - r_{s2} \bar{i}_c \quad (6)$$

$$\text{其中} \quad r_{s2} \bar{i}_c = \frac{1}{2} k_1 dT \quad (7)$$

式中: v_e 为误差放大信号; k_1 为电容电流采样信号 $r_{s2}i_c$ 的上升斜率; $r_{s2} \bar{i}_c$ 为图2b中阴影部分面积的

平均值。

由式(6)和式(7)可得:

$$v_e - r_{s2}i_c = \frac{1}{2}k_1dT \quad (8)$$

对式(8)中变量施加小信号扰动量,得到:

$$\hat{v}_e - r_{s2}\hat{i}_c = \frac{1}{2}K_1\hat{d}T + \frac{1}{2}\hat{k}_1DT \quad (9)$$

式中: K_1 为电容电流采样信号 $r_{s2}i_c$ 上升斜率 k_1 的直流分量。

由此可得占空比小信号量 $\hat{d}$ 的表达式为

$$\hat{d} = F_v(s)\hat{i}_o - H_c(s)\hat{i}_c \quad (10)$$

其中

$$F_v(s) = \frac{DRT - 2r_{s1}Lk_p}{K_1TL} - \frac{2r_{s2}k_i}{K_1Ts} \quad H_c(s) = \frac{2r_{s2}}{K_1T}$$

式中: $F_v(s)$, $H_c(s)$ 为传递函数。

2.3 控制-输出环路增益传递函数

根据式(5),得到 CCRC Buck LED 恒流驱动器的控制-输出电流传递函数 $G_{i,d}(s)$ 和控制-电容电流传递函数 $G_{i,c}(s)$ 分别为

$$G_{i,d}(s) = \frac{V_{in}}{RLCs^2 + Ls + R} \quad (11)$$

$$G_{i,c}(s) = \frac{V_{in}RCs}{RLCs^2 + Ls + R} \quad (12)$$

由传递函数 $G_{i,d}(s)$, $G_{i,c}(s)$, $F_v(s)$ 和 $H_c(s)$ 构成 CCRC Buck LED 恒流驱动器的小信号模型框图,如图3所示。

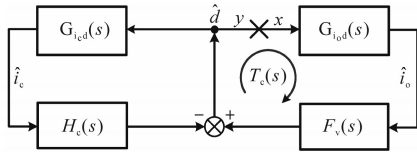


图3 CCRC Buck LED恒流驱动器小信号模型框图

Fig.3 Block diagram of small signal model for CCRC Buck LED constant current driver

图3中,定义 x 到 y 的环路增益函数为该驱动器的控制-输出环路增益传递函数 $T_c(s)$,其表达式为

$$T_c(s) = \frac{G_{i,d}(s)F_v(s)}{1 + G_{i,d}(s)H_c(s)} \quad (13)$$

同理可得 CCRC Buck LED 恒流驱动器未加入补偿器PI的控制-输出环路增益传递函数 $T_{c1}(s)$ 为

$$T_{c1}(s) = \frac{G_{i,d}(s)F_{v1}(s)}{1 + G_{i,d}(s)H_{c1}(s)} \quad (14)$$

其中 $F_{v1}(s) = \frac{DR}{k_1L} - \frac{2r_{s1}}{k_1T}$ $H_{c1}(s) = \frac{2r_{s2}}{K_1T}$

3 频域分析

3.1 PI参数设计

电路参数设置如下:输入电压 $v_{in}=10$ V,额定输出电压 $v_o=3.2$ V,额定输出电流 $i_o=1$ A,等效电阻 $R=0.7$ Ω ,LED等效电压源 $v_{LED}=2.5$ V,电容 $C=100$ μ F,电感 $L=370$ μ H,开关周期 $T=20$ μ s,采样电阻 $r_{s1}=r_{s2}=1$ Ω 。

将上述电路参数代入式(14),可得:

$$T_{c1}(s) = \frac{-7.4 \times 10^{-3}}{3.52 \times 10^{-12}s^2 + 5.68 \times 10^{-7}s + 9.52 \times 10^{-5}} \quad (15)$$

由文献[11]可知,稳定系统的控制-输出环路增益传递函数的穿越频率通常为 $(1/20 \sim 1/5)f_s$, f_s 为开关频率。本文选取 CCRC Buck LED 恒流驱动器的控制-输出环路增益传递函数的穿越频率 $f_c=(1/10)f_s=5$ kHz,由式(15)可得 $T_{c1}(s)$ 的幅值裕度为

$$|T_{c1}(j2\pi f_c)| = -7.86 \text{ dB}$$

为使该驱动器稳定,需要设计补偿器PI在5 kHz处的幅值裕度为7.86 dB,即

$$|G_c(j2\pi f_c)| = 7.86 \text{ dB}$$

因此,本文选取 $k_p=2.35$,可得 $k_i=24055$ 。

将设置的电路参数和PI补偿参数代入式(13),得到 $T_c(s)$ 的数值表达式为

$$T_c(s) = \frac{-1.73 \times 10^{-2}s - 178}{3.52 \times 10^{-12}s^3 + 5.68 \times 10^{-7}s^2 + 9.52 \times 10^{-5}s} \quad (16)$$

依据式(15)、式(16),绘制出PI补偿前、后的 CCRC Buck LED 恒流驱动器的控制-输出环路增益传递函数伯德图,如图4所示。

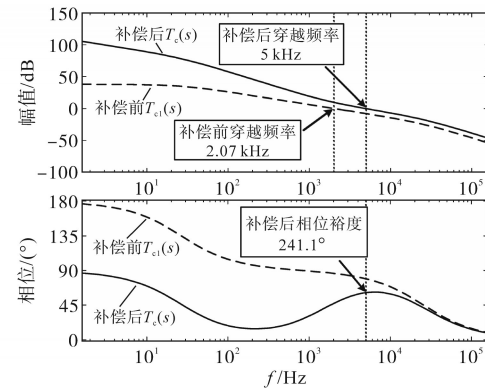


图4 补偿前、后控制-输出环路增益传递函数伯德图

Fig.4 Bode diagram of control-output loop gain transfer functions with and without compensation

由图4可知,补偿前的控制-输出环路增益传

递函数的穿越频率未达到5 kHz,而补偿后的控制-输出环路增益传递函数的穿越频率为5 kHz,且对应的相位裕度为241.1°。说明PI补偿后系统稳定,PI参数设计合理。

3.2 控制-输出环路增益传递函数分析

根据式(16),利用Matlab绘制出控制-输出环路增益传递函数 $T_v(s)$ 的伯德图,如图5a所示。为了验证式(16)的正确性,采用PSIM仿真软件搭建了CCRC Buck LED恒流驱动器的仿真电路,电路参数同3.1节设置。利用PSIM的交流频域仿真分析模块,对CCRC Buck LED恒流驱动器的环路增益进行扫频分析,得到基于PSIM扫频分析的控制-输出环路增益伯德图,如图5b所示。由图5可知,控制-输出环路增益传递函数 $T_v(s)$ 的幅频及相频曲线与基于PSIM扫频分析的控制-输出环路增益的幅频及相频曲线基本吻合,从而验证了控制-输出环路增益传递函数 $T_v(s)$ 的正确性。

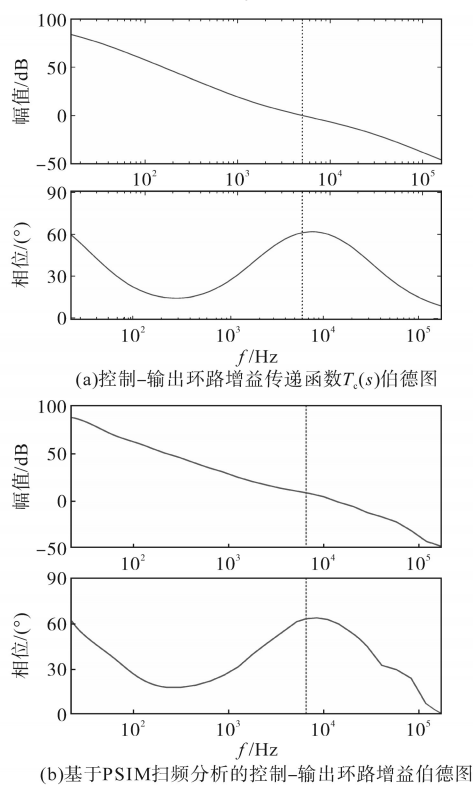


图5 CCRC Buck LED恒流驱动器伯德图

Fig. 5 Bode diagram of CCRC Buck LED constant current driver

3.3 负载瞬态响应性能分析

根据文献[17],可知VMC Buck LED恒流驱动器的环路增益传递函数为

$$T_v(s) = G_{i,d}(s)G_m(s)G_c(s)H(s) \quad (17)$$

式中: $G_m(s)$ 为该驱动器的调制器传递函数; $H(s)$ 为采样网络增益。

为简化计算,令 $G_m(s)=1, H(s)=1$ 。

采用与CCRC Buck LED恒流驱动器相同的电路参数^[9],得到 $T_v(s)$ 的数值表达式为

$$T_v(s) = \frac{23.5s + 240550}{2.59 \times 10^{-8}s^3 + 3.7 \times 10^{-4}s^2 + 0.7s} \quad (18)$$

依据式(16)、式(18),绘制出VMC和CCRC Buck LED恒流驱动器的控制-输出环路增益传递函数伯德图,如图6所示。

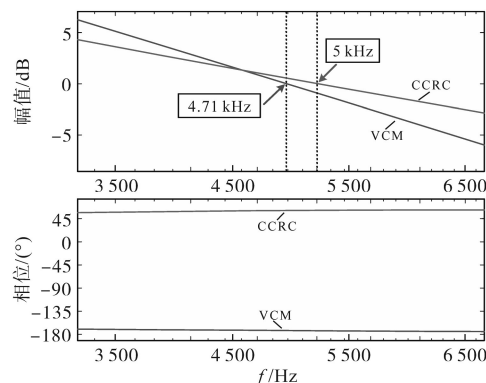


图6 VMC和CCRC Buck LED恒流驱动器环路增益传递函数伯德图

Fig. 6 Bode diagram of loop gain transfer functions for VMC and CCRC Buck LED constant current driver

由图6可知,VMC和CCRC Buck LED恒流驱动器的控制-输出环路增益传递函数的穿越频率分别为4.71 kHz和5 kHz。对比分析表明:相比于VMC Buck LED恒流驱动器,CCRC Buck LED恒流驱动器带宽更大、负载瞬态响应性能更好。

4 仿真验证

采用PSIM仿真软件搭建了VMC和CCRC Buck LED恒流驱动器的仿真电路,电路参数同3.1节。图7为基准电流 i_{ref} 变化时,VMC和CCRC Buck LED恒流驱动器的输出电流瞬态仿真波形。由图7a、图7b可知,基准电流 i_{ref} 从1突变至0.5时,VMC和CCRC Buck LED恒流驱动器的输出电流 i_{o1} 和 i_{o2} 均从1 A跟随变化至0.5 A;VMC Buck LED恒流驱动器的输出电流 i_{o1} 经过4 ms的调整时间进入了新的稳态;而CCRC Buck LED恒流驱动器的输出电流 i_{o2} 经过0.7 ms的调整时间进入了新的稳态。由图7c、图7d可知,基准电流 i_{ref} 从0.5突变至1时,VMC和CCRC Buck LED恒流驱动器的输出电流 i_{o1} 和 i_{o2} 均从0.5 A跟随变化至1 A;VMC Buck LED恒流驱动器的输出电流 i_{o1} 经过4 ms的调整时间进入新的稳态;而CCRC Buck LED恒流驱动器的输出电流 i_{o2} 经过0.45 ms的调整时间进入新的稳

态;由此说明:相比于VMC Buck LED恒流驱动器,CCRC Buck LED恒流驱动器提高了负载瞬态响应速度,仿真结果与理论分析结果相符。

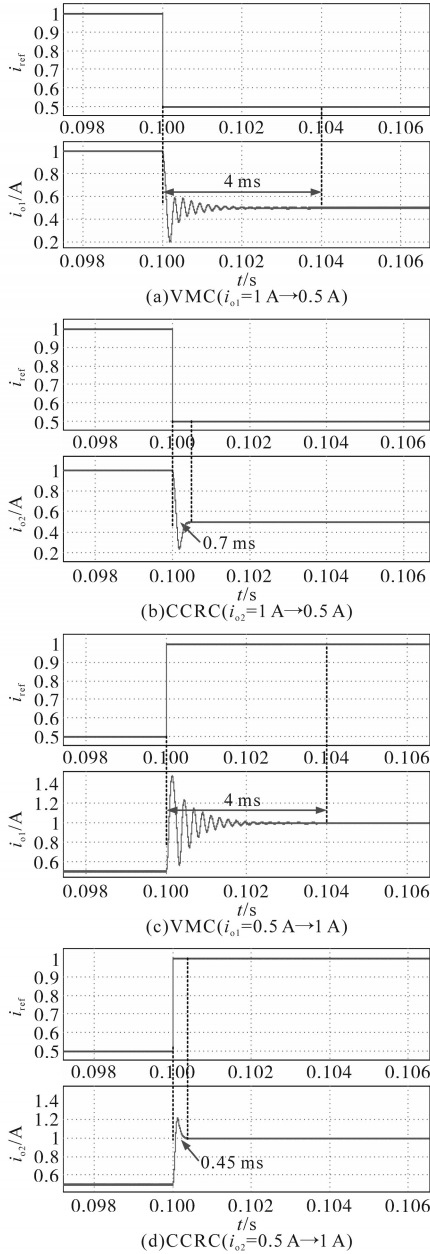


图7 VMC和CCRC Buck LED恒流驱动器的瞬态仿真波形

Fig.7 Transient simulation waveforms of VMC and CCRC Buck LED constant current driver

5 实验验证

为了验证上述理论分析与仿真分析的正确性,采用3.1节中的电路参数,搭建了VMC和CCRC Buck LED恒流驱动器的实验电路。为了排除电容对响应速度测试的干扰,实验选取在响应速度较快的固态电容基础上作对比测试。CCRC Buck LED恒流驱动器的实验电路如图8所示,瞬态实验波形如图9所示。

示,瞬态实验波形如图9所示。

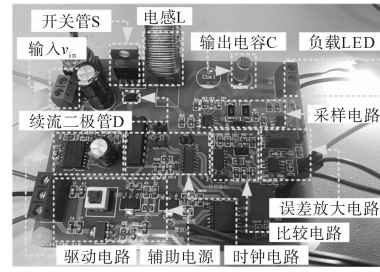


图8 CCRC Buck LED恒流驱动器实验电路

Fig.8 Experimental prototype of CCRC Buck LED constant current driver

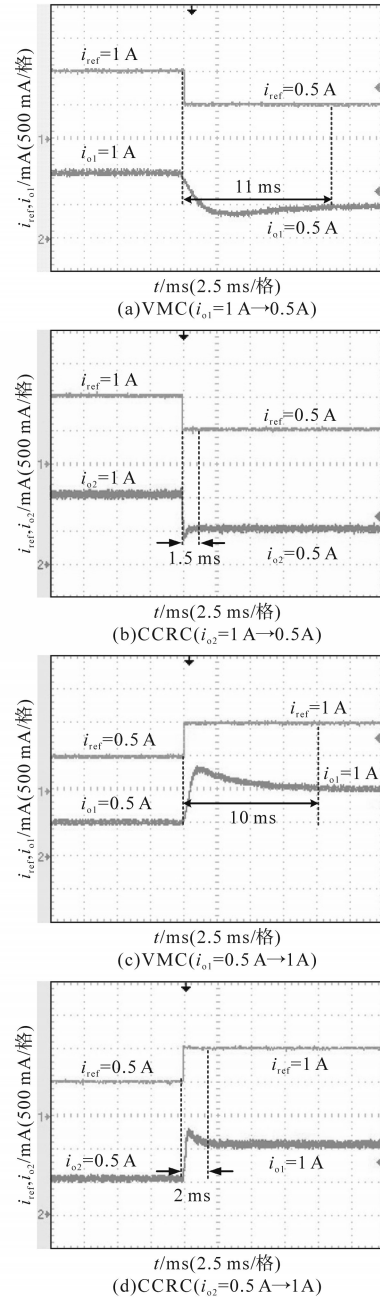


图9 VMC和CCRC Buck LED恒流驱动器的瞬态实验波形

Fig.9 Transient experimental waveforms of VMC and CCRC Buck LED constant current driver

由图9a、图9b可知,当基准电流 i_{ref} 从1突变至0.5时,VMC和CCRC Buck LED恒流驱动器的输出电流 i_{o1} 和 i_{o2} 分别经过11 ms, 1.5 ms的调整时间进入新的稳态。

由图9c、图9d可知,当基准电流 i_{ref} 从0.5突变至1时,VMC和CCRC Buck LED恒流驱动器的输出电流 i_{o1} 和 i_{o2} 分别经过10 ms, 2 ms的调整时间进入新的稳态。

由此说明:相比于传统VMC Buck LED恒流驱动器,本文提出的CCRC Buck LED恒流驱动器提高了负载的瞬态响应速度,实验结果与理论分析结果相符。

6 结论

本文分析了Buck LED恒流驱动器的工作原理,采用状态空间平均法,建立了其状态空间平均模型。提出了CCRC Buck LED恒流驱动器,阐述了CCRC Buck LED恒流驱动器的工作原理,建立了其小信号模型,推导出系统的控制-输出环路增益传递函数,并设计了控制电路的PI补偿参数。通过环路增益传递函数的伯德图,与VMC Buck LED恒流驱动器的负载瞬态响应速度进行对比分析。研究结果表明:相比于传统的VMC Buck LED恒流驱动器,CCRC Buck LED恒流驱动器具有更大的带宽和更好的负载瞬态性能。最后,仿真和实验结果验证了理论分析的正确性。

参考文献

- [1] 闫东辉,谢荣斌,周群,等.无PFC LED球泡灯滤波电路对电流谐波的影响研究[J].电气传动,2021,51(5):38-44.
Yan Donghui, Xie Rongbin, Zhou Qun, *et al.* Research on the influence of PFC-free LED bulb filter circuit on current harmonic[J]. Electric Drive, 2021, 51(5): 38-44.
- [2] Zhang Yimeng, Rong Guangjian, Qu Shasha, *et al.* A high-power driver based on single inductor-multiple output DC-DC converter with high dimming frequency and wide dimming range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 8501-8511.
- [3] 陶权保,闫铁生,胡啸天,等.基于Cuk PFC变换器的LED驱动电源设计[J].电气传动,2020,50(7):108-112.
Tao Quanbao, Yan Tiesheng, Hu Xiaotian, *et al.* Design of a LED driving power based on Cuk PFC converter[J]. Electric Drive, 2020, 50(7): 108-112.
- [4] 闫铁生,许建平,曹太强,等.基于二次型Buck PFC变换器的无频闪无变压器LED驱动电源[J].电工技术学报,2015,30(12):512-519.
- Yan Tiesheng, Xu Jianping, Cao Taiqiang, *et al.* A flicker-free transformerless LED driving circuit based on quadratic Buck PFC converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 512-519.
- [5] Leng Mingrui, Zhou Guohua, Zhou Shuhan, *et al.* Stability analysis for peak current-mode controlled Buck LED drive based on discrete-time modeling[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(3): 1567-1568.
- [6] 章安达. LED恒流驱动电路的研究[D].南京:南京理工大学,2013.
Zhang Anda. Research on LED constant current driver[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [7] 章伟,周国华,刘啸天,等.具有快速负载瞬态响应的开关变换器数字均值电压控制方法[J].电工技术学报,2018,33(4):856-857.
Zhang Wei, Zhou Guohua, Liu Xiaotian, *et al.* Digital average voltage control technique for switching converter with fast load transient response[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 856-857.
- [8] 曾鹏灏,杨明宇,甄少伟,等.快速瞬态响应的变导通时间模式Buck变换器[J].微电子学,2019,49(6):745-749.
Zeng Penghao, Yang Mingyu, Zhen Shaowei, *et al.* A variable on time mode Buck converter with fast transient response[J]. Microelectronics, 2019, 49(6): 745-749.
- [9] 张希,沙金,徐杨军,等.恒定导通时间电容电流控制Buck变换器研究[J].电工技术学报,2015,30(23):18-23.
Zhang Xi, Sha Jin, Xu Yangjun, *et al.* Research on the constant on-time capacitor current control of Buck converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 18-23.
- [10] 王金平,许建平,兰燕妮,等.基于输入电压前馈补偿的开关变换器恒定导通时间控制技术[J].电工技术学报,2012,27(2):18-22.
Wang Jinping, Xu Jianping, Lan Yanni, *et al.* Constant on-time control of switching DC-DC converters based on input voltage feed-forward compensation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 18-22.
- [11] 周国华,许建平,吴松荣.开关变换器建模、分析与控制[M].北京:科学出版社,2016:174-177.
Zhou Guohua, Xu Jianping, Wu Songrong. Switching converter modeling, analysis and control[M]. Beijing: Science Press, 2016: 174-177.
- [12] 周国华,许建平.开关变换器调制与控制技术综述[J].中国电机工程学报,2014,34(6):815-831.
Zhou Guohua, Xu Jianping. A review of modulation and control

(下转第59页)

- integration NTC [J]. Industrial Instrumentation and Automation, 2019, 269 (5): 87-90.
- [5] 孙志宇. 基于多模型的IGBT模块结温估计方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2019.
- Sun Zhiyu. Research on junction temperature estimation method of IGBT module based on multiple models[D]. Hefei: Hefei Polytechnic University, 2019.
- [6] 曾东. 基于加速老化试验IGBT性能退化特征参量的可靠性评估[D]. 重庆:重庆大学, 2019.
- Zeng Dong. Reliability evaluation of IGBT performance degradation characteristic parameters based on accelerated aging test [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [7] Liu B Y, Wang G S, Tseng M L, *et al.* Exploring the electro-thermal parameters of reliable power modules: insulated gate bipolar transistor junction and case temperature[J]. Energies, 2018, 11(9): 1-15.
- [8] Karimi F S, Saviz S, Ghoranneviss M, *et al.* The circuit parameters measurement of the SABALAN-I plasma focus facility and comparison with Lee Model[J]. Results in Physics, 2017, 7: 1859-1869.
- [9] Lim Heesun, Hwang Jaeyeob, Kwon Soonho, *et al.* A study on real time IGBT Junction temperature estimation using the NTC and calculation of power losses in the automotive inverter system[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2021, 21(7): 2454.
- [10] Yukawa Fumio, Takaku Taku, Yano Koji. Effect of negative gate voltage on the turn-off performance of Si-IGBT device[J]. IEEJ Journal of Industry Applications, 2020, 9(5): 557-562.
- [11] Jiao Chaoqun, Zhang Zuoming, Zhao Zhibin, *et al.* Integrated rogowski coil sensor for press-pack insulated gate bipolar transistor chips [J]. Sensors, 2020, 20(15): 4080.
- [12] 李哲. 基于无线传感器网络家居环境监测系统的设计与实现[D]. 保定:华北电力大学, 2015.
- Li Zhe. Research and design of home environment monitoring system based on wireless sensor network[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2015.
- 收稿日期: 2021-04-22
修改稿日期: 2021-06-21
- *****
- (上接第45页)
- techniques for switching converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6): 815-831.
- [13] 许丽君, 沙金, 许多, 等. 开关DC-DC变换器电容电流脉冲序列控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(18): 100-107.
- Xun Lijun, Sha Jin, Xu Duo, *et al.* Capacitor current pulse train control for switching DC-DC converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(18): 100-107.
- [14] 王瑶. 电容电流-电容电压纹波控制单电感双输出CCM Buck变换器[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3280-3287.
- Wang Yao. Capacitor current and capacitor voltage ripple controlled single-inductor dual-output CCM Buck converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3280-3287.
- [15] Wang Yao, Xu Jianping, Yin Gang. Cross regulation suppression and stability analysis of capacitor current ripple controlled SIDO CCM Buck converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 1770-1780.
- [16] Huerta S C, Soto A, Aloup, *et al.* Advanced control for very fast DC-DC converters based on hysteresis of the C-out current[J]. IEEE Transactions on circuits & systems I regular papers, 2013, 60(4): 1052-1061.
- [17] Guo Yue, Li Sinan, Lee Albert T L, *et al.* Single stage AC-DC single inductor multiple output LED drivers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 66(3): 1770-1780.
- 收稿日期: 2021-05-04
修改稿日期: 2021-07-06