

Research and Simulation of Two-Phase Interleaving Boost Converter

Jiayi Chen¹, Pingjuan Niu², Shengwei Gao¹

¹Tianjin Key Laboratory of Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, Tianjin Polytechnic University, Tianjin

²High Power Semiconductor Lighting Application Systems Engineering Research Center, Tianjin Semiconductor Lighting Technology Engineering Center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin
Email: 1216657569@qq.com, niupingjuan@tjpu.edu.cn, gaoshengwei@tjpu.edu.cn

Received: Mar. 7th, 2017; accepted: Mar. 24th, 2017; published: Mar. 28th, 2017

Abstract

This paper introduces the basic principle and unique advantages of interleaving technology, and analyzes the efficacy of the two-phase interleaved boost converter in detail. In the control part of the circuit, a PI control strategy and digital hysteresis current control strategy are respectively adopted for the sake of comparison. Via MATLAB simulation, interleaving technology is shown to possess a number of important advantages compared to other methods, such as high frequency output voltage ripple with lower switching frequency, reducing current flowing through the switch tube, reducing switching loss, decreasing output voltage ripple, and output current ripple. Compared to the PI control method, the digital hysteresis current control method makes the performance of whole circuit is improved.

Keywords

Interleaving, PI Control, Digital Current Hysteresis Control, Simulation

两相交错并联Boost变换器的研究与仿真

陈嘉怡¹, 牛萍娟², 高圣伟¹

¹天津工业大学, 电工电能新技术天津市重点实验室, 天津

²天津工业大学, 天津市半导体照明技术工程中心, 大功率半导体照明应用系统教育部工程研究中心, 天津

Email: 1216657569@qq.com, niupingjuan@tjpu.edu.cn, gaoshengwei@tjpu.edu.cn

收稿日期: 2017年3月7日; 录用日期: 2017年3月24日; 发布日期: 2017年3月28日

摘要

本文介绍了交错并联技术的基本原理及其优点, 详细分析两相交错并联Boost变换器基本原理, 分别采用PI控制和数字电流滞环控制方法, 简单叙述了两种控制方法的原理并进行优缺点的分析与对比。使用MATLAB仿真, 结果显示采用交错并联技术能在很大程度上减小流过开关管的电流, 降低开关损耗和输出电压、输出电流纹波; 相对于PI控制, 采用数字电流滞环的控制方法使得整个电路的性能得到提升。

关键词

交错并联, PI控制, 数字电流滞环控制, 仿真

Copyright © 2017 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

1. 引言

Boost 电路是基本的电路拓扑结构之一, 由于其拓扑结构简洁、效率高、容易控制等特点, 广泛用于功率因数校正电路、光伏发电系统、电动汽车等多个领域。随着电力电子技术的快速发展, 对变换器功率等级和电路器件的要求逐步提高。在高电源的应用中, 单个变换器的使用已经无法满足要求, 并且导致输出电压和输出电流中存在较高的纹波, 因此需要更大的电感和滤波电容[1]。为了解决这一问题, 通常采用多个变换器并联运行的方式。在多个变换器并联运行方式下采用交错并联技术, 不仅可以满足较高的功率等级的要求, 而且减小了开关应力, 降低输出电压、输出电流纹波, 提高了变换器的功率密度。

针对交错并联 Boost 变换器, 分别采用 PI 控制和数字电流滞环控制的方法。对两种控制方法在系统性能上的改进作进一步的理论分析与对比。

最后通过 MATLAB 搭建电路仿真模型, 用仿真结果来验证理论分析的正确性。

2. 基本原理

2.1. 交错并联技术原理

交错并联技术已经广泛的应用于多个工程领域, 在电力电子领域, 也成功应用于变换器方面。以两相交错并联 Boost 电路为例, 两条支路并联运行, 其控制信号为频率相同, 相位相差 180 度的两个 PWM 信号, 使两支路交错相通。采用交错并联技术可提高变换器功率容量和可靠性, 减小开关管电流应力[2][3]。交错并联技术的应用不仅使得整个系统有并联运行的优点, 还具有降低开关损耗和输出电压、输出电流纹波等优点。

2.2. 交错并联 Boost 变换器工作原理

图 1 为两相交错并联 Boost 变换器。电路工作在电感电流连续模式(Continuous Conduction Mode)下, 开关管 S_1 、 S_2 工作, 它们的占空比相等且相位相差 180 度, 电感 L_1 、 L_2 相等, 二极管 D_1 、 D_2 为续流二极管。分析该电路的工作过程, 作如下假设:

- 1) 电路中的开关元器件均为理想元件;

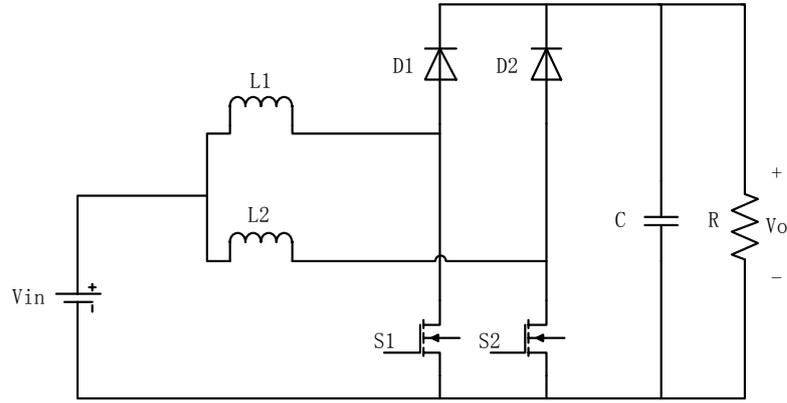


Figure 1. The two-phase interleaved boost converter
图 1. 两相交错并联 Boost 变换器

2) 电路中的电感、电容均为理想元件。

研究电路在一个开关周期内的工作状态，即 CCM 模式下的电路工作过程可以分为 4 个阶段，如图 2 所示。

阶段 1，开关管 S_1 、 S_2 导通，此时电感 L_1 、 L_2 储存能量；

$$L_1 \frac{di_{l1}}{dt} = V_{in} \quad L_2 \frac{di_{l2}}{dt} = V_{in} \quad C \frac{du_c}{dt} = -\frac{V_o}{R} \quad (1)$$

阶段 2，开关管 S_1 关断 S_2 继续导通，电感 L_1 通过二极管 D_1 形成续流回路并进行能量释放，电感 L_2 继续储存能量；

$$L_1 \frac{di_{l1}}{dt} = V_{in} - V_o \quad L_2 \frac{di_{l2}}{dt} = V_{in} \quad C \frac{du_c}{dt} = i_{L_1} - \frac{V_o}{R} \quad (2)$$

阶段 3，开关管 S_1 导通 S_2 关断，电感 L_1 储存能量，电感 L_2 通过二极管 D_2 形成续流回路并进行能量释放；

$$L_1 \frac{di_{l1}}{dt} = V_{in} \quad L_2 \frac{di_{l2}}{dt} = V_{in} - V_o \quad C \frac{du_c}{dt} = i_{L_2} - \frac{V_o}{R} \quad (3)$$

阶段 4，开关管 S_1 、 S_2 关断，此时电感 L_1 、 L_2 则分别通过二极管 D_1 、 D_2 形成续流回路并进行能量释放。

$$L_1 \frac{di_{l1}}{dt} = V_{in} - V_o \quad L_2 \frac{di_{l2}}{dt} = V_{in} - V_o \quad C \frac{du_c}{dt} = i_{L_1} + i_{L_2} - \frac{V_o}{R} \quad (4)$$

3. 控制方法

3.1. PI 控制

经典的 PID 控制策略已广泛应用于各种电路的闭环控制中，其具有算法简单、鲁棒性好和可靠性高等优点[4]。本文采用 PI 控制，将比例控制规律和积分控制规律相结合，不但能够实现对闭环控制系统的快速响应，而且同时具有消除系统稳态误差的特点。

针对交错并联 Boost 变换器建立电压电流双闭环控制系统，控制原理框图如图 3 所示。实时检测输出电压，将其值和给定电压进行比较作为电压外环控制，通过外环控制得到期望的电流值，该值和输出电流进行比较作为电流内环控制，最终通过两个双闭环控制系统产生控制信号，来实现交错并联 Boost 变换器开关管的开通与关断，进而实现输出电流和输出电压值趋于稳态值。

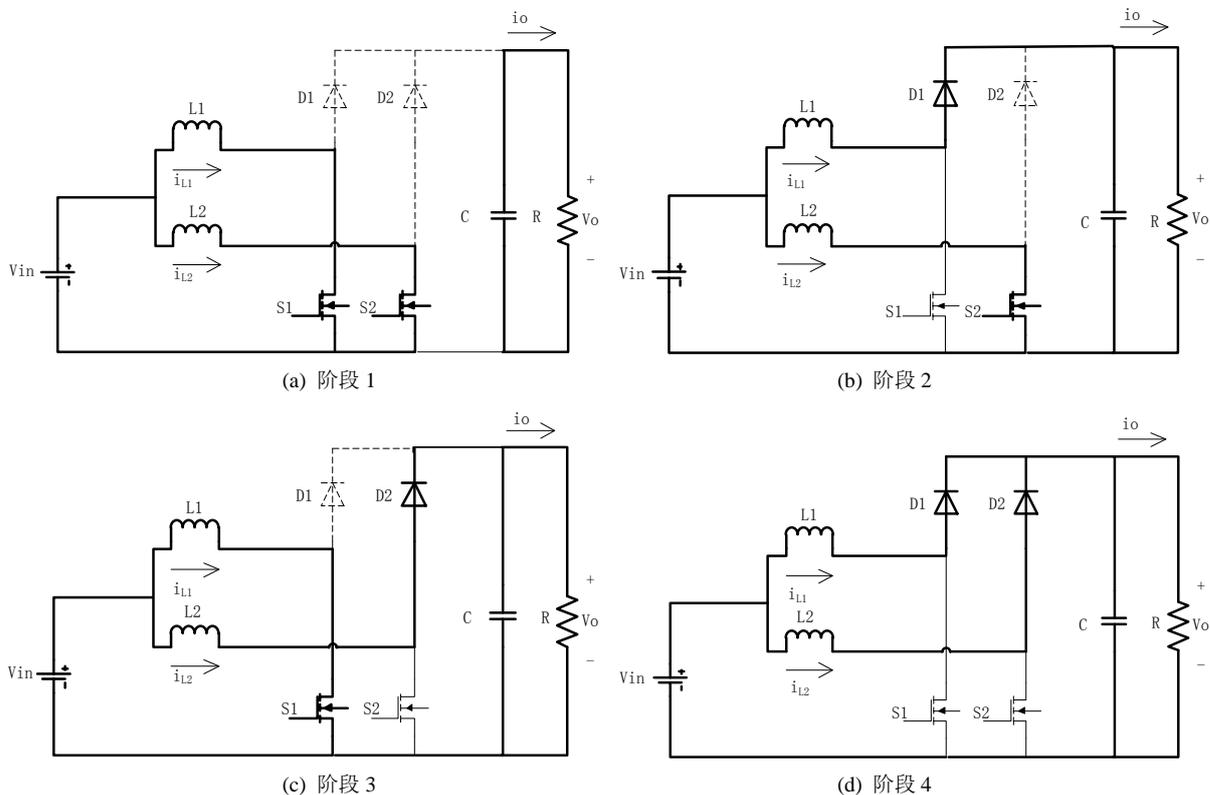


Figure 2. Working process of two-phase interleaved boost circuit
图 2. 两相交错并联 Boost 电路工作过程

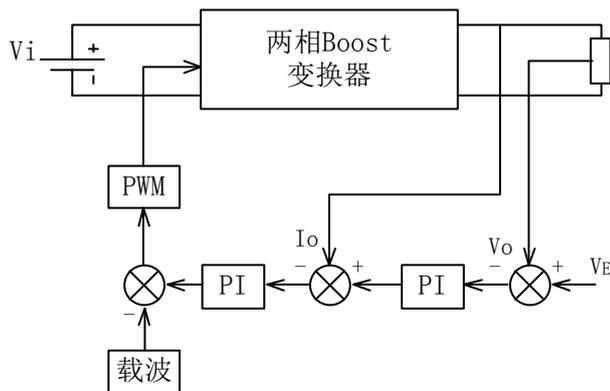


Figure3. Control block diagram of double closed-loop controlled two-phase boost converter
图 3. 双闭环两相 Boost 变换器控制原理框图

3.2. 数字电流滞环控制

数字电流滞环控制方法，即根据输入电压、输出电压、输出电流的采样信息和输出电压偏差反馈增益，得出公式并计算出所需的平均电感电流值，并根据需要将电流控制在该平均电感电流的一个滞环宽度内[5] [6]。图 4 为数字电流滞环控制原理框图。

在连续导电模式下，由数字控制器采集输入电压 $v_i(t)$ 、输出电压 $v_o(t)$ 、电感电流 $i_L(t)$ 、输出电流 $i_o(t)$ ，计算出变换器负载电阻 $R(t)$

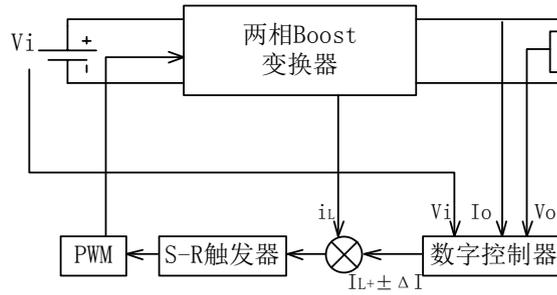


Figure 4. Control block diagram of digital hysteresis current controlled two-phase boost converter

图 4. 数字电流滞环两相 Boost 变换器控制原理框图

$$R(t) = \frac{v_o(t)}{i_o(t)} \quad (5)$$

设定期望的输出电压为 V_E ，由期望输出电压除以负载电阻，得出输出电流 $I_o(t)$

$$I_o(t) = \frac{V_E}{R(t)} \quad (6)$$

则理想的电感电流 $I_{L_1}^*(t)$ 、 $I_{L_2}^*(t)$

$$I_{L_1}^*(t) = I_{L_2}^*(t) = \frac{V_E I_o(t)}{2V_i} \quad (7)$$

由于在实际当中存在损耗，所以需要额外补充电感电流 $\Delta I_{L_1}(t)$ 、 $\Delta I_{L_2}(t)$

$$\Delta I_{L_1} = \Delta I_{L_2} = \frac{k[V_E - v_o(t)]I_o(t)}{2V_i} \quad (8)$$

其中 k 是电压偏差的增益。

所以需要的实际电感电流 $I_{L_1}(t)$ 、 $I_{L_2}(t)$

$$I_{L_1}(t) = I_{L_2}(t) = \frac{V_E i_o(t)[(k+1)V_E - kv_o(t)]}{2v_i(t)v_o(t)} \quad (9)$$

设置电流滞环宽度 ΔI ，采用下面的控制方法如图 5:

令 S 导通，当 $i_{L_1}(t) < I_{L_1}(t) - 0.5\Delta I$ 时

令 S 保持，当 $I_{L_1}(t) - 0.5\Delta I \leq i_{L_1}(t) \leq I_{L_1}(t) + 0.5\Delta I$ 时

令 S 截止，当 $i_{L_1}(t) > I_{L_1}(t) + 0.5\Delta I$ 时。

4. 参数设计

在设计一个变换器时，通常输入电压、输出电压以及相关的纹波要求都已经给定(要求电感电流纹波小于其平均电流的 20%，电压纹波小于其平均电压的 5% [7])，需要设计的参数有电感、电容和电流滞环宽度。电路是交错并联的，以电感 L_1 所在相为例，求解电路的电压增益[8]。根据 2.2 节对两相交错并联 Boost 电路的工作过程分析可知，在阶段 1 中，电感电流 L_1 两端的电压为 V_{in} ；在阶段 2 中，电感电流 L_1 两端的电压为 $V_{in}-V_o$ 。设在阶段 1 电路工作过程中的占空比为 D ，则在阶段 2 电路工作过程中的占空比为 $1-D$ 。稳态时，忽略电感电流纹波的影响，则有：

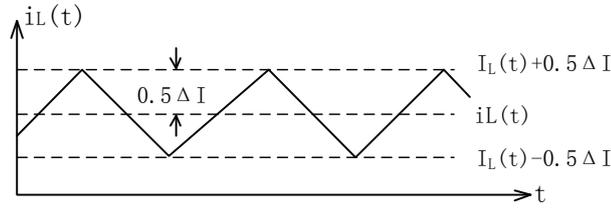


Figure 5. Inductor current under hysteresis current control method

图 5. 电感电流控制方法

$$DV_{in} + (1-D)(V_{in} - V_o) = 0 \quad (10)$$

即

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (11)$$

则电路开关管的占空比 D 为

$$D = \frac{V_o - V_{in}}{V_o} \quad (12)$$

由文献[9]可知, Boost 电路电感值的计算公式为

$$L = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta I_L \cdot f_s} \quad (13)$$

由于电路拓扑引入了交错并联结构, 则两条支路电感值的计算公式为

$$L = \frac{(2D-1)V_{in}}{\Delta I_{in} f_s} \quad (14)$$

其中开关频率 $f_s = 20$ kHz, 占空比 $D = 0.67$

代入公式(14)进行计算, $L_1 = L_2 = 800$ μ H

Boost 电路电容的计算公式为

$$C = \frac{I_o \cdot D}{\Delta U_o \cdot f_s} \quad (15)$$

代入公式(15)进行计算, $C = 100$ μ F

为了方便对电路进行检测与控制, 取电流滞环宽度 $\Delta I = 100$ mA

5. 仿真分析

采用数字电流滞环控制, 对两相交错并联 Boost 变换器进行 MATLAB 仿真。如图 6 所示, 输入电压 $V_{in} = 10$ V, $L_1 = L_2 = 800$ μ H, $C = 100$ μ F, $R = 80$ Ω , 设置期望的输出电压 $V_E = 30$ V。两条支路的开关管驱动信号为两个周期相同、占空比相同且相位延迟 180 度的 PWM 控制信号, 如图 7 所示。

从图 8 中可以看出, 两条支路的电感电流成交错相通状态。电感电流纹波相互抵消, 达到减小总输出电流纹波的效果。每相电感电流是流过电路电流的 1/2, 所以流过开关管的电压和总损耗都得以减少。电路中的电感较小, 电力系统能量增加[9]。

从图 9 中可以明显看出, 电路的总输出电流纹波小于电感电流纹波, 且输出电压纹波也大大减小。

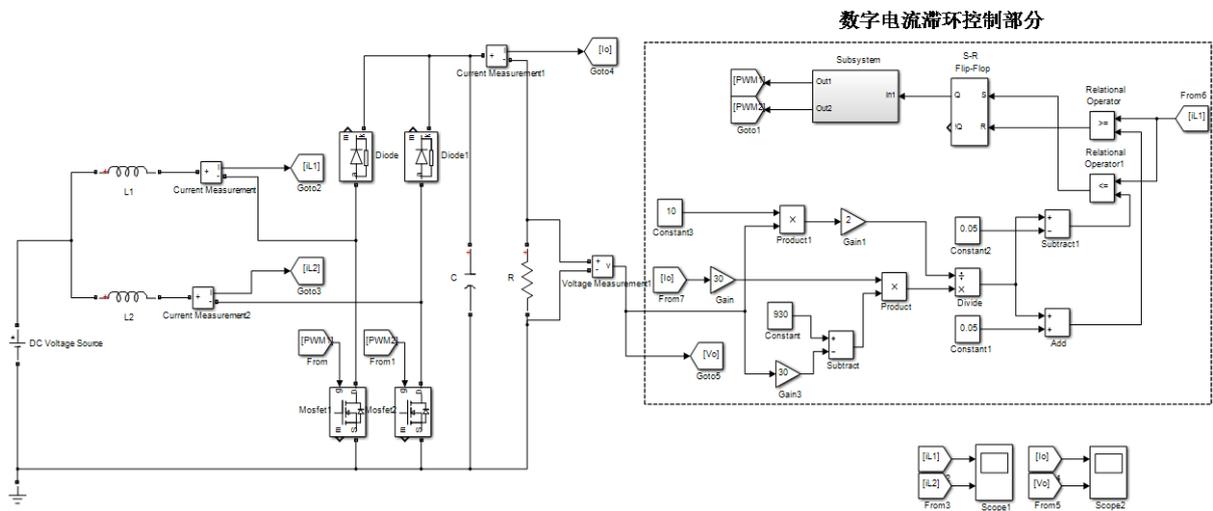


Figure 6. Two-phase interleaved boost converter simulation model

图 6. 交错并联 Boost 变换器仿真电路图

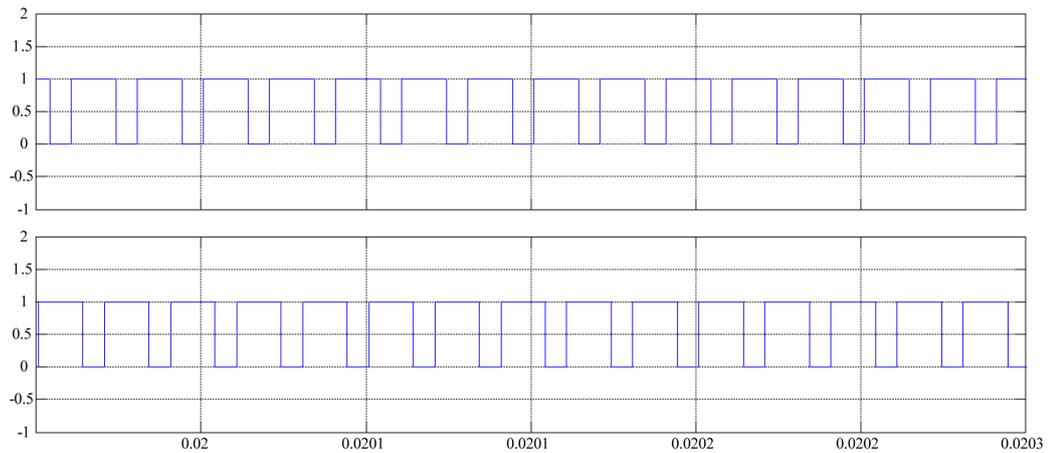


Figure 7. Two-branch PWM control signal

图 7. 两支路 PWM 控制信号

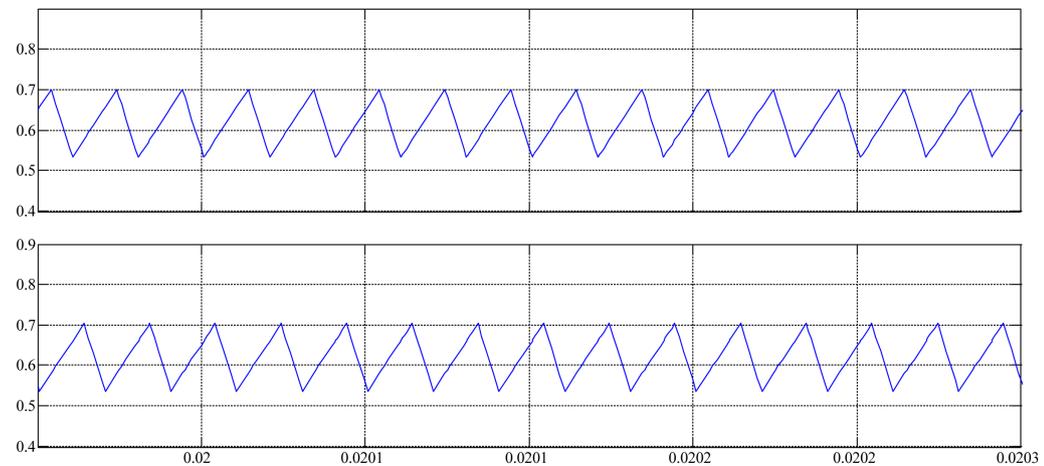


Figure 8. Balanced inductor current waveform

图 8. 两支路电感电流波形

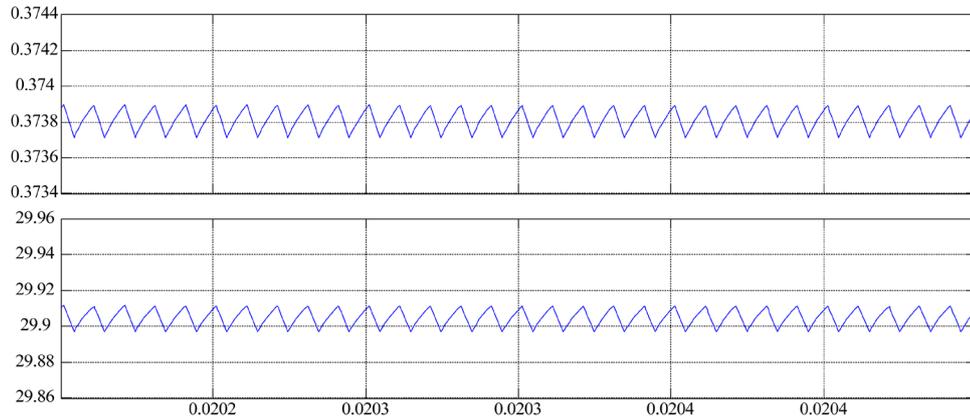


Figure 9. Output current waveform, output voltage waveform

图 9. 输出电流、输出电压波形

然而在实际的电路应用中，常存在一些未知的扰动使电路发生突变。本文针对输入扰动和输出扰动两种情况，分别采用两种控制方法进行仿真分析。设置仿真时间为 0.1 s。

当 $t = 0.04$ s 时，输入电压由 10 V 增大至 15 V；当 $t = 0.08$ s 时，输入电压由 15 V 减小至 10 V；

当 $t = 0.04$ s 时，负载电阻由 80Ω 增大至 200Ω ；当 $t = 0.08$ s 时，负载电阻由 200Ω 减小至 80Ω ；

数字电流滞环控制下的电路输出电流和输出电压的波形如图 10、图 11 所示。从图中可以看出，当输入电压增大/减小时，输出电压的上冲电压增量为 0.08 V，下冲电压增量为 0.08 V；当负载电阻增大/减小时，输出电压的上冲电压增量为 0.12 V，下冲电压增量为 0.15 V。仿真结果显示，当电路发生扰动时，输出电流和输出电压仅有较小扰动，控制器能快速做出响应使系统重新达到稳定，且控制精度高。

PI 控制下的电路输出电流和输出电压的波形如图 12、图 13 所示。从图中可以看出，当输入电压增大/减小时，输出电压的上冲电压增量为 1.5 V，下冲电压增量为 1 V；当负载电阻增大/减小时，输出电压的上冲电压增量为 0.2 V，下冲电压增量为 0.5 V。仿真结果显示，当电路发生扰动时，PI 控制器虽然能做出较快的动态响应，但其对输出电流和输出电压引起了较大的扰动。

从理论分析出发，数字电流滞环控制是直接根据系统的非线性模型建立得出的控制方法，它不需要对系统进行线性化的近似，从而保留其完整性。所以在系统输入或输出发生扰动时，能够实现快速并且更精确的动态响应。而 PI 控制是依据精确的数学模型建立得出的控制方法，一旦 PI 的各个参数值确定后，当系统输入或输出发生扰动时，该控制方法就不能适应系统在遇到干扰时的动态变化，从而进一步影响了对系统动态响应的速度和精度。根据上述对仿真数据的分析与对比，也验证了这一理论的正确性。

6. 结论

本文介绍了交错并联技术的基本原理及其特点，分析了两相交错并联 Boost 变换器的工作过程，简单叙述了 PI 控制和数字电流滞环控制，并对这两种控制方法做了进一步的分析与比较，最后经过 MATLAB 仿真，结果显示采用交错并联技术具有减小开关管应力，降低输出电压、输出电流纹波等优点；与传统的逻辑控制算法相比较，PI 控制和数字电流滞环控制的方法都更加简便，主要体现在灵活多变、易于控制、设计周期短等等。经过理论研究与分析对比，数字电流滞环控制既有数字控制的优点，又有 PI 控制所不具备的高准确性，其在稳态和动态性能上都更加优异。数字电流滞环控制下的变换器工作性能更可靠更灵活，具有较好的电压和负载调整率、输出纹波小，以及启动平缓等优良特性。仿真结果显示该控制器具有优越的稳态特性和抵抗系统在遇到大信号瞬态扰动时发生变化的良好性能，验证了理论的正确性。

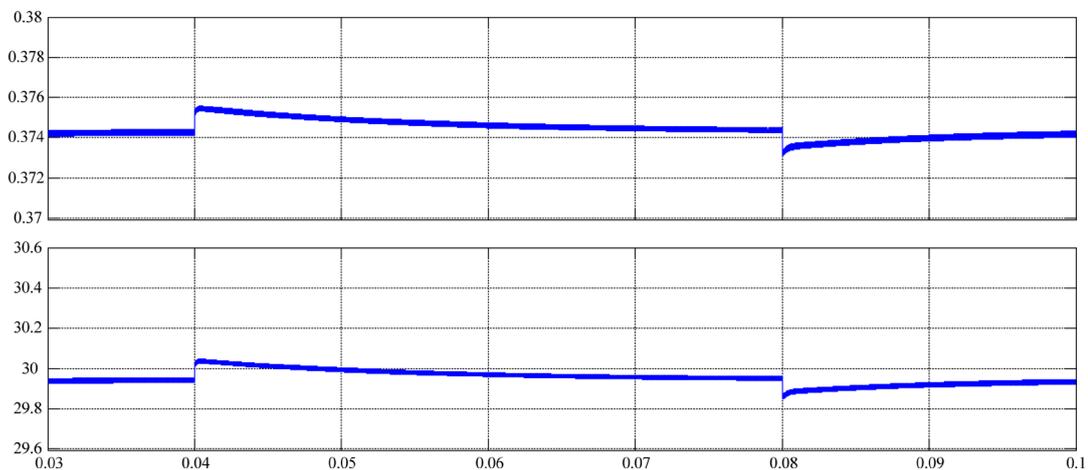


Figure 10. Performance of digital hysteresis current controller under step input voltage change

图 10. 数字滞环电流控制器在阶跃输入电压变化下的性能

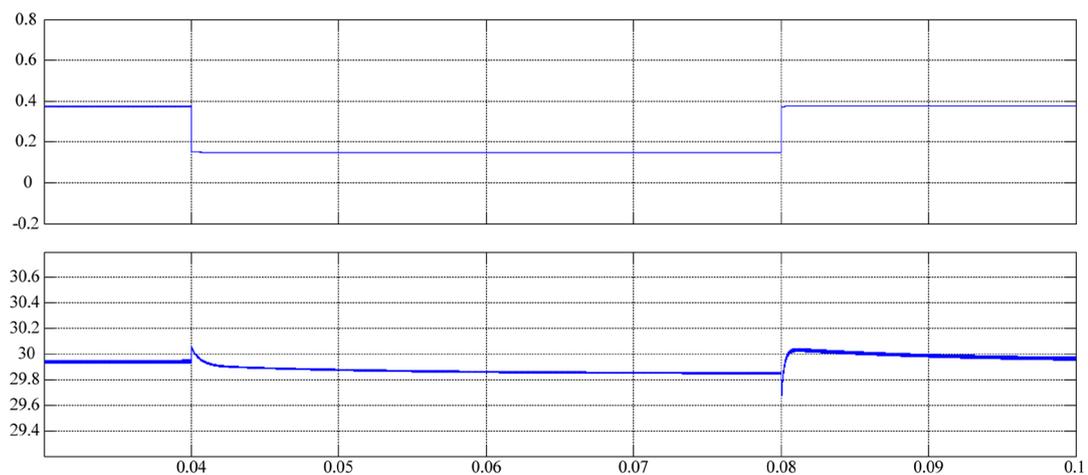


Figure 11. Performance of digital hysteresis current controller under step load change

图 11. 数字滞环电流控制器在负载变化下的性能

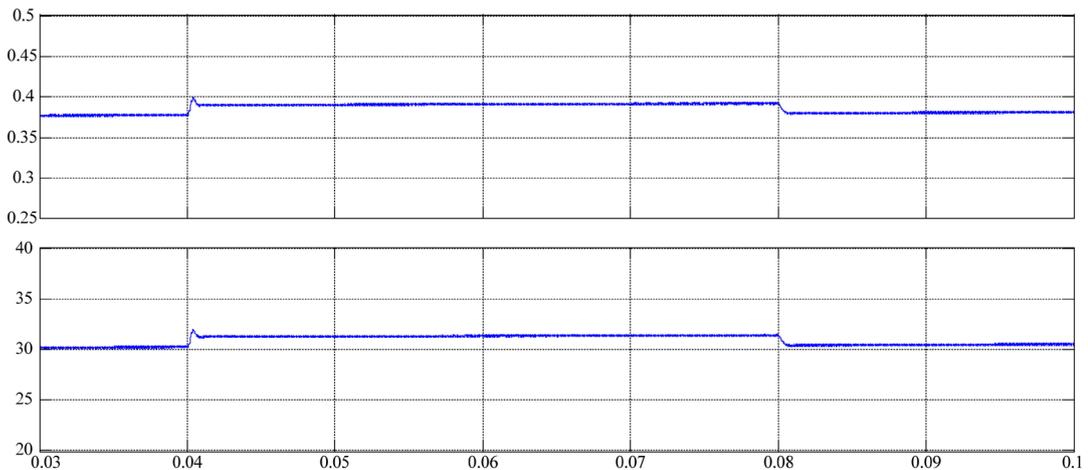


Figure 12. Performance of double closed-loop PI controller under step input voltage change

图 12. 双闭环 PI 控制器在阶跃输入电压变化下的性能

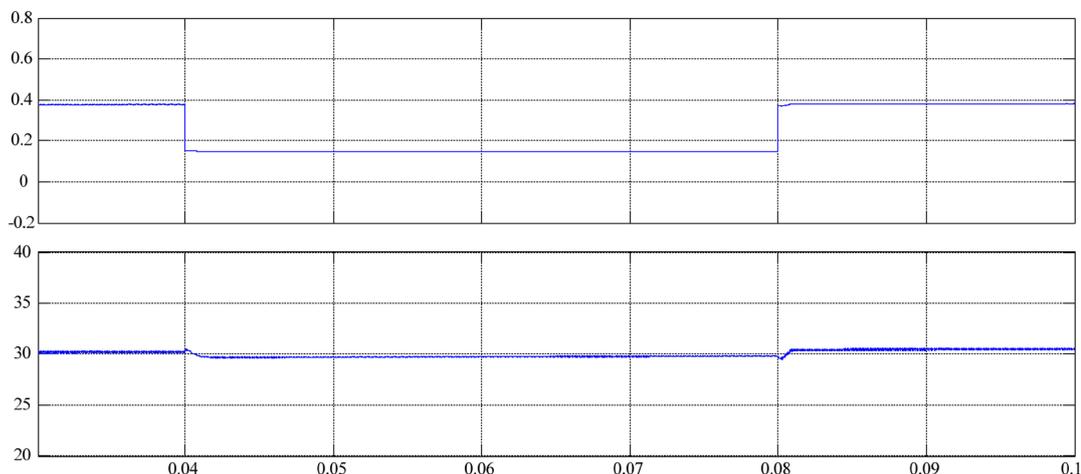


Figure 13. Performance of double closed-loop PI controller under step load change

图 13. 双闭环 PI 控制器在负载变化下的性能

基金项目

中小企业发展专项资金(对欧合作部分), 项目号 SQ2013ZOA100010。高性能 LED 植物生长灯驱动电源关键技术研究(天津市科委项目), 项目号 16JCTPJC46600。

参考文献 (References)

- [1] Shah, M., Sutaria, J. and Chauhan, C. (2015) Design, Simulation and Implementation of Two Phase Interleaved Bi-Directional DC-DC Converter. 2015 *International Conference on Electrical Electronics Signals Communication and Optimization (EESCO)*.
- [2] Ho, C.N.-M., Breuniger, H., Pettersson, S., *et al.* (2012) Practical Design and Implementation Procedure of an Interleaved Boost Converter Using SiC Diodes PV Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **27**, 2835-2845. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2178269>
- [3] 陆治国, 祝万平, 刘捷丰, 吴春军, 赵丽丽. 一种新型交错并联双向 DC/DC 变换器[J]. 中国电机学报, 2013, 33(12): 39-46.
- [4] 张菲菲. 交错并联 Buck 变换器研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2015.
- [5] 程红丽, 强新娟, 刘健. 数字电流滞环控制的 Buck-Boost DC/DC 变换器[J]. 电力电子技术, 2010, 44(12): 56-58.
- [6] 张军涛. 数字电流滞环控制的 Boost DCDC 变换器[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2011.
- [7] 陈建龙. 电动汽车的双向 DC-DC 变换器的研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [8] 陆治国, 郑路遥. 一种新型无源交错并联 Boost 软开关变换器[J]. 开关电源, 2011(12): 56-60.
- [9] Kanta, S., Plangklang, B. and Subsingha, W. (2014) Design of a Bi-Directional DC-DC 4 Phase Interleave Converter for PV Applications. *Energy Procedia*, **56**, 604-609. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.199>

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jee@hanspub.org