

四相交错并联 Buck 变换器的单周控制

李 昊, 荣智林, 刘良杰, 张 义

(株洲南车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 分析了四相交错并联 Buck 变换电路, 提出一种单周控制与 PID 结合的改进型单周控制方案, 以提高输出电压动态响应。采用该方案的变换器输出纹波低, 且具有优异的抗扰动性。理论和仿真结果证明了该控制方案的可行性和有效性。

关键词: Buck 电路; 交错并联; 单周控制; PID (比例积分微分)

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2014)04-0001-05

doi:10.13889/j.issn.2095-3631.2014.04.001

One-cycle Control for Four-phase Interleaved Buck Converter

LI Hao, RONG Zhi-lin, LIU Liang-jie, ZHANG Yi

(Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: It analyzed the circuit diagram of four-phase interleaved buck converter. A control scheme which combines PID controller and one-cycle control(OCC) was proposed to enhance dynamic response of converter output voltage. The converter with the proposed method has few output ripples and good robustness. The theory and simulation experimental results demonstrate its feasibility and validity.

Keywords: Buck circuit; interleaved parallel; one-cycle control; proportion integration differentiation (PID)

0 引言

在许多场合, 用电负载往往需要大容量的直流电源供电, 并对输出精度、纹波有很高的要求。单个电源功率模块容量和开关管承受应力的能力有限, 设计 and 应用比较困难。此外, 用电系统还要求供电设备有冗余以保证支路故障时仍能继续供电, 不至于整个系统瘫痪。因此电源模块并联受到越来越多的重视。并联电源的优点是: 大容量、高效率; 系统可靠性高; 能冗余配置; 能实现电源模块化和扩展性等^[1]。当几个 DC/DC 模块并联时, 如果交错运行, 则能实现: 减小输出电压和电流的纹波幅值, 提高纹波频率, 输出高质量的电压和电流; 减小输出滤波器的体积和质量, 同时不增加开关损耗和器件应力; 提高系统效率和功率密度^[2]。对于运

行于电感电流连续模式 (CCM) 下的 N 个模块并联的电源系统, 交错运行将使系统的纹波幅值降为单模块的 $1/N$, 输出纹波频率提高 N 倍^[3]。每相邻两相采用频率相同而相位差为 $2\pi/N$ 的触发脉冲驱动门极电路。

在大功率 DC/DC 变换器中, 为了满足输出电压纹波要求, 提出利用四相交错并联技术, 以减少输出纹波, 提高开关频率, 减小磁元件体积和施加在功率开关管上的应力。单周控制具有抗输入扰动能力强、响应速度快、稳定性好等优点, 但抑制负载扰动能力弱。因此, 本文采用了四相交错并联 Buck 电路, 以满足纹波要求; 设计了电压外环和单周期内环的控制方案, 以有效抑制输入电压波动和突投突切负载波动。

1 四相交错并联 Buck 变换器工作原理

四相交错 Buck 变换器的结构如图 1 所示。控制开关管 V1、V2、V3 和 V4, 使开关周期相等, 相位依次相错 $\pi/2$ 。四相电流交错叠加后的总电流的波动及其纹波较

收稿日期: 2014-04-30

作者简介: 李昊 (1989-), 男, 硕士, 研究方向为电力电子与电力传动。

小(图2)。

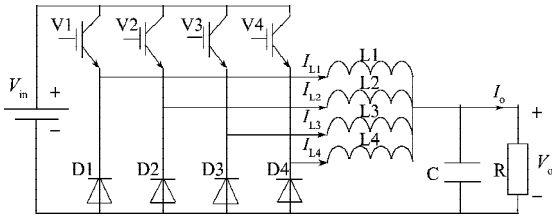
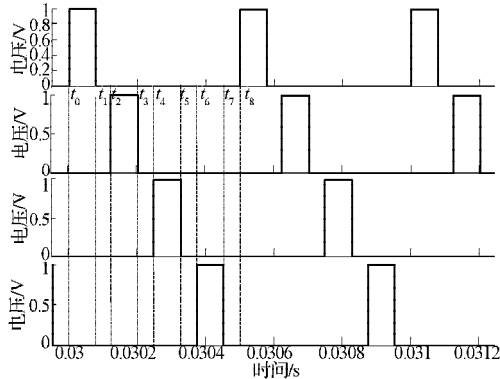
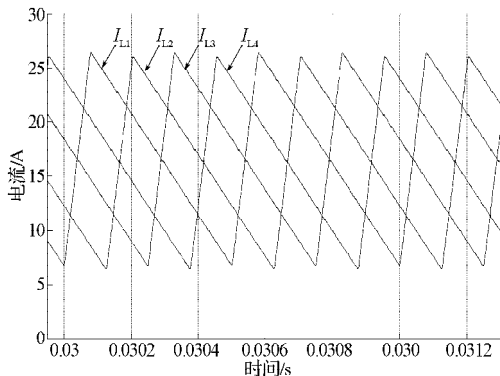


图1 四相交错并联Buck变换器

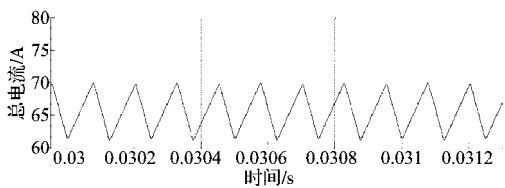
Fig. 1 Four-phase interleaved parallel Buck converter



(a) 四相脉冲信号



(b) 四相电流波形



(c) 总电流波形

图2 四相门极驱动信号及电流波形

Fig. 2 Waveforms of four-phase gate drive signals and output currents

设电感的充、放电电流是线性的,开关处于理想状态。在CCM模式下,一个周期内变换器的工作可以分为8个阶段^[4]:

第1阶段($t_0 \sim t_1$), V1触发导通, D1、V2、V3和V4截止, D2、D3和D4续流, 电感L1储存能量同时电流上升; 到达 t_1 时刻, V1截止, I_{L1} 达到最大值, 电感L2、L3和L4的电流减小, 释放磁能, 电容C充电。

第2阶段($t_1 \sim t_2$), V1、V2、V3和V4截止, D1、D2、D3和

D4续流, I_{L1} 从最大值开始减小, 电感L1释放磁能, L2、L3和L4继续释放磁能; 到达 t_2 时刻, I_{L2} 降低到最小值, 电容C放电。

第3阶段($t_2 \sim t_3$), V2触发导通, D2、V1、V3和V4截止, D1、D3和D4续流, 电感L2储存能量, 同时电流上升; 到达 t_3 时刻, V2截止, I_{L2} 达到最大值, L1、L3和L4的电流减小, 释放磁能, 电容C充电。

第4阶段($t_3 \sim t_4$), V1、V2、V3和V4截止, D1、D2、D3和D4续流, I_{L2} 从最大值开始减小, 电感L2释放磁能, L1、L3和L4继续释放磁能; 到达 t_4 时刻, I_{L3} 降低到最小值, 电容C放电。

第5阶段($t_4 \sim t_5$), V3触发导通, D3、V1、V2和V4截止, D1、D2和D4续流, 电感L3储存能量, 同时电流上升; 到达 t_5 时刻, V3截止, I_{L3} 达到最大值, L1、L2和L4的电流减小, 释放磁能, 电容C充电。

第6阶段($t_5 \sim t_6$), V1、V2、V3和V4截止, D1、D2、D3和D4续流, I_{L3} 从最大值开始减小, 电感L3释放磁能, L1、L2和L4继续释放磁能; 到达 t_6 时刻, I_{L4} 降低到最小值, 电容C放电。

第7阶段($t_6 \sim t_7$), V4触发导通, D4、V1、V2和V3截止, D1、D2和D3续流, 电感L4储存能量同时电流上升; 到达 t_7 时刻, V4截止, I_{L4} 达到最大值, L1、L2和L3的电流减小, 释放磁能, 电容C充电。

第8阶段($t_7 \sim t_8$), V1、V2、V3和V4截止, D1、D2、D3和D4续流, I_{L4} 从最大值开始减小, 电感L4释放磁能, L1、L2和L3继续释放磁能; 到达 t_8 时刻, I_{L1} 降低到最小值, 电容C放电。

四相交错并联Buck变换器的工作过程即按第1~第8阶段周期进行。在一个开关周期内, 4个电感中每个仅有一次充电储能过程, 其他时间均处于放电续流状态, 表明每相支路的电流纹波频率与单相Buck变换器的工作频率相同; 整个电路在一个开关周期内4个电感依次充、放电, 即有4个充电储能和4个放电续流, 因此总电流纹波频率为单相支路开关频率的4倍(图2(c))。

电感在电流断续模式(DCM)下, 四相交错并联Buck变换器工作过程有12个阶段, 大部分工作过程与CCM相同, 在增加的4个阶段中电感电流均为零, 仅有电容C放电的过程。

四相交错并联, 如果每相电感为L, 则并联总电感等效为 $4 \times L$, 相对于单个Buck电路, 达到相同性能所需的输出电容更小。每相分别承受电流应力, 大大提高了变换器对大电流输入的承受能力。在开关频率恒定时, 每相可采用较低的频率, 以达到更高的效率。