

一种直流电源模块并联运行均流方法^{*}

韩 猛¹, 陈 昭², 张玮麟¹

(1. 黑龙江科技大学 电气与控制工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150027;

2. 哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 电源模块间的并联运行均流控制是实际应用中常见的问题。针对电源模块并联运行均流控制中存在的均流精度不高、稳定性差、抗干扰能力低的问题, 提出了一种电压环结合双电流环进行均流控制的方法。对直流电源模块的输出电压进行采样, 形成外电压环, 稳定输出电压。利用最大电流均流的方法对模块输出电流进行均流控制, 形成外电流环。各模块主电路电流经过采样电路连接到处理器形成内电流环, 保证输出电流和均流的精度。电压环和双电流环经过处理器的调制, 产生脉宽调制(PWM)对各个直流电源模块进行控制。通过仿真分析和 2 台 4 000 W 样机测试, 验证了电压环和双电流环控制的均流方法具有均流精度高、稳定性好、抗干扰能力强的优点。

关键词: 电源模块; 并联运行; 均流控制; 双电流环

中图分类号: TM 92 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)06-0093-04

doi: 10.12177/emca.2020.039

A Current Sharing Method for Parallel Operation of DC Power Module^{*}

HAN Meng¹, CHEN Zhao², ZHANG Weilin¹

(1. Institute of Electrical and Control Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150027, China;

2. School of Measurement-Control Technology and Communications Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Current sharing control of parallel operation between power modules is a common problem in practical applications. In view of problems with low current sharing accuracy, poor stability and low anti-interference ability in current sharing control of parallel operation of power modules, a method of current sharing control with voltage loop and double-current-loop is proposed. Output voltage of DC power module is sampled, and the external voltage loop is formed to stabilize the output voltage. Maximum current sharing method is used to control the output current of module and form the external current loop. Main circuit current of each module is connected to the processor through sampling circuit to form the internal current loop. In this way, the accuracy of output current and current sharing can be ensured. Voltage loop and double-current-loop are modulated by the processor, generating PWM to control each DC power module. Through simulation analysis and tests of two 4 000 W prototypes, it is verified that the current sharing method controlled by voltage loop and double-current-loop has the advantages of high current sharing accuracy, good stability and strong anti-interference ability.

Key words: power modules; parallel operation; current sharing control; double-current-loop

收稿日期: 2020-02-25; 收到修改稿日期: 2020-04-16

^{*} 基金项目: 黑龙江省 2019 年大学生创新创业训练计划项目(201910219072)

作者简介: 韩 猛(1999—), 男, 研究方向为电气工程及其自动化。

陈 昭(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

0 引言

大功率电能变换电路在多种场合得到应用,尤其是在电动汽车、航天航空、工业化生产等场合,对于大功率电路并联均流控制方法的研究也显得十分重要。

文献[1]针对电动汽车电能变换电路提出了一种滑动平均控制的均流方法,具有较强的抗干扰能力,但是存在均流精度不高的问题。文献[2]对输出电压环和电流环进行设计,提出了一种双环控制的均流电路,但在双环控制过程中电流环抗干扰能力差,导致整个系统抗干扰能力较低。文献[3]利用谐振原理,设计了一种具有自动均流特性的并联 LLC 谐振变换器,但整个变换器系统在自动均流过程中存在一定的均流偏差。文献[4]通过 DSP 数字控制,提出了一种基于 LLC 谐振变换器的数字控制均流方法,但是存在谐振点难以掌握、抗干扰能力差的缺点。文献[5]进行了各个模块之间的信息通信,使得各模块的输出电压一致,但是通信过程中容易出现数据缺失的问题,导致均流精度差。

为了解决电源模块并联运行过程中并联均流精度低、抗干扰能力差的问题,本文提出了一种直流电源模块并联运行的双电流环均流控制方法。在传统双闭环均流控制的基础上,增加了内电流控制环,通过对电压环和双电流环进行控制,使得并联运行的各个电源模块电流分布均衡。所设计的均流方法具有均流精度高、稳定性高、抗干扰能力强等优点。

1 电路设计

对 2 台 4 000 W 的 DC-DC 变换器进行并联均流控制,核心处理器选择 DSP 芯片 TMS320F28335,并联均流控制的电路图如图 1 所示。

图 1 中,输出额定电压为 400 V,电流传感器 CT1 和 CT2 均选择 ACS712 电流传感器芯片,分别对主电路电流和输出端电流进行采样。

CT1 将主电路电流转化为电压经过采样电路连接到 DSP 处理器,形成内层电流环,内层电流环避免输出电流过大,保证了均流的精度和系统的抗干扰能力。CT2 将输出端电流转化为电压,

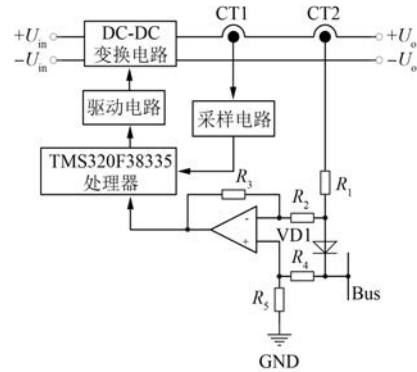


图 1 均流电路图

单个模块的输出电流转化为电压后,经过二极管 VD1 连接到均流 Bus 母线上。当多个模块并联运行后,电流最大的模块转化后的电压最高,经过二极管后即为均流母线电压,故均流母线电压为多个模块并联运行时电流最大的模块转化而来的电压。电流较小模块的电流转化为电压后与均流母线电压通过运算放大器进行误差放大^[6],误差放大信号连接至 DSP 处理器,形成外层电流环^[7],外电流环保证各个模块之间能够实现并联均流运行。

对输出电压进行采样,连接至 DSP 处理器,形成电压环。电压环和双电流环经过 PI 调节后,生成脉宽调制(PWM)信号,经过驱动电路对 DC-DC 变换电路进行驱动,调节各个模块的输出电压,达到各个模块均流的目的^[8]。

2 控制方法

电压环和双电流环共同对整个系统作用,其中电压环起到稳定外环电压的作用,外层电流环根据最大输出电流进行模块间的均流,内电流环则限制最大输出电流以保证均流的精度和稳定性。均流控制方法框图如图 2 所示。

外层电流环为均流环,利用最大电流法进行均流^[9],将各模块的电流值与均流母线上的最大电流进行误差放大后,得到电流差值 ΔI_{\max} ,经过一个比例放大 P 环节后转化为 ΔU_{\max} ,利用最大电流法进行均流会出现各个模块额定输出电压偏高、输出电流偏大的情况。内层电流环为精确稳流环,对主电路电流 I_{dc} 进行采集,与设定参考电流 I_{ref} 进行误差放大,形成误差放大信号 ΔU_{dc} ,消除了输出额定电压偏高的误差。 ΔU_{\max} 和 ΔU_{dc} 经

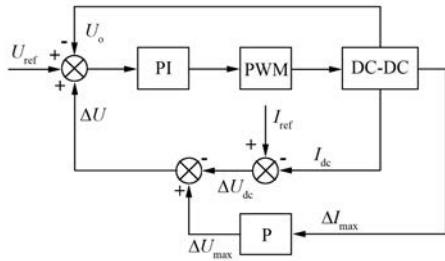


图2 均流控制方法框图

过 DSP 处理器内部比较调制处理后,形成误差补偿信号 ΔU 。参考电压 U_{ref} 和误差补偿信号 ΔU 进行叠加后,与输出电压 U_o 进行比较调整,调整产生的误差信号经过比例积分 PI 环节后,产生 PWM 信号对各个 DC-DC 变换电路模块进行驱动,达到各个模块之间精确均流的目的^[10]。

3 仿真分析

在 PLECS 仿真软件里对 2 个额定输出电压为 400 V 的直流电源模块进行直接并联运行仿真,工作频率为 20 kHz,并联的输出端等效负载为 20 Ω ,仿真电路图如图 3 所示。

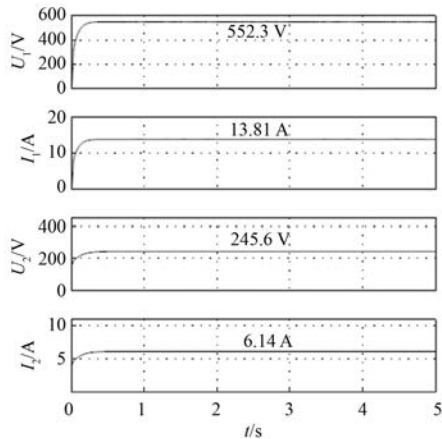


图3 模块直接并联输出波形

由图 3 可知,直接进行 2 个直流电源模块的并联运行,基本不能实现均流,2 个模块之间的输出电压和电流偏差太大。一路模块发生严重过载情况;另一路模块没有得到充分的应用。

利用传统单电流环控制的最大电流均流法对 2 个模块进行并联均流控制,两电源模块并联运行的输出端波形如图 4 所示。

根据最大电流均流的方法,利用设计的双电

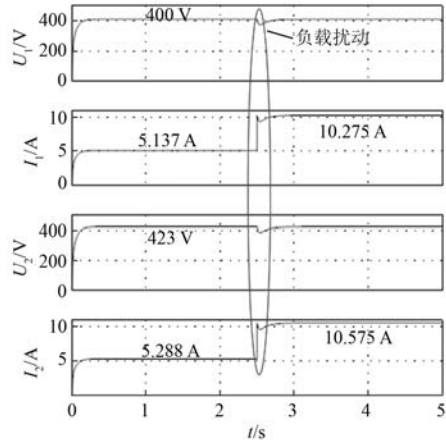


图4 单电流环控制模块并联输出波形

流环和电压环共同控制的方法对 2 个直流电源模块的并联运行进行均流控制,输出端波形如图 5 所示。

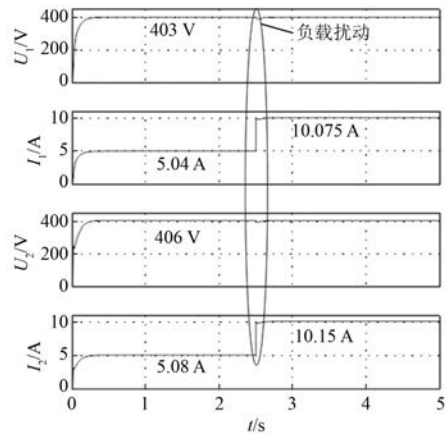


图5 双电流环控制模块并联输出波形

由图 4 可知,在利用传统最大电流法进行 2 个直流电源模块之间的并联均流控制时,两路模块之间能够实现均流运行,额定输出电压为 411、423 V,额定输出电流为 10.275、10.575 A。但是,输出电压超过额定电压,不利于电源模块的长久运行。改变输出端负载,使得系统由半载向满载运行进行负载扰动仿真,但输出系统经过较长时间才稳定,抗干扰能力差。由图 5 可知,利用双电流环和电压环进行均流控制时,2 个模块的输出电压稳定在额定输出电压附近,额定输出电压为 403、406 V,额定输出电流为 10.075、10.150 A,2 个模块之间的均流精度有所提高。改变输出端负

载,使得系统由半载向满载运行进行负载扰动仿真,双电环控制增强了整个系统的抗干扰能力,系统快速达到稳定输出。

4 试验验证

采用 2 个 4 000 W 的直流电源模块进行试验测试,工作频率为 20 kHz,输入电压为交流 380 V,输出电压为 400 V。处理器为 TMS320F28335,输出端滤波电感为 10 mH,电容为 470 μ F,电流传感器为 ACS712,输出端负载为 20 Ω 。直接利用基于最大电流法进行单电流环进行并联运行均流控制的试验测试输出波形如图 6 所示。

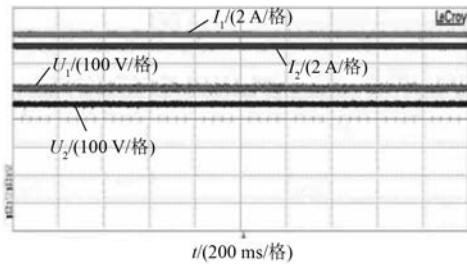


图 6 单电流环控制模块并联输出测试波形

利用设计的基于最大电流法,采用双电流环进行 2 个模块并联运行均流控制的测试波形如图 7 所示。

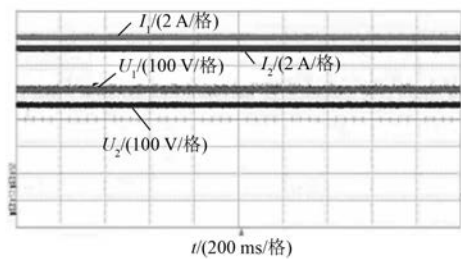


图 7 双电流环控制模块并联输出测试波形

根据图 6 和图 7 可知,测试波形图与仿真结果相似。基于最大电流法对直流电源模块并联运行进行均流控制,单电流环控制时 2 个模块能够实现均流运行,但输出电压均偏高。一路电压为 423.8 V,电流为 10.567 A;另一路电压为 410.8 V,电流为 10.273 A。该方法不利于模块的长期运行,且均流精度较低,存在一定误差。当采用双电流环进行均流控制时,2 个模块均工作在额定电压附近。一路电压为 409.9 V,电流为 10.226 A;

另一路电压为 402.2 V,电流为 10.065 A。采用该方法,均流精度得到大大提高,有利于整个系统的长时间可靠稳定运行。

5 结 语

本文根据最大电流均流法,利用主电路电流和输出端电流形成双电流环控制,结合电压环控制,达到了直流电源模块并联均流运行的目的。经过仿真分析和试验测试,设计的双电流环均流控制方法与传统的均流方法相比,具有均流精度高、稳定性好、抗干扰能力强的优点。

【参考文献】

[1] 张笑笑.电动汽车充电均流控制方法及电源设计 [D].合肥:合肥工业大学,2019.

[2] 韩猛,张元科,孙贺,等.基于 Buck 变换器的并联均流系统研究[J].电动工具,2019(4): 4.

[3] 徐玉珍,郭跃森,林维明.一种具有自动均流特性的并联 LLC 谐振变换器[J].中国电机工程学报,2018,38(22): 6671.

[4] 万志华,王建军,吴春燕,等.基于数字控制技术的 LLC 电源并联均流的研究[J].电力电子技术,2018,52(9): 71.

[5] 汪涛,朱一昕,熊连松.基于一致性的电源模块并联控制策略[J].电子设计工程,2018,26(24): 74.

[6] SINGH S K, CHOUDHURI S G. Hierarchical fuzzy control applied to parallel connected UPS inverters using average current sharing scheme[J]. Journal of the Institution of Engineers (India): Series B,2018,99(4): 369.

[7] 苏少侃,彭勃,王立伟,等.一种新型双环控制并联均流稳压电路[J].空间控制技术与应用,2018,44(4): 72.

[8] TRÉGOUËT J, DELPOUX R. New framework for parallel interconnection of buck converters: application to optimal current-sharing with constraints and unknown load[J]. Control Engineering Practice, 2019,87: 59.

[9] 张强,姚绪梁,张敬南.大功率直流电源并联运行的均流控制[J].电力电子技术,2011,45(3): 73.

[10] 彭龙飞.一种可多相交错并联大电流 BUCK 型 DC-DC 变换器的设计与研究[D].成都:电子科技大学,2019.