

DC/DC 模块电源并联研究

石健将, 王惠贞, 严仰光

(南京航空航天大学, 南京 210016)

摘要: 介绍了直流变换器模块并联及其均流问题。从模块输出特性角度分析了 CCM 工作模块不能直接并联, 而必须采取均流措施; 从模块输出特性和能量角度分析 DCM 工作模块可以直接并联, 且能自然实现各模块间均流。用 4 个 DCM 工作 Buck 电源模块交叉并联实验证实了这一结论。

关键词: 模块; 电源; 并联; 均流

中图分类号: TM46; TN86 文献标识码: A 文章编号: 1000-100X(2002)03-0043-04

Study of the Paralleling of DC/DC Power Supply Modules

SHI Jian-jiang, WANG Hui-zhen, YAN Yang-guang

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The paralleling of converter modules and their current sharing are presented. According to the output characteristics of modules, CCM modules can not be paralleled directly and must adopt current sharing approaches. DCM modules can be paralleled directly and their current sharing can be achieved naturally. The conclusion is verified experimentally by the interleaving of four DCM Buck modules.

Keywords: module; power supply; paralleling; current sharing

1 引言

随着电子系统的发展, 电源技术亦相应得到发展, 对电源的可靠性、效率和功率密度的要求也越来越高。若采用单个变换器电源供电, 则设计中至少要面对电流应力、热应力及选择价格昂贵的高功率等级的功率开关器件等问题。采用多个电源模块并联技术, 可以合理解决以上问题。

模块交叉并联是并联方式的一种, N 模块交叉并联指各并联模块的开关频率相同, 但起始导通时刻彼此依次错开 $1/N$ 开关周期。模块并联均流方式有多种, 总体上可分为下垂法和有源均流法两大类^[1]。文献[2]介绍了交叉并联技术在 PFC 中的应用, 并采用频域法分析交叉并联减少总输入电流脉动。本文从输出特性角度对 CCM 模块直接并联和有源均流并联的均流特性进行了分析; 从输出特性和功率角度对 DCM 模块可以直接并联从而自然实现均流特征进行分析; 对 4 个 CCM 工作 Buck 模块交叉并联从而减少输出电流脉动进行定量理论分析; 最后用实验验证了 4 个 DCM 工作模块可以直接交叉并联并能自然实现均流, 且具有较小输出电流脉动等优点。

2 CCM 和 DCM 电源模块并联均流分析

2.1 CCM 工作模块并联均流分析

CCM 工作模块可以等效为一个理想电压源和阻值很小的输出电阻串联而成的高性能电压源^[3], 两个 CCM 工作模块直接并联等效电路如图 1 所示。如果每个模块参数相同, 即理想电压源和输出电阻都相等, 则每个模块均匀承担总输出电流亦即模块间自然实现均流。图 2 为两个 CCM 工作模块直接并联输出特性曲线, 其中输出电阻值较小、理想电压源值较高的模块将输出大部分负载电流。模块输出电阻越小, 其输出特性斜率越大, 并联后均流性能越差。如图 3 所示, 增大各并联模块输出电阻, 使它们输出特性斜率减小, 可以有效地改善并联均流性能, 但会使系统效率下降, 尤其在要求输出大电流场合, 会使并联系统输出电压调节特性变差^[3]。

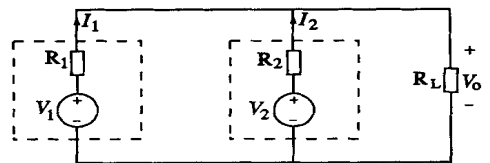


图 1 两模块并联等效电路

CCM 工作模块有源均流并联, 一般都要检测各模块的输出电流, 然后与参考电流比较, 控制模块输出电流与参考电流一致^[3]。图 4 为两个 CCM 工作模块并联输出特性曲线。从输出特性曲线可知, 有

收稿日期: 2001-10-08

定稿日期: 2001-11-19

作者简介: 石健将(1969-), 男, 博士研究生。研究方向为电力电子技术。

源均流法的均流状况不随输出电压变化而变化, 因此模块并联均流技术是多模块实现并联的关键。

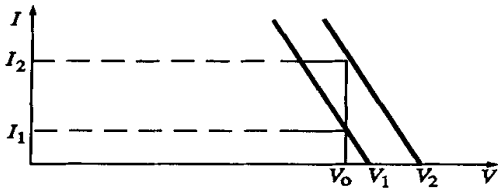


图 2 两模块直接并联输出特性

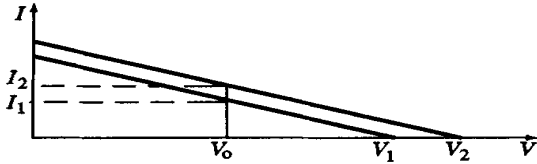


图 3 两模块直接并联输出特性

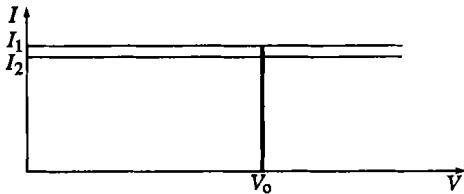


图 4 两模块有源均流并联输出特性

2.2 DCM 工作 Buck 模块并联均流分析

为了讨论 DCM 工作 Buck 模块直接并联的均流性能, 先分析模块的输出特性。为了便于分析, 先定义以下归一化参数:

$$M = \frac{V_o}{V_i} \quad (1)$$

$$J = \frac{R_o}{V_i} I_o \quad (2)$$

$$Q = \frac{M}{J} = \frac{R_L}{R_o} \quad (3)$$

$$R_o = 2Lf_s \quad (4)$$

式中 V_o —— 模块的输出电压
 I_o —— 模块的输出电流
 R_L —— 模块的负载电阻
 R_o —— 模块的特性阻抗
 L —— 输出滤波电感
 f_s —— 开关频率

由 Buck 变换器电流断续工作方式推得:

$$J = D^2 \left(\frac{1-M}{M} \right) \quad (5)$$

$$J < (1-M)M \quad (6)$$

由式(5)、(6)得到 Buck 模块 DCM 工作时的输出特性, 如图 5 粗实曲线以下部分。

该输出特性表明 DCM 工作 Buck 模块具有一定值的等效输出电阻, 故电流断续工作方式的 Buck 变换器可以直接并联且能自然实现均流^[3]。需要说明的是该等效输出电阻不是通常意义上的输出电

阻, 它并不消耗功率, 但反映输出特性斜率。

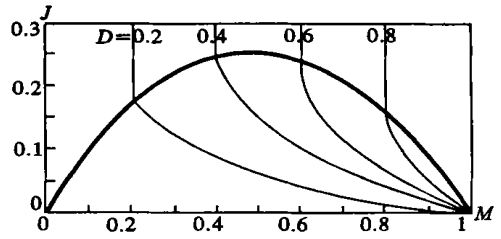


图 5 DCM 工作模块输出特性

从 DCM 工作模块提供负载能量的角度, 也可以解释 DCM 工作模块可直接并联而自然实现均流。一个 DCM 工作 Buck 模块在一个开关周期内提供的负载能量为:

$$E_1 = \frac{V_i - V_o}{2L_1} V_i T_{on}^2 \quad (7)$$

由式(7)可知, 多个 DCM 工作模块直接并联时, 各模块输出能量基本相同, 且各模块输出电压 V_o 相同, 故各模块输出电流 V_i 也基本相同, 即能自然实现均流。

2.3 CCM 模块有源均流方式并联与 DCM 模块直接并联之比较

CCM 工作模块有源均流法是通过检测各模块输出电流及电流调节器来控制其输出电流等于参考电流; DCM 工作模块并联可自然实现模块间均流, 而无需检测、反馈模块输出电流。

DCM 工作的 Buck 模块, 由于不存在续流管反向恢复引起的损耗, 其效率和开关频率均比 CCM 高些, 系统功率密度亦得以提高。DCM 模块并联还有一个优点: 整个系统可共用一个控制电路。这样, 大大降低了整个系统控制复杂性, 同时, 也减小了系统的体积及降低了成本。

有源均流法除了系统固有电压控制调节器外, 每个模块都带有电流控制器, 增加了整个系统控制复杂性及成本。但有源均流法有其自身的优点: ①相对于直接并联的 DCM 工作模块, 有源均流并联 CCM 模块功率半导体器件峰值电流要小些; ②电感电流连续可以降低对滤波器设计要求^[3]; ③DCM 模块间的均流依赖于模块的工作方式, 如负载变化使模块从 DCM 方式转变为 CCM 方式, 则模块间均流将失败; ④有源均流法中各模块本身具有有限流功能。

2.4 模块交叉并联

交叉并联是并联方式的一种, 其均流控制原理与一般并联方式没有本质差别, 仅各模块驱动信号依次错开一个固定相位。但是, 交叉并联除具有普通并联一系列优点外, 还具有一些特有的优点: 减小

输出电流、电压的纹波幅值,提高输出电压、电流纹波频率,减小输出滤波器体积重量,同时不增加开关频率、开关损耗和器件应力;改善输入电流波形,减小输入电容的容量和体积^[2];提高输入端功率因数,减小输入端EMI^[2];提高系统效率和功率密度。

4个CCM工作Buck模块交叉并联主电路及主要波形如图6、7所示。 $I_{g1} \sim I_{g4}$ 分别为4个模块的驱动信号、相位依次错开1/4开关周期, $I_{L1} \sim I_{L4}$ 分别为4个模块的输出滤波电感电流, I_L 为4个模块交叉并联后的输出电感电流($I_{L1} \sim I_{L4}$ 的叠加)。

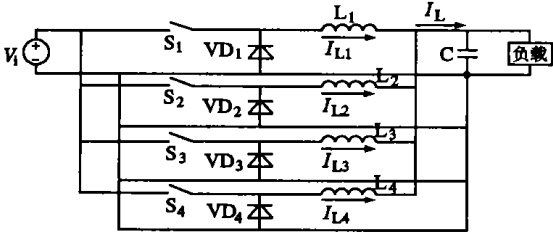


图6 4个Buck模块并联

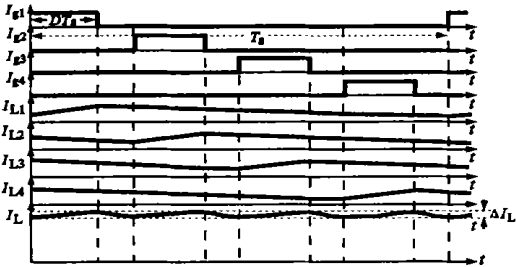


图7 4个Buck模块交叉并联波形

由图7中 $I_{L1} \sim I_{L4}$ 电流波形及变换器滤波电感方程可推得总输出电流 I_L 变化量 ΔI_L 。Buck变换器模块稳态工作时电感电流 I_{L1} 的变化量:

$$\Delta i_{L1} = \frac{V_o(1-D)}{L f_s} \quad (8)$$

I_{L1} 与 I_{L3} 叠加后得到电流变化量:

$$\Delta i_{L1,3} = \frac{V_o(1-2D)}{L f_s} \quad (D \leq 0.5) \quad (9)$$

I_{L2} 与 I_{L4} 叠加后得到电流变化量:

$$\Delta i_{L2,4} = \frac{V_o(1-2D)}{L f_s} \quad (D \leq 0.5) \quad (10)$$

$I_{L1} \sim I_{L4}$ 叠加后得到电流 I_L 变化量:

$$\Delta i_L = \frac{V_o(1-4D)}{L f_s} \quad (D \leq 0.25) \quad (11)$$

比较式(8)和式(11)表明,当占空比 $D \leq 0.25$ 时,4路CCM工作模块交叉并联后系统总输出电流脉动较单模块减少许多。由图7还可知,总输出电流脉动频率是单模块的4倍。当 $0.25 < D \leq 1$ 时,4个CCM工作模块并联后总输出电流脉动的归一化

与空比 D 关系^[2]如图8所示。图8表明, $D = 0.25, 0.5, 0.75$ 时总输出电流脉动为零;无论占空比 D 为何值,4个CCM工作模块交叉并联后输出电流脉动总比其中任一模块要小。

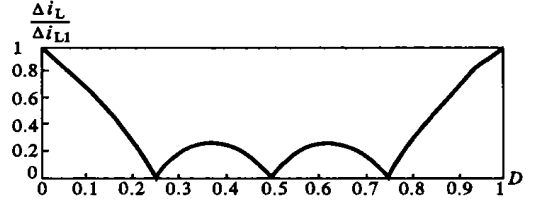


图8 4个CCM工作Buck模块交叉并联输出

DCM工作模块交叉并联输出电流脉动关系式较CCM更复杂,其归一化 $\Delta i_L / \Delta i_{L1}$ 是滤波电感电流不为零占空比 D_L 和开关管占空比 D_Q / D_L 的函数^[2]。需指出, N 个DCM工作模块交叉并联,须保证 $D_L > 1/N$,否则交叉并联不能减小输出电流脉动量。 N 个DCM工作模块交叉并联后,其输出电流脉动比其中一个模块要小($D_L > 1/N$)。

3 实验结果

实验主电路及主要器件参数如图9所示,电感 $L_1 \sim L_4$ 由EE55B铁芯绕制而成,交流输入电压 V_i 为240~300V,开关频率 $f_s = 50\text{kHz}$,直流输出电压 V_o 为70~75V,最大输出功率1.1kW。4模块并联共采用两个控制环:4路输出滤波电感电流合成的总电流反馈控制环和输出电压反馈控制环。控制原理框图如图10所示,主要由两片SG3525芯片和一片uA741运放构成,其中uA741构成电压控制外环,SG3525构成电流控制内环。

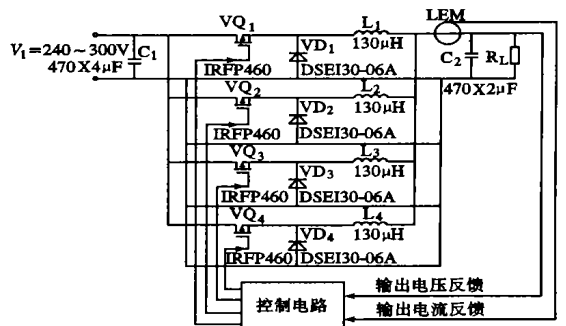


图9 4个Buck模块并联主电路

SG3525的3端外接同步控制信号,使两片3525芯片11、14端分别输出相位依次错开1/4开关周期、开关频率相同的4路PWM控制信号。该控制电路输出的4路PWM控制信号实验波形,如图11所示:每路输出信号的开关频率相同为50kHz,占空比基本一致、彼此相位依次错开1/4开关周期,示波器通道ch2的上升沿用作同步触发信

号。输入电压 $V_i = 270V$ 、输出电压 $V_o = 75V$ 、输出电流 $I_o = 13A$ 时,各并联模块输出电感电流实验波形如图 12 所示:各模块输出滤波电感电流波形基本相同、仅相位依次相隔 $1/4$ 开关周期。在输入电压 $V_i = 270V$ 、输出电压 $V_o = 75V$ 下,不同负载时各模块间均流状况实验数据如表 1 所示。这表明 4 个 DCM 工作模块并联后能自然实现均流,且均流效果很理想。并联后输出合成电感电流 I_L 和输出电压 V_o 实验波形分别如图 13、14 所示。

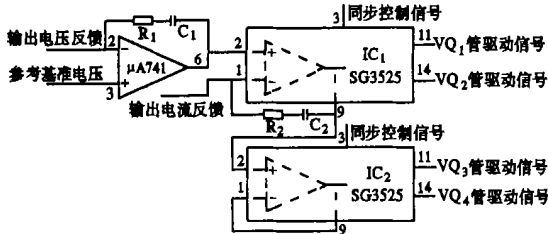


图 10 交叉并联控制图

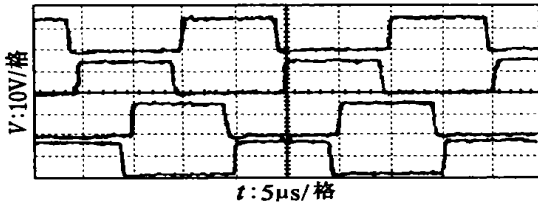


图 11 4 模块交叉并联驱动波形

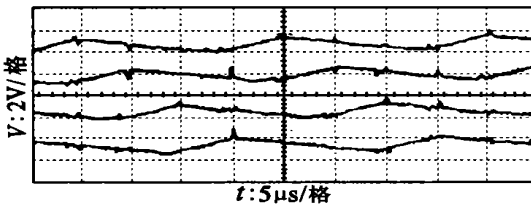


图 12 4 交叉并联模块输出滤波电感电流

表 1 各并联模块输出滤波电感电流值

I_{L1}/A	I_{L2}/A	I_{L3}/A	I_{L4}/A	I_L/A
1.0	1.0	1.0	1.0	4.0
1.97	1.98	2.03	2.03	8.01
2.48	2.48	2.52	2.52	10.0
2.98	2.99	3.01	3.02	12.0

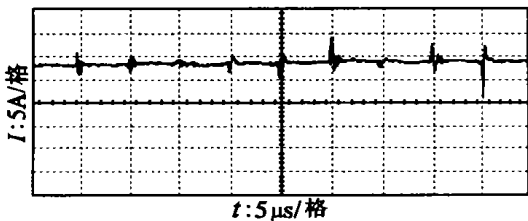


图 13 4 个并联模块滤波电感电流合成波形

由实验电流波形可以看出,交叉并联后总输出电感电流几乎无脉动,因此交叉并联的确大大减小了总输出电感电流纹波幅值,并且纹波频率是开关频率的 4 倍。输出电感电流经滤波电容滤波后,输

出电压低频交流纹波如图 15 所示,峰峰值在 100mV 以下。

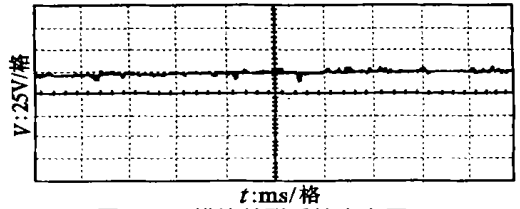


图 14 4 模块并联后输出电压

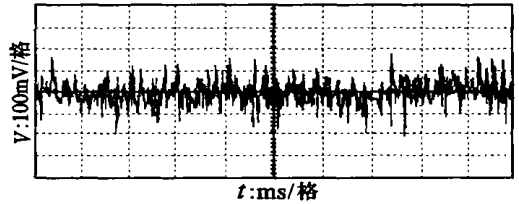


图 15 4 模块交叉并联输出电压交流纹波

本实验直流输入是整流滤波后得到的。当整流滤波后的直流母线输入电压为 270V、输出功率为 1000kW 时,三相平均功率因数 $PF = 0.75$ 。三相整流桥输出滤波电容前面的直流母线电流实验波形如图 16 所示,可见交叉并联的确能减小输入电流畸变,有利于提高 PF 。另外,交叉并联能使系统输出端电流连续,有利于降低系统输入端 EMI。

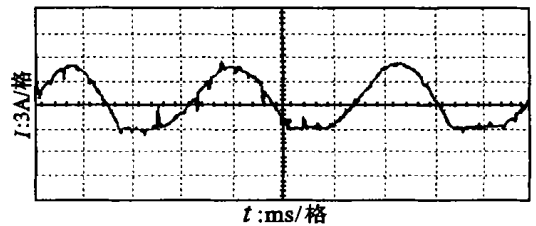


图 16 三相整流桥母线总输入电流纹波

4 结论

DCM 工作模块可以直接并联,因而能自然实现均流。CCM 工作模块不能直接并联,必须采取有效均流措施。加大各模块输出电阻虽能改善均流性能,但降低了系统效率及输出电压调节特性变差;采取有源均流法能很好地实现均流,但控制相对复杂。

参考文献:

- [1] Luo S G, et al. A Classification and Evaluation of Parallel Methods for Power Supply Modules [C]. IEEE PESC' 99, 1999: 901~ 908.
- [2] Glaser J S, et al. Output Plane Analysis of Load Sharing in Multiple module Converter Systems [J]. IEEE Trans on PE., 1994, 9(1): 43~ 50.
- [3] Miwa B A, et al. High Efficiency Power Factor Correction Using Interleaving Techniques. IEEE PESC' 92, 1992: 557~ 568.