

DC/DC模块有源均流技术研究

张军明, 谢小高, 吴新科, 钱照明

(浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

RESEARCH ON ACTIVE CURRENT-SHARING METHODS FOR DC/DC CONVERTERS

ZHANG Jun-ming, XIE Xiao-gao, WU Xin-ke, QIAN Zhao-ming

(Zhejiang University, Hangzhou, 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: In power electronics system integration, cascade operation and paralleling operation of standardized power module are popular in the practical application system using standardized power module. This paper mainly focuses on the paralleling techniques. Uniform distribution of load current is one of the key technique for paralleling operation. In middle power level application, active current sharing (CS) method is widely used. According to the intrinsic mechanism of current-sharing method, a detailed classification and summarization of various CS methods are presented in the paper. Eighteen possible active CS methods are summarized. The performance of these eighteen possible active CS methods is analyzed by the simulation. Based on the simulation results, eight CS methods suitable for practical application is finally achieved, and the detailed discussion of these eight CS methods are also presented. From the viewpoint of middle power level system integration, the preferred CS methods for practical applications are also discussed. And the outer loop regulation method is preferred for general applications.

KEY WORDS: Current-sharing method; DC/DC converter; Power electronics system integration

摘要: 在电力电子系统集成研究中, 利用标准模块集成电力电子应用系统的过程中, 必然设计到标准模块的级联和并联运行。该文主要研究标准模块的并联运行技术。如何平均分配负载电流是并联技术的一个重要方面。在中等功率场合, 有源均流法被广泛采用。该文从均流的内在原理出发, 对各种均流方法进行了系统的总结和分类, 总结了 18 种可能的有源均流方法。并对 18 种有源均流方法进行了系统的仿真研究。通过仿真分析, 得到 8 种实用的均流方法, 并对这 8 种方法的优缺点进行了讨论。从中功率系统集成的角度出发, 对方案进行了优选, 在通用场合, 外环调节的均流控制方法是较好的选择。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50237030)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50237030)。

关键词: 均流技术; DC/DC 变流器; 电力电子系统集成

1 引言

在电力电子系统集成研究中, 标准模块的并联运行也是其中的关键技术之一。模块的并联技术包括两个方面, 一个是模块根据各自的功率等级平均分配负载电流, 另一个是并联系统的稳定性。目前已经提出了很多的均流技术^[1-14], 如何选择合适的均流方案必须系统地对这些方法进行比较分析, 包括其复杂性、成本、模块化程度、可靠性和均流性能等方面。本文将对均流方法进行系统的研究。

从本质上讲, 模块并联运行需要均流的主要原因是由于模块输出是电压源性质, 输出电压的微小偏差会导致输出电流的很大差别。因此均流可以通过改变电压源的特性(使特性变软)或改变电压源的幅值来实现, 这就是目前两大类均流方法的基本出发点, 即下垂法(Droop method)和有源均流法(Active current sharing method)。

2 均流方法分类

下垂法通过改变输出的电压源特性来实现, 根据其电压电流外特性的形成方式, 有 5 种不同方法。下垂法非常简单, 但由于在负载调整率和均流性能上无法兼顾, 只在小功率场合有广泛的应用。

有源法在中大功率应用场合有广泛的应用, 它通过改变输出电压源的幅值来实现均流, 一般由两部分组合而成, 即控制方法和均流母线形成方法。控制方法主要用来调节输出电压。从变流器闭环控制的角度出发, 能够改变输出电压的只有 4 种方法: 改变输出电压基准或输出电压反馈、改变电流内环的给定或反馈、同时改变电压基准和电流基准以及

采用外部闭环控制。根据这 4 种方法，对应应有 4 种均流控制方法，即外环调节（Outer loop regulation, OLR）、内环调节（Inner loop regulation, ILR）、双环调节（Dual loop regulation, DLR）和外控制器法（External controller, EC）。均流母线得到各模块输出电流的基准信号，其产生方法可分为两大类，即平均法（Average program method, AP）和主从法（Master slave method, MS）。

在有源均流法中，传统的外部控制器法由于连线过多，系统的可靠性和容错能力差，已经很少采用。对双环调节法，存在单母线结构和双母线结构两种方法。各种控制方法的框图如图 1 所示。

均流母线形成方法中，常用的有 3 种方法，即基本平均法（Basic AP, BAP），指定主从法（Dedicated master, DM）和自动主从法（Automatic master, AM）。

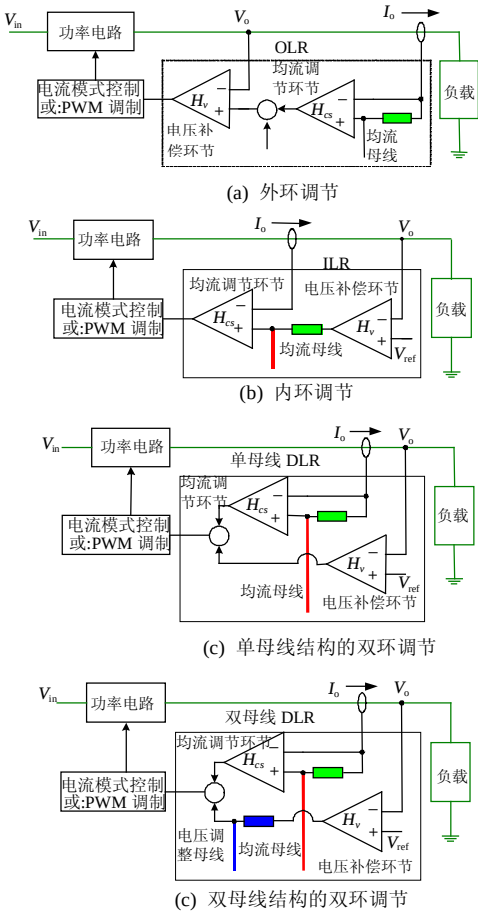


图 1 各种均流控制方法框图

Fig. 1 Block diagram for various CS control method

这样，从理论上讲，共存在 18 种可能的有源均流方法，如表 1 和表 2 所示。其中一些已经被广泛

应用，有些则需要进一步的研究来确定其实用的可能性及均流的性能。本文将根据简单性、性能、实用性等指标对这 18 种方法进行系统的比较。

为简明起见，以下分析以图 2 所示的两个 Buck 变流器并联的系统为例，主要考虑输出电压失配和输出引线阻抗失配时均流的情况。用于仿真的主要参数如表 3 所示。为方便描述起见，本文中采用的符号说明： V_{o1} 和 V_{o2} 为模块 1 和 2 的输出电压； I_{o1} 和 I_{o2} 为模块 1 和 2 的输出电流； V_o 为并联系统的输出电压； R_{cb1} 和 R_{cb2} 为模块 1 和 2 的输出电缆的电阻； V_{ea1} 和 V_{ea2} 为模块 1 和 2 电压补偿环输出电压。

表 1 采用单母线结构的可能的均流方法

Tab. 1 Possible current-sharing method with single bus

单母线均流方案	均流母线形成方法		
	BAP	AM	DM
控制方法	OLR	OLR+BAP	OLR+AM
	ILR	ILR+BAP	ILR+AM
	DLR	DLR+BAP	DLR+AM

表 2 采用双母线结构的可能的均流方法

Tab. 2 Possible current-sharing methods with dual bus

双母线 DLR 控制方法	均流母线形成方法		
	BAP	AM	DM
电压调整	BAP	BAP+BAP	BAP+AM
母线形成	AM	AM+BAP	AM+AM
方法	DM	DM+BAP	DM+AM

表 3 仿真电路的参数

Tab. 3 Parameters of the simulated circuit

参 数							
	V_{in}	V_o	K_{fb}	L	C	I_o	R_e
1	320	200	0.01	250u	500u	10A	0.1
2	320	200	0.01	250u	500u	10A	0.001

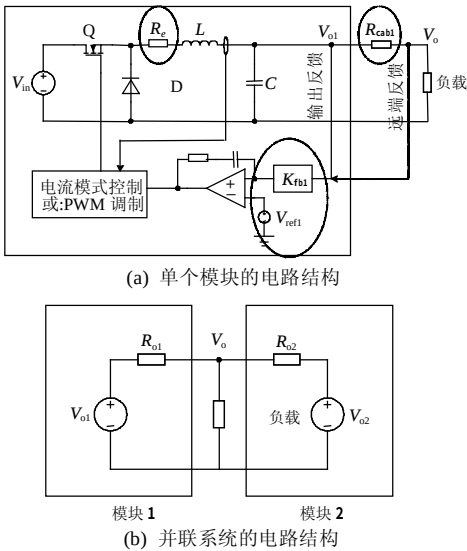


图 2 并联系统

Fig. 2 Paralleled system

3 外环调节

3.1 外环调节加自动主从法

在这种控制方式下, 两个模块的输出电流存在一定交叉现象, 即两个模块的主从方式一直是交叉进行的, 仿真波形如图 3(a)所示, 其频率、幅值与均流环节的设计有关。为解决这问题, 均流环需要加入一定的偏置电压, 如图 4 所示。这也是 UC3907 芯片采用的方案^[2], 加入的偏置电压会引起静态均流的误差, 误差可以表示为

$$\Delta I = V_{\text{offset}} / K_i \quad (1)$$

其中, K_i 是输出电流采样的增益。加入的偏置后的仿真波形如图 3(b) 所示。

这种控制方式具有容错性能好、抗干扰能力强以及有商用集成芯片可用等优点, 但由于主模块电流不可控, 系统的响应一般较慢, 而且为解决主从交替问题, 引入的偏置电压引起静态均流误差。

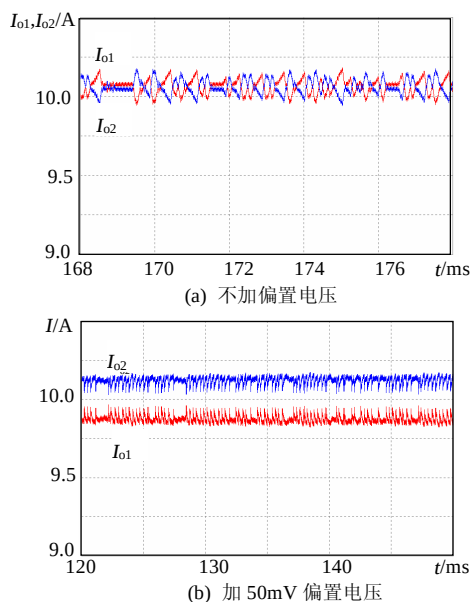


图 3 OLR+AM 均流方法下的仿真波形

Fig. 3 Simulation waveforms for OLR+AM CS method

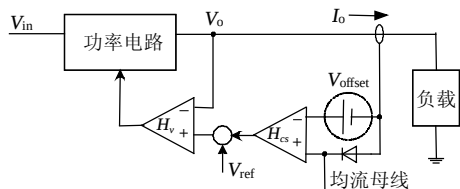


图 4 加入偏置电压

Fig. 4 Solution for chatting problem: offset voltage

3.2 外环调节加基本平均法

在(OLR+BAP)^[3]方法下, 不存在主从交替的问题, 所以均流精度高, 其仿真波形如图 5 所示。理

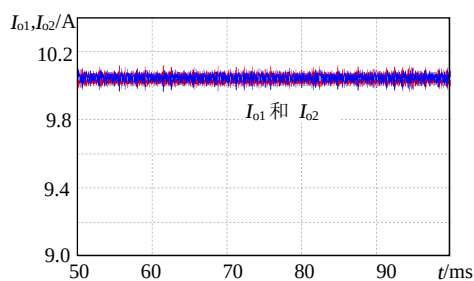


图 5 OLR+BAP 均流方法的仿真波形

Fig. 5 Simulation waveforms with OLR+BAP CS method

论上, 忽略电流采样的误差, 这种控制方法的均流误差为 0。但该控制方法容错性能差, 需要额外的开关断开有问题模块的均流母线。

3.3 外环调节加指定主从法

在该控制方式下, 主模块必须是在没有均流环节时输出电流最大的模块, 否则, 均流不能实现。如每个模块的输出电压一致, 输出连线电阻 R_{cb1} 和 R_{cb2} 不相等, 分别为 $15m\Omega$ 和 $5m\Omega$, 1 号模块是主模块, 输出电流的仿真波形如图 6 所示, 显然各个模块输出电流没有均分。在输出连线电阻 R_{cb1} 和 R_{cb2} 相等的情况下, 如果主模块 (1 号) 的输出电压偏低, 其输出电流也会严重不均衡。

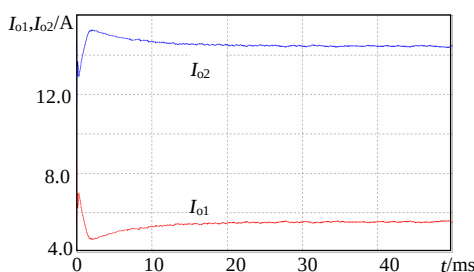


图 6 OLR+DM 仿真波形, $R_{cb1} > R_{cb2}$

Fig. 6 Simulation waveforms with OLR+DM method,

$R_{cb1} > R_{cb2}$

显然, 这种方式在可靠性方面存在严重的缺陷, 在参数发生变化时, 系统将失去均流特性。因此在实际中很少被采用。

3.4 小结

显然, OLR 控制方法具有模块化特性好、方便标准化和生产, 系统扩充方便、维护方便以及容错性能好 (尤其是 OLR+AM 方式下) 等优点。其主要缺点是均流环节与电压环串联, 是三环系统, 设计困难, 容易引起系统的不稳定; 而且均流环节带宽比较窄, 远在电压环带宽以下, 影响动态均流特性。

从上面的分析可以看出, OLR+AM 和 OLR+BAP 是这3种方法中比较优秀的方案。适合一般场合下, 多模块并联运行的系统。

4 内环调节

4.1 内环调节加基本平均法

在内环调节方法中, 一般内部的均流环的电流信号取电感电流而不是输出电流, 这样, 同时可以获得电流模式控制的好处, 使电压补偿环节和电流环节的参数变得容易设计。在电流模式控制的变流器中, 均流环一般与电流环合二为一。所以, 笼统地讲, 内环调节的均流方法是电流模式控制的。

这种方案的主要问题就是输出电压的调整率比较差。如果忽略输出连线电阻 R_{cb1} 和 R_{cb2} , 电压反馈系数或电压基准的不匹配会导致输出电压偏小的模块电压补偿环节的输出为 0, 为维持输出电流和电压, 另一个模块的电压环就会饱和输出, 这样输出电压在重载的时候偏低, 在轻载的时候偏高。为了维持比较好的负载调整率, 电压环参数的匹配就非常重要。或者, 对 n 个模块并联的系统, 其电压补偿环节的饱和输出电压比满载时电流采样信号高 n 倍以上, 显然, 这对模块过流限制是极其不利的。如图 7 所示, 两个模块的电压基准差别为 2%, 在负载从 10% 跳变到 100% 时, 输出电压变化幅度为 2%。

4.2 内环调节加自动主从法

该控制方式可以避免前述方法的负载调整率的问题^[4]。若忽略输出连线电阻, 其输出电压就由静态输出电压最大的模块决定。在与前面相同的条件下, 其仿真波形如图 8 所示, 在负载突变的情况下, 输出电压的调整率明显改善。在突变动态过程中, 两模块的输出电流差别也非常小, 说明均流环节的带宽非常宽。

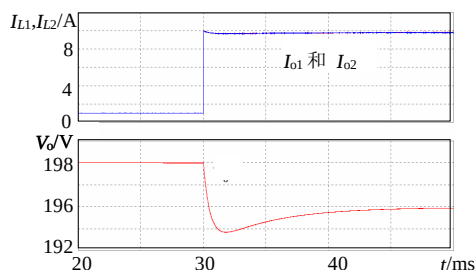


图 7 ILR+BAP 方法仿真波形 (2% 的电压基准差别)

Fig. 7 Simulation waveforms for ILR+BAP CS method, 2% difference of voltage reference of each module

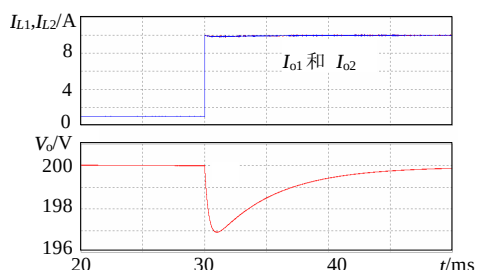


图 8 ILR+AM 方法仿真波形 (2% 的电压基准差别)

Fig. 8 Simulation waveforms for ILR+AM CS method, 2% difference of voltage reference of each module

4.3 内环调节加指定主从法

这个控制方法与 (ILR+AM)^[5] 本质上是一致的。通过指定一个模块作为主模块, 其电压补偿环节决定其余模块的输出电流。输出电压由主模块决定。由于主模块是系统指定的, 因此容错性能较差。

在 ILR+AM/DM 控制方式下, 电流采样信号不同影响均流精度。如果取电感电流, 如果忽略电流取样的误差, 其均流的误差为 0。如取开关器件的电流, 电感量不同会导致输出电流不相同, 误差的大小与电感量的差别成正比。如两个模块并联时, 其输出电流的误差为

$$\Delta I = \frac{V_{in} \cdot D \cdot (1-D)}{2 \cdot f_s} \cdot \left(\frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_2} \right) \quad (2)$$

式中 f_s 为开关频率; L_1 和 L_2 为电感量。

4.4 小结

ILR 这种控制方式具有简单 (只有两个控制环)、稳定性好、均流环带宽等优点。但其缺点也是相当明显的, 如: 均流母线为电压误差信号, 电压环的动态影响均流性能; 均流母线抗干扰性能差, 对噪声敏感; 如果电压环的带宽比较宽, 均流母线有丰富的高频信号, 使系统容易不稳定; 模块化特性差 (尤其是 ILR+DM)。显然, ILR+AM 均流方案具有较好的性能。

因此, ILR 控制方法不适合应用于均流母线连接距离比较远的场合, 而适合应用在多相交错并联的系统中, 由几个小功率的模块组合成一个大的功率模块, 均流母线距离很近。

5 双环调节

5.1 单母线结构

这个方法的主要目的是综合 OLR 和 ILR 方法各自的特点, 试图获得一种快速、又具有好的抗干扰性能的均流方式^[6-7]。与 ILR 方法中一样, 均流环节也可以和电流环合并, 方便补偿环节的设计。

虽然这个想法是可行的,但在实际应用中,单母线结构的 DLR 方法是不能实现的。忽略输出连线电阻,当电压补偿环节的反馈系数和电压基准不相等时,基准小的模块其电压补偿环节的输出电压会下降到 0,这样,其均流只能通过均流环的调节来实现,一般情况下,均流环的输出只占控制信号的一小部分,在这种情况下,均流是不可能实现的,仿真波形如图 9(a)所示。当基准匹配,输出连线电阻不相等时,模块间的均流也是不可实现的,此时电流的不平衡完全由输出连线电阻决定,仿真波形如图 9(b)所示,按照图 2(b)的等效电路模型,其输出电流可以表示为^[7]

$$I_{o1} = \frac{R_{load} \cdot (V_{o1} - V_{o2}) + V_{o1} \cdot R_{cb2}}{R_{cb1} \cdot R_{cb2} + R_{load} \cdot (R_{cb1} + R_{cb2})} \quad (3)$$

$$I_{o2} = \frac{R_{load} \cdot (V_{o2} - V_{o1}) + V_{o2} \cdot R_{cb1}}{R_{cb1} \cdot R_{cb2} + R_{load} \cdot (R_{cb1} + R_{cb2})} \quad (4)$$

从本质上讲,这个方法的内在缺陷是输出电压不可调,电压不平衡引起的电流不平衡现象是不可能通过均流环节来纠正的。在实际中,在电压基准匹配比较好,而且电压补偿环节是有静差的情况下,这种方法有一定的应用^[6]。

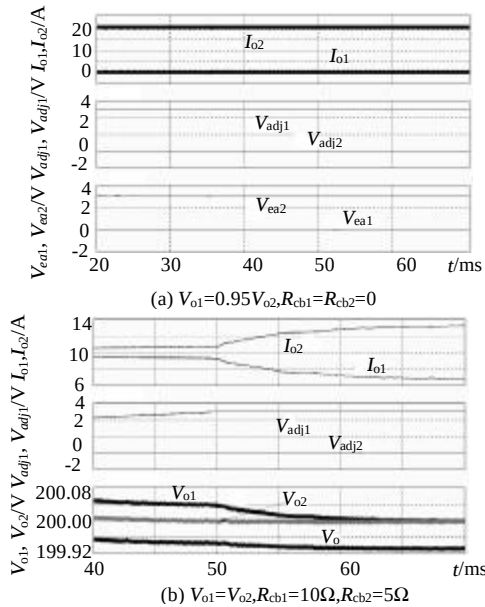


图 9 单母线结构 DLR 仿真波形

Fig. 9 Simulation waveforms of DLR with single bus

5.2 双母线结构

单母线结构 DLR 的主要问题就是在电压不匹配的模块并联时出现的不均流现象。与 ILR 方法类似,为解决这个问题,最简单的方法就是引入电压均衡信号,即额外加一条电压调整母线构成双母线

结构。

根据两条母线不同的形成方法,双母线结构的 DLR 有 9 种组合。由于双母线结构的 DLR 方法结合了 ILR 和 OLR 的方法,根据前面对这两种方法的分析,均流母线的形成方法不能用 DM 的方法,原因与 OLR 方法中均流母线不能用 DM 方法一样。电压调整母线的形成方法根据 ILR 中的分析,不能采用 BAP 的方法,所以实际可能采用的方案只有 4 种,如表 4 所示。

从电压调整母线的形成方法看,显然 AM 方式和 DM 方式效果是一致的,但 AM 方法具有更好的模块化特性和容错特性。在与单母线结构 DLR 相同的条件下,采用双母线结构的 AM+BAP 均流方法,仿真结果如图 10 所示。显然,对各种情况都可以获得良好的均流和电压调整效果。

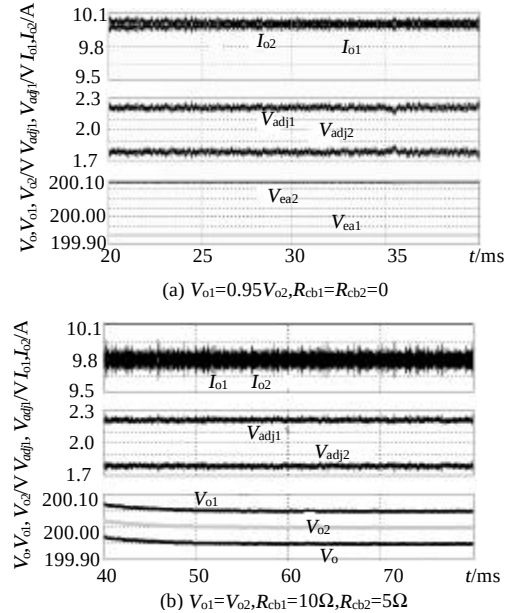


图 10 双母线结构 DLR 仿真波形

Fig. 10 Simulation waveforms of DLR with dual bus

DLR 方法综合了 ILR 和 OLR 方法各自的优点,可以获得宽的均流环带宽;电压环和均流环节相互独立,方便设计;具有更好的电压调整特性和好的均流特性。双母线结构的 DLR 主要的缺点有:需要额外的电压调节母线;电压调节母线对噪声敏感,尤其是电压环带宽比较宽的时候。

因此,对双母线结构的方案,一般不适合在多模块并联时均流母线间距较长的场合应用。但由于其性能优越,尤其是宽的均流带宽,在一些需要好的动态均流特性的场合,如 VRM 等应用场合,DM+BAP 的方法有广泛的应用^[8]。

6 结论

本文对各种可能的有源均流方案进行了系统的分析和仿真研究。通过比较和仿真分析,对单母线结构的均流方案,其实际可用的方案如表5所示。对双母线结构的均流方案,实际可用的方案如表4所示。

表4 双母线结构均流方案

Tab. 4 CS methods for practical application with dual bus

双母线 DLR 控制方法		均流母线形成方法		
		BAP	AM	DM
电压调整母线形成方法	BAP	×	×	×
	AM	ü	ü	×
	DM	ü	ü	×

表5 单母线结构均流方案

Tab. 5 CS methods for practical application with single bus

单母线均流方案		均流母线形成方法		
		BAP	AM	DM
控制方法	OLR	ü	ü	×
	ILR	×	ü	ü
	DLR	×	×	×

根据前面分析的诸方案各自的优缺点,我们可以概括为以下结论。对小功率应用,下垂法由于其简单性有很好的应用前景。对中大功率场合,有源法是首选。有源法中,ILR 控制方法更加适合用在多相交错并联的系统中,由几个小功率的模块组合成一个大功率模块这种场合。双母线 DLR 一般适合一些需要好的动态均流特性的场合。这两种方法由于母线容易受干扰,并且包含丰富的电压补偿环节的高频信号,一般不适合用在通用场合,尤其是均流母线连接距离比较长的场合。相对而言,OLR 控制方法在一般应用上还是一个比较主流的选择。

参考文献

- [1] Shiguo Luo, Zhihong Ye, Ray-Lee Lin *et al.* A classification and evaluation of paralleling methods for power supply modules[C]. In: Proceedings of IEEE-PESC, Charlextion, South Carolina, USA, 1999. 901-907.
- [2] Mark Jodan. UC3907 load share ic simplifies parallel power supply power supply design[J]. Unitrode Application Note, www. ti. Com.
- [3] Milan Jovanovic M, David Crow E, LIEU Fang-Yi. A novel, low-cost implementation of democratic load-current sharing of paralleled converter modules[J]. IEEE Trans. Power Electronics, 1996, 11(4): 604-611.
- [4] Kasemsan Siri, Calvin Truong. Performance limitations of random current current-sharing parallel-connected converter systems & their solution[C]. Amaheim, CA, USA, In: Proceedings of IEEE-APEC, 1998. 860-866.
- [5] Siri K, Lee C Q, Wu T F. Current distribution control for parallel

connected converters, Part II[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28(3): 841-850.

- [6] Lin Changshiarn, Chen Chernlin. Singlewire current-share paralleling of current-mode controlled dc power supplies[J]. IEEE Trans. on I. E., 2000, 47(4): 780-786.
- [7] Wu T F, Siri K, Banda J. The central-limit control and impact of cable resistance in current distribution for parallel-connected dc-dc converters[C]. In: Proceedings of IEEE-PESC, Taipei, China, 1994. 694-702.
- [8] Current Sharing Technique for VRMs, Intersil Technical brief, TB385. 1, www. intersil. Com
- [9] 李君,徐德鸿,郑家伟,等. 超导储能系统用多模块电流型变流器均流方法载波轮换[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 106-111. Li Jun, Xu Dehong, Zheng Jiawei *et al.* Carrier swapping method to equalize current in a multi-modular current source converter for SMES[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 106-111.
- [10] 段善旭,刘银,康勇,等. UPS 并联系统的 SPWM 再调制控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 81-86. Duan Shanxu, Liu Yinbang, Kang Yong *et al.* The techniques of SPWM re-modulation of UPSS in parallel operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 81-86.
- [11] 姜桂宾,裴云庆,杨旭,等. SPWM 逆变电源的无互联信号线并联控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 94-98. Jiang Guibin, Pei Yunqing, Yang Xu *et al.* Parallel operation of sinusoid wave inverters without control interconnections [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 94-98.
- [12] 程荣仓,刘正之. 大容量单相逆变装置并联技术的分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 112-116. Cheng Rongcang, Liu Zhengzhi. Analysis of parallel single-phase inverters of large capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 112-116.
- [13] 孔雪娟,王荆江,彭力,等. 采用 SVPWM 的三相逆变电源的分散逻辑并联运行[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 81-86. Kong Xuejuan, Wang Jingjiang, Peng Li *et al.* Distributed logic paralleling operation of three phase inverters applying SWPWM [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 81-86.
- [14] Huang Guokiang, Chen Chernlin. A simple current-share paralleling technique for peak-current-mode controlled power supplies[C]. In: Conference Record of IEEE-PEDS, Bali, Indomesia, 2001. 504-507.

收稿日期: 2005-04-08。

作者简介:

张军明(1975-),男,博士,现从事电力电子系统集成,DC/DC 变换技术研究;

谢小高(1975-),男,博士,现从事电力电子系统集成研究,同步整流技术研究;

吴新科(1978-),男,博士研究生,现从事电力电子系统集成,开关电源技术研究;

钱照明(1939-),男,教授,博士生导师,现从事电力电子系统集成,电磁兼容等领域的研究。