

模块化直流电源并联均流控制方法

Controlling Means of Parallel Current Sharing in Blocking DC Power Supply

张胜发 向龙 姚国顺 空军雷达学院基础部 (武汉 430019)

Zhang Shengfa Xiang Long Yao Guoshun Air Force Radar College (430019)

摘要: 本文对模块化直流电源的并联均流控制方法进行了分类,研究了并联均流机理,阐述了均流控制方法的实现原理。

叙词: 模块化电源 并联均流 控制方法

Abstract: The classify of controlling means of parallel current sharing in blocking DC power supply is brought forward in this paper. With studying the current sharing mechanism of it, the realization principle of the controlling means are expounded.

Keywords: blocking power supply parallel current sharing controlling means

[中图分类号] TM92 [文献标识码] A 文章编号:1561-0349(2007)08-0012-04

1 引言

在直流供电系统中,产生直流电源的单元可以是“交流-直流-直流”方式工作的开关整流模块,或“直流-直流”方式工作的斩波模块。直流供电系统的组成分为“集中式”和“并联式”两种方式。而并联式模块化直流输出系统比集中式单电源系统具有更多的优点。并联式系统具有输出功率的可扩展性强、设计灵活、可靠性高,设计易于标准化、易于维护等特点。实际中的并联模块,其功率等级和控制参数存在一定的误差,所以每个模块所分担的电流并不是完全相等。如果在并联系统对负载电流不采取特殊的平均分配手段,那么就可能出现一个或多个模块分担过多电流的情形,其结果就可能导致某个模块的热应力过大,系统的稳定性降低。为了使负载输出端的电流在并联模块中得到平均分配,迄今,已提出、研究和发展了多种不同的均流控制方法^[3]。实际应用中,并联均流方法可分为外特性下垂法(或称输出阻抗法、电压调整率法)主从模块设置法和“主动均流法”(active current-sharing methods)三大类。外特性下垂法依据对模块输出阻抗的外部调节,或输出电压的内部负反馈来实现

对模块输出外特性斜率的控制,从而改善均流性能。主从模块设置法是用一个主控单元的电压调节器,控制所有并联运行的电源模块工作于电流源方式。主动均流法是依据均流误差信号的闭环控制方法,由并联系统的闭环调节模式和均流误差信号处理方式(算法)两部分组成,根据这两部分的不同选择,目前已发展了很多的组合类型。图1给出了并联均流控制方法的基本分类^[1,2]。

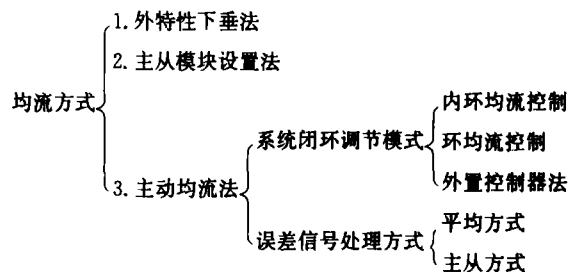


图1 均流方式分类

2 并联均流机理

可用如图2所示的两个参数非常接近的并联模块分析均流机理。图中受控源 U_{oc1} 和 U_{oc2} 分别是电源模块 1# 和 2# 的开路

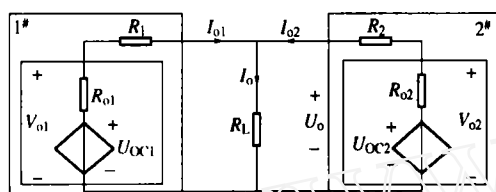
输出电压,其大小受控于特定的均流控制方法。 R_{o1} 和 R_{o2} 是其输出阻抗; R_1 和 R_2 是线路阻抗或外加阻抗; R_L 为负载阻抗。电源模块1#和2#的输出外特性方程,并联系统负载电压(记: $R_{11}=R_1+R_{o1}$; $R_{22}=R_2+R_{o2}$),及模块均流输出电流可分别表示为:

$$\begin{aligned} V_{o1} &= U_{OC1} - R_{o1} \cdot I_{o1} \\ V_{o2} &= U_{OC2} - R_{o2} \cdot I_{o2} \end{aligned} \quad (1)$$

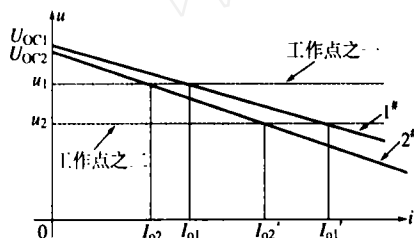
$$U_o = \frac{R_1(R_{22}U_{OC1} + R_{11}U_{OC2})}{R_{11}R_{22} + R_L(R_{22} + R_{11})} \quad (2)$$

$$I_{o1} = \frac{U_{OC1} - U_o}{R_{11}} = \frac{R_{22}U_{OC1} + R_L(U_{OC1} - U_{OC2})}{R_{11}R_{22} + R_L(R_{22} + R_{11})} \quad (3)$$

$$I_{o2} = \frac{U_{OC2} - U_o}{R_{22}} = \frac{R_{11}U_{OC2} - R_L(U_{OC1} - U_{OC2})}{R_{11}R_{22} + R_L(R_{22} + R_{11})}$$



(a)



(b)

图2 并联系统及其输出外特性

运用均流技术的目的是,当负载 R_L 变化时,既要稳定系统输出电压 U_o 不变,又要保证各电源模块的输出电流近似相等(如: $I_{o1} \approx I_{o2}$)。分析式(2)和式(3),可从原理上说明改变模块的等效输出电阻 R_{11} 和 R_{22} ,或者调节具有受控源机理的开路输出电压 U_{OC1} 和 U_{OC2} ,可以达到上述目的。

1. 改变等效输出电阻实现均流

设图2中 $R_1=R_2=0$ (或认为其记入到 R_{o1} 和 R_{o2} 中),考虑负载电阻 R_L 变化对 I_{o1} 和 I_{o2} 的影响。当 R_L 变小时, I_{o1} 和 I_{o2} 变大到如图2(b)中的 I_{o1}' 和 I_{o2}' ,则当调节 R_{o1} 并使之变大时,1#曲线的斜率变大(或减小 R_{o2} 时2#曲线的斜率变小),两条曲线靠拢或在工作点(系统输出电压 U_o)附近相交,使得 I_{o1}' 和 I_{o2}' 的差值变小,实现均流。但因此时模块的开路电压并未改变,使得负载电压的改变较大。这种均流方法的输出电压调整率较大,负载效应较差。

2. 调节开路输出电压实现均流

因为各并联模块的外特性斜率相近,调节图2中的模块的开路电压 U_{OC1} 和 U_{OC2} ,可使图2(b)中的两外特性曲线上下平移

(也可认为是左右平移),能够在工作点附近近似重合或相交。这样,当负载变化,并联系统变化到新的工作点时,各模块的输出电流差值较小,并联均流效果好,而且并联系统输出电压的稳压变化小。这种均流方法的输出电压调整率较小,负载效应好,并联系统稳压精度较高。

根据上述并联均流的机理,工程上实现并联均流的方法基本如图1所示,下面进行原理性分析,研究各种均流控制方法。

3 外特性下垂法

图2中电源模块总的外特性曲线斜率由输出阻抗 R_{o1} 、 R_{o2} 和外部串联阻抗 R_1 、 R_2 共同决定。人为地增加 R_1 和 R_2 (一般是连接负载的电缆电阻或外加电流取样、限流电阻),也可略微增加输出阻抗,改善均流性能,提高系统的可靠性和稳定性。

利用模块输出电流的负反馈,可以增加该电源模块的等效输出阻抗 R_{o1} 和 R_{o2} (参见图2),使电源模块外特性曲线斜率增加,实现某种程度的均流。原理如图3所示。如果不考虑电流反馈信号,则模块的输出外特性方程如式(1)所示,加上本模块的电流反馈信号后,其输出外特性方程变为

$$V_{o1} = U_{oc1} - (R_{o1} + R_{eq1}) \cdot I_{o1} \quad (4)$$

式中, R_{eq1} 由图3中的 V_f 、 I_f 以及其他整定参数决定。使得电源模块的等效输出阻抗变大,改善了并联均流性能。

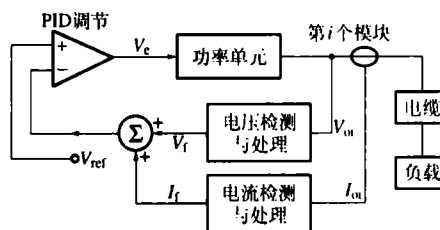


图3 外特性下垂法原理

外特性下垂法均流控制的优点是:并联系统易于实现和扩展,各模块间的控制电路没有耦合,避免了控制信号的相互干扰和EMI;模块化和可靠性较高。其缺点是:为得到下垂特性,负载调节率有所降低;虽然各模块内部具有电流负反馈和电压闭环控制,但并联系统属于电压和电流开环控制,故均流效果较差;必须分别调整各电源模块才能获得较好的均流特性;如果各模块的功率等级不同,均流实现起来就比较困难。

4 主从模块设置法

图4为主从模块设置法原理示意图。这种均流方式认为,对于参数特性相近的模块,只要其输出电压相等,系统的均流指标就能满足要求。其工作原理是:用一个主控模块的电压调节器控制各并联模块的输出电压整定值,所有并联模块内部具有电流型内环控制,从而工作于电流源方式。图4中 V_c 是电压调

节器输出的误差电压,作为模块内部电流内环的电流基准。这样,各模块的电流按同一 V_c 值进行调节,输出电流基本一致,从而实现均流。

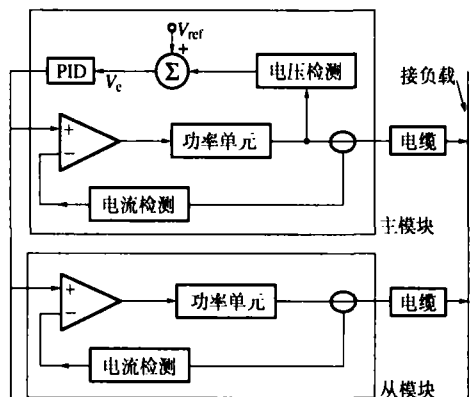


图4 主从模块设置法

这一方法的均流机理是适时调整各模块的输出特性(如图2(b)所示),使之上下平移达到一致(或重合),从而实现均流。这一方法的主要缺点是:如果主模块发生故障,整个系统就不能工作;主模块电压环的带宽较大,容易受外界噪声干扰。

5 主动均流法

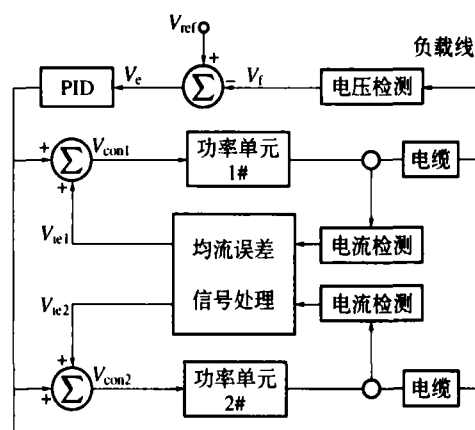
主动均流法^[3]是调节各模块开路输出电压实现均流的一类方法,如图2(b)所示,相对于主从模块设置法,主动均流法是依据“均流误差信号”的闭环控制方法。考虑到均流误差信号提取方法的不同,主动均流法由并联系统的闭环调节模式和均流误差信号处理方式两部分组成,这两部分的有机结合就构成了特定的主动式均流法。因为均流误差信号参与控制,从而使这一类方法具有许多优良性能和丰富的研究内容,是一个具有广泛发展前景的研究方向。

5.1 并联系统的闭环调节模式

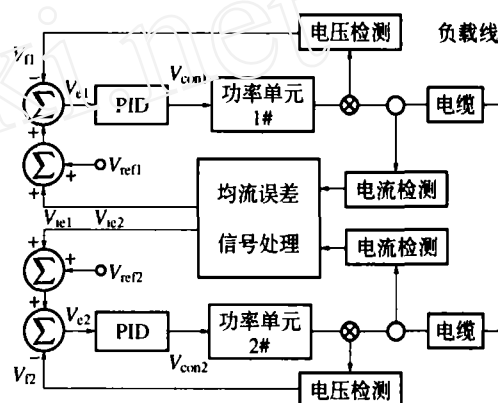
并联系统的闭环调节模式可概括为三类:内环均流调节、外环均流调节和外置控制器均流调节。图5是这三类模式的原理示意图。

1. 内环均流调节

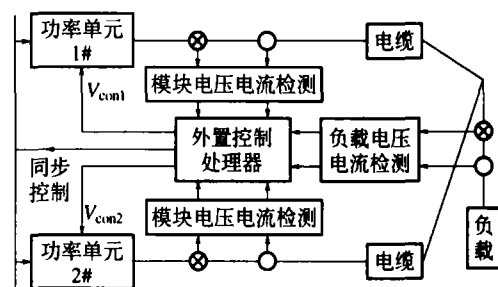
内环均流调节模式如图5(a)所示。电压参考信号 V_{ref} 和电压反馈信号 V_f 是系统的公共信号,PID是电压误差调节器。从“均流误差信号处理”单元输出的信号(如 V_{ie1} 和 V_{ie2})用来动态改变PID的输出值,以得到各功率单元所需的电压控制信号 V_{con1} ($i=1, 2, \dots, n$),从而控制每个并联模块的PWM产生电路,实现稳压和均流。其优点是:均流过程较稳定,电压输出值较精确。因为均流误差信号并不流经电压环PID调节器,所以系统的均流响应较稳定。不足之处是:系统的模块化程度降低了;故障容耐量下降。



(a)内环均流调节



(b)外环均流调节



(c)外置控制器均流调节

图5 并联系统的闭环调节模式

2. 外环均流调节

外环均流调节模式如图5(b)所示。每个电源模块都有自己独立的电压PID调节外环和参考整定电压($V_{ref1} \approx V_{ref2}$)。从“均流误差信号处理”单元输出的信号(如 V_{ie1} 和 V_{ie2})用来动态改变参考整定电压值,通过各自的PID调节器后,产生各功率单元所需的电压控制信号 V_{con1} ($i=1, 2, \dots, n$),控制每个并联模块的PWM产生电路,实现稳压和均流。其优点是:系统模块化程度高,系统结构配置灵活,便于扩展和维修。任意单个模块工作失效,均能表现出极高的容错量。不足之处是:因为均流误差信号经过电压环PID调节器,所以系统的均流暂态响应较大,一般要

附加特定的改善措施。

3. 外置控制器均流调节

外置控制器均流调节模式如图 5(c) 所示。外置控制处理器处理来自各模块和负载上的电压和电流取样信号, 采用某种控制策略, 产生各功率单元所需的电压控制信号 $V_{con i}$ ($i=1, 2, \dots, n$), 从而控制并联系统, 实现稳压和均流。因为外置控制器和各并联模块需要众多的信号连接, 如果采用模拟方式实现, 就需要过多的电缆连接线, 系统就极易受到各种干扰, 造成稳定性和可靠性的降低, 而且模拟控制器难以实现优化的控制策略。但是, 如果采用数字方式实现图 5(c) 所示的外置控制处理器, 则可利用串行通信技术减少信号连接线, 极大地增强系统抗干扰能力, 充分发挥外置控制器的灵活性, 利用计算机控制技术实现

优化的控制策略和实时监控系統, 全面地提高系統性能。因此, 外置控制处理器的数字化实现方法具有极大的发展前景。

5.2 均流误差信号的处理方法

均流误差信号的处理方法(或算法)是决定并联系统均流指标的重要因素。常用的有平均值均流算法和最大值均流算法^[2]。其原理如图 6 所示。图 6 中, 平均值均流母线电压和最大值均流母线电压可分别表示为(设 n 组单元并联):

$$V_{av} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n V_{sk}$$

$$V_m = \max\{V_{sk}; k=1, \dots, n\} \quad (5)$$

如果采用单片机进行均流误差信号处理, 可以采用更灵活的新算法来提高均流技术指标, 这也是工程实用的发展方向。

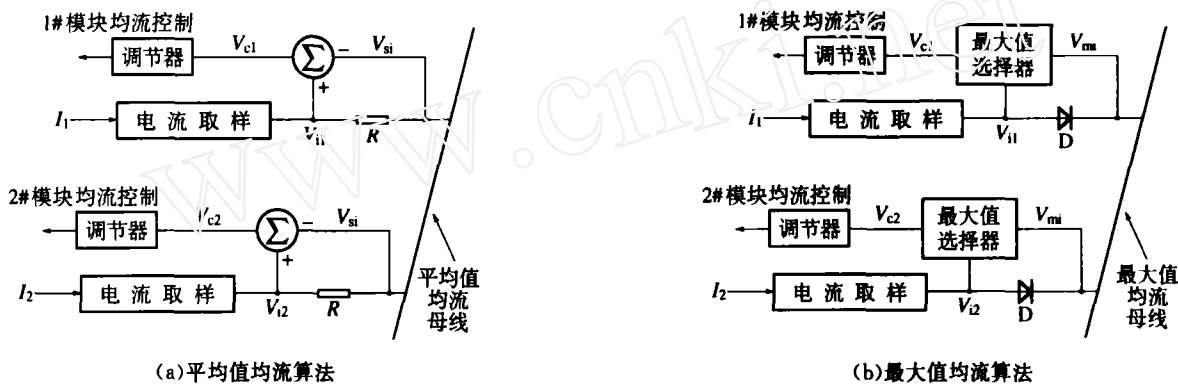


图 6 均流误差信号处理方法

参考文献

- [1] 李爱文编著. 现代通信基础开关电源的原理和设计. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] 张占松, 蔡宣三编著. 开关电源的原理与设计. 北京: 电子工业出版社, 1998.
- [3] Shiguo Luo, Z. Ye, r. lin and Fred C. Lee. A classification and evalu-

ation of paralleling methods for power supply modules. 1998.

作者简介

张胜发, 男, 1964 年生, 工学博士, 副教授, 主要从事电力电子与电力传动、高电压及绝缘技术等方面研究。

收稿日期: 2006-03-07

定稿日期: 2007-06-12

Primarion 双输出同步 DC-DC 控制器“新作”出品

专业设计、生产和销售数字集成电路的混合信号半导体厂商 Primarion 公司近日宣布推出双输出双相 PX 7522, 这款产品是其可编程数字电源转换和电源调节集成电路产品即 Primarion Di-POL(TM) 系列中的最新产品。

PX7522 是一款电源转换和电源调节集成电路, 可用于电信、数据通信、在线服务和存储市场上的同步 DC-DC 转换器中。PX 7522 可以调节两个独立的输出或者在单输出模式下调节两相输出。它同时支持 DCR 和 RDSon 电流传感集成电路布局技术, 输出电压范围宽, 在 0.5V 到 8V 之间。

这款可配置性极高的控制集成电路利用了 PMBus (TM) 和芯上非易失性存储器 (NVM) 来增强其可控制性和实时系统监控。