

电源并联技术综述

王悦, 陈志彬

(鞍山科技大学, 辽宁鞍山 114044)

摘要: 多模块并联开关电源能较灵活地实现对电源系统容量的扩展, 为了增加整个电源系统的可靠性, 可以用多个电源模块组成并联冗余系统。文中对目前采用的 DC-DC 及逆变器并联技术的现有方法、发展现状及趋势进行了综述。

关键词: DC-DC 逆变器 并联 并联控制 均流

通常, 电源模块并联比单个大功率电源集中式供电更具优势。标准化模块并联方法已经广泛应用于分布式电源系统。并联供电系统的理想特性是单个模块稳定均分负载电流。并联模块因为控制参数不同而不同。如果没有特殊的均流措施, 一个或多个模块有可能过载而引起某个器件的热应力过大, 从而降低系统的稳定性。为了获得并联电源的理想特性, 目前已经提出一系列不同并联方式和均流方法。成功的选择一个并联方案需要对这些方法的优缺点有很深的了解。在选择并联方案时必须考虑复杂性、费用、模块化等。各模块的交互作用应该在设计和系统综合中被考虑以保证系统的稳定性、可靠性和动态性能。本文针对 DC-DC 以及逆变器并联的均流方案进行论述。

1 DC-DC 并联均流方法

并联均流的基本方法有输出电压调整法、主从电源控制法和按电流自动均流法等^[1]。

1.1 输出电压调整法^[2]

在并联的电源系统中, 每个模块按外特性和各模块的电压参数值均分总负载电流。实际上是调节模块外特性的负斜率的一种方法, 利用电流反馈调整各模块的输出阻抗, 进而调整各模块输出电压, 使之尽可能相近。这种方法简单, 属于开环控制, 其缺点是调整精度差, 每个模块必须个别调整, 对于不同额定功率的模块并联运行时, 难以实现均流, 而且模块间可能有电流不平衡现象。

1.2 主从电源法^[2]

主从法是在并联的若干个电源模块中, 一个作为主电源模块, 而其余作为从模块跟随主模块工作。在电流型控制中误差电压与负载电流成比例, 主模块误差电压设定了整个系统的误差电压, 通过各自的电流反馈控制, 使所有的模块分担相同的负载电流。缺点是: 主从间通讯联系使连线复杂; 如果主模块失效, 整个电源系统不能工作, 因而这种方法不适用于冗余系统; 电压环带宽大, 易受噪声干扰。

1.3 按电流自动均流法^[4]

这种方法无需外加均流控制器, 并联的各个模块间仅通过一个公共的均流母线 SCB 联系。其原理完全是建立在数学模拟电路——平均值电路的基础上实现的^[3]。工作示意图如图 1。

这种方法的缺点是当开关电源处于限流状态时, 会使均流线平均电流降低, 开关电源的输出电压将被调至下限值。当某一开关电源失效时, 平均电流值降至更低, 其余开关电源输出电流会同时减少, 导致整个开关电源系统不能正常工作。

1.4 外加控制器法

这种方法需要特殊的均流控制器, 比较所有模块的电流, 调节相应的反馈信号以实现均流。图 2 为有均流控制器时一台电源模块的系统。图中 V_c 反映了模块的输出电流, 误差电压 V_e 综合了 SC 输出电压 V_c , 反馈电压信号 V_f 以及基准(参数)电压 V_r , 各均流控制器联接在公共母线 SCB 上。

1.5 按热应力自动均流

美国 Lambda 电子公司建议一种按热应力(而不仅

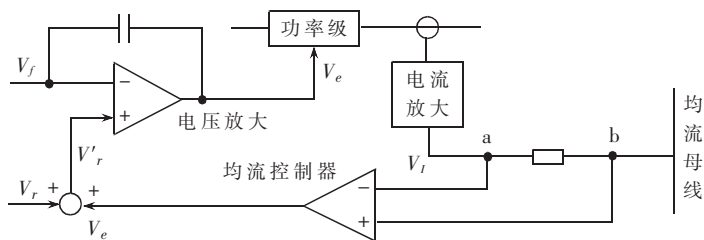


图 1 平均电流法自动均流示意图

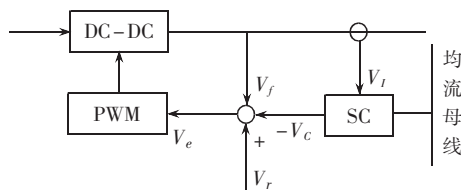


图 2 有均流控制器的电源模块原理图

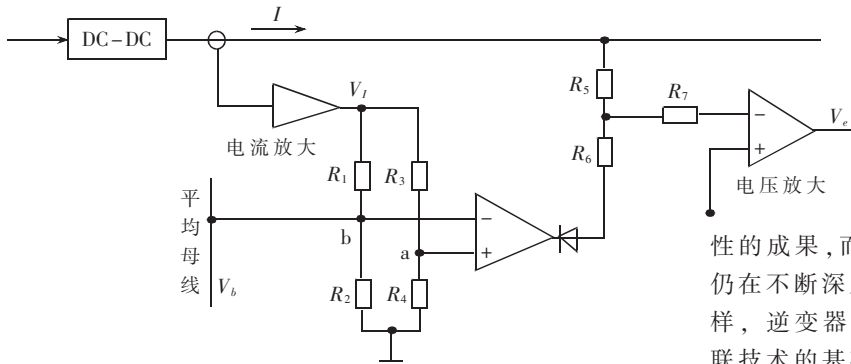


图3 应力法均流原理图

仅是按电流值)的自动均流技术,以下简称应力法,已成功地应用于该公司的P系列ZVS开关变换器中。

图3给出一台模块电源的应力法均流控制示意图,直流电流检测、放大后得到一个低带宽电压 $V_I=KIT^a$,K与a为常数,T与变换器运行温度成正比,I为平均输出电流。因此,每个模块的电流和温度(热应力)决定了均流的程度。 V_c 加到由 R_1-R_4 组成的电阻电桥输入端,桥的输出接放大器, R_1 和 R_2 形成加法器,在b点产生n台模块的平均电压 $V_b=(V_{c1}+V_{c2}+\dots+V_{cn})/n$,b点接到均流母线SCB。 V_I 通过 R_3 、 R_4 分压得到 V_a , V_a 反映了电源的ITa值, V_a 与 V_b 比较,若 $V_a < V_b$,则 R_5 中电流增大,使该模块的输出电压上升,输出更多电流,使 V_a 接近于 V_b , R_5 也限制了偏离母线电压 V_b 的最大偏差。

并联电源系统中各模块在电源柜中的位置不同,对流情况和散热条件不同,造成有的模块温度高,有的模块温度低,按热应力的均流技术可在设计时不必考虑模块的布置,此外,Lambda公司认为,由于这种技术中回路频带窄,对噪声不敏感,设计时也无需考虑电源对噪声的屏蔽。

1.6 均流调节器集成电路 UC3907^[4]

美国Unitrode IC公司1993年开发了UC3907,一种便于多个独立电源模块并联用的均流调节器集成电路。可用以控制并联电源的输出电压,并在电源模块间均匀分配负载电流。

UC3907集成电路由电压环与电流环组成,电压环中包含高阻抗、全差动电压放大器,接地放大器和驱动放大器;电流环中包含低损耗、固定增益电流放大器,缓冲放大器,调整放大器和状态指示器。

UC3907芯片使多个并联在一起的电源模块分别承担负载电流的一部分,并且所承担的负载电流大小相等。通过检测每个模块的电流,电流均流母线确定哪个并联模块的输出电流最高,并把它定为主模块,再根据主模块的电流调节其他模块的输出电流,使并联运行的电源模块单元工作在所设定的电流值上,

从而实现均流,精度可达2.5%。

在文献[5]中介绍了UC3907与SG3524结合的PWM变换器并联均流系统。

2 并联逆变技术

二十世纪80年代国外开始研究DC/DC变换器并联运行技术,现已取得实质性的成果,而新的均流技术、系统稳定性等方面的研究仍在不断深入。同主电路和控制电路的研究发展过程一样,逆变器并联运行技术的研究也是在借鉴DC/DC并联技术的基础上不断深入。但由于是正弦输出,其并联运行远比直流电源困难,首先要解决三个问题:

(1)两台或多台投入运行时,相互间及与系统的频率、相位幅度必须达到一致或小于容许误差时才能投入,否则可能给电网造成强烈冲击或输出失真。而且并联工作过程中,各逆变器也必须保持输出一致,否则,频率微弱差异和积累将赞成并联系统输出幅度的周期性变化和波形畸变;相位不同使输出幅度不稳。

(2)功率的分配包括有功和无功功率的平均分配,即均流包括有功和无功均流。直流电源的均流技术不能直接采用。

(3)故障保护。除单机内部故障保护外,当均流或同步异常时,也要将相应逆变器模块切除。必要时还要实现不中断转换。

目前,实现逆变器并联运行的几类典型方法有:

2.1 自整步法^[6]

并联系统中各模块是等价的,没有专门的控制模块。通过模块间的 \dot{I}_{od} 均流线实现同步和均流,源于航空恒速恒频(CSCF)电源的自整步并联技术。其基本原理如图4。

逆变器输出端通常接LC滤波器,二通道并联时差模阻抗 Z_1-Z_2 只包含输出滤波电感 L_f ,而输出滤波电容 C_f 归入负载阻抗 Z_L 中。当二模块的输出电压 \dot{U}_{o1} 、 \dot{U}_{o2} 存在偏差电压 \dot{U}_{od} 时,其幅度偏差 \dot{U}_{odm} 与 \dot{U}_{o1} 、 \dot{U}_{o2} 基本同相,相位偏差 \dot{U}_{odp} 超前 \dot{U}_{o1} 、 \dot{U}_{o2} 、约 90° 。减小 \dot{U}_{o1} 、 \dot{U}_{o2} 的幅值偏差和相位偏差将会减小偏差电压 $\dot{U}_{od}(=\dot{U}_{odm}-\dot{U}_{odp})$,从而减小环流 $\dot{I}_{od}(=\dot{I}_{odm}-\dot{I}_{odp})$ 。 \dot{U}_{odm} 引起的偏差电流 \dot{I}_{odm} 滞后偏差电压 90° ; \dot{U}_{odp} 引起的偏差电压 \dot{I}_{odp} 滞后 \dot{U}_{odp} 90° ,与 \dot{U}_{o1} 、 \dot{U}_{o2} 基

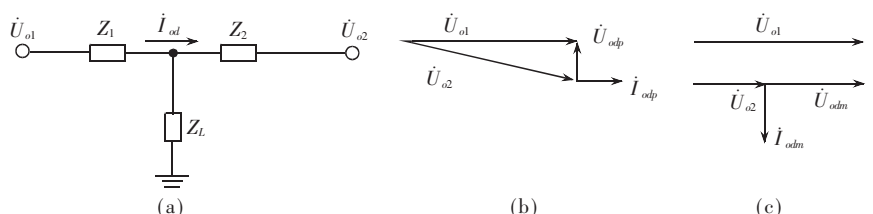


图4 二模块逆变器并联的简化电路及其输出电压电流相量

本同相。因此,对幅值偏差的控制可以通过对偏差电流无功分量的控制来实现,使二通道无功功率趋于均衡;对相位偏差的控制,可以通过对偏差电流有功分量的控制来实现,使二者趋于均衡;对相位偏差的控制,可以通过对偏差电流有功分量的控制来实现,使二通道通过有功功率趋于均衡。

偏差电流检测电路如图 5 所示,设逆变器模块 1、2 中电流互感器二次侧电流分别为 \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 ,检测电阻 R_{s1} 、 R_{s2} 中的电流分别为 $I_{R_{s1}}$ 、 $I_{R_{s2}}$,则电流检测闭合环路满足:

$$\dot{I}_{R_{s1}}R_{s1} + \dot{I}_{R_{s2}}R_{s2} = (\dot{I}_1 - \dot{I}_A)R_{s1} + (\dot{I}_2 - \dot{I}_A)R_{s2} = 0 \quad (1)$$

若 $R_{s1} = R_{s2}$, 则

$$\dot{I}_A = (\dot{I}_1 - \dot{I}_2) / 2 \quad (2)$$

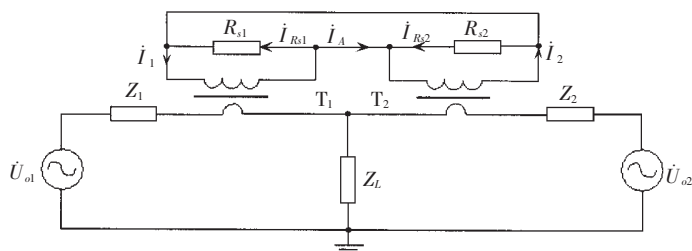


图 5 偏差电流检测电路

式(2)表明, \dot{I}_A 体现了负载电流平均值, $\dot{I}_{R_{s1}}$ 、 $\dot{I}_{R_{s2}}$ 体现了电流偏差,将其分离成无功分量与有功分量,并分别用来调节电压幅值和相位,从而实现无功功率和有功功率的均衡,如图 6。

自整步法常适用于开环控制的低频调制逆变器,电流检测、分离和控制电路复杂,调节时间长、精度低。

2.2 外特性下垂法^{[6][7]}

出发点类似于直流输出变换器并联均流的下垂法。模块间没有控制信号连线。它仅以本模块有功功率、无功功率和失真功率为控制变量,从而使各模块独立工作。各模块有自己的控制电路,之间唯一的连接是各模块交流并联功率输出线。均流靠模块内部输出频率、电压和谐波电压分别输出的有功功率、无功功率和失真功率呈下垂特性,从而实现同步和均流。

各逆变器的下垂特性为:

$$\omega_{oi} = \omega_{oi0} - k_{i1} P_{oi} \quad (3a)$$

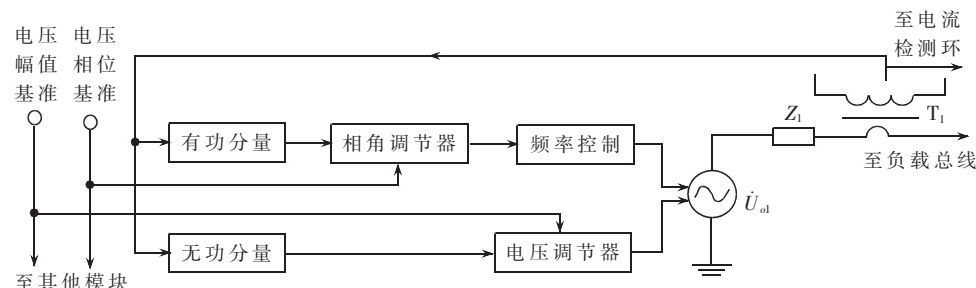


图 6 自整步并联逆变器系统控制框图

$$U_{oi} = U_{oi0} - k_{i2} Q_{oi} \quad (3b)$$

ω_{oi} 、 U_{oi} 分别为输出电压空载时的角频率、有效值, k_{i1} 、 k_{i2} 分别为 ω_{oi} 、 U_{oi} 的下降斜率。下垂特性使各逆变器模块的功率流受控,系统的频率和电压降落到新工作点,该点环流最小。

非线性负载时,视在功率 S 的表达式中又增加了一项谐波电流引起的失真功率 D ,即:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

与基波无功功率不同,只调整逆变器输出电压的基波分量不会影响失真功率,解决这一问题的方法之一是依照失真功率的函数调整电压环增益,使电压环的增益和带宽随谐波分量而降低,从而得到所需的输出阻抗特性。借此降低电压分量,改善各模块对谐波电流的均流。

这一方案的关键环节是功率的计算单元。算法必须能处理线性和非线性两种负载情况。算法所需信息源于电感电流和输出电压,其基本思路是将电感电流谐波分解,然后以输出电压与之相乘,从而得到各个功率分量。

该方案的优点是各模块仅在负载端相连,方便现场组成并联系统,特别适合于分布式并联系统。缺点是下垂特性赞成系统的频率和电压随负载而变,偏离理想工作点,均流效果不够理想。特别是动态过程或带非线性负载时,算法实现较复杂。

2.3 同步开关控制法^[7]

该方法由一个外部控制器和 N 个具有相同额定输出功率的逆变器模块构成,是一种较简单的集中控制并联方法,没有设置均流电路。外部控制器检测输出电压,产生 PWM 开关控制信号,控制各模块的功率开关同时进行状态转换。

并联逆变器同步开关控制法具有如下特点:(1)每个逆变器模块无法脱离外部控制器而独立工作,系统的冗余性和模块通用性较差;(2)对逆变器模块的参数一致性要求较高,模块输出阻抗的不一致性引起的负载不平衡现象无法克服,均流精度差;(3)逆变器模块间的通信信号线多,增加了控制电路的故障。

2.4 主从模块法^[7]

主从式并联逆变器系统由一个电压控制 PWM 逆变器主模块、数个电流控制 PWM 逆变器从模块和一个功率分配中心组成。主模块保证系统输出的正弦电压幅值、频率稳定,从模块输出的电流跟随参考电流的变化来实现负载均分,功率分配中心检测负载电流,并分配每个从模块的参考电流。

主从模块法并联系统具有如下特点:(1)电压控制 PWM 逆变器模块、电流控制 PWM 逆变器模块均有独立的控制环,系统稳定性好,易于容量扩展,均

流效果好;(2)电压控制 PWM 逆变器、电流控制 PWM 逆变器和功率分配中心是不同性质的模块单元,构成复杂,主模块一旦失效,从模块无法工作,系统没有实现冗余,可靠性低。(3)各模块间相互的连接线会引入噪声干扰。

基于“民主”主从模块法的 N 个逆变器模块并联系统通过硬件开关选择或软件设置,将任一逆变器模块设置为主模块 1 并控制其输出电压,电压环的输出即为所有模块电流给定信号,从模块从 2-N 自身的电压环不再起作用。当主模块故障时,任一从模块上升为主模块。这种主从模块法可实现并联系统的冗余,实现系统的模块化,提高了系统的可靠性,但模块间仍有通信连线。

2.5 平均值电流控制法^[8]

该系统中,同步的各逆变器模块的基准电压信号的平均值作为各模块电压外环的给定,各模块电压反馈信号的平均值作为各模块电压外环的反馈信号,各模块电压调节器输出的平均值作为各模块电流内环的给定,各模块输出滤波电感电流作为电流反馈信号。由于各模块输出滤波电感电流均跟踪给定电流的变化,所以可以实现各模块输出均流。

平均值电流控制法与主从模块法均属于电流跟踪控制法。平均值电流控制法具有如下特点:(1)电压基准、电压反馈、电流基准均为各并联模块相应信号的平均值,并联系统的动态和静态性能不比单模块性能差;(2)不需附加额外的并联控制模块;(3)模块间的模拟信号线较多,易受干扰,不适用于远距离通信;(4)并联控制电路复杂,可靠性较低。

3 并联逆变技术的发展趋势

随着智能化技术、模糊控制理论、EDA 技术的出现及不断发展日渐成熟,各种新的并联逆变控制技术不断被提出,并付诸研究实践。在文献[9]中提出了数字式逆变器并联智能化均流,文献[10]中提出了模糊控制理论实现自动均流的应用技术,文献[11]中提出了 DSP 技术

在并联逆控制中的应用。这些都表明并联逆变技术正朝着高功率、高变换效率、大容量、高可靠性、无污染、智能化的方向发展。目前国外已经公开发表了很多控制用单片 FPGA 或 CPLD 集成方面的文章,国内对这种技术的研究也在不断深入,但毋庸置疑,这也将是今后并联逆变技术的一个发展方向。

参考文献

- 1 朱金芳.并联均流技术在通信开关电源中的应用.辽宁科技学院学报,2005;7(3):36~37
- 2 徐亚东,雄伟.小功率开关电源并联使用均流技术.电子技术与应用,2002;(2):31~33
- 3 李士庆.高频开关电源并联均流技术及应用.煤矿机械,1998;(3):40~41
- 4 张占松、蔡宣三著.开关电源的原理与设计[M]:电子工业出版社,2004
- 5 刘春艳.UC3907 在开关电源并联系统中的应用.移动电源与车辆,2005;(2):7~9
- 6 陈道炼.DC-AC 逆变技术及其应用.机械工业出版社,2003
- 7 邢岩等.逆变器的并联运行技术.电源技术应用,2004:
<http://www.b2bic.com/>
- 8 王敏.基于平均电流法控制的逆变器系统并联技术的研究.电力机车与城轨车辆,2005;28(3):18~20
- 9 杜鹏英等.数字式 ACDC 电源并联系统及其智能化均流.科技通报,2005;21(3):302~305
- 10 赵珂.模糊控制理论在自动均流技术中的应用.电力电子技术,2005;39(4):115~117
- 11 秦娟英.逆变器并联控制及 DSP 应用.电气传动,2005;35(6):29~31
- 12 Shiguo Luo. A Classification and Evaluation of Paralleling Methods for Power Supply Modules:IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS,VOL19,PP 901-908,MAY 1999

(收稿日期:2006-03-24)