

模块化直流电子负载的冗余设计

王明彦¹, 王艺博², 王乐三³

^{1, 2} 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院

³ 海信(山东)空调有限公司

摘要: 针对大功率通讯电源测试时传统负载造成的能量浪费情况以及可靠性不高等问题, 设计了一种采用模块化结构的3+1冗余型直流电子负载。该电子负载由三个工作子模块和一个备份模块组成。在完成负载模拟功能的同时, 如若子模块中发生故障, 系统采用相应的故障检测方法诊断出故障模块, 并自动切除该故障模块, 投入备份负载模块, 大大提升了系统的可靠性。通过相关技术的仿真实验, 验证了本文冗余设计是可实现的, 模块化直流电子负载系统冗余设计可提高系统的安全性与可靠性, 保证系统安全稳定运行。

关键词: 电流模拟, 模块化, 冗余设计

1 引言

近年来, 大容量 DC 电源已经被广泛使用。例如通讯用电源系统需要 50V/2400A 的电源供电, 雷达发射器需要 40V/1000A 纹波小且稳定度高的低压大电流电源供电, 为保障电源出厂后能长期稳定安全工作, 必须对其进行测试与评估。传统的加载测试方法可靠性差, 发热严重, 造成严重的能源损失。因此, 我们采用直流电子负载技术来解决这个问题。电子负载设备可实现各类负载的模拟, 对电源进行检测, 并将被测电源输出的能量逆变回馈给电网。传统直流电子负载应用单台设备可靠性很低, 如果电子负载系统发生故障, 则这个设备将不能正常工作甚至完全瘫痪, 出现设备损坏以及数据丢失等严重损失。高可靠性是系统稳定工作的保证, 因而冗余设计日益成为研讨热点, 目前市场上对直流电子负载系统可靠性的要求日益增加, 因此多模块与冗余设计不可或缺。

针对于低压大电流电源, 采用模块化直流电子负载具有负载形式调整灵活、实验精度高以及节能减排等特点, 系统实现各模块独立控制, 解决了负载模拟模块功率各不相同的问题, 降低了对整体对称性的要求, 它使测试更加灵活, 大幅度降低了系统控制环节的复杂性, 且多模块结构保证了后级逆变环节电压达到并网电压要求, 弥补了单台设备的不足。系统整体类似于电子变压器系统, 完成了低压直流到高压交流的能量转换。若采用 N+1 冗余结构, 当某一模块故障时, 备份单元替代故障单元继续稳定工作,

大大提升了系统的可靠性。本文详细叙述了采用模块化结构的直流电子负载其冗余设计方案。

2 工作原理

模块化直流电子负载, 采用输入并联输出串联型系统结构, 可实现大电流电源的测试, 并进行能量回馈, 图 1 为该系电路结构示意图。通过模块化技术, 根据被测电源参数灵活配置子模块数目。每个模块由输入级负载模拟环节、中间直流储能环节和逆变回馈环节三部分组成。输入端采用多模块输入并联的结构, 对同一电源进行加载, 减小了单模块电流应力和电感体积; 电压一定时, 不同负载对应的电流不同, 因此负载模拟部分只需让端口输入电流准确跟踪给定负载电流即可完成对不同类型负载的模拟, 此处选用强迫均流技术中的软件强迫均流, 采用传统的 PI 控制, 实现负载电流精确跟踪并保证各模块电流的均衡; 中间直流能量存储环节负责平衡输入和输出级之间的能量交换, 实现前后级控制解耦; 后级各逆变单元输出与电网之间通过变压器隔离, 并对输出进行串联, 线圈匝数比为 1, 从而保证在前级输入并联的前提下实现后级输出电压的叠加, 以达到并网电压要求; 后级采用多电平级联型逆变进行并网回馈, 控制策略采用载波移相调制技术, 我们称之为 CPS-SPWM 调制法。此技术可以使得开关器件在较低频率下实现低谐波平滑回馈, 达到高频率的效果, 逆变电平数多, 且含有较少的电压谐波, 等效的开关频率成倍提升,

减少了逆变器的开关损耗，并且由于模块之间独立性较强，每个单元独立工作，输出电压不会相互影响，因此电路结构易于实现模块化和扩展。

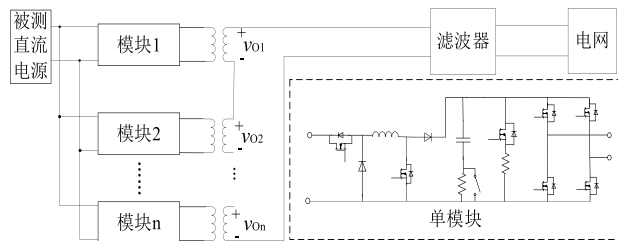


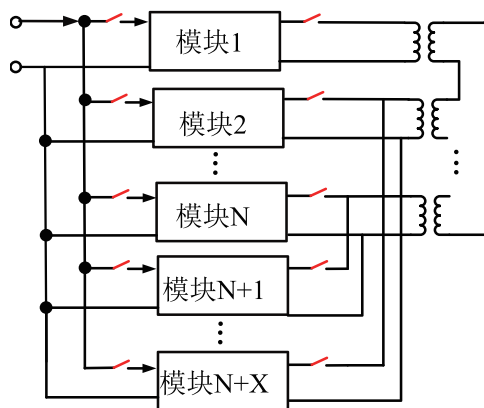
图1 模块化直流电子负载电路示意图

3 冗余设计

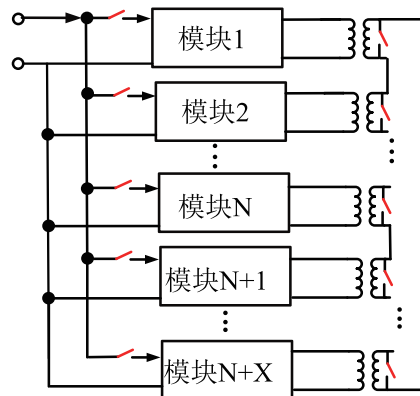
冗余备份技术是指系统具有相同的工作模块数目为两个或两个以上时，只有所有模块全部故障损坏时，整个系统才完全失去了正常工作的能力，该技术可以大大提升系统的可靠性以及系统的容错能力。简单并联冗余结构、双模块并联冗余结构、混并联冗余结构和N+X并联冗余结构是常见的几种系统冗余结构。本文选择N+X并联冗余结构作为直流电子负载系统的主要结构。

针对于模块化直流电子负载的现有结构，考虑在冗余实现过程中模块切换的复杂程度，并保证对负载电流持续的准确跟踪，尽可能缩短总负载电流恢复时间，设计了两种冗余方案。

方案一冗余结构示意图如图2(a)所示，正常工作的模块数目为N，冗余模块的数目为X，冗余模块分别并接在各正常工作模块上单独为其进行冗余。该冗余方案有较快的模块冗余速度，备份模块的控制信号完全与原模块相同，模块投切简单，但该结构若实现每个正常工作模块的冗余需要同等数量的冗余模块，一些冗余模块长时间处于非工作状态，利用率相对较低，浪费了更多的模块资源。方案二冗余结构示意图如图2(b)所示，在正常工作模块数为N的前提下可以灵活配置冗余模块X的数目，当检测到任何模块发生故障时，冗余模块可自动更换故障模块，确保系统继续稳定工作，大大提高了冗余模块的利用率，且系统结构简单方便模块的整体切除投入，在实际工程生产中更容易实现，因此选用方案二的冗余设计结构来实现模块化直流电子负载的冗余设计。



(a)



(b)

图2 冗余设计结构示意图

系统采用3+1冗余结构，其中三个模块对被测电源进行加载测试，另一模块为冗余备份模块；正常工作时若某一模块发生故障，通过故障检测可用开关将该模块切除，进行故障隔离，与此同时闭合冗余模块所对应的开关，让其替代故障模块继续工作，使整个瞬态过程平滑切换，从而最终实现了故障模块以及冗余备份模块的在线投切，维持整个系统能安全可靠工作，切实提升了系统的可靠性。为方便进一步说明投切过程，图3为冗余型直流电子负载整体拓扑图，具体冗余实现过程如下：当系统正常工作时，输入端快关 S_{11} 、 S_{21} 和 S_{31} 处于闭合状态、 S_{41} 断开，输出端开关 S_{12} 、 S_{22} 和 S_{32} 处于断开状态、 S_{42} 闭合，一号、二号、三号直流电子负载模块处于工作状态，为被测直流电源进

行加载实验并将能量回馈至电网；当检测到某一模块有故障发生（例模块三），该模块需退出系统，断开 S_{31} 、闭合 S_{32} ，断开该模块的开关控制信号，此时完成了对模块三的切除，使其退出该系统；与此同时，冗余备份模块准备接入到系统中，闭合 S_{41} 、断开 S_{42} ，并提供相对应的开关控制信号，则可实现冗余备份模块的在线投入。此时被测直流电源将由一号、二号、四号直流电子负载模块进行加载测试，整个系统继续保持稳定运行。

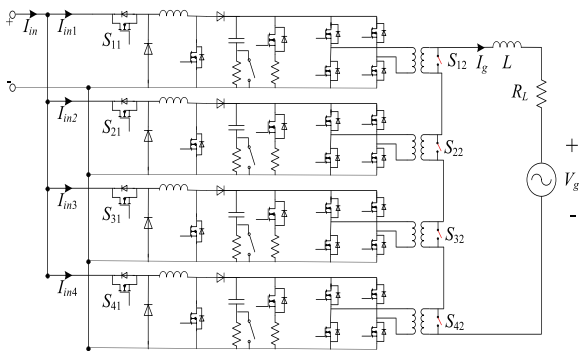


图3 模块化直流电子负载 3+1 冗余结构电路示意图

4 仿真验证

本文以 48V/63A 通讯电源为测试对象进行仿真验证，在发生故障并进行诊断后，此时输出故障信号，系统开始进行故障模块的切除隔离以及冗余备份模块的投入，完成该操作后系统继续稳定运行。例通过故障诊断在检测到故障信号开始进行模块 3 的投切，考虑到切换时间较短，所以在故障模块切除过程中其余两模块正常工作，仍保持原负载电流跟踪值，待冗余模块投入后，总跟踪电流恢复正常。图 4 为切换过程中电流跟踪仿真波形；图 5 为切换过程中

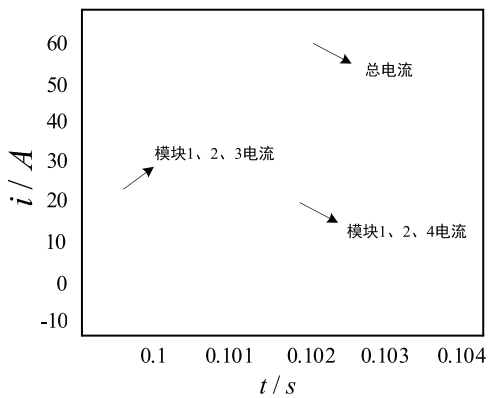


图4 恒流工作模式下电流跟踪仿真波形

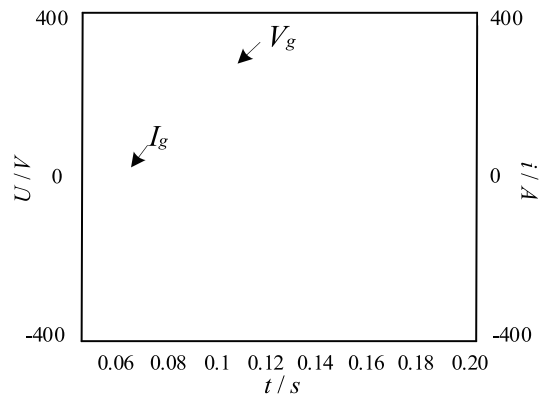


图5 逆变输出电流和单相电网电压波形

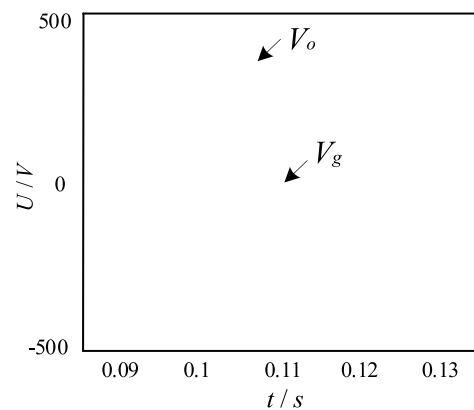


图6 逆变总输出电压和电网电压波形

单相电网电压和逆变输出电流波形图；图 6 为逆变总输出电压和单相电网电压波形图。

通过对仿真结果的分析我们可以得到如下结论，系统能够在内完成对故障模块的切除隔离并进行冗余备份模块的投入。非故障模块仍继续稳定工作，负载模拟总电流在很短的时间内就精确恢复到系统设定跟踪电流值；后级以单位功率因数并网其电流与网侧电压同相位，投切过程电流变化较小；逆变输出电压为七电平，投切过程中有微小波动，经半个电压周期后恢复正常，相位一致，跟踪效果良好。

5 结论

本文介绍了针对于模块化直流电子负载的冗余设计，提出了 3+1 冗余结构的设计方案，并分析了其工作原理。

下转165页