变电站新型直流系统及其控制保护策略

站内直流系统运行过程中经常出现蓄电池失效和直流母线接地故障，为了解决上述问题，提出了一种基于电力电子技术和保护控制技术的站内新型拓扑结构直流系统。该系统将站内一组蓄电池组进行分组后并联冗余输出，再经过电压变换给直流支路负载供电，介绍了系统的工作模式并进行可靠性分析；另外，提出了将接地故障检测电路和接地保护控制策略“双融于”直流升压变换装置的控制方案，实现直流接地故障的检测以及绝缘电阻计算、定位、故障保护和故障隔离，并分析了其控制方案和实现形式；最后进行仿真和实验验证，结果表明，站内新型直流系统的控制保护策略运行可靠，能够有效避免蓄电池组不能放电的问题，同时可以实现直流接地故障的有效保护，从而保障直流系统的稳定。

杨　涛　黄晓明／国网浙江省电力公司电力科学研究院
李　忠　邹学毅／南京国臣信息自动化技术有限公司

杨　涛／硕士研究生

关键词／Keywords
新型直流系统 ·
蓄电池失效 ·
直流接地 ·
双融于 ·
控制策略 ·

0　引言

变电站直流系统是站内二次电源的重要组成部分，是站内控制和继电保护的直流供电电源。目前，站内直流系统的主要构成部分包括高频充电机、蓄电池组、监控单元、直流绝缘检测装置、蓄电池电压巡检装置、直流断路器以及降压硅链等，其中蓄电池组是直流系统的核心组件，然而站内直流系统的蓄电池组由于各种原因都会造成蓄电池过早失效[1-3]。

另外，站内直流系统的直流母线经常发生单点接地或绝缘下降故障，如不及时处理，当另一极再发生接地故障就会造成直流系统短路，引起直流失电，造成继电保护的拒动作或误动作。

为了解决站内直流系统存在的上述问题，本文分析了蓄电池故障以及接地故障的原因和危害，提出了一种基于电力电子技术和保护控制技术的新型拓扑结构的站内直流系统，讨论了直流系统架构、工作原理以及保护控制策略，并进行了仿真和实验验证。

1　站内直流系统蓄电池故障和接地故障分析

1.1　蓄电池组故障分析

蓄电池组的失效和故障表现形式包括蓄电池开路、反极、短路、极板硫酸化、电解液干涸、容量异常以及热失控。

经过现场调研和分析，站内直流系统蓄电池组故障的原因包括以下几个方面[4-6]：①充放电管理不完善；②现场维护不周；③蓄电池自身的质量问题；④蓄电池组的容量设计不合理；⑤环境条件恶劣。

站内直流系统由于单节或几节蓄电池出现上述故障，就会造成整组蓄电池在需要放电时不能放电，引起继电保护装置的拒动作或误动作，给变电站稳定运行带来安全隐患。

1.2　接地故障分析

站内直流系统经常发生接地或绝缘下降故障，接地故障的形式分为单点接地和多点接地[6-7]：单点接地包括正母线接地或负母线接地；多点接地发生在多个支路。若正负母线同时接地，就会发生短路，造成更严重的事故。

经过现场调研和分析，站内直流系统接地故障的原因包括以下几个方面[8-10]：①直流支路数量较多，各支路电缆较长，容易造成接线错误；②长距离的电缆对

地分布电容变大，若电缆绝缘下降就会造成电缆对地放电，进一步引起电缆金属接地或绝缘下降；③恶劣天气会造成直流接线端子或电缆接地；④直流设备故障会造成直流接线端子的接地。

站内直流系统的单点接地长时间运行是不允许的，如不及时处理，当另一极再发生接地故障时就会造成直流系统短路，引起直流失电，造成断路器拒动作和熔断器熔断等。

2 站内新型直流系统拓扑结构和原理分析

为了解决站内直流系统存在的蓄电池故障和直流接地故障等问题，本文提出了一种基于电力电子技术和保护控制技术的新型拓扑结构的站内直流系统。

2.1 站内新型直流系统拓扑结构

站内新型直流系统拓扑结构如图1所示。以站内220 V直流系统为例，即将原直流系统的一组蓄电池分成两组，两组蓄电池并联输出，通过直流升压装置将直流母线电压升高到原直流系统的电压，并给支路负载供电[11-13]；另外，直流升压装置内部具有接地保护功能，实现支路直流母线的接地检测与保护；整流模块的输出经直流冗余切换装置后给直流负载提供热备用电源。

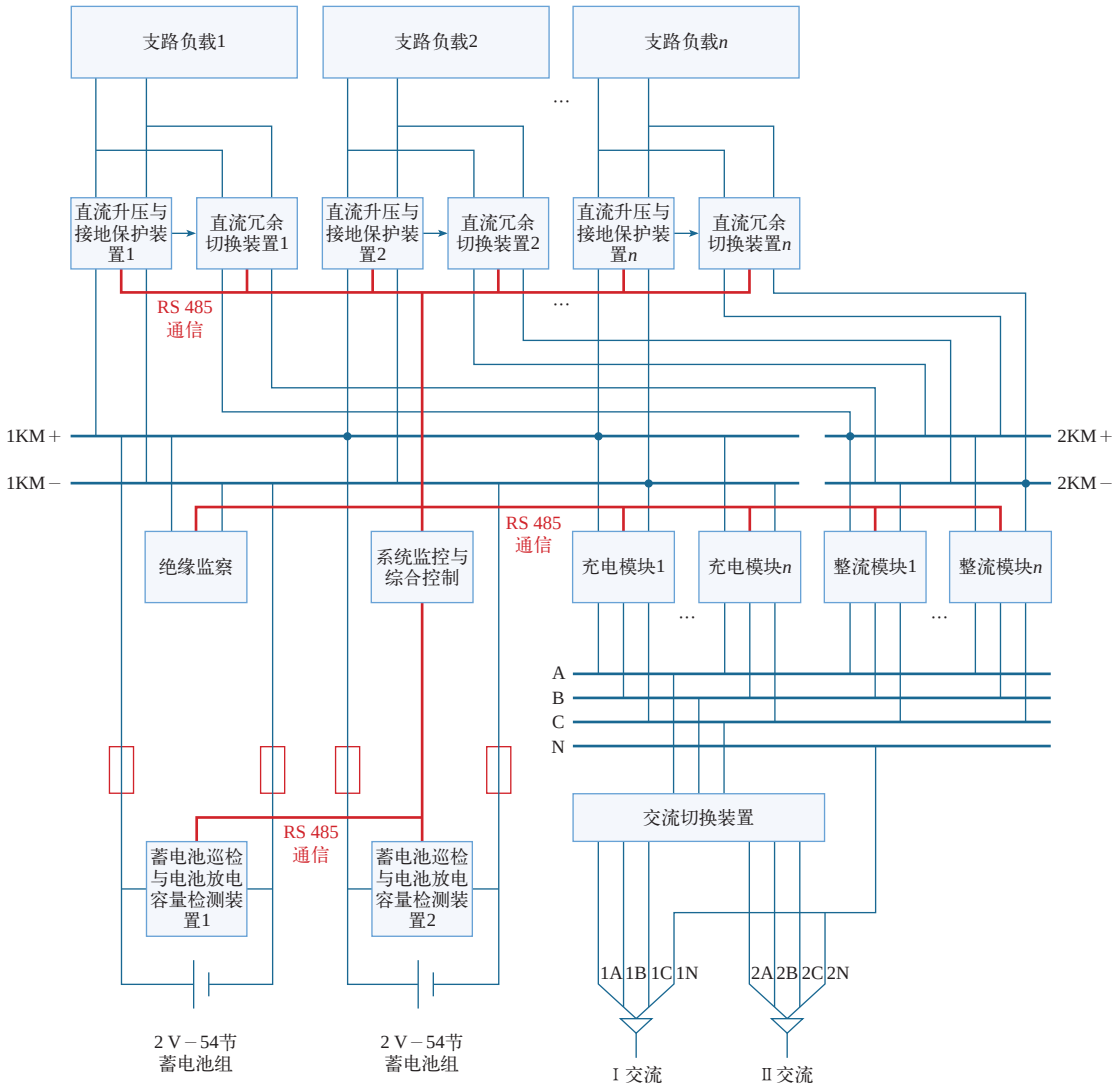

图1 站内新型直流系统拓扑结构

2.2 站内新型直流系统控制模式分析

由图1可知，站内新型直流系统包括三相交流电源、交流切换装置、充电模块、整流模块、蓄电池组、蓄电池巡检与电池放电容量检测装置、绝缘监察装置、系统监控与综合控制装置、直流升压与接地保护装置以及直流冗余切换装置，系统的核心是蓄电池组、直流升压与接地保护装置以及系统监控与综合控制装置，系统中的各个装置均通过RS 485与监控和综合控制装置通信。

站内新型直流系统的控制模式分为以下几种。

1）模式一：若I路交流电压正常，充电模块工作正常，给两组蓄电池组充电，两组蓄电池组并联输出到直流母线1KM，经过直流升压与接地保护装置给支路负载供电。

2）模式二：若I路交流电压异常，则系统自动切换到II路交流供电。

3）模式三：若I路和II路交流均故障，则系统由两组蓄电池组并联经直流升压和接地保护装置升压后给负载供电；同时系统监控与综合控制装置发出故障报警信号。

4）模式四：若充电模块发生故障，则系统监控与综合控制装置发出故障报警信号。

5）模式五：若一组蓄电池组故障，则可由另一组蓄电池继续给直流母线1KM供电，同时系统监控与综合控制装置发出故障报警信号。

6）模式六：若直流升压与接地保护装置故障，则通过直流冗余切换装置继续给负载供电，系统监控与综合控制装置发出故障报警信号。

7）模式七：若整流装置故障，则系统监控与综合控制装置发出故障报警信号。

8）模式八：若直流冗余切换装置故障，系统监控与综合控制装置发出故障报警信号。

3 站内新型直流系统蓄电池组的控制方案和可靠性分析

3.1 蓄电池组控制方案分析

为了解决站内直流系统因蓄电池组故障而不能正常放电的问题，本文提出了以下控制方案：

1）将站内原直流系统的一组蓄电池分成两组，分组后的蓄电池组直流母线电压变为原来的1/2。

2）分组后的两组蓄电池组并联输出给直流母线供电，电池组互为冗余。

3）蓄电池组输出的直流母线经过直流升压与接地保护装置后得到正常的电压给支路直流负载供电。

4）每组蓄电池配有蓄电池巡检和电池放电容量检测装置，实时检测蓄电池的工作状况。

5）系统监控与综合控制装置实时监测蓄电池组的状态信息和直流升压与接地保护装置的状态信息，实现实时监测与故障报警。

3.2 控制方案的可靠性分析

站内新型直流系统设计的重点在于提高直流系统的供电可靠性，本文将分散风险和提高元件的可靠性等作为设计依据，通过采取以下措施来提高直流系统的可靠性。

1）分散风险：即将一组蓄电池分成两组，两组蓄电池并联运行，任何一组蓄电池出现故障，整个系统仍能正常工作；同时进行蓄电池组的在线巡检与定时进行蓄电池组放电检测，检测电池内阻和容量，蓄电池组的状态实时上传至监控系统进行监测与报警；实现了蓄电池组故障风险的分散，提高直流系统蓄电池组的供电可靠性。

2）提高元件的可靠性：即通过新型直流系统中相关装置冗余和关键装置内部元件的冗余设计来实现。直流升压与接地保护装置是新型直流系统的另一核心元件，实现了分组后电池电压的抬升以及直流电源和直流负载的电气隔离，关系到直流负载支路的供电可靠性；此核心元件设计的基本原则是保证可靠性，其内部采用了交错并联冗余设计的拓扑结构，内部元件的设计要求有两倍以上的安全裕量；在核心元件的外部还并联了直流冗余切换装置，保证直流负载供电的可靠性；直流冗余切换装置的直流母线2KM来自多台并联输出的整流模块，进一步保证了直流负载供电的可靠性。

4 站内新型拓扑结构直流系统接地故障的保护方案和实现方式分析

4.1 新型直流系统接地故障保护控制方案

为了解决站内直流系统的接地故障问题，本文提出了在直流母线和直流负载支路之间串联直流升压和接地保护装置的保护方案[14-15]，该装置不但实现了蓄电池分组后直流母线电压的抬升，而且具有直流支路母线接地检测和保护功能，如图2所示。

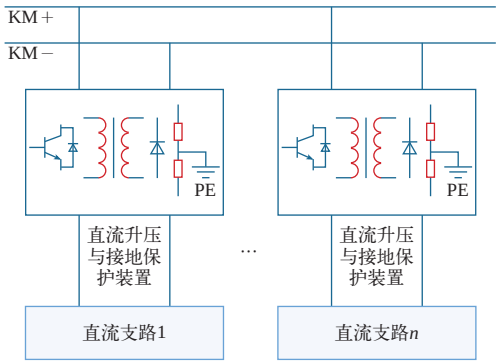

图2 站内新型直流系统接地保护示意图

支路直流母线接地保护控制方案如下：站内直流系统现有的直流母线接地故障检测方法包括低频交流注入法、平衡桥电阻法以及漏电流检测法等，虽然在一定程度上可以检测到直流母线接地故障的存在，但只能实现直流母线接地故障报警，无法准确定位接地故障点，更不能从根本上解决母线接地故障带来的危害。

基于电力电子变换和数字控制技术，本文设计了适用于蓄电池组电压变换的直流升压装置，借助于直流升压装置本身的保护和隔离功能，结合接地故障的检测方法与控制算法，提出了一种解决直流支路母线接地故障的新型方案，即将接地故障检测方法融于直流升压装置内部的硬件电路设计中，将接地故障检测保护控制策略融于直流升压变换器自身的保护控制策略，通过软硬件“双融于”的控制方案来实现支路直流母线接地故障的检测、保护、定位和隔离。

4.2 接地故障检测与保护的实现形式

直流升压与接地保护装置主电路拓扑结构采用隔离型的双管正激交错并联的DC/DC变换器，如图3所示，该装置内部采用了交错并联的设计方案，在一定程度上提高了装置自身的可靠性，进一步提高了直流系统的供电可靠性。

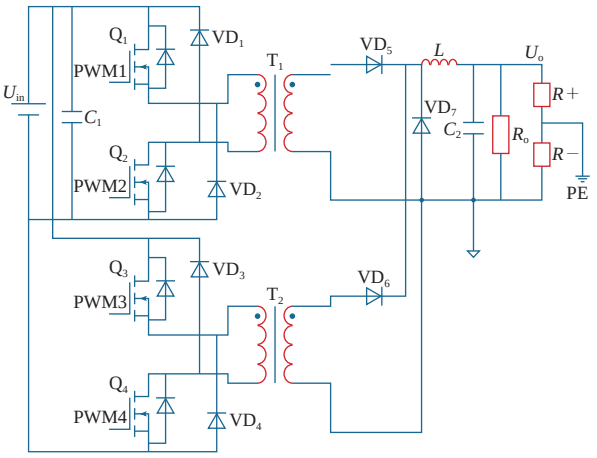

图3 直流升压与接地保护装置主拓扑原理框图

具体实现形式如下：

1）升压与保护装置内部的接地检测电路可以实时检测负载母线电压，由内部的数字控制器来计算母线对地绝缘电阻，同时进行绝缘电阻的实时监测与显示，根据软件程序中设定的阈值来实现接地故障的报警，并通过通信进行故障信息上传。

2）由于装置中存在高频隔离变压器，可以实现蓄电池组直流母线和直流支路负载母线的电气隔离，当负载侧发生接地故障时，由于变压器一、二次侧的电气隔离，负载侧的接地故障不会传递到直流母线侧，将接地故障限制在故障支路。

3）直流升压与接地保护装置串联在直流母线和负载之间，当检测到直流负载支路发生接地故障时，本支路装置发出故障报警信号，实现接地故障的快速与精准定位。

4）在单点接地故障清除之前，直流系统及故障支路均可正常运行，单点接地故障不需要装置内部的开关动作，将接地故障进行隔离与故障报警及信息上传。在故障清除之前，可根据负载中断的影响进行情势判断，提前设置闭锁输出或继续给故障支路供电。

5 实验验证

5.1 仿真验证

本文利用Saber软件搭建仿真模型，并进行蓄电池分组和直流接地的仿真。

1）一组蓄电池（220 V）分成两组，并进行两组电池并联输出仿真，如图4所示。

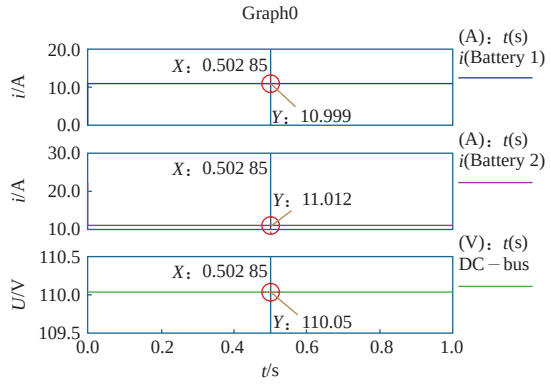

图4 蓄电池分组并联输出的电压和电流波形

由图4可知，蓄电池分组后，两组蓄电池并联给负载供电，蓄电池组的直流母线电压为DC 110 V，两组蓄电池的输出电流分别为10.99 A和11.01 A，电流基本均分。

2）模拟一组蓄电池内部故障由另一组蓄电池继续带负载的仿真，如图5所示。

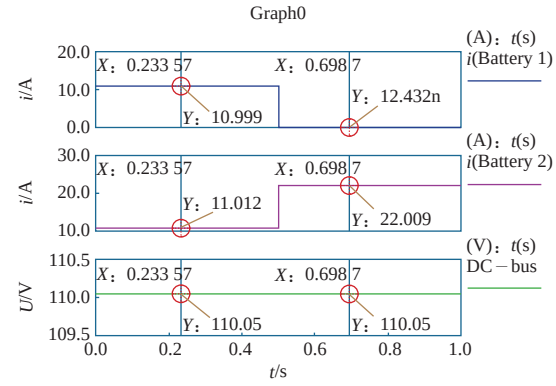

图5 一组蓄电池故障时输出的电压和电流波形

由图5可知，正常情况下两组蓄电池给负载供电，当一组蓄电池出现故障时，故障蓄电池组输出电流为零，负载电流由另一组蓄电池全部提供，输出电流变为原来的两倍，母线电压保持不变，保证负载的正常运行。

3）利用搭建的仿真电路分别模拟支路直流母线正负接地时正负母线对地电压的变化情况，如图6和图7所示。

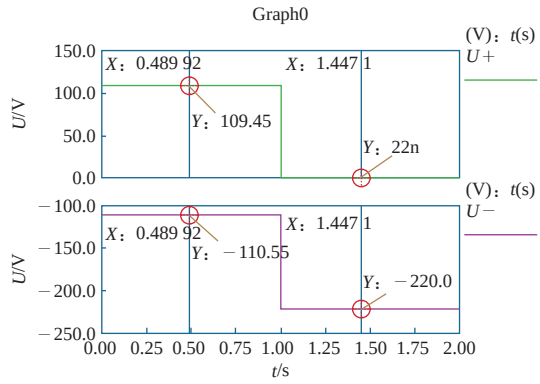

图6 正母线接地时的正负母线对地电压波形

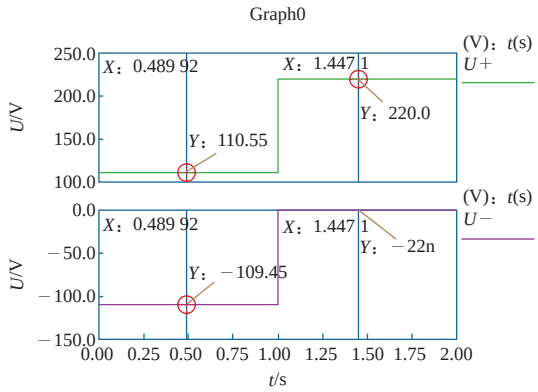

图7 负母线接地时的正负母线对地电压波形

由图6和图7可知，由于支路直流系统的正负母线是浮地的，当正母线出现接地故障时，正母线对地电压接近于零，负母线对地电压被钳位至DC－220.0 V；当负母线出现接地故障时，负母线对地电压接近于零，正母线电压被抬升至DC 220.0 V；而正负母线之间的电压差仍为DC 220 V，由于直流升压与接地保护装置的作用，支路母线在出现单点接地时仍然可以短时间正常运行。

5.2 实验验证

为了验证仿真分析的可行性和正确性，本文搭建实验平台进行相关的实验验证。

1）两组蓄电池组并联经过直流升压与接地保护装置给负载供电，蓄电池的输出电压和电流波

形如图8所示。

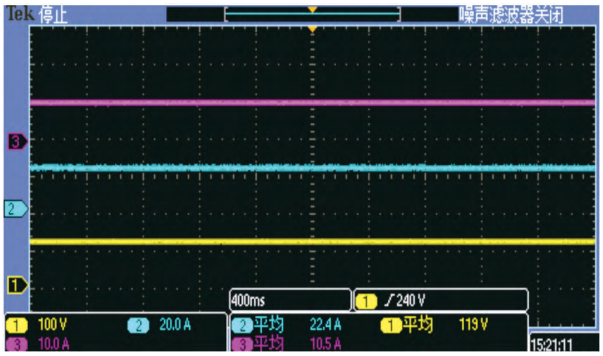

图8　两组蓄电池的电流和母线电压波形

由图8可知，通道1表示蓄电池组的直流母线电压，其数值为DC 119 V；通道2表示两组蓄电池并联输出的总电流，其数值为22.4 A；通道3为第一组蓄电池输出的电流，其数值为10.5 A，两组蓄电池组的输出电流基本一致。

2）一组蓄电池蓄故障时的另一种蓄电池组的电压和电流波形如图9所示。

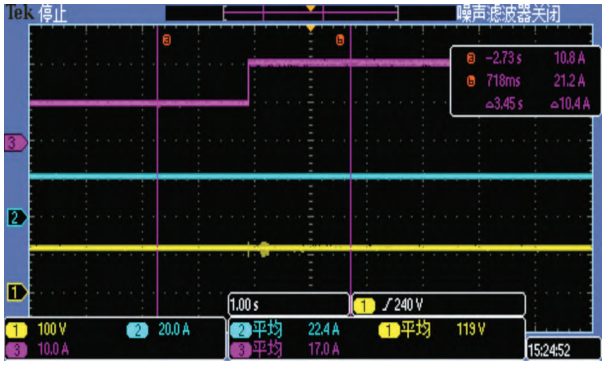

图9　一组电池故障时的输出电流和母线电压波形

由图9可知，两组蓄电池均正常时共同给负载供电，当第二组蓄电池出现故障时，第一组蓄电池的输出电流由10.8 A变为21.2 A（通道3），第二组蓄电池组的输出电流变为零，蓄电池组的母线电压不变。

由此可以验证蓄电池分组的可行性与正确性，同时实现了蓄电池组的冗余配置，保证了负载供电的连续性和可靠性，实现了负载不间断供电情况下对故障蓄电池组的在线维护和更换，保证了站内直流系统的正常运行。

3）支路直流母线接地故障模拟测试，正常情形下蓄电池分组后并联给直流升压与接地保护装置供电，蓄电池组的直流正负母线对地电压和支路直流母线正负之间电压波形如图10所示。

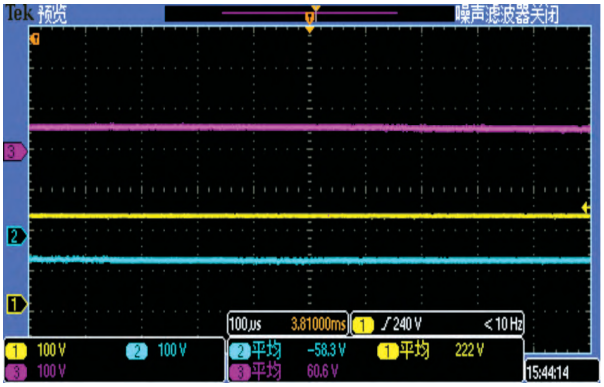

图10　蓄电池直流母线对地电压和支路母线电压

其中，通道1表示支路直流正负母线之间的电压，其数值为DC 222 V；通道2为蓄电池组的负母线对地电压，其数值为DC −58.3 V；通道3为蓄电池组的正母线对地电压波形，其数值为DC 60.6 V，正负之间的电压为118.9 V。

4）模拟支路直流正母线接地时，测试蓄电池组直流母线对地电压的变化和直流负母线对地电压的变化波形如图11所示。支路负母线对地电压变为DC −215 V，蓄电池组正负母线对地电压基本不变，不受支路直流正母线接地故障的影响。

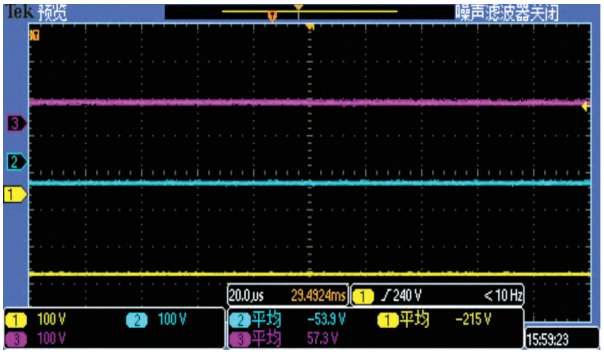

图11　蓄电池直流母线对地电压和直流负母线电压

5）模拟支路直流负母线接地时，测试蓄电池组直流母线对地电压的变化和直流正母线对地电压的变化波形如图12所示，支路正母线对地电压变为DC 219 V，蓄电池组正负母线对地电压基本不变，不受支路直流负母线接地故障的影响。

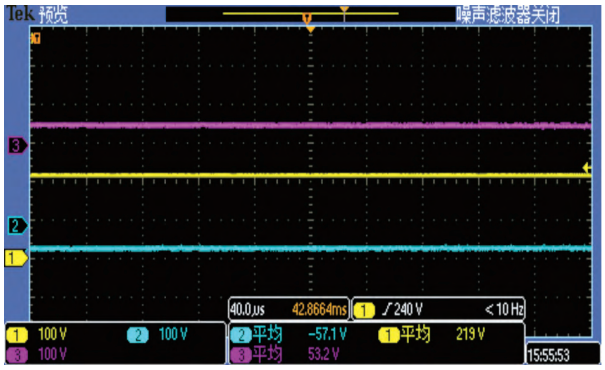

图12 蓄电池直流母线对地电压和直流正母线电压

由图10～图12的分析可知，当支路直流母线发生单点接地故障时，支路负载仍然可以正常工作，同时由于直流升压与接地保护装置的作用，将故障限制在故障支路；蓄电池组直流正负母线对地电压基本保持不变，蓄电池直流母线不会受到负载支路接地故障的影响，减小了接地故障对整个直流系统的影响，同时实现支路接地故障的检测以及绝缘电阻计算、保护、故障隔离和故障定位，保证了站内新型直流系统的正常运行。

6 结束语

本文分析了站内直流系统蓄电池组故障以及直流接地故障的原因和危害，提出了一种基于电力电子技术和保护控制技术的新型拓扑结构的站内直流系统，对主拓扑结构、各功能实现原理与可靠性、工作模式以及保护控制策略进行了深入研究，并进行了仿真和实验验证。本文提出的站内蓄电池组分组的相关控制方案，可以有效解决蓄电池组失效带来的系列安全隐患问题，实现了蓄电池组、充电装置、整流装置以及负载供电装置的冗余配置和在线维护检修，提高了站内直流系统的供电可靠性。本文提出的“双融于”控制策略，解决了蓄电池组分组后的直流升压问题，并实现了支路直流母线接地故障的检测、保护、故障定位和故障隔离，有效缩小了接地故障的影响范围，保证了站内直流系统的安全稳定运行。

参考文献

[1] 邓晨华．直流系统绝缘在线监测与蓄电池故障预测 [D]．哈尔滨：哈尔滨工业大学，2013．

[2] 杨忠亮．直流电源系统综述 [J]．供用电，2015，32 (2)：14-18．

[3] Q/CSG 1203003—2013 变电站直流电源系统技术规范 [S]．

[4] 赵宝良，姜晓飞．由一起变电站直流电源事件引发的蓄电池内阻探讨 [J]．供用电，2015，32 (2)：25-27．

[5] 陈冬，谭建国，王丽．变电站蓄电池失效分析及对策措施 [J]．供用电，2016，33 (3)：10-14．

[6] 余剑锋．直流系统接地故障监测研究 [D]．武汉：武汉大学，2004．

[7] 李富颖．关于直流系统绝缘监测装置的研究 [D]．北京：华北电力大学，2010．

[8] 王金凤．直流系统接地故障检测方法的研究 [D]．天津：天津大学，2005．

[9] 雷兴，徐楠，潘学萍，等．变电站直流接地巡检的选线校核机制研究 [J]．电力系统保护与控制，2015，43 (20)：76-82．

[10] 汤磊，高厚磊，苏文博，等．杂散电容对二次回路的影响及防范措施 [J]．电力系统保护与控制，2010，38 (22)：206-209，213．

[11] 梁建斌．变电站直流系统接地故障查找的研究 [D]．广州：华南理工大学，2013．

[12] 王丽，陈文波．基于本质安全化设计的直流系统研究 [J]．供用电，2016，33 (3)：3-9．

[13] Wang Li，Zou Xueyi，Chen Wenbo．Study on DC system based on intrinsic safety design [C]．The 6th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection，Nanjing，China，2015．

[14] 黄晓明，杨涛，邹学毅．直流系统主动式接地保护装置研究与开发 [J]．供用电，2016，33 (3)：19-24．

[15] 吴鸣，刘海涛，陈文波，等．中低压直流配电系统的主动保护研究 [J]．中国电机工程学报，2016，36 (4)：891-899．

（收稿日期：2016－10－20）EA