

站用直流电源系统中新型主动式保护装置的研究

张武洋¹,王同¹,曹子恒²,邹学毅³

(1. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110006;

2. 四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065; 3. 南京国臣

信息自动化技术有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要:在站用直流电源系统中,交流窜入直流是常见的一种故障,对系统的稳定运行具有严重的危害。为解决上述故障,提出了一种基于电力电子设备的新型主动式保护装置,该装置可实现对交流窜入直流故障的主动隔离、精确检测及报警,同时还能保护故障支路的其他设备,从而保证站用直流电源系统的安全运行。首先给出了该装置的拓扑结构、功能实现形式、故障检测方案以及电路的设计,之后提出了用于提高站用直流电源系统供电可靠性的新型拓扑结构,最后通过现场实验验证了该装置功能的可靠性以及运行控制策略的正确性。

关键词:交流窜入直流故障;电力电子设备;站用直流电源系统;保护装置;主动式

中图分类号:TM464 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd21842

Research on a New Active Protection Device in DC Power System of Station

ZHANG Wuyang¹, WANG Tong¹, CAO Ziheng², ZOU Xueyi³

(1. Electrical Power Research Institute of Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, Liaoning, China;

2. School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China; 3. Golden

Cooperate Information & Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, Jiangsu, China)

Abstract: The fault of alternating current (AC) power flow into direct current (DC) power is a common fault in the DC power system of the station, and it has serious harm to the stable operation of system. For solving above fault, a new active protection device based on power electronic equipment was proposed. Active isolation, accurate detection and alarm location for the fault of AC power flow into DC power could be realized by this device, and other equipment of fault branch also could be protected, and the safe operation of DC power system of the station could be ensured. Firstly, the topology of the device, function realization, fault detection scheme and circuit design were shown. After that, a new topology for improving the supply reliability of DC power system of the station was proposed. In the end, the reliability of the device and correctness of the operation control strategy were verified by site experiment.

Key words: the fault of alternating current (AC) flow into direct current (DC); power electronic equipment; DC power system of station; protection device; active

站用直流电源系统属于电力二次系统的组成部分,既是电力系统控制和保护的重要基础,同时也是确保事故能得到快速处理的关键保障,在目前的变电站与发电厂中广泛存在^[1-4]。

在站用电源系统中,交流回路和直流回路是两个相互独立的系统,交流回路一般是接地系统,而直流回路是不接地系统,所以当发生交流

窜入直流时,就会引发直流母线接地故障^[5-6]。对于交流窜入直流而造成的母线接地故障,现有的解决方法可以通过便携式的接地故障查找仪来检测故障,但是该方法存在明显的缺点:1)由于查找仪自身兼容性低和抗干扰能力差的因素,可能会造成接地故障的误报;2)需对任何馈线支路进行检测,具有工作量大、时效性差的缺点。另

基金项目:国家自然科学基金项目(51807126);国家电网公司科技项目(SGLNDK00DWJS1800020)

作者简介:张武洋(1981—),男,硕士,高级工程师,Email:zhang_wuyang@126.com

外,也可以用万用表拆除部分回路接线来查找故障,但易造成误触误碰事故的发生,更重要的是,这些仪器或方法无法对故障进行有效地限制和快速地隔离,进而可能导致故障进一步扩大到整个系统^[7-8]。因此,标准DL/T1392—2014《直流电源系统绝缘监测装置技术条件》要求在站用直流电源系统中,窜入的交流电压有效值大于或等于10 V时监测装置应具有测记和报警功能^[9]。

文献[10-12]分析了现在站用直流电源系统中所存在的故障,对其特点与发展过程做了详细介绍,并提出了保护装置的概念,但并没有给出详细的设计方案。文献[13]提出了基于电容隔离的检测方法和基于快速傅里叶变换的故障幅值计算方法,但是只能实现检测和报警功能,并不能实现定位和限制故障的功能,并且检测方法过于复杂,不利于实现。文献[14]首先分析了多种交流窜入直流故障的检测方法,之后提出了一种新型故障定位算法,但同样不能实现故障的隔离和限制。文献[15]同样针对交流窜入直流故障,提出了基于中央处理器的故障检测技术,但其适用性还有待进一步验证。

针对交流窜入直流故障,文章提出了一种基于电力电子设备的新型主动式保护装置,可实现故障主动隔离、故障主动检测、故障主动定位和设备保护的功能。故障的检测和定位功能主要通过系统控制算法来实现,而故障的隔离功能则是通过保护装置的电路拓扑结构来实现的,最后通过现场实验验证了文章提出装置功能的有效性。

1 交流窜入直流故障分析

1.1 交流窜入直流故障的现象

交流窜入直流故障指的是交流电源连接直流正极母线或者负极母线的情况,如图1所示。图1中, U_{dc} 为母线极间电压; R_p, R_n 为正负母线的绝缘检测电阻; U_{ac} 为窜入的交流故障电源有效值。由图1可以看出,由于 U_{ac} 接地并且与直流母线相连接,所以对于直流回路来说,相当于母线发生了接地故障,而对于交流回路来说, U_{ac} 可通过 R_p, R_n 输出交流电,从而对直流母线电压产生影响。

定义正常情况下正极母线对地电压为 U_p ,负极母线对地电压为 U_n ,定义故障情况下正极母线对地电压为 U_{p*} ,负极母线对地电压为 U_{n*} 。

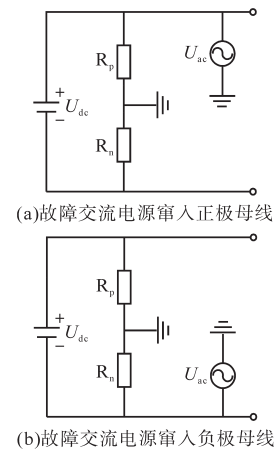


图1 交流窜入直流故障现象

Fig.1 Appearance of the fault when AC power flow into DC

根据图1a有下式成立:

$$\begin{cases} U_{p*} = U_{ac} \\ U_{n*} = U_{ac} - U_{dc} \end{cases} \quad (1)$$

根据图1b有下式成立:

$$\begin{cases} U_{p*} = U_{ac} + U_{dc} \\ U_{n*} = U_{ac} \end{cases} \quad (2)$$

1.2 交流窜入直流故障的产生原因及危害

经过多次的现场调研与讨论,发生交流窜入直流故障的因素主要分为三类^[16]:

1)人为因素。由于现场人为误操作,会造成交流的火线或零线与站用直流电源系统的正或负母线连接,例如对变电站或者发电厂情况不熟悉,以及在技术上的失误等都有可能错误地将交流电接到直流系统供电回路中去,从而导致发生交流电源窜入直流系统事故。

2)绝缘下降。电缆面上的保护层绝缘下降也可导致交流窜入直流系统中,这样一来交流电缆和直流电缆的内芯可能发生电气接触,从而导致故障。

3)天气影响。在雨天当中,也可能会发生雨水进入配电箱的情况,导致发生交流窜入直流故障。

交流窜入直流故障可能引发如下危害^[17]:

1)继电保护装置拒动或误动。如果故障发生在正极母线,可能会造成继电保护装置误动的情况;如果发生在负极母线,可能会造成继电保护装置拒动的情况。

2)继电器抖动或光电隔离信号的动作。故障情况下,交直流电压叠加于直流跳闸回路的中间继电器两端,其幅值会远超过中间继电器的动作电压,可能会出现周期性的继电器抖动或光电隔离信号的动作。

目前,交流窜入直流故障是发电厂、变电站经常可能遇到的异常情况,这不但会影响到站用直流电源系统本身的可靠运行,而且在一定条件下会引发信号回路及继电保护装置的误动和拒动,严重影响了系统的发供电效率^[18]。

2 提出新型主动式保护装置

针对现有故障检测技术的不足,提出了一种基于电力电子设备的新型主动式保护装置,该保护装置可实现对故障的主动隔离、精确检测以及快速定位,同时还能保护故障支路的设备。

2.1 新型主动式保护装置的拓扑结构

新型主动式保护装置的拓扑结构如图2所示,该保护装置的输入端连接电源系统的发电端蓄电池组、输出端连接直流负载。整个保护装置包括双管正激DC/DC变换器、单片机控制电路、输出二极管以及检测电路。双管正激DC/DC变换器的输入端连接直流电源,双管正激DC/DC变换器的输出端通过输出二极管连接直流负载;单片机控制电路连接双管正激DC/DC变换器的驱动端,还同时连接检测电路的传输接口;检测电路包含直流正负母线的交流信号采样电路、检测电路的采样端口及连接DC/DC变换器输出端的输出二极管。

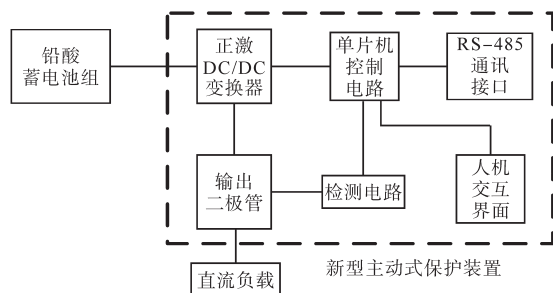


图2 新型主动式保护装置的拓扑结构

Fig.2 Topology structure of new active protection device

本文提出的用于直流配电系统的新型主动式保护装置还包括RS-485通讯接口和人机交互界面,RS-485通讯接口和人机交互界面分别与单片机控制电路连接。单片机控制电路一方面通过串行外设接口(serial peripheral interface, SPI)连接显示屏,一方面还可通过RS-485通讯接口进行故障信息的远程上传,实现远程监控;同时单片机控制电路通过脉宽调制(pulse width modulation, PWM)两个驱动控制信号来控制变换器的两个金属氧化物半导体管(metal oxide semiconductor, MOS)的工作状态。

2.2 新型主动式保护装置的功能实现方式

在实际应用中,保护装置通常串联在负载支路和直流母线之间,如图3所示。

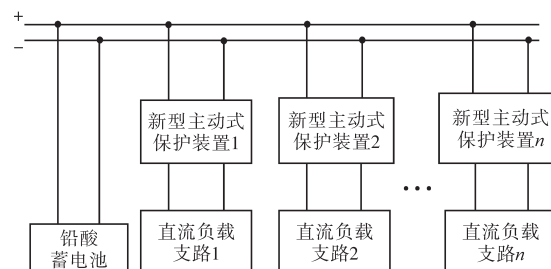


图3 站用直流电源系统中主动式保护装置的连接方式

Fig.3 Connection mode of active protection device in DC power system of station

新型主动式保护装置的主动保护作用是通过四大功能来实现的,即故障主动隔离功能、故障主动检测功能、故障主动定位功能以及设备保护功能。

1)故障主动隔离功能。由于主动式保护装置当中DC/DC正激变换器与负载支路直接相连接,并且DC/DC正激变换器当中含有高频隔离变换器,可实现负载支路与蓄电池侧的电气隔离,从而将故障限制在本支路,防止故障扩张到蓄电池侧和其他负载支路,实现了故障支路和非故障支路之间的电气隔离。值得注意的是,由于DC/DC变化器自身内部具有一定的保护功能,可防止过流、过压、断路、短路等故障的发生,一定程度上增加了站用直流电源系统的安全性能。

2)故障主动检测功能。该保护装置当中的检测电路和单片机电路可实时监测负载端母线的电压情况,若母线发生故障,单片机控制电路对采样得到的负载端母线的电压信号进行相关数据处理和计算,识别出交流电源窜入负载母线的情况,并进行交流窜入电压有效值的计算,最后通过SPI通讯对故障信息进行上传,从而实现了交流窜入直流故障的精确检测。

3)故障主动定位功能。若某负载支路发生交流窜入直流故障时,则该支路的主动式保护装置可发出报警信号,报警信号通过通讯设备上传到显示屏或者远程监控室,全方位实现了对所有负载支路故障的快速定位。

4)设备保护功能。为了防止负载支路发生交流窜入直流故障后出现设备击穿或者保护设备误动、拒动的现象,当保护装置的单片机电路检测出直流母线上的故障后,会立即断开DC/DC正激变换器的PWM开关驱动信号、关闭两个MOS

管的工作状态、停止对负载支路的供电,从而实现了负载端设备的保护。

值得注意的是,由于站用直流电源系统中含有较多负载支路,并且保护装置内含有多个电路与器件,相比于现在通用的便携式接地故障查找仪,虽然一定程度上增加了站用直流电源系统的经济成本,但是能大幅提高故障检测的时效性,大大减少了工程查找量,节约了人力,而且该保护装置能将故障限制在故障支路,实现了故障主动隔离与保护的效果,避免了整个站用直流电源系统接地甚至发生短路以及直流消失的风险,而这些优势都是现有技术不具备的。

综上所述,相比于现在通用的故障查找仪技术,所提出的新型保护装置在站用直流电源系统中的应用效益更大,用途更加广泛,提升了站用直流电源系统的智能化技术。

2.3 新型主动式保护装置的故障检测方案

该保护装置的故障主动检测功能主要是通过检测电路和单片机控制电路来完成,为了弥补现有技术难以分辨和精确查找的缺点,该保护装置不仅能通过单片机电路的相关数据处理检测出故障极,还能计算出窜入的故障交流电压的有效值,故障检测的详细方案如下:

1) 直流母线的故障判断。故障交流电压一个周期的时间约为 20 ms,单片机的一个周期大约采样 100 个点,连续采样 3 个周期的数据,则形成三个周期的正弦波形,由于发生故障的一极将直接连接交流故障电源,因此,故障检测方法会根据两极电压的峰值和来判断故障交流电源窜入哪一极,通过式(1)、式(2)可以发现,若峰值和接近 0,则为故障极。

2) 故障交流电压的有效值计算。有效值的计算可通过均方根公式获得,若单片机在 3 个周期内连续采样 n 个点的电压瞬时值记为 $U_1 \sim U_n$,则计算窜入的交流电压 U_{ac} 的有效值表达式如下式所示:

$$U_{ac} = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}{n}} \quad (3)$$

图 4 为故障检测方案的流程图,在各模块及各参数初始化之后,保护装置启动,启动完成后,单片机控制电路通过自身的 A/D 采样单元采集双管正激 DC/DC 变换器输出端的交流电压信号,并进行直流母线的故障判断和窜入的交流电压有效值计算,得出相关故障信息后进行上传。

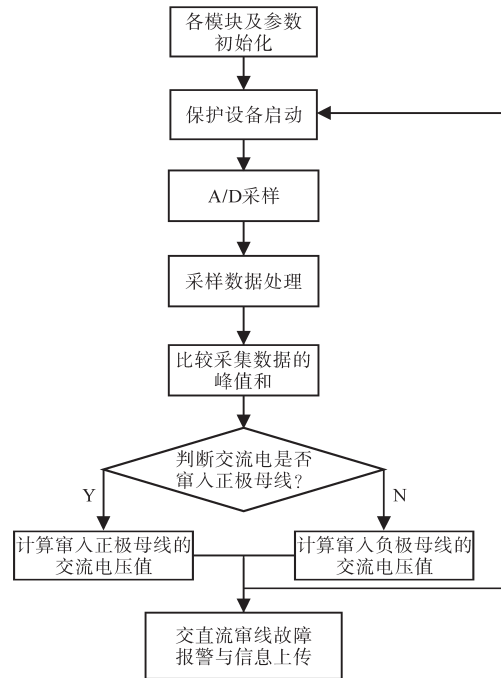


图4 故障检测方案的流程图

Fig.4 Flow chart of fault detection programme

2.4 新型主动式保护装置的电路设计

2.4.1 主电路设计

在新型主动式保护装置当中双管正激 DC/DC 变换器有着极其重要的快速隔离功能,当故障交流电源窜入直流母线并构成回路后,故障交流电经高频变压器副边侧的整流电路和二二极管后变为直流电,而直流电无法通过高频变压器,所以负载端的故障对其他支路没有影响,故交流窜入直流故障可被限制在该支路,有效地避免了故障进一步扩大。

图 5 为双管正激 DC/DC 变换器的拓扑结构。其中, U_{in} 为输入电压; C_1 为储能电容; U_o 为输出电压; L, C_2 为 LC 滤波器的滤波电感与滤波电容; T 为高频隔离变压器; Q_1, Q_2 为 MOS 开关管; PWM_1, PWM_2 为控制两个开关管的驱动信号; D_1, D_2 为续流二极管; D_3, D_4 为整流二极管。

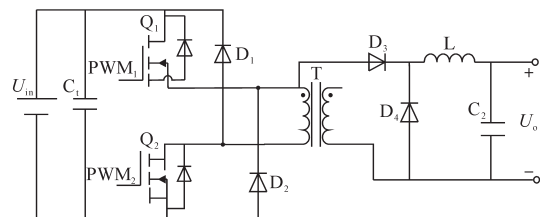


图5 双管正激 DC/DC 变换器的拓扑结构

Fig.5 Topology structure of two switches forward DC/DC converter

2.4.2 检测电路设计

新型主动式保护装置的检测电路原理图如

图6所示,直流220 V的电源为双管正激DC/DC变换器的输出电压,检测电路包含了两个电路:正极采样电路与负极采样电路,检测电路的功能为检测双管正激DC/DC变换器输出电压的正负母线上是否含有交流电,当有正极或者负极含有交流电时,则等效为交流电源直接与故障极相连接,并且将采集到的正负极交流电压信号传输给单片机电路,从而引导单片机控制电路对电压信号进行采样。

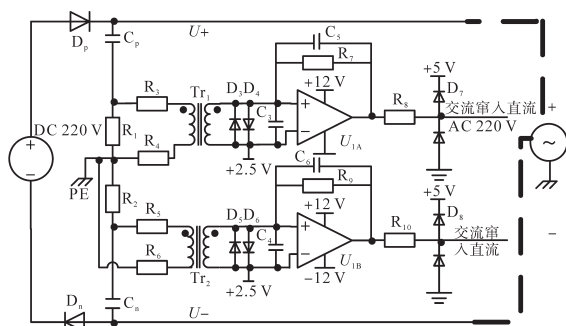


图6 检测电路原理图

Fig.6 Principle diagram of detection circuit

2.4.3 单片机控制电路设计

单片机控制电路原理图如图7所示,单片机控制电路中单片机的型号为DSPIC30F2023; U_i 为输入电压; U_o 为输出电压采样; I_o 为输出电流; Y 为晶振; C_a, C_b 为晶振电容; $R_1^*, R_2^*, R_3^*, R_4^*$ 为电压采样电阻; J_1 和 J_2 为温度采样端口; AN_3, AN_4 为正、负母线上窜入的交流电压的采样端口;单片机的PWM₁, PWM₂信号用来控制双管正激DC/DC变换器的两个MOS管,单片机的485A和485B端口即为RS-485通讯接口,单片机通过其SPI通讯接口与人机交互界面实现通讯。

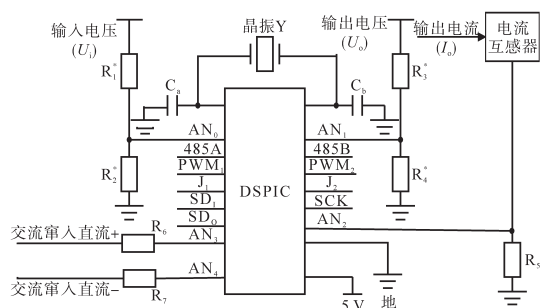


图7 单片机控制电路原理图

Fig.7 Principle diagram of single-chip microcomputer control circuit

2.5 站用直流电源系统的供电可靠性分析

由于本文提出的新型主动式保护装置串接在蓄电池与负载之间,实现了交流窜入直流故

障的主动隔离功能,但是接入了电力电子设备,增加了中间环节,如果主动式保护装置本身发生故障,会造成其输入端微型断路器动作,从而造成负荷停电。因此,文章第二个重点在于提高站用直流电源系统加入保护装置之后的供电可靠性,故提出了一种提高供电可靠性的新型拓扑结构,如图8所示。该方案优势在于提高了供电可靠性。

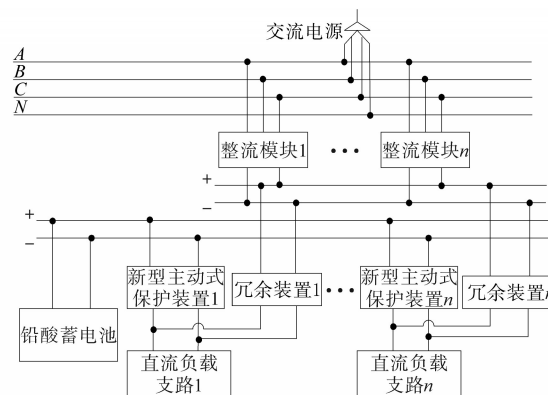


图8 提高站用直流电源系统供电可靠性的新型拓扑结构

Fig.8 Topology structure of DC power system of the station after improving reliability of power supply

为了防止保护装置的DC/DC变换器发生故障、导致该负载支路发生供电中断的情况,可在保护装置旁并联冗余装置,冗余装置为一个双管正激DC/DC变换器。当保护装置的DC/DC变换器发生故障时,可通过切换到冗余装置继续对负载传输供电,从而提高整个站用直流电源系统的供电可靠性,此外,为了进一步提高供电可靠性,冗余装置的供电由充电机提供。由图8可以看出,交流电源通过多个整流模块为各支路的冗余装置供电,可防止蓄电池发生故障时,导致负载支路停止供电的现象。同时,为了提高保护装置自身DC/DC变换器的安全性能,变换器内部所有器件按照二倍以上的安全参数来设计。

3 实验验证

为了验证提出的新型主动式保护装置在负载端支路发生交流窜入直流故障的情况下能有效地隔离故障支路、保证蓄电池支路母线电压不受影响,本文给出了相关实验验证。

首先分别给出正常情况下蓄电池侧正负母线的对地电压、负载端正极母线的对地电压以及负载端的输入电流,如图9所示,其中从下至上分别为通道1~通道4曲线(图10~图11相同)。通道

1为正常情况下负载端正极母线的对地电压,电压值为100 V左右;通道2为正常情况下负载端的输入电流,电流值为7.3 A左右;通道3为正常情况下蓄电池侧母线正极的对地电压,电压值为112 V;通道4为正常情况下蓄电池侧母线负极的对地电压,电压值为-120 V。

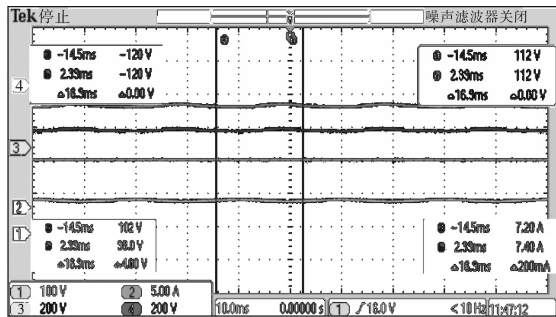


图9 正常情况下站用直流电源系统的电流电压参数

Fig.9 Parameters of current and voltage of DC power system of the station in normal situation

图10为负载端的母线负极发生交流窜入直流故障(故障1)时,蓄电池侧正负母线的对地电压(通道3和通道4)、负载端正极母线的对地电压(通道2)以及负载端的输入电流(通道1)的变化情况。由图10可知,在负载端负极母线发生交流窜入直流故障的情况下,蓄电池侧的正负母线对地电压不受故障影响,仍然分别为112 V与-120 V,与图9中正常情况下的对地电压一致,而负载端的母线正极受到故障影响,由于图9中100 V左右的直流电变为电压范围为[-95,545]的交流电,其峰值的和为450且远大于0,说明故障发生极不是该极,符合了2.3节的理论分析。另外,负载端的输入电流同样与正常情况下一致,说明蓄电池侧未受到故障的影响,维持了正常情况下的供电能力。

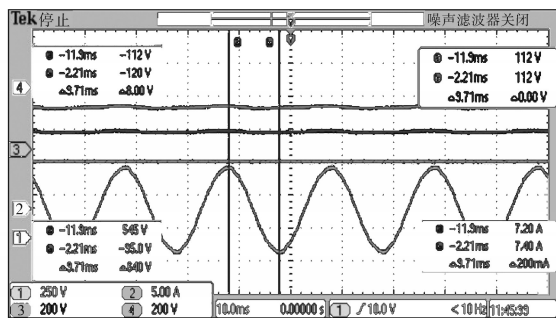


图10 故障1情况下站用直流电源系统的电流电压参数

Fig.10 Parameters of current and voltage of DC power system of the station in the fault situation 1

图11为负载端的母线正极发生交流窜入直流故障(故障2)时,蓄电池侧的正负母线对地电

压(通道3和通道4)、负载端正极母线的对地电压(通道2)以及负载端的输入电流(通道1)的变化情况。由图11看出当故障发生在负载端母线的正极时,蓄电池侧正负母线的对地电压仍然不受故障影响。由于负载端正极母线发生故障,其对地电压变为电压范围为[-325,335]的交流电,其峰值的和为10且接近于0,说明故障发生极为该极,验证了2.3节分析的正确性。负载端的输入电流仍然为7.3 A左右,与图9一致。

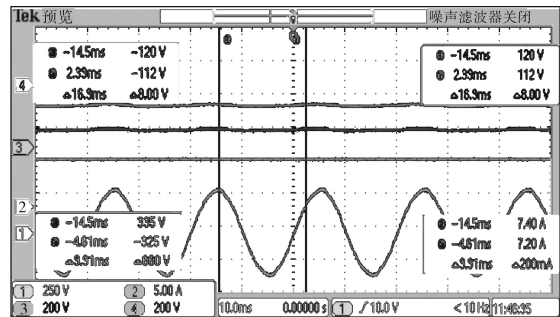


图11 故障2情况下站用直流电源系统的电流电压参数

Fig.11 Parameters of current and voltage of DC power system of the station in the fault situation 2

综合图9~图11实验结果可知,该故障不会影响蓄电池电源对负载支路提供的供电电流,有效地保护了蓄电池对所有支路的供电能力。

通过上述在故障情况下的实验验证,发现无论故障发生在负载端的母线正极还是母线负极,蓄电池侧的正负极母线电压始终不受影响,可以确定该新型主动式保护装置对故障支路具有主动隔离的功能,实现了该侧故障不会影响其他支路的稳定运行的功能,防止了故障的进一步扩大。同时单片机控制电路通过前文叙述的数据处理得出故障相关信息,并且发出报警信号,通过通讯设备对故障信息和报警信号进行上传,之后关闭DC/DC变换器的驱动信号,实现了对故障的主动隔离、主动检测、主动定位以及设备的保护,克服了现有技术对于交流窜入直流故障难以分辨和精确查找的缺点,有效地减少了故障解决的工程量,提高了故障的解决效率。

4 结论

本文针对当前的研究技术不能很好地解决交流窜入直流故障的问题,提出了一种基于电力电子设备的新型主动式保护装置,该保护装置能实现对故障的精确检测、主动隔离以及报警,同时还能保护故障支路的用电设备,从而大幅提高

了交流窜入直流故障的检测时效性,减少了检测工程的查找量,解决了现有技术中存在的工程量大、时效性差的问题,下一步将围绕减小新型主动式保护装置经济成本的问题进行相关研究,并将该保护装置拓展应用到站用直流电源系统中其他故障的解决方案上。

参考文献

- [1] 薛士敏,陈超超,金毅,等. 直流配电系统保护技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(19):3114-3122.
- [2] 宋强,赵彪,刘文华,等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(25):9-19.
- [3] 胡竟竟,徐习东,裘鹏,等. 直流配电系统保护技术研究综述[J]. 电网技术,2014,38(4):844-851.
- [4] 杨涛,黄晓明,李忠,等. 变电站新型直流系统及其控制保护策略[J]. 电气应用,2017(24):48-54.
- [5] 刘玉富. 交流窜入直流系统故障分析[J]. 电工技术,2016(11):71,77.
- [6] Ji Yuganh, Li Yitong, Shi Chuan. Aspect rating prediction based on heterogeneous network and topic model[J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(11):3201-3206.
- [7] 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.
- [8] 李应文,彭明智,张纯. 变电站直流电源系统直流环网与交流窜入的原因及危害[J]. 自动化与仪器仪表,2018(7):57-60.

- [9] 中国南方电网责任有限公司. Q/CSG1203003—2013. 变电站直流电源系统技术规范[S]. 广东:中国南方电网有限责任公司,2013.
- [10] 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.
- [11] 孙婉胜,张海梁. 基于单片机的交流窜入直流系统监测装置设计与实现[J]. 电工技术,2018(8):117-118.
- [12] 乔国栋. 直流系统主动式交流窜入保护装置的研究[J]. 电工技术,2018(13):74-75,77.
- [13] Chen W, Cui X. Foreword for the special section on AC and DC ultrahigh voltage technologies[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(3): 1-2.
- [14] Li X, Cui X, Lu T, et al. Comparison between the audible noises generated from single corona source under DC and AC corona discharge[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(3):23-30.
- [15] 徐玉凤,张焕清. 交流窜入直流电源故障分析与检测[J]. 供用电,2015(2):28-30.
- [16] 杨超余,陈达民,杨磊. 变电站交流窜入直流报警与录波的研究[J]. 电力科学与工程,2015,31(12):39-42.
- [17] 严海健,冯健棠,林康熙,等. 交直流窜电引起高压直流系统双极相继闭锁事件分析及防控[J]. 电工技术,2018(7):43-45,48.
- [18] 尉镔. 交流窜入直流系统故障的试验与研究[J]. 电力科学与工程,2013,29(3):29-32.

收稿日期:2020-04-27

修改稿日期:2020-06-09

(上接第28页)

参考文献

- [1] 刘海涛,熊雄,季宇,等. 直流配电系统不同运行模式下扁平化管理与协调控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(8):37-46.
- [2] 熊雄,季宇,李蕊,等. 直流配用电系统关键技术及应用示范综述[J]. 中国电机工程学报,2018,38(23):6802-6813.
- [3] Guo L, Feng Y B, Li X L, et al. Stability analysis of a DC microgrid with master-slave control structure[C]// Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014.
- [4] 陈小平. 级联直流分布式电源分析与设计[D]. 南京:南京航空航天大学,2007.
- [5] 任小永,阮新波. 适用于高压输入低压输出的两级式变换器[J]. 中国电机工程学报,2005,25(23):153-157.
- [6] Jung J H, Kim H S, Ryu M H, et al. Design methodology of bidirectional CLLC resonant converter for high-frequency isolation of DC distribution systems[J]. Power Electronics IEEE Transactions on, 2013, 28(4):1741-1755.

- [7] 殷起明,王志刚,周玲,等. 全桥 LLC 谐振变换器的轻载时域模型[J]. 电力电子技术,2019,53(12):4-8.
- [8] 吴涛,阮新波. 分布式供电系统中负载变换器的输入阻抗分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(12):20-25.
- [9] 吴涛,阮新波. 分布式供电系统中源变换器输出阻抗的研究[J]. 中国电机工程学报,2015,28(3):66-72.
- [10] Chang C H, Cheng H L, Chang E C, et al. Modeling and design of the LLC resonant converter used as a solar-array simulator[C]// Industrial Electronics & Applications, IEEE, 2012.
- [11] 梁昊,张军明. 一种简化的 LLC 谐振变换器小信号分析方法[J]. 电力电子技术,2011,45(10):71-72.
- [12] 胡广莉,王定中. LLC-型串并联谐振变换器小信号电路模型[J]. 华南师范大学学报(自然科学版),1995(4):17-24.
- [13] 张书槐,闫海云,王议锋,等. 光伏微电网中串联 DC-DC 变换系统稳定性研究[J]. 电气传动,2016,46(6):11-14.

收稿日期:2020-10-11

修改稿日期:2020-11-15