

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.04.005

## 适用于直流配电网母线保护的改进方法

曾先锋<sup>1</sup>, 王文龙<sup>1</sup>, 刘永生<sup>1</sup>, 陈进<sup>2</sup>, 高超<sup>1</sup>, 宋志伟<sup>1</sup>

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 国网鄂州供电公司, 湖北 鄂州 436000)

**摘要:**当直流系统的母线发生故障时,故障电流迅速上升,目前直流配电网母线保护基本引用了交流保护方案,动作时间较长,不利于直流故障的快速隔离。为保证经济性的同时,实现在直流配电系统母线故障时的可靠快速保护,首先对直流配电网母线故障特性进行分析,然后对直流配电网母线保护接线方案、保护算法、资源配置进行改进,提出了差流直接通过直流互感器采集、采用电流变化率算法、分级处理数据、使用不同形态出口继电器等方法。通过实时数字仿真仪进行仿真分析,验证了所提方法的有效性,该方法在兼顾经济性同时可以有效提高直流配电系统母线保护的可靠性和快速性。

**关键词:**直流配电网;母线保护;电流变化率;分级处理;快速保护

**中图分类号:**TM774

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2020)04-0028-06

### 0 引言

随着国内城市电力需求的增加,大规模分布式电源、储能设备、充电桩等直流电源或负荷占比日益提高<sup>[1-3]</sup>。传统的交流配电网因存在接入分布式电源或直流负荷效率低、成本高、供电半径小等问题,在新的配电网发展形势下面临越来越多的挑战<sup>[4-6]</sup>。与此同时,直流配电网因具备可控性好、可再生能源接入方便、传送功率大等优点,成为近年来学术界研究的热点<sup>[7]</sup>。

而直流配电网母线保护的方案较少,常见的方法是引用交流保护方案,但常规的交流保护动作时间一般在 20 ms 以上,切除故障时故障电流一般也已达到稳定值。文献[8]提出直流配电系统与交流系统有很大不同,故障有其自身的特点;文献[9]指出直流系统发生接地或极间短路故障时,故障电流迅速上升,可以在很短的时间内给系统设备造成严重损害;文献[10]建议直流保护能在微秒级检测故障,并快速实现故障定位和隔离;文献[11]提出直流故障在故障刚发生未到稳态时应切断,常规的交流方案不能满足直流的快速保护要求。另外,直流故障电流上升迅速,因此要求各互感器响应时间极快并且测量范围很广,多互感器的配置一方面增加了运维成本,另一方面还存在各互感器响应时间和动态范围不一致而可能引起的保护误动或拒动风险<sup>[12]</sup>。

文中结合直流配电网母线故障特点,首先分析了直流配电网母线故障特性,然后对直流配电网母

线保护接线方案、保护算法、资源配置进行了改进,实现在直流配电系统中母线故障刚发生时的快速定位和隔离。由于不需采集直流母线上每条线路的电流,减少了配置上的成本,在提高经济性的同时,进一步提高了直流配电系统母线保护的整体可靠性和快速性。

### 1 直流配电网母线故障特性分析

直流配电母线的故障特性和换流器的原理息息相关。目前国内直流配网工程较少,其中较典型的换流器为电压源换流器(voltage source converter, VSC)<sup>[13-14]</sup>。

直流配电系统故障主要有极间短路、直流侧对地短路等,其中以极间短路最为严重。与交流系统相比,直流配电网母线或线路发生故障时,故障电流上升更为迅速。且直流配电网中电力电子器件较多,不像传统交流配电网具备大量的惯性环节<sup>[15]</sup>。在发生短路故障尤其是极间短路时,直流侧的滤波电容会对故障点快速放电。由于直流电容直接并联在 VSC 直流侧,因此电容放电和故障电流的快速上升无法受 VSC 自身的控制,故障电流的上升速度会比传统交流配电网快一个甚至多个数量级。在发生较严重的直流故障时,VSC 为避免本体损坏,会在几毫秒内自动闭锁和锁定绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT),同时交流电源会通过 IGBT 反并联的续流二极管向故障点不停地注入整流电流,导致故障电流难以自行衰灭<sup>[16]</sup>。

与交流电流不同,直流电流没有自然过零点。在发生短路故障时,VSC 的过电流耐受能力一般为

收稿日期:2020-02-13;修回日期:2020-03-27

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904700)

标称值的 2 倍左右,且承受时间很短。一旦超过 VSC 自身承受能力,换流阀将自动闭锁,因此要求直流保护装置能快速检测到故障,并配合直流断路器在极短的时间内切除故障<sup>[17]</sup>。但由于没有过零点,直流系统的灭弧比交流系统灭弧更为困难,灭弧时间更长,这不仅是对直流断路器的考验,也是对直流保护装置可靠性和快速性的极大挑战<sup>[18]</sup>。

以直流母线保护为例,常规保护装置采集母线电压和各条线路电流,主保护采用母差保护,动作时间一般大于 10 ms。由于直流故障电流迅速上升,在发生极间故障瞬间故障电流上升 2 000 A/ms 以上,直流故障希望在故障刚发生未到稳态时即切断,因此常规的交流保护方案直接应用于直流的快速保护还有待改进。

## 2 直流配电网母线保护接线改进方案

配电保护装置通过处理器完成保护运算等功能,常见的交流保护装置中断间隔时间为 833  $\mu$ s,对于直流母线保护装置,近 1 ms 时间显然太长<sup>[19]</sup>。在不改变硬件成本的基础上,可从以下方面改进直流配电网母线保护接线。

霍尔电流传感器响应速度快,测量精度高<sup>[20]</sup>,因此可在低压直流母线附近安装一个霍尔直流电流互感器 1。进线正向穿过互感器 1,出线反向穿过互感器 1,互感器 1 输出信号接入保护装置,保护装置测量得到差流,该信号供母线保护装置作主保护用,如图 1 所示。

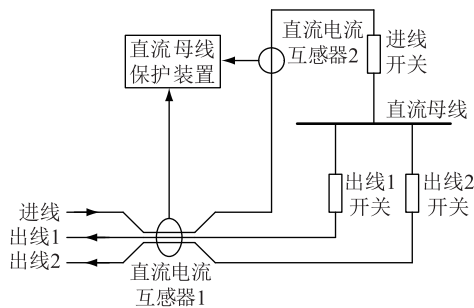


图 1 母线和进/出线及直流互感器和开关接线

Fig.1 Diagram of bus, inlet/outlet, DC transformers and switches

正常运行或发生区外故障时,流入和流出直流母线的电流理论上相同,此时差流基本为 0。当直流母线发生区内故障时,流入和流出直流母线的电流将会有显著差异,此时会存在较大差流。由于直流母线发生故障时电流上升迅速,为了保证母线保护装置能快速检测到故障电流并跳开开关,直流电流互感器 1 采用闭环霍尔大电流互感器。为减少不平衡电流或多线路并联可能存在的磁场畸变影响,

多条线路从互感器的线孔中穿过时,线缆中间可填充绝缘环氧板等固定支撑材料,在穿过互感器前后保持一小截和互感器平面垂直,从而减少不平衡电流的影响<sup>[21]</sup>。

在直流母线进线的直流开关侧安装常规直流电流互感器 2,互感器 2 输出信号接入保护装置,保护装置测量得到进线电流,该信号供母线保护装置作后备保护用。

该接线设计方案具有以下优点:(1) 不用每条线路的电流都接入保护装置,减少了接入装置的模拟量,同等硬件条件下减少了装置数据处理时间,以便装置有更多时间来进行可靠性校验;(2) 配置采集差流的霍尔大电流互感器因尺寸性能等要求目前基本是定制产品,成本相对较高,但与此同时不用每条出线配置电流互感器,整体上成本变化不大。另外一组互感器直采差流不需保护装置采集每条线路电流然后合成计算,减少了数据处理数量,有利于保护装置的资源提升,以便实现更高采样速度,从而进一步提高装置可靠性和快速性;(3) 由于直流故障时故障电流速度上升极快,若采用多个电流互感器,不同电流互感器将会存在数据同步问题,仅采用直流互感器 1 则可避免数据同步难题。

## 3 直流配电网母线保护算法改进

常规的母线保护装置主要有母线差动保护、过流保护等保护功能,由于直流系统不像交流系统具有大量的惯性环节,故障电流上升速度更快,如果依然使用常规的保护算法,当电流(或差流)达到门槛值时,直流故障电流已经接近故障电流稳定值了,不利于保护装置的快速动作<sup>[22]</sup>。在换流阀不闭锁的情况下,故障时电流和电流变化率随时间变化曲线如图 2 所示。

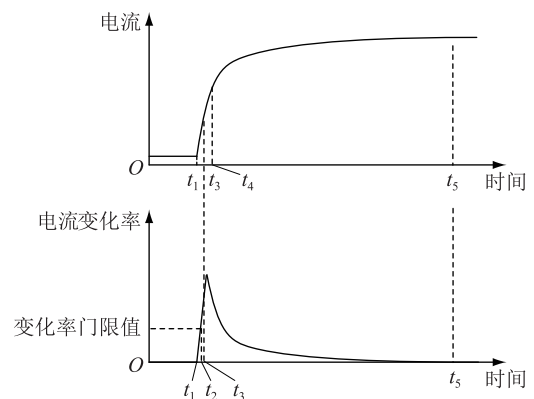


图 2 故障时电流和电流变化率随时间变化曲线

Fig.2 Diagram of the change of current and current with time in case of failure

图2中 $t_1$ 为故障发生时刻; $t_2$ 为电流变化率大于主保护或后备保护的变化率启动门限值时刻; $t_3$ 为电流大于主保护或后备保护的过电流门限值1时刻; $t_4$ 为电流大于主保护或后备保护的过电流门限值2时刻; $t_5$ 为换流阀未闭锁情况下故障未切除时电流达到稳态时刻。

由于电流变化率可以提前预知电流变化情况,如果采用电流的变化率作为判断条件,则可在故障刚发生时将故障判断出来,主保护在 $t_3$ 时即可动作。为达到这一目的,直流配电网母线保护装置算法作如下改进:直流母线保护装置的主保护和后备保护设置变化率启动门限值、过电流门限值1、过电流门限值2。主保护和后备保护动作逻辑如图3所示。

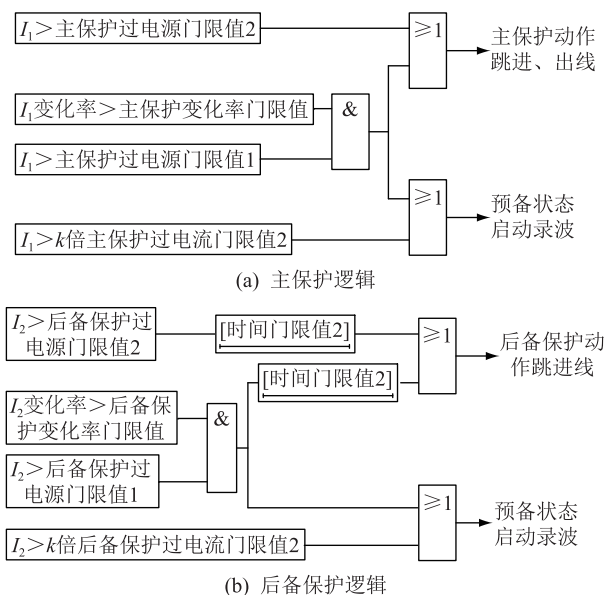


图3 主保护和后备保护逻辑示意

Fig.3 Logic diagrams of main protection and backup protection

图3中 $I_1$ 为直流互感器1输出电流, $I_2$ 为直流互感器2输出电流。主保护满足以下任意一条时动作:(1)检测到 $I_1$ 电流变化率大于主保护电流变化率启动门限值后,进入预备状态,检测到电流值大于主保护过电流门限值1后,主保护动作;(2)检测到 $I_1$ 电流值大于 $k$ ( $k$ 为常数,取值范围0.8~1.0)倍的主保护过电流门限值1后,进入预备状态,检测到 $I_1$ 电流值大于主保护过电流门限值2后,主保护动作,跳进、出线开关。

后备保护比主保护多了2个动作时限门值的设置,以便与主保护起动级差配合。如图3所示,后备保护满足下面任意一条时保护动作:(1)检测到 $I_2$ 电流变化率大于后备保护电流变化率启动门限值后,进入预备状态,检测到电流值大于后备保护过电流门限值2后,经时间门限值1后备保护动作;

(2)检测到 $I_2$ 电流值大于 $k$ 倍的后备保护过电流门限值2后,进入预备状态,检测到 $I_2$ 电流值大于过电流门限值2后,经时间门限值2后备保护动作,跳进进线开关。

目前低压直流配网在直流线路发生较严重的短路故障时,受限于VSC承受能力、现有断路器动作时间较长等因素,发生故障时往往换流阀会先闭锁,在换流阀闭锁后再隔离故障,但闭锁后故障电流很快消失,对常规纯过流判据的直流保护挑战性较大。而该改进算法主要采用电流变化率提前预判电流变化,结合电流(或差流)门限值,在故障刚发生时就进入动作前的准备工作,同时采用主后备保护和多个动作条件,使用或逻辑,避免某一保护失灵而无法快速切除故障,进一步提高保护可靠性。

#### 4 保护装置资源优化

配电保护装置一般包含采集模块、数据处理模块、人机输入模块、显示模块、输出模块<sup>[23]</sup>。为减少运算处理和资源消耗,直流母线保护装置可分多级中断进行数据处理,其中保护采样中断时间典型值可取0.01 ms或0.02 ms,主保护和后备保护的处理计算均在优先级最高的保护采样中断内完成,保证能快速可靠地处理数据。对于液晶和显示等人机界面对实时性要求相对较弱的数据处理,在优先级较低一些的中断中处理,处理时间可取10 ms,20 ms等值。图4为直流母线保护装置各模块配合示意,图中数据处理模块设置了2个中断时间,一个中断时间为0.02 ms,用于主保护和后备保护所需的数据以及保护逻辑等处理,另一个中断时间为20 ms,用于显示等人机界面处理。

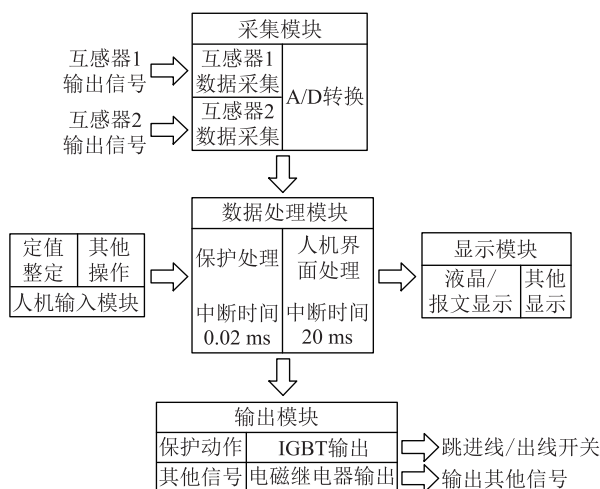


图4 直流母线保护装置各模块配合示意

Fig.4 matching diagram of DC bus protection module

常规的交流保护出口继电器一般采用电磁继

电器,出口动作时间往往需要 5~8 ms,对于需要快速出口的直流保护装置,继电器的动作时间过长,不利于故障的快速切除。为了在发生故障时直流母线保护装置和直流断路器能快速断开开关,保护装置的出口继电器应使用固态继电器,比如较成熟的 IGBT 继电器,动作时间小于 1 ms。

由于中低压直流配电网在今后应用的广泛性和对成本的敏感性,直流母线保护装置的跳进、出线开关的继电器采用 IGBT 继电器,非跳闸出口的继电器如告警、闭锁等信号出口采用常规电磁继电器。

该优化可对装置资源进行合理划分,分级处理不同重要等级数据,保证重要数据处理的快速性和可靠性。对于不同出口要求,采用不同形态的出口继电器,保证快速性的同时,兼顾经济性,以便在配网工程实际应用中推广。

## 5 仿真分析

通过实时数字仿真仪(real time digital simulator, RTDS)搭建仿真模型,模型母线电压 750 V,直流电容使用 RTDS 提供的默认值 10 560  $\mu\text{F}$ ,负载使用 500 kW 的电阻负荷,分别模拟直流母线故障和出线故障。

图 5 为直流母线发生故障时电压电流波形变化图,在故障发生 2 ms 后,进线电流从 667 A 上升到 5 323 A,差流从 0 上升到 5 029 A,在故障发生 9 ms 后电流接近稳态值,进线电流上升到 7 991 A,差流上升到 7 770 A,母线电压 427 V。

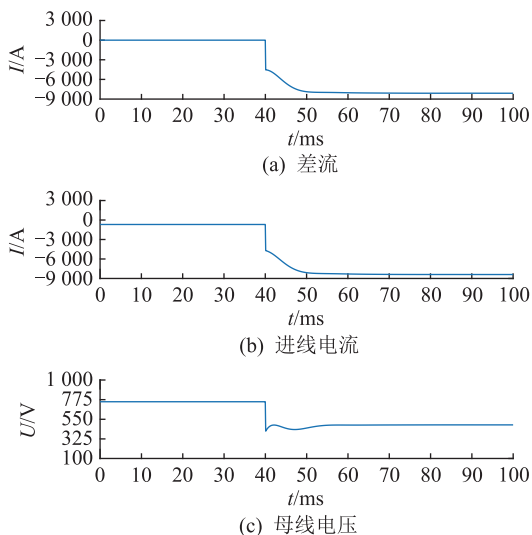


图 5 直流母线故障电压电流波形

Fig.5 Voltage and current waveforms during DC bus faults

图 6 为出线发生故障时的电压电流波形,在故

障发生 2 ms 后,进线电流从 667 A 上升到 3 107 A,在故障发生 9 ms 后电流基本处于稳态值,进线电流上升到 3 987 A,母线电压 598 V,差流在故障期间基本为 0。

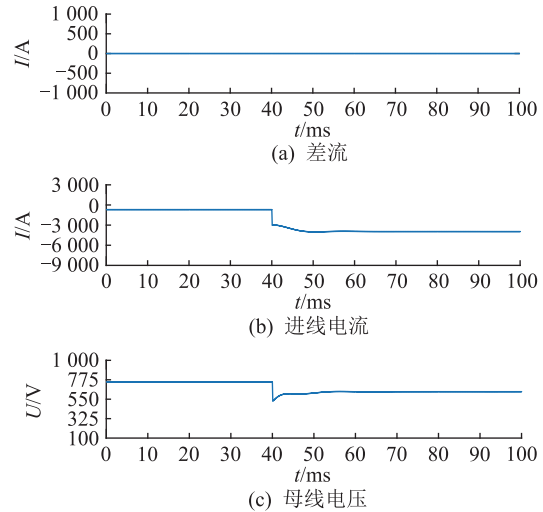


图 6 直流线路故障电压电流波形

Fig.6 Voltage and current waveforms during DC line faults

从仿真波形上看,母线故障时前 2 ms 差流变化率约为 2 500 A/ms,进线电流变化率约为 2 300 A/ms;出线故障时差流变化率基本为 0,进线电流变化率约为 1 200 A/ms。

为实现毫秒内动作,各电流变化率和电流及相应的时间参数配合很关键。若装置一个中断时间为 0.02 ms,则母线故障时差流每中断上升约 50 A。当检测到电流变化率达到启动阈值时,使用变化率可提前进入动作预备状态,当故障电流上升到电流阈值时即可立即动作。假定电流阈值为 200 A,从故障发生到动作一共 5 个中断左右,可以实现微秒级的整定和判定。

## 6 结论

文中以兼顾经济性的同时提高直流配电网母线保护可靠性和快速性为目标,对直流配电网母线故障特性、接线方案、保护算法、资源配置进行了研究,结合仿真算例,得出以下结论或建议:

(1) 直流配电系统与交流系统有很大不同,当直流系统尤其是母线发生短路故障时,故障电流迅速上升,常规的交流保护方案不宜直接应用于直流的快速保护。

(2) 差流通过直流互感器采集,不仅减少了接入装置的模拟量,而且不用装置自身合成计算差流,大大减少数据处理时间。使用一个互感器采集差流也避免了多电流互感器采集电流的数据同步

问题,可提高整体可靠性。

(3) 采用电流变化率方法可提前预判电流变化,结合电流门限值,多个判据可避免某一保护失灵,进一步提高保护的可靠性。

(4) 对装置资源进行合理划分,分级处理不同重要等级的数据,可保证重要数据处理的快速性;对于不同出口采用不同形态的出口继电器,可在保证快速性的同时兼顾经济效益。

参考文献:

[1] 张永超,韦钢,周健,等. 含电动汽车充电站的直流配电网规划研究[J]. 电测与仪表,2018,55(3):41-47.  
ZHANG Yongchao, WEI Gang, ZHOU Jian, et al. Planning of DC distribution network containing electric vehicle charging and discharging station[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(3):41-47.

[2] 闫湖,黄碧斌,洪博文. 区块链:适应未来市场化交易的分布式电源交易架构重构[J]. 电力信息与通信技术,2018,16(10):8-12.  
YAN Hu, HUANG Bibin, HONG Bowen. Block chain: reconfiguration of distributed energy trading architecture for the future market[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2018, 16(10):8-12.

[3] 徐珂,聂萌,王洋,等. OpenDSS 在分布式光伏接入配电网仿真分析中的应用[J]. 电力信息与通信技术,2018,16(11):88-92.  
XU Ke, NIE Meng, WANG Yang, et al. Application of OpenDSS in simulation and analysis of distributed photovoltaic connected to distribution network[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2018, 16(11):88-92.

[4] 吴盛军,王益鑫,李强,等. 低压直流供电技术研究综述[J]. 电力工程技术,2018(4):1-8.  
WU Shengjun, WANG Yixin, LI Qiang, et al. Review of low voltage DC power supply technology[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018(4):1-8.

[5] 王林富,邱方驰,张斌,等. 基于分布式电源的配电网多目标优化策略研究[J]. 智慧电力,2019,47(1):47-53,65.  
WANG Linfu, QIU Fangchi, ZHANG Bin, et al. Research on multi-objective optimal strategy for distribution network based on distributed generation[J]. Smart Power, 2019, 47(1):47-53,65.

[6] 郑能,胡瑞馨,丁晓群,等. 考虑多种类型的分布式电源和网络重构的配电网无功优化[J]. 智慧电力,2019,47(3):90-96.  
ZHENG Neng, HU Ruixin, DING Xiaoqun, et al. Reactive power optimization of distribution network considering multiple types of distributed generations and network reconfiguration[J]. Smart Power, 2019, 47(3):90-96.

[7] 王丹,毛承雄,陆继明,等. 直流配电系统技术分析与设计构想[J]. 电力系统自动化,2013,37(8):82-88.  
WANG Dan, MAO Chengxiong, LU Jiming, et al. Technical analysis and design concept of DC distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8):82-88.

ation of Electric Power Systems, 2013, 37(8):82-88.

[8] 张宸宇,邓凯,史明明,等. 基于小波变换的直流主动配电网电压波动源辨识[J]. 电力工程技术,2017,36(4):21-24.  
ZHANG Chenyu, DENG Kai, SHI Mingming, et al. Identification of voltage pollution source based on wavelet transform in DC active distributed network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4):21-24.

[9] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 99(1):133-148.

[10] 温家良,葛俊,潘艳,等. 直流电网用电力电子器件发展与展望[J]. 电网技术,2016,40(3):663-669.  
WEN Jialiang, GE Jun, PAN Yan, et al. Development and expectation of power electronic devices for DC grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(3):663-669.

[11] 陈堃,胡伟,肖繁,等. 高压直流输电系统典型闭锁事件分析[J]. 湖北电力,2017,41(11):24-27.  
CHEN Kun, HU Wei, XIAO Fan, et al. Analysis of one typical blocking fault in HVDC transmission system[J]. Hubei Electric Power, 2017, 41(11):24-27.

[12] 陈庭程,程浩忠,何明,等. 城市中压配电网接线模式研究[J]. 电网技术,2000,24(9):35-38.  
CHEN Tingji, CHENG Haozhong, HE Ming, et al. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Power System Technology, 2000, 24(9):35-38.

[13] 曾嘉思,徐习东,赵宇明. 交直流配电网可靠性对比[J]. 电网技术,2014,38(9):2582-2589.  
ZENG Jiasi, XU Xidong, ZHAO Yuming. Reliability comparison of AC and DC distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(9):2582-2589.

[14] 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.  
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25):9-19.

[15] 江道灼,郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化,2012,36(8):98-104.  
JIANG Daozhuo, ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8):98-104.

[16] 孙国萌,齐琛,韩蓓,等. 交直流混合配电网规划运行关键技术研究[J]. 供用电,2016,33(8):7-17  
SUN Guomeng, QI Chen, HAN Bei, et al. Research of key technology of AC/DC hybrid distribution network planning and operation[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(8):7-17.

[17] 戴志辉,葛红波,严思齐,等. 柔性直流配电网故障分析[J]. 电工技术学报,2018,33(8):1863-1874.  
DAI Zhihui, GE Hongbo, YAN Siqi, et al. Fault analysis of flexible DC distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8):1863-1874.

[18] 刘树,赵宇明,陈莉,等. 柔性直流配电网控制保护系统设计

- 计与策略研究[J]. 供用电, 2018(1):21-27.  
LIU Shu, ZHAO Yuming, CHEN Li, et al. Research on control and protection strategy and design scheme of VSC-DC distribution network control and protection system[J]. Distribution & Utilization, 2018(1):21-27.
- [19] 王伟. 基于 VSC-MTDC 技术的交直流配电网稳态仿真研究[D]. 北京:华北电力大学, 2015.  
WANG Wei. Steady simulation research on the AC-DC power distribution network based on VSC-MTDC technology [D]. Beijing:North China Electric Power University, 2015.
- [20] 张正纲. 直流大电流测量技术研究[D]. 北京:华北电力大学, 2014.  
ZHANG Zhenggang. The Research of DC-current measurement technology[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2014.
- [21] 李玲龙. 霍尔直流大电流传感器设计与研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2017.  
LI Linglong. Study and design of large DC current sensor based on hall effect[D]. Wuhan:Huazhong University of Science & Technology, 2017.
- [22] 吉兴全, 孙灏, 陈尔奎, 等. 基于电流差动的直流配电网保护方案[J]. 电测与仪表, 2018, 55(5):51-56.  
JI Xingquan, SUN Hao, CHEN Erkui, et al. Protection scheme of DC distribution network based on differential current[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(5):51-56.
- [23] 毕天姝, 李猛, 贾科, 等. 直流配电网保护技术评述[J]. 南方电网技术, 2016, 10(3):53-57.  
BI Tianshu, LI Meng, JIA Ke, et al. Review of DC distribution network protection technology[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(3):53-57.

作者简介:



曾先锋

曾先锋(1987),男,硕士,工程师,从事配电网继电保护和应用分析相关工作(E-mail: zengxf@nrec.com);

王文龙(1973),男,硕士,研究员级高级工程师,从事直流配电网继电保护和应用分析相关工作;

刘永生(1986),男,硕士,工程师,从事电力系统继电保护相关工作。

## Improved method for busbar protection in DC distribution network

ZENG Xianfeng<sup>1</sup>, WANG Wenlong<sup>1</sup>, LIU Yongsheng<sup>1</sup>, CHEN Jin<sup>2</sup>, GAO Chao<sup>1</sup>, SONG Zhiwei<sup>1</sup>

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 2. State Grid Erzhou Power Supply Company, Erzhou 436000, China)

**Abstract:** When a bus short circuit fault occurs in DC system, the fault current will rise rapidly. At present, the bus protection of the DC distribution network basically refers to the AC protection scheme, and the operation time is long, which is not conducive to the rapid isolation of the DC fault. In order to achieve reliable and fast protection of bus faults in DC distribution systems while ensuring economy, firstly the fault characteristics of the bus distribution of the DC distribution network are analyzed, and then the bus protection wiring scheme, protection algorithm and resource allocation of the DC distribution network are studied. Methods or recommendations for differential currents are directly collected by DC transformers, using current rate-of-change algorithms, hierarchically processing data, different exit relays and so on, which the effectiveness is verified by the real time digital simulator(RTDS). The proposed method can effectively improve the reliability and rapidity of bus protection of DC power distribution system as well as balancing economics.

**Keywords:** DC distribution network; busbar protection; current rate; hierarchical processing; high-speed protection

(编辑 方晶)