

DOI: 10.7667/PSPC151252

# 电压源换流器接地方式对直流配电系统的影响

鲁国正, 高亮, 梁智敏

(上海电力学院电气工程学院, 上海 200090)

**摘要:** 针对低压直流(Low Voltage Direct Current, LVDC)配电系统分析比较了电压源换流器不同接地方式的优缺点。分别在换流器电容中点直接接地和高阻接地方式下, 对换流器交流出口处不对称故障特性和直流线路单极接地故障特性进行了分析, 并建立LVDC电磁暂态模型进行了仿真研究。对比系统不同工况下的暂态性能可知, 电压源换流器电容中点高阻接地方式优于直接接地方式。高阻接地的方式对限制故障电流更为有利, 同时也有利于直流配电系统故障消除后的快速恢复, 这为未来直流配电系统保护方案的配置奠定了基础。

**关键词:** 电压源换流器; 直流配电系统; 故障特征; 接地方式; 换流器交流出口; 直流母线; 零序通路

## Influence of voltage source converter grounding mode on DC distribution system

LU Guozheng, GAO Liang, LIANG Zhimin

(College of Electric Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** For the low voltage direct current (LVDC) distribution system, the advantages and disadvantages of the different grounding modes of the voltage source converter are analyzed and compared. In the converter capacitor directly grounding and high resistance grounding mode, the converter AC outlet of asymmetric fault characteristics and DC line pole grounding fault characteristics are analyzed, and the LVDC electromagnetic transient model is established and studied by simulation. Comparison of the system transient performance under different operating conditions shows that voltage source converter capacitor high resistance grounding mode is better than the direct grounding way. High resistance grounding to limit fault current is more favorable, and it is also beneficial to the rapid recovery after the DC power distribution system is eliminated, which lays the foundation for the protection scheme of DC power distribution system in the future.

This work is supported by Shanghai Engineering Research Center of Green Energy Grid Connected Technology (No. 13DZ2251900).

**Key words:** voltage source converter; DC distribution system; fault characteristics; grounding; converter AC outlet; DC bus; zero-sequence path

## 0 引言

现有的交流配电网将面临一些问题和挑战, 如城市用户随着产业结构的调整和转型, 对电能质量的要求不断提高, 以及电压波动、电压闪变、频率波动、谐波污染等电能质量问题。随着直流输电技术以及电力电子技术的快速发展, 之前被交流取代的低压直流 (Low Voltage Direct Current, LVDC) 配电技术再次被提上日程。

直流配电系统是包括中压配电网和用户侧配电网的公共配电网[1]。与交流配电网相比, 直流配电有其明显的优势[2-4]: ①线路成本低, 当交直流电有效值相同时, 交流电压的峰值比直流电压峰值大, 因此对电缆的绝缘强度要求也更严格, 所以直流电缆的成本也要低; ②供电可靠性高, 不存在频率稳定和无功功率等问题; ③节能减排, 直流配电网给直流设备供电时, 减少了交流到直流的转换次数, 减少电能的传输与分配; ④更方便各种分布式电源和电动汽车充电站的接入。

实际上, 直流供电方式早在列车牵引系统、通信系统、船舶用电以及直流输电中得到广泛的应用[5],

**基金项目:** 上海绿色能源并网工程技术研究中心 (13DZ2251900)

这些特殊领域的配电技术为直流配电的更进一步研究提供了基础。文献中 Nuutinen 等人开发了直流配电系统实验室平台，用于故障检测和保护研究<sup>[6]</sup>，国内也在研究可适用于直流配电系统的智能功率变换技术，直流配电系统有望更早地实现。

目前国内外对直流配电网的研究尚处于探索阶段，主要集中在直流配电系统的拓扑结构、交直流配网的优缺点比较、经济性比较、控制策略等方面。对于直流配电系统保护技术的研究还远远不够，相比交流系统，直流配电网的系统架构、运行模式、故障类型均有不同。直流配电系统的保护技术涉及方向主要包括直流配电网的接地方式、直流配电网的故障判断与定位、关键设备的研制。文献[7]主要分析了低压直流配电系统的故障类型、保护原则等问题，其中接地方式的确立对保护有重大影响，直接关系到接地故障时故障电流的大小以及系统恢复平衡的时间，从而影响配电保护的方案配置。

本文将针对双极运行方式下，电压源换流器 (Voltage Source Converter, VSC) 电容中点接地方式对直流配电系统的影响进行详细的分析，分析中所采用的电压源型换流器均为三相两电平拓扑结构<sup>[8]</sup>，直流线路电缆采用  $\pi$  型等值模型。内容主要包括不同接地方式对系统几种主要故障下暂态特性以及故障消除后电压恢复时间的影响。如无特别说明，本文所提及的直流接地以及高阻接地均指换流器电容中点接地方式。

### 1 直流配电系统接地方式

LVDC 系统的运行方式可以分为单极大地回线运行方式和双极运行方式<sup>[9]</sup>。单极大地回线运行方式只有一根极导线，利用大地或海水作为返回线。双极运行方式采用两根导线传输，一正一负，换流器分裂电容通过接地系统可靠接地。直流配电系统不管采用哪种运行方式，都涉及到 VSC 直流侧接地方式的问题。

下面主要介绍直流系统中两种比较常见的接地方式，如图 1 所示<sup>[10-12]</sup>。其中图 1(a)是 TN-S 方式，即换流器电容中点连接到大地，并通过一条单独线路将大地(T)、中性点(N)和保护线(PE)连接；图 1(b)是 IT 方式，即换流器电容中点不接地或经高阻抗接地，设备的外露可导电部分均经接地装置接地。

其中，当系统发生小电阻接地故障时，TN-S 接地方式中漏电流和电压瞬变较大，但在直流配电系统中，由于大量电力电子器件尤其是电压源换流器，对过电流极其敏感，很容易对换流器造成危害，

因此这种接地方式优势并不明显。而系统采用 IT 接地方式时，发生接地故障时产生的漏电流和电压瞬变较小，可以确保系统的稳定运行<sup>[13]</sup>。

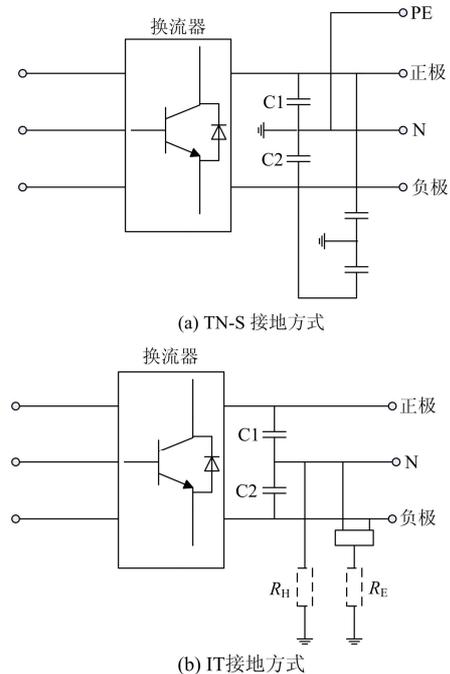


图 1 直流系统接地方式

Fig. 1 DC system grounding mode

### 2 换流器交流出口处故障分析

交流电网是直流配电系统的主要电源，通过 AC/DC 换流器将交流电转换为直流电供给直流配电系统。为增加电压和功率的控制性能，本研究中换流器采用定直流电压控制，具有双闭环控制结构。换流器交流出口处故障主要指联结变压器二次侧与换流器之间的连接母线故障<sup>[14]</sup>，此处主要针对联结变压器换流器侧即换流器交流出口侧进行分析，具体故障包括换流器交流端口单相短路、两相短路及其他不正常运行方式，如图 2 所示。

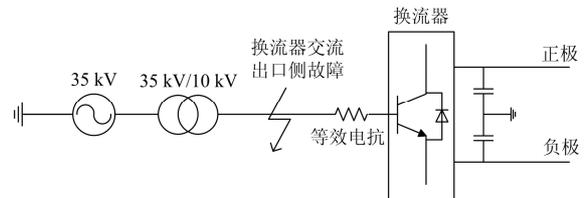


图 2 换流器交流出口侧故障类型

Fig. 2 Converter AC outlet side fault type

当换流器交流出口处发生不对称接地故障时，其不对称接地故障的基频分量能够分解成正序分量、负序分量及零序分量，对于 LVDC 系统同样如

此, 可以认为故障点加入了基频正序、负序、零序电源<sup>[15-16]</sup>。故障电压和电流中的零序分量会通过 VSC 电容接地支路形成通路。本节主要讨论换流器交流出口处发生单相接地故障, 此时系统等效电路如图 3, 虚线接线为短路电流通路。

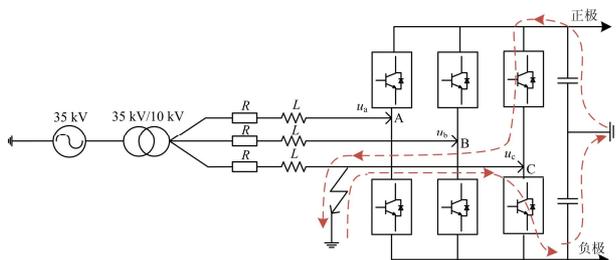


图 3 换流器交流出口处单相接地故障等效电路

Fig. 3 Converter AC outlet grounding fault at single-phase equivalent circuit

当直流电容中点采用直接接地方式时, 会造成很大的故障电流, 绝缘栅双极晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)需要承受很高的电流, IGBT 的过流倍数仅为额定电流的 2 倍左右, 这对 IGBT 危害很大。换流器交流出口处单向接地故障中的零序分量将直接作用于两条直流端口, 并在直流侧形成共模基频分量, 使正负极电容电压不平衡。

本文使用 PSCAD 软件进行仿真, 仿真模型如图 4 所示。模型中使用交流 35 kV 为 LVDC 供电。联结变压器变比 35 kV/10 kV, 正序漏抗 0.1 p.u.。等效相电抗为  $R=0.5 \Omega$ ,  $L=0.0048 \text{ H}$ 。换流器直流电容  $C_1=C_2=20000 \mu\text{F}$ 。直流电压为  $\pm 5 \text{ kV}$ 。此处设置交流电源出口处单相接地故障, 故障接地电阻设置为  $0.01 \Omega$ 。故障开始时间为 1 s, 故障持续时间为 0.1 s。本文仿真中所有故障均按永久性故障处理。仿真结果如图 5 所示。

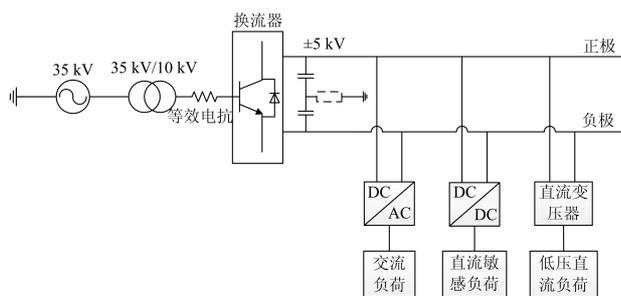
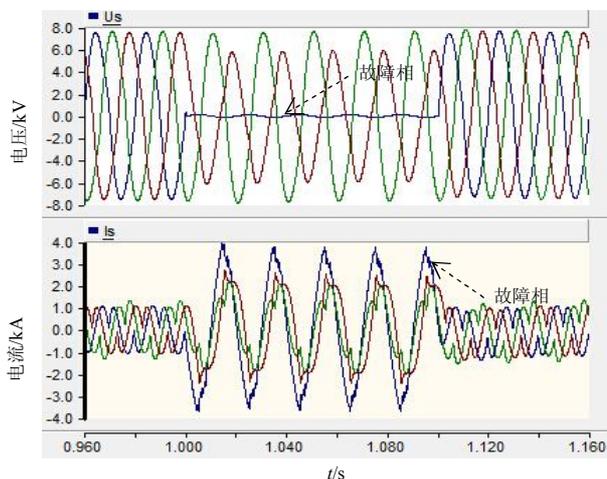


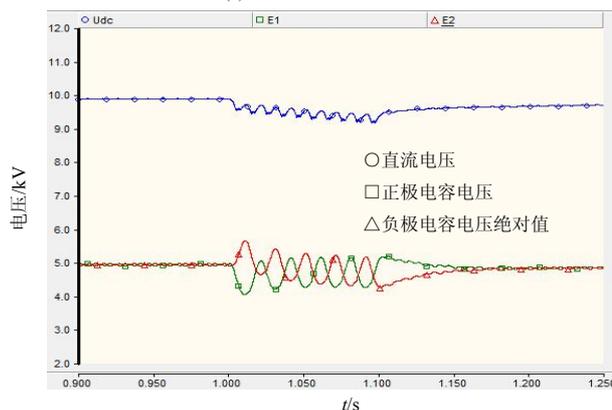
图 4 LVDC 系统仿真结构

Fig. 4 LVDC system simulation structure

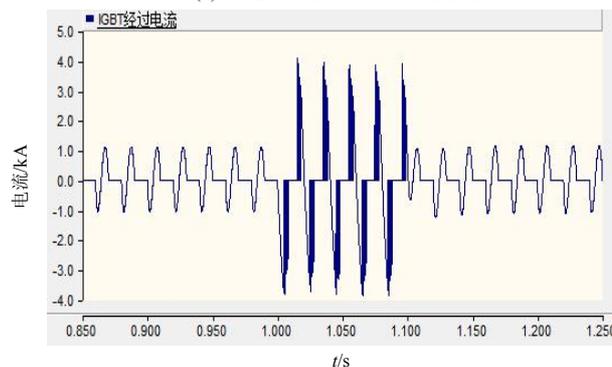
由仿真结果可以看出, 交流电源侧单相接地故障时, 直流电容在接地故障下通过 IGBT 直接对地放电, 换流器电容电压  $E_1$ 、 $E_2$  出现明显的共模振动, 故障电流流经的 IGBT 电流激增至 4 倍左右。故障



(a) VSC 交流端口电压、电流



(b) 直流通路电压及正负极电容电压



(c) 短路电流通路流经 IGBT 电流

图 5 直接接地方式下 VSC 交流出口处单相接地故障波形

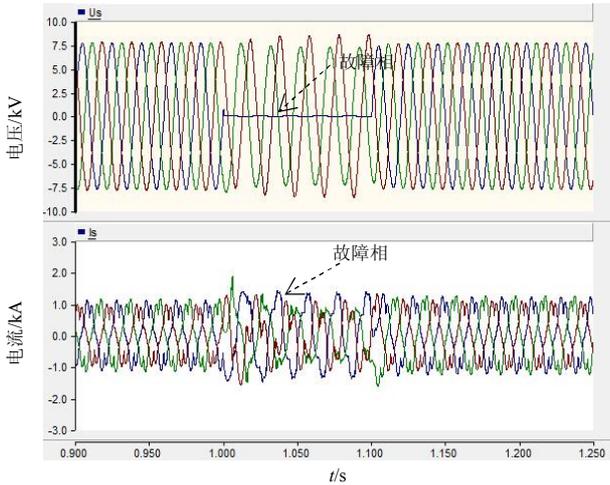
Fig. 5 Single phase to ground fault waveforms of VSC AC outlet under direct grounding mode

在 1.1 s 消除后, 正负极电容电压仍有不平衡现象存在, 导致直流电压无法快速恢复稳定。

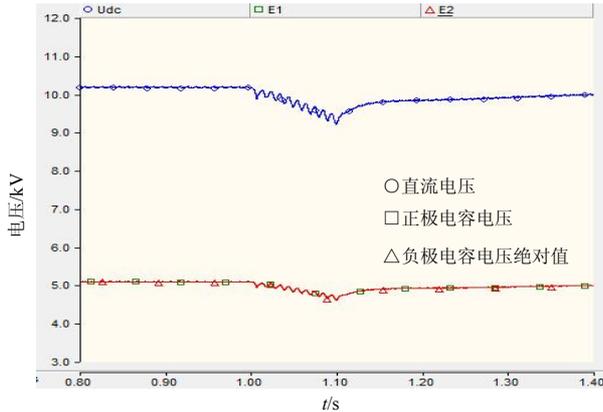
当 LVDC 系统换流器电容中点高阻接地时, 接地电阻设为  $400 \Omega$ , 系统故障特性仿真结果如图 6 所示。

可以看出, 当换流器电容中点高阻接地时, 共模波动现象消失, 工频零序电压绝大部分加在接地电阻两端, 换流器正负极电容电压保持稳定。IGBT

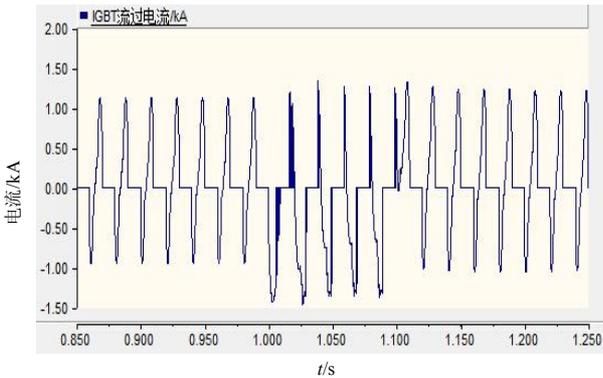
经过电流涨幅很小，过流比换流器直接接地方式小得多。故障消除后，系统快速恢复平衡。



(a) VSC 交流端口电压、电流



(b) 直流线路电压及正负极电容电压



(c) 短路电流通路流经 IGBT 电流

图 6 高阻接地方式下 VSC 交流出口侧单相接地故障仿真波形

Fig. 6 Single phase to ground fault waveforms of VSC AC outlet under high resistance grounding mode

### 3 直流线路故障分析

直流线路故障类型可分为正负极间短路故障、

单极接地故障以及断线故障，其中正负极间短路故障是 LVDC 系统中最为严重的直流侧故障类型<sup>[17]</sup>。故障发生后，直流侧并联电容放电，直流线路出现很大的浪涌电流，直流电压下降。对应于不同的故障距离，其波形的变化率也随距离的增加而减小，其故障特征与换流器电容中点接地方式无关。相对于极间短路故障，直流配电系统直流网络单极线路接地故障发生的概率更大一些，本节只针对直流线路发生单极接地故障时故障特征进行分析。

发生单极接地故障时，直流侧电容将通过接地点以及接地极形成通路，产生很大的浪涌电流<sup>[18]</sup>。闭锁后的换流器将在交流侧电压的作用下成为一个非受控整流器，交流侧电流将流过二极管。正极或负极接地故障的差异仅仅是故障电流的方向以及导通的二极管不同<sup>[19]</sup>。当直流线路发生单极金属性接地故障时，系统放电通路及仿真结果如图 7、图 8 所示。

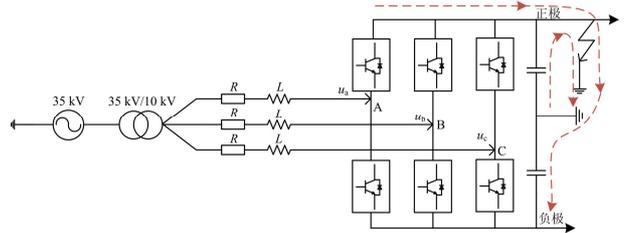


图 7 直接接地方式下系统单极接地故障等效电路

Fig. 7 Equivalent circuit of a single pole ground fault system in the direct grounding system

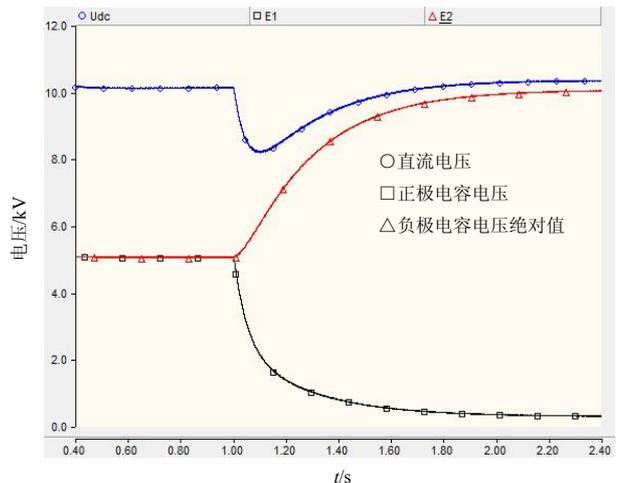


图 8 直接接地方式下单极接地故障直流电压波形

Fig. 8 DC voltage waveform of single pole ground fault under direct grounding mode

可以看出，此时由于故障极电容电压无法建立，系统转变成由负极电容支撑的单极传输系统，由于

总电压低于系统设定电压, 在直流电压控制器控制直流电压保持不变的情况下, 导致故障极电压将逐渐振荡到接近零, 非故障极电容电压会上升到 2.0 p.u.左右。故障消除后, 直流正负极对地电压无法恢复正常。同时, 在单极接地故障情况下, 单极电容快速放电, 导致直流电压暂时降低, 可能会引起交流侧的暂时性过流, 这也与连接交流系统的强弱、系统功率传输潮流设定以及控制器所设计的动态性能有很大的关系。

当换流器电容中点高阻接地时, 单极接地故障会引起直流正负极对地电压的跳变, 但电容电压本身并没有变化<sup>[20-21]</sup>。如图 9 所示。

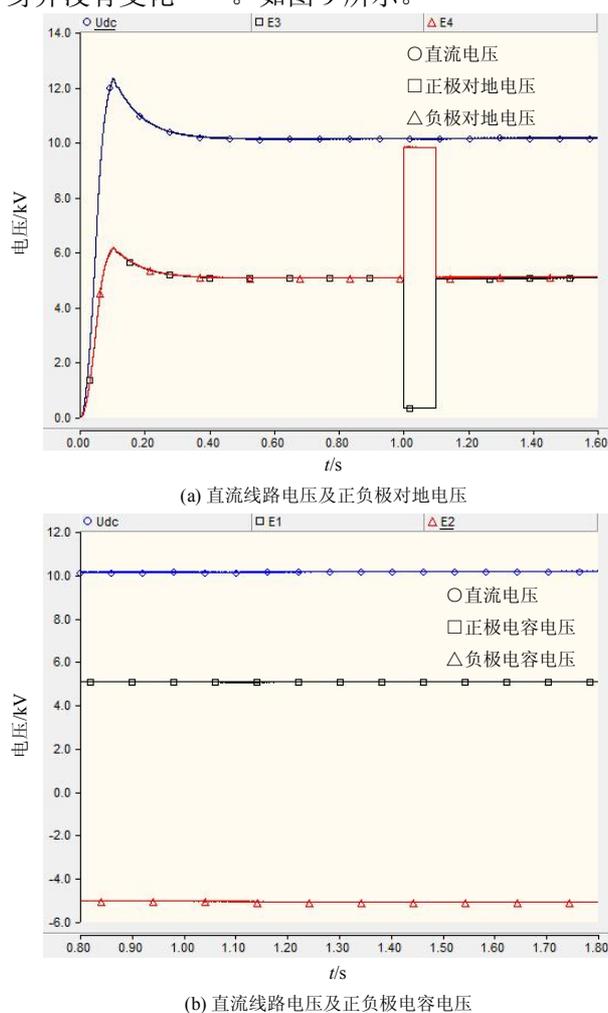


图 9 高阻接地方式下单极接地故障仿真波形

Fig. 9 Simulation waveform of single pole ground fault with high resistance grounding mode

可以看出, 换流器电容中点高阻接地时, 只是存在正负极对地电压的跳变, 直流线路电压以及电容电压在故障暂态过程中基本保持不变, 而且故障消除后, 直流正负极对地电压能够快速恢复正常。

由上述分析可得, 不管是换流器交流出口不对称故障还是直流线路单极接地故障, VSC 直流侧并联的滤波电容首先在极短的时间内对故障点放电, 造成线路电流迅速上升, 而换流器电容中点高阻接地方式都能够在一定程度上限制故障电流, 这对于对过电流敏感的电压源换流器是非常重要的。并且, 换流器高阻接地方式也有利于系统故障消除后的快速恢复。

## 4 结论

直流配电系统的设备多由电力电子装置变换而来, 系统的故障参数将很大程度上决定这些装置能否正常稳定运行。尤其是电压源换流器对过电流敏感, 限制故障电流显得尤为重要。对比研究结果, 综合考虑换流器电容中点接地方式选择高阻接地对系统更加有利。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 周逢权, 黄伟. 直流配电网系统关键技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 62-67.  
ZHOU Fengquan, HUANG Wei. Study on the key technology of DC distribution power network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 62-67.
- [3] SALONEN P, KAIPIA T, NUUTINEN P, et al. A LVDC distribution system concept[C] // Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics. Helsinki, Finland: IEEE, 2008: 1-7.
- [4] 雍静, 徐欣, 曾礼强, 等. 低压直流供电系统研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 42-52.  
YONG Jing, XU Xin, ZENG Liqiang, et al. A review of low voltage DC power distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 42-52.
- [5] 丁明, 田龙刚, 潘浩, 等. 交直流混合微点网运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 1-8.  
DING Ming, TIAN Longgang, PAN Hao, et al. Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 1-8.
- [6] NUUTINEN P, SALONEN P, PELTONIEMI P, et al. Implementing a laboratory development platform for an LVDC distribution system[C] // IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Brussels,

Belgium: IEEE, 2011: 84-89.

[7] SALONEN P, NUUTINEN P, PELTONIEMI P, et al. LVDC distribution system protection solutions, implementation and measurements[C] // 13th European Conference on Power Electronics and Applications. Barcelona, Spain: IEEE, 2009: 1-10.

[8] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-29.  
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-29.

[9] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.  
JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.

[10] European Commission. Low voltage directive (LVD) 2006/95/EC[S]. Brussels: European Commission Directive, 2006.

[11] 李露露, 雍静, 曾礼强, 等. 低压直流双极供电系统的接地型式研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2210-2218.  
LI Lulu, YONG Jing, ZENG Liqiang, et al. Researches on grounding types of low-voltage DC bipolar distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2210-2218.

[12] HIROSE K, TANAKA T, BABASAKI T, et al. Grounding concept considerations and recommendations for 400 V DC distribution system[C] // 33rd International Telecommunications Energy Conference. Amsterdam: IEEE, 2011: 1-8.

[13] 管敏渊, 徐政. 两电平 VSC-HVDC 系统直流侧接地方式选择[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(5): 55-60.  
GUAN Minyuan, XU Zheng. DC side grounding methodology for a two-level VSC-HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(5): 55-60.

[14] 杨杰, 郑健超, 汤广福, 等. 电压源换相 HVDC 站内交流母线故障特性及保护配合[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 6-11.  
YANG Jie, ZHENG Jianchao, TANG Guangfu, et al. Internal AC bus fault characteristics of VSC-HVDC system and protection coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 6-11.

[15] KAKIGANO H, MIURA Y, ISE T. Low voltage bipolar type DC microgrid for super high quality distribution[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 3066-3075.

[16] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 溪洛渡-浙江±800 kV 特高压直流输电工程直流保护系统实施策略及其仿真试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 115-121.  
WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. DC protection system implementation strategy and simulation test study of ±800 kV UHVDC power transmission project from Xiluodu to Zhejiang[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 115-121.

[17] JIN Y, FLETCHER J E, O'REILLY J. Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based DC network cables[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(10): 3827-3837.

[18] 赵军, 曹森, 刘涛, 等. 贵广直流输电工程直流线路故障重启策略研究及优化[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 126-131.  
ZHAO Jun, CAO Sen, LIU Tao, et al. Research and optimization on DC line fault recovery strategy used in Gui-Guang HVDC Project[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 126-131.

[19] LAZAROIU C, BULAC C, POPESCU M. Control and protection of a multiterminal low voltage DC system based on VSC[J]. UPB Sci Bull Series C, 2012, 74(1): 173-180.

[20] SALOMONSSON D, SODER L, SANNINO A. Protection of low-voltage DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1045-1053.

[21] BYEON G, LEE H, YOON T, et al. A research on the characteristics of fault current of DC distribution system and AC distribution system[C] // 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia. Jeju, Korea: IEEE, 2011: 543-550.

收稿日期: 2015-07-20; 修回日期: 2015-08-21

作者简介:

鲁国正(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护、直流配电系统; E-mail: 471042184@qq.com

高亮(1960-), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统继电保护及数字化变电站;

梁智敏(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护、分布式发电。

(编辑 魏小丽)