

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190371

直流线路边界特性保护综述

乔立华¹, 陶然², 宋国兵², 万青³, 张青蕾³

(1. 国网河南省电力公司周口供电公司, 河南 周口 466000; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 3. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 陕西 西安 710100)

摘要: 换流器的高可控性与脆弱性对继电保护的動作速度提出严格要求。因此, 仅利用单端量的全线速动, 即基于边界特性的保护近年来成为研究热点。首先综述了利用边界特性的直流线路继电保护研究进展, 总结现有边界的特征。在此基础上, 定义了能够主动响应扰动产生特征信号的有源边界与仅能够被动响应扰动产生特征信号的无源边界, 依据边界性质与边界位置对边界进行了分类。最后, 分析了每一类边界特性的应用范围与应用价值。

关键词: 高压直流; 柔性直流; 边界特性; 继电保护

A summary of the boundary characteristics used in DC system relay protection

QIAO Lihua¹, TAO Ran², SONG Guobing², WAN Qing³, ZHANG Qinglei³

(1. Zhoukou Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Zhoukou 466000, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Electric Power Research Institute of State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710100, China)

Abstract: The high controllability and vulnerability of converters impose strict requirements on the speed of relay protection. Therefore, the whole-line quick-action protection using only single-ended information, that is boundary characteristics based protection, has become a research hotspot in recent years. Firstly, the research progress of DC line relay protection using boundary characteristics is summarized, and the existing boundary characteristics are summarized. On this basis, the active boundary which can generate characteristic signal by active response disturbance and the passive boundary which can only generate characteristic signal by passive response disturbance are defined, and the boundary is classified according to the nature and location of the boundary. Finally, the application scope and application value of each kind of boundary characteristics are analyzed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1766209).

Key words: high voltage direct current; flexible DC; boundary characteristics; relay protection

0 引言

由于能源资源和负荷需求的逆向分布, 我国实施了西电东送战略以进行全国范围内资源的优化配置, 采用直流工程来实现远距离大容量输电是目前经济技术条件下的必然选择。同时, 伴随着直流输电技术与电力电子装备的快速发展, 多端直流输电(Multi-Terminal HVDC, MTDC)系统作为更加灵活的输电方式, 在多交流电网互联、多电源供电和多落点受电等方面优势突出, 为解决区域内高比例可再生能源并网及消纳问题提供有效技术手段^[1], 可

以充分发挥直流输电的经济型和灵活性, 应用范围日益广阔。

常规直流技术基于电网换相换流器, 由于采用定电流控制策略, 其故障特征主要取决于故障导致的拓扑结构变化带来的暂态过程^[2]。而柔性直流系统的故障特征, 不仅受到拓扑结构影响, 也受不同类型控制策略影响^[2-3]。与常规直流技术不同的是, 由于系统故障阻尼小、故障电流上升快等原因, 对保护的速动性与可靠性提出更高要求。近年来, 针对直流系统的故障特征分析已经趋向成熟^[4-7], 而保护研究则保持不断深入, 分别基于频率特性和暂态特征提出许多保护新思路^[8]。追求快速性的单端量保护能够实现主保护功能。其中, 仅通过单端量数

据实现对被保护线路的全线速动是一种理想的保护方法,该方法必须依赖于边界设备的边界特性构造;追求灵敏性的双端量保护本质上是给线路加设数据边界,其中部分双端量保护需要借助实际的线路边界设备构成。越来越多的保护方法为实现速动性与灵敏性的双重要求,利用边界特性构造全线速动,边界及其特性研究已逐渐成为直流系统保护研究中重要的理论依据,也成为近年来的研究热点。

本文首先对边界的本质进行阐述,通过对近年来利用边界特性的保护方法回顾与分析,对边界极其特性进行分类,定义了有源边界与无源边界、线路边界与网络(网源)边界概念,并对不同类型边界特性的应用进行分析与展望,以期对相关问题研究有所裨益。

1 边界与边界特性

在直流系统继电保护的研究过程中,尤其是单端量保护,需要依赖于边界特性实现。边界特性本质上是某一点两侧分别发生故障时,测点测得的故障特征存在明显差异,具有边界特性的设备或结构称为边界。

边界特性的存在并非一定依赖于实际的边界设备,在双端量保护方法中,通过利用对端数据配合进行区内、外故障判别,也类似于对端存在边界特性。

2 利用边界特性的保护方法

在直流线路保护研究的发展过程中,可以将现有的保护方法分为两个类别:一类是利用结构自身阻抗特性、通过被动响应故障的被动式保护方法,该类保护方法以阻/感/容元件结构为代表;另一类则是利用控制能力或附加设备实现的、通过主动产生特征信号判别故障的主动式保护方法,该类方法以换流器为代表。本节将从这两个类别出发,对直流系统中利用边界特性的保护方法进行总结。

2.1 被动式保护方法

1) 常规直流系统

常规直流系统的继电保护技术研究目前已经较为成熟,由于换流器出口存在滤波器与平波电抗器,许多单、双端保护均以此为边界,利用滤波器与平波电抗器组合的阻抗频率特性^[9-12]、平波电抗器对高频分量的削减作用^[13-14]以及滤波器与平波电抗器的等效参数^[15]等特性构造保护,具有代表性的保护方法如下:

文献[9,14,16]均利用了边界元件对暂态高频分量的削减作用,可以构造出利用暂态高频电流、暂

态高频能量、甚至直接利用高频信号形态学特征的暂态量保护;

文献[17]采用常规高压直流系统中的滤波器作为边界,利用其对于区内外故障的阻抗频率特性差异,同时考虑到保护灵敏性需求,构造了利用滤波器支路电流的单端量保护;

文献[18]利用行波在边界处折反射特征构造快速保护,但基于行波特征的保护均具有对采样率要求高、可靠性不足等缺点。

2) 柔性直流系统

针对柔性直流系统,一方面,VSC型换流器出口并联的大电容,故障时具有强放电能力,参数特征明显,是一种构造单、双端量保护的重要边界,如文献[19]即利用大电容对故障点迅速放电的特征,通过时域计算识别电容参数构造保护。

另一方面,考虑到MMC型换流器没有附加设备,有文献提出创造线路边界的保护方法,如文献[20]提出在线路两端加装平波电抗器构成边界。现有新型MMC型直流线路单端量保护几乎均采用该方法,具有代表性的保护方法如下:

文献[21]利用了边界平波电抗器对行波波头的平滑作用,通过比较行波陡度构造保护;

文献[22-23]则利用了边界平波电抗器对高频暂态信息的衰减作用,通过比较高频信息幅值构造保护;

文献[24-25]均借助边界电抗器的电压变化率构造保护,需要考虑电抗器大小的影响,在功率反转时需重新整定。

上述保护方法所采用的边界特性,大多为换流站内边界设备的阻抗参数特征或固有电气量特征。

2.2 主动式保护方法

近两年,由于直流系统的控制维度不断上升,有学者开始研究主动式保护方法,即利用控制与保护融合的思路实现保护的相关技术。

实际上,早期在交流系统中,就有利用“S注入法”实现小电流接地系统故障选线及定位的相关研究,用以解决零序电流法选线中存在的装有两相CT架空线出线无法获取零序电流的问题^[26-28],但存在受高过渡电阻接地干扰的问题,在后续的研究中又有了基于有功功率、突变量比较、信号相位、双频注入等针对性的改进^[29-31]。这种通过注入信号探测故障的思路在后续的保护相关研究中也出现。如文献[32]即研究了在孤岛环境下,在被保护区域两端分别注入特征频率信号与主频信号的方式,通过比较线路两端特征频率分量幅值的差异构造差动保护、通过比较主频分量幅值的差异选线。

此外, 通过主动注入特征信号实现交流配电网故障定位(测距)、单相接地故障选线、消弧线圈自动调整、接地故障高阻测量^[33]等方向均已具有相关研究。

在直流系统中, 虽然目前利用主动式方法实现直流系统区内、外故障判别的文献相对缺乏, 但通过主动注入特征信号实现直流配电网的故障定位(测距)、单极接地故障选线、直流系统的重合/重启, 甚至直流微电网线路阻抗检测^[34]等方面已有文献发表。

目前多数主动方案采用附加设备的方法, 但随着系统控制能力的提高, 利用高可控性的主动方案拥有较大发展空间。两种主动式思路在直流系统中的代表性应用方法如下:

1) 无需额外添加设备的方法多利用换流器自身的高可控性, 如文献[35]在全桥 MMC 型换流器中附加控制向故障线路注入特征信号, 通过比较健全线路与故障线路的差异判别故障性质; 文献[36]利用全桥 MMC 的高可控性, 附加控制对直流线路健全极注入特征信号, 通过故障线路的耦合感应差异判别故障性质。

2) 多数方法通过附加设备实现主动注入, 如文献[37]利用了接地极引线的行波传输规律, 采用附加脉冲发射单元向接地极引线并行线路同时注入同极性脉冲信号, 通过耦合特性消除无故障时注入脉冲的影响, 从而实现故障测距; 文献[38-39]均采用附加发生装置向故障线路注入电流三角波, 通过数据拟合估算阻抗, 实现故障区段定位; 文献[40]同样是离线定位方法, 通过附加 LC 注入装置与故障点构成震荡回路, 实现精确故障定位。

2.3 小结

综上所述, 目前应用于直流线路保护的边界特性具有以下三个特点:

1) 边界设备的边界特性并非一定是时刻存在的, 有些边界设备只能够在某一频率上或某一频带范围内表现出边界特性。

2) 现有研究中, 边界特性的来源大多是在故障发生时, 线性元件对于故障的被动响应特征。

3) 已有少量研究提出“主动”思想, 利用已有设备或附加设备的高可控性, 使得设备既具备边界特性, 又具备注入特征信号的能力。

3 边界特性的分类

根据上述对于现有利用边界特性的直流线路保护方法的总结可以看出, 保护方法按照原理性质分为主动式和被动式两类。相应地, 所应用的边界特性也可按照性质进行分类。此外, 边界位置的不同

会导致应用范围的不同。因此, 本节将边界特性分别按照性质与位置进行分类阐述。

3.1 按照边界性质分类

1) 无源边界

根据第 2 节对已有直流各种保护方法的梳理可知, 常见的边界设备有线路两端串联的平波电抗器、常规直流系统(LCC)中的直流滤波器、VSC 型柔性直流系统中的并联大电容等, 如图 1 所示。

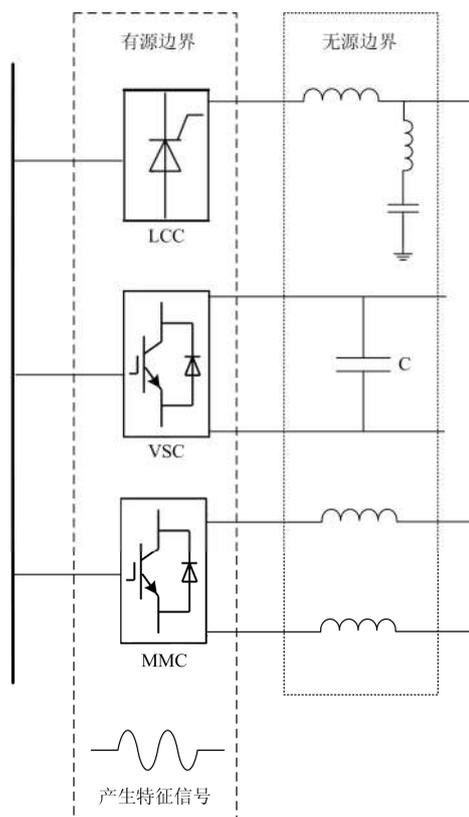


图 1 有源边界与无源边界

Fig. 1 Active boundary and passive boundary

故障特征的产生与表征本质上是激励到响应的映射。上述所有的边界设备对系统来说均不具备源特性, 当发生故障时, 通常由故障作激励, 边界设备或结构被动地响应产生特征, 这种响应往往具备线性特征。基于上述特点, 可以将这些只能通过被动响应故障产生边界特征的设备或结构称为无源边界, 即无源边界自身不会产生特征信号。

2) 有源边界

在直流系统中, 除了平波电抗器、直流滤波器、并联大电容等被动响应故障的边界外, 换流器由于自身拓扑结构也具备成为边界的能力, 甚至能够利用其非线性、强受控性主动产生特征信号, 从而反映故障信息, 如图 1 所示。

换流器是交流电网与直流电网信息交互的枢纽，对于交直流侧网络均表现出源特性。故障发生时，换流器不仅能够自身响应故障，还可以作为激励，使系统响应产生特征。基于上述特点，可以定义这种能够主动产生特征信号且具备边界特征的设备或结构为有源边界。

有源边界不仅能够通过所产生的信号特征的差异区分正常运行状态与区内、外故障状态，还能够应用于实现主动探测式保护、主动探测式故障测距、主动式单极故障选线、主动探测式重启/重合闸等功能。

3.2 按照边界位置分类

1) 线路边界

根据第 2 节对已有直流各种保护方法的梳理可知，目前能够实现被保护线路全线速动的多端系统单端量保护方法，多依赖于线路两端平波电抗器作为边界，如图 2 所示。

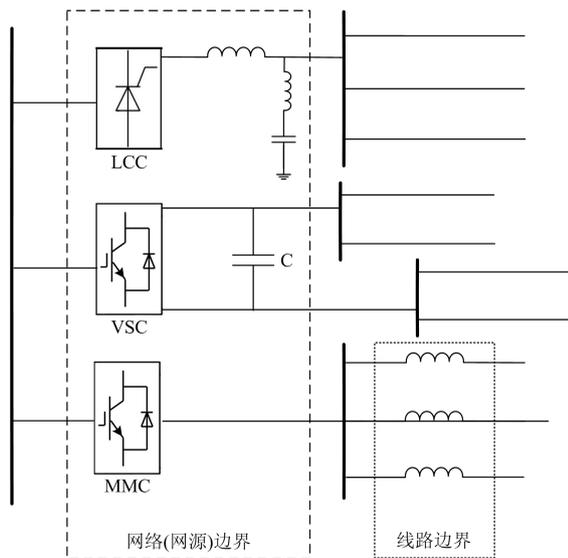


图 2 网络边界与线路边界

Fig. 2 Network boundary and line boundary

这种直接安装在线路两端的边界设备可以称为线路边界。被保护线路区内、外故障时具有明显的特征差异，因此，线路边界是继电保护研究中最理想的边界，能够用来实现被保护线路的全线速动。

2) 网络(网源)边界

实际的直流系统中，能够作为线路边界的设备或结构很少，很多文献将研究点放在换流站内部设备上，如第 2 节梳理得到的常规直流系统的换流器与滤波器、柔性直流系统换流器与 VSC 型柔性直流系统的并联大电容等，如图 2 所示。

这些边界应用于多端系统中时，其后有多条出

线，并非安装在某条线路上。此时，它可以作为该网络与其他网络或该网络与电源系统之间的边界，即网络(网源)边界。

4 边界特性的应用

边界特性越发广泛地应用于直流线路保护、故障测距及直流系统重合/重启中，针对不同边界设备或结构，应用范围、应用效果及相应的处理方法均不尽相同，有必要通过系统的分类并梳理应用价值，为形成有效的边界特性应用思路奠定基础。

下面，将通过代表案例分析，对无源线路边界、无源网络边界、有源线路边界、有源网络边界四种类型进行说明。

4.1 无源线路边界

根据本文对于边界的分类标准，无源线路边界指仅能够被动响应故障特征、位于被保护线路上、具备实现全线速动能力的边界，如图 3 所示。

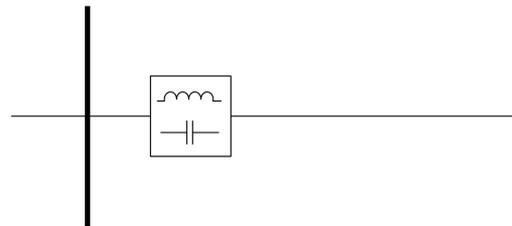


图 3 无源线路边界

Fig. 3 Passive line boundary

无源线路边界的代表案例为柔性直流线路保护中常用的平波电抗器。从相关文献的分析可以看出，线路两端的平波电抗器，不仅能够平抑直流波动、限制故障电流上升，还对高频暂态分量具备削减作用，对故障行波波头具有平滑作用，且能够在线路两端产生阻抗不连续点，上述特征均能够用于构造保护。如文献[41]利用线路两侧平波电抗器对行波波头的平滑作用，通过比较行波极性与幅值实现区内外故障判别；文献[42]利用直流线路的边界对暂态能量的消耗作用，通过边界消耗的暂态谐波能量差异判别区内、外故障，同时利用正、负极线路同侧边界消耗的暂态谐波能量之比实现故障选极。

4.2 无源网络边界

根据本文对于边界的分类标准，无源网络边界指仅能够被动响应故障特征、位于被保护直流线路所在网络外侧的边界，如图 4 所示。

无源线路边界的代表案例为最早应用于常规高压直流系统中的滤波器与平波电抗器以及 VSC 型柔性直流系统中的并联大电容。如文献[12]即利用了换流站中滤波器的阻抗频率特性，利用滤波器支

路电流的大小判别故障。

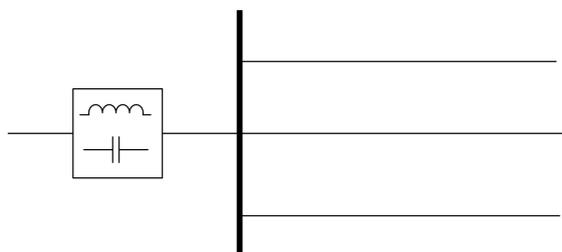


图 4 无源网络边界

Fig. 4 Passive network boundary

但利用无源网络边界特性的保护方法均存在网络(网源)边界的固有缺陷, 即当网络(网源)边界内部网络中任意一点发生故障时, 故障点均位于保护边界内部。此时, 对于两端系统, 该边界仍能够实现全线速动; 但对于多端系统, 若发生换流器出口故障或被保护线路的相邻线路故障, 故障点均位于边界内部, 此时仅通过边界特性将无法直接判断具体的故障线路。需要采取其他方法进行补充。

4.3 有源线路边界

根据本文对于边界的分类标准, 有源线路边界指能够主动产生特征信号、特征信号能够反映区内外故障、位于被保护线路上、具备实现全线速动能力的边界, 如图 5 所示。

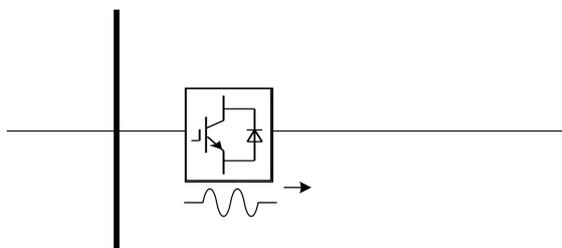


图 5 有源线路边界

Fig. 5 Active line boundary

有源线路边界的代表案例在保护方法中尚未出现, 但已有研究将其应用于直流系统的重合/重启当中。如文献[43]采用半桥 MMC 与混合式断路器的组合方式, 利用混合式断路器对故障线路主动注入电压脉冲信号的方法, 判别故障性质, 实现快速重启。混合式断路器安装于线路上, 且具备主动产生特征信号的能力, 特别在多端多源系统中, 被保护直流线路两端均装设断路器, 可以考虑将其应用于保护故障判别的可能性。

4.4 有源网络边界

根据本文对于边界的分类标准, 有源线路边界指能够主动产生特征信号、特征信号能够反映区内外故障、位于被保护直流线路所在网络外侧的边界,

如图 6 所示。

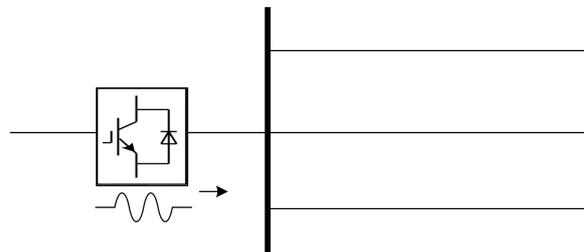


图 6 有源网络边界

Fig. 6 Active network boundary

有源网络边界的代表案例为换流器, 如控制维度较高的 MMC 型换流器, 不管是附加信号发生器或附加控制环节, 还是利用换流器本身的特征与控制实现特征信号注入, 均可用于主动反应故障。如文献[44]通过控制策略短时改变 MMC 型换流器子模块投入规律, 向发生单极接地故障的直流线路注入电压脉冲, 通过测量脉冲的发出与到达时刻实现故障测距, 该方法在半桥 MMC 与全桥 MMC 结构中均可应用。

当然, 同理于 4.2 节所述, 有源网络边界同样存在网络(网源)边界的固有弊端, 在应用于多端系统时需要进一步考量。

4.5 小结

综上所述, 虽然可以利用的线路边界设备或结构相对较少, 但具备实现全线速动的优越性, 特别是有源线路边界, 还拥有巨大的研究空间。网络边界虽然具备一定的固有缺陷, 但可利用的设备或结构较多, 研究的切入点较多, 在应用于多端系统时, 辅以合理的补充判据同样能够构造快速、可靠的保护方法, 特别是有源网络边界, 在控制维度不断上升的现代直流系统中, 其主动特征可以在更多领域得到应用。

5 结语

本文对直流线路保护方法中应用的边界特性进行了综述, 总结了国内外应用边界保护的直流线路保护方法研究进展。在梳理与总结现有研究进展的基础上, 分别定义了能够发出特征信号的有源边界与仅能被动响应故障特征的无源边界, 分别基于边界性质与边界位置对边界进行分类, 并分析了每一种边界的应用范围与应用价值。

参考文献

- [1] 严胜, 罗湘, 贺之渊. 直流电网核心装备及关键技术展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 205-216.
YAN Sheng, LUO Xiang, HE Zhiyuan. Prospect of DC

- grid core equipment and key technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 205-216.
- [2] 宋国兵, 陶然, 李斌, 等. 含大规模电力电子装备的电力系统故障分析与保护综述[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 2-12.
SONG Guobing, TAO Ran, LI Bin, et al. Survey of fault analysis and protection for power system with large scale power electronic equipments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 2-12.
- [3] 徐政, 张哲任, 刘高任. 柔性直流输电网的电压控制原理研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 54-59.
XU Zheng, ZHANG Zheren, LIU Gaoren. Research on voltage control principle of flexible DC transmission power grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 54-59.
- [4] 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.
- [5] 吕家乐, 吴在军, 窦晓波, 等. 基于 MMC 的中压直流配电网极间短路故障保护策略[J]. 电力工程技术, 2019, 38(4): 2-9.
LÜ Jiale, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. Bipolar short circuit protection strategy for MMC based medium voltage DC distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(4): 2-9.
- [6] 朱益华, 郭琦, 李威, 等. 含柔性直流输电系统的电网安全稳定特性和控制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(12): 20-26.
ZHU Yihua, GUO Qi, LI Wei, et al. Research on security and stability characteristics and control strategy of power grid with VSC-HVDC[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(12): 20-26.
- [7] 李振兴, 叶诗韵, 谭洪, 等. 交直流混联系统对交流电网继电保护影响综述[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(12): 41-47.
LI Zhenxing, YE Shiyun, TAN Hong, et al. An overview of influences of AC-DC hybrid system on AC grid protection[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(12): 41-47.
- [8] 王勇, 李中波, 谢嘉晟, 等. 基于状态坐标分析的高压直流输电线路保护方案[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(1): 16-21.
WANG Yong, LI Zhongbo, XIE Jiasheng, et al. A scheme of HVDC transmission line protection based on the state coordinate[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(1): 16-21.
- [9] 高淑萍, 索南加乐, 宋国兵, 等. 利用单端电流的高压直流输电线路全线速动保护[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 107-113, 19.
GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. A novel whole-line quick-action protection principle for HVDC transmission lines using one-end currents[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 107-113, 19.
- [10] 魏德华, 苗世洪, 刘子文, 等. 基于边界特征的高压直流输电长线路故障判别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 75-82.
WEI Dehua, MIAO Shihong, LIU Ziwen, et al. A fault identification method for HVDC transmission with long line based on boundary characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 75-82.
- [11] 许小雪, 刘建锋, 江玉蓉. 基于多频带能量的高压直流输电线路单端暂态电流保护[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 42-49.
XU Xiaoxue, LIU Jianfeng, JIANG Yurong. HVDC transmission line protection based on single-ended transient current using multiband energy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 42-49.
- [12] 宋国兵, 褚旭, 高淑萍, 等. 利用滤波器支路电流的高压直流输电线路全线速动保护[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 120-126.
SONG Guobing, CHU Xu, GAO Shuping, et al. A whole-line quick-action protection principle for HVDC transmission lines using one-end current of DC filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 120-126.
- [13] 束洪春, 刘可真, 朱盛强, 等. ± 800 kV 特高压直流输电线路单端电气量暂态保护[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(31): 108-117.
SHU Hongchun, LIU Kezhen, ZHU Shengqiang, et al. ± 800 kV UHVDC transmission line protection based on single end electrical transient signal[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31): 108-117.
- [14] 陈仕龙, 曹蕊蕊, 毕贵红. 基于形态学的特高压直流输电线路单端电流方向暂态保护[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(1): 67-72.
CHEN Shilong, CAO Ruirui, BI Guihong. Single-end current direction transient protection based on morphology for UHVDC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 67-72.
- [15] 索南加乐, 侯卓, 宋国兵, 等. 基于分布参数模型的高压直流输电线路距离保护[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 53-57.
SUONAN Jiale, HOU Zhuo, SONG Guobing, et al. Distance protection for HVDC transmission line based on distributed parameter model[J]. Automation of Electric

- Power Systems, 2011, 35(8): 53-57.
- [16] 张保会, 张嵩, 尤敏, 等. 高压直流线路单端暂态量保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 18-23.
ZHANG Baohui, ZHANG Song, YOU Min, et al. Research on transient-based protection for HVDC lines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 18-23.
- [17] SONG Guobing, CHU Xu, GAO Shuping, et al. A new whole-line quick-action protection principle for HVDC transmission lines using one-end current[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 599-607.
- [18] 罗澍忻, 董新洲. 基于故障行波过程的直流线路单端保护[J]. 广东电力, 2016, 29(9): 52-57.
LUO Shuxin, DONG Xinzhou. Single-end protection of DC transmission lines based on fault travelling wave process[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(9): 52-57.
- [19] 宋国兵, 靳幸福, 冉孟兵, 等. 基于并联电容参数识别的 VSC-HVDC 输电线路纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 76-82, 102.
SONG Guobing, JIN Xingfu, RAN Mengbing, et al. Pilot protection for VSC-HVDC transmission lines based on shunt capacitance parameter identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 76-82, 102.
- [20] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 基于边界特性的多端柔性直流配电系统单端量保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5741-5749.
LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multi-terminal VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5741-5749.
- [21] DESCLOUX J, RAISON B, CURIS J B. Protection algorithm based on differential voltage measurement for MTDC grids[C] // 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection, March 31-April 3, 2014, Copenhagen, Denmark: 1-6.
- [22] 谢秋霞. 基于 MMC 的直流电网架空线路故障暂态特性分析及快速保护[J]. 机电工程技术, 2018, 47(6): 134-139.
XIE Qiuxia. Fault transient characteristic analysis and fast protection of overhead lines in MMC-based HVDC grids[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2018, 47(6): 134-139.
- [23] XIANG Wang, YANG Saizhao, XU Lie, et al. A transient voltage-based DC fault line protection scheme for MMC-based DC grid embedding DC breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 334-345.
- [24] SNEATH J, RAJAPAKSE A D. DC fault protection of a nine-terminal MMC HVDC grid[C] // 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, February 10-12, 2015, Birmingham, UK: 1-8.
- [25] SNEATH J, RAJAPAKSE A D. Fault detection and interruption in an earthed HVDC grid using ROCOV and hybrid DC breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 973-981.
- [26] 桑在中, 张慧芬, 潘贞存, 等. 用注入法实现小电流接地系统单相接地选线保护[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(2): 11-12, 35.
SANG Zaizhong, ZHANG Huifen, PAN Zhencun, et al. Protection for single phase to earth fault line selection for ungrounded power system by injecting signal[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(2): 11-12, 35.
- [27] 桑在中, 潘贞存, 丁磊, 等. “S 注入法”选线定位原理及应用[J]. 中国电力, 1997, 30(6): 44-45, 62.
SANG Zaizhong, PAN Zhencun, DING Lei, et al. The principle and application of ‘S Injection Method’ for faulty line selection[J]. Electric Power, 1997, 30(6): 44-45, 62.
- [28] 王慧, 范正林, 桑在中. “S 注入法”与选线定位[J]. 电力自动化设备, 1999, 19(3): 18-20.
WANG Hui, FAN Zhenglin, SANG Zaizhong. The “S Signal Injection Method” and its application in single phase-to-earth fault line identification and fault point location[J]. Electric Power Automation Equipment, 1999, 19(3): 18-20.
- [29] 梁伟健, 黄洪全. 基于有功功率的小电流接地选线注入法的研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2012(1): 19-21.
LIANG Weijian, HUANG Hongquan. The study of signal injection method for small current neutral grounding system single phase earthed fault feeder detection based on active power[J]. Automation & Instrumentation, 2012(1): 19-21.
- [30] 刘英亮, 龚俊祥, 魏国栋, 等. “S 注入法”接地选线原理分析与改进[J]. 山东大学学报(工学版), 2007, 37(4): 64-67.
LIU Yingliang, GONG Junxiang, WEI Guodong, et al. Analysis and improvement of the ‘S injection’ fault feeder detection method[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2007, 37(4): 64-67.
- [31] 潘贞存, 张慧芬, 张帆, 等. 信号注入式接地选线定位保护的分析和改进[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 71-75.
PAN Zhencun, ZHANG Huifen, ZHANG Fan, et al. Analysis and modification of signal injection based fault

- line selection protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 71-75.
- [32] SOLEIMANISARDOO A, KAREGAR H K, ZEINELDIN H H. Differential frequency protection scheme based on off-nominal frequency injections for inverter-based islanded micro-grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 2107-2114.
- [33] 曾祥君, 尹项根, 于永源, 等. 基于注入变频信号法的经消弧线圈接地系统控制与保护新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 29-32, 36.
ZENG Xiangjun, YIN Xianggen, YU Yongyuan, et al. New methods for control and protection relay in a compensated medium voltage distribution network based on injecting various frequency current[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 29-32, 36.
- [34] 刘琛, 赵晋斌, 王闪闪, 等. 基于单脉冲注入的直流微电网线路阻抗检测[J]. 电工技术学报, 2018, 33(11): 2584-2591.
LIU Chen, ZHAO Jinbin, WANG Shanshan, et al. A line impedance identification based on single pulse injection in DC Microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(11): 2584-2591.
- [35] 宋国兵, 王婷, 张晨浩, 等. 利用全桥 MMC 注入特征信号的直流自适应重合闸方法[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 149-156.
SONG Guobing, WANG Ting, ZHANG Chenhao, et al. Adaptive auto-reclosing of DC line based on characteristic signal injection with FB-MMC[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 149-156.
- [36] 宋国兵, 王婷, 张晨浩, 等. 利用健全极 MMC 注入特征信号的直流线路故障性质判别方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 994-1003.
SONG Guobing, WANG Ting, ZHANG Chenhao, et al. DC line fault identification based on characteristic signal injection using the MMC of sound pole[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 994-1003.
- [37] 钟小垒, 李京. 基于行波耦合原理的高压直流输电系统接地极引线故障测距[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2012, 26(3): 54-59.
ZHONG Xiaolei, LI Jing. Fault location of grounded electrode lead in HVDC system based on the principle of coupled travelling waves[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 26(3): 54-59.
- [38] CHRISTOPHER E, SUMNER M, THOMAS D W P, et al. Fault location in a zonal DC marine power system using active impedance estimation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(2): 860-865.
- [39] JIA Ke, CHRISTOPHER E, THOMAS D, et al. Advanced DC zonal marine power system protection[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(2): 301-309.
- [40] 贾科, 李论, 宣振文, 等. 基于扰动注入的柔性直流配电网主动故障定位及其仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 99-106.
JIA Ke, LI Lun, XUAN Zhenwen, et al. Study on fault location method and simulation for VSC-DC distribution network based on disturbance injection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 99-106.
- [41] JOHANNESSON N, NORRGA S, WIKSTRÖM C. Selective wave-front based protection algorithm for MTDC systems[C] // 13th IET International Conference on Development in Power System Protection, March 7-10, 2016, Edinburgh, UK: 1-6.
- [42] 谢志远, 胡斌俞, 张卫民, 等. 基于边界消耗暂态谐波能量的柔性直流输电线路保护新方案[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 34-42.
XIE Zhiyuan, HU Binyu, ZHANG Weimin, et al. A novel protection scheme for VSC-HVDC transmission lines based on boundary transient harmonic energy[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 34-42.
- [43] SONG Guobing, WANG Ting, HUSSAIN K S T. DC line fault identification based on pulse injection from hybrid HVDC breaker[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 271-280.
- [44] 王帅, 毕天姝, 贾科. 基于主动脉冲的 MMC-HVDC 单极接地故障测距[J]. 电工技术学报, 2017, 32(1): 12-19.
WANG Shuai, BI Tianshu, JIA Ke. Single terminal fault location for MMC-HVDC transmission line using active pulse[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(1): 12-19.

收稿日期: 2019-04-02

作者简介:

乔立华(1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: 15839731616@163.com

陶然(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为直流电网继电保护; E-mail: ryna_tr@163.com

宋国兵(1972—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: song.gb@163.com

(编辑 葛艳娜)