

一种适用于混合三端直流系统的差动保护方案

高淑萍¹, 曾子璇¹, 宋国兵², 段必聪¹, 姜元月¹

(1. 西安科技大学电气与控制工程学院, 710054, 西安; 2. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为提高混合三端高压直流线路及母线差动保护的速动性、灵敏性、可靠性与选择性, 提出一种基于 Hausdorff 距离算法的新型高压直流线路及母线差动保护方案。当 ± 800 kV 混合三端直流线路发生故障时, 通过线模电流故障分量判定故障方向, 区分故障区域。对线路首末两侧电流波形进行实时短窗数据差异量化, 用线路首末两端的电流相似度差异判定线路区内外故障及单双极选极。以 T 区送端(电网换相换流器侧)与 T 区两受端(模块化多电平换流器侧)电流和的 Hausdorff 距离差异作为 T 区母线故障识别保护判据。利用 PSCAD 建立混合三端直流输电系统模型, 运用 MATLAB 验证所提方案。仿真结果表明: 所提方案判据可耐受过渡电阻 $500\ \Omega$, 耐受过渡电阻能力强; 能在 3 ms 内快速可靠动作, 可靠性高、快速性好; 对线路两侧通信精度要求低, 具有一定的抗噪和抗异常数据的能力; 在不同工况下, 都可快速识别故障区域及区内外故障, 并实现故障选极。

关键词: 混合三端直流系统; 差动保护; Hausdorff 距离算法; T 区; 线模电流故障分量

中图分类号: TM773; TM75 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202101003 **文章编号:** 0253-987X(2021)01-0017-10



OSID 码

A Differential Protection Scheme for Hybrid Three-Terminal DC System

GAO Shuping¹, ZENG Zixuan¹, SONG Guobing², DUAN Bicong¹, JIANG Yuanyue¹

(1. School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710045, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To enhance the rapidity, sensitivity, reliability and selectivity of differential protection for hybrid three-terminal HVDC lines and buses, a new differential protection scheme based on Hausdorff distance algorithm is proposed. When a fault occurs in ± 800 kV mixed three-terminal DC line, the fault component values of line-mode current on both sides in T-zone are used as the fault direction discrimination basis of this scheme, and the scheme quantifies the difference of short-window data between the current waveforms of the first and last sides of the line, and uses the difference of current similarity between the first and last ends of the line to determine the internal faults and external faults, as well as the faults of unipolar and bipolar. The Hausdorff distance between T-zone sender (LCC side)'s current and two T-zone receiver (MMC side)'s total current is taken as the criterion of T-zone bus fault identification and protection. Then the hybrid three-terminal DC transmission system model is established by PSCAD and the protection method is verified by MATLAB. The simulation results show that the proposed scheme has strong ability to tolerate the transition resistance ($500\ \Omega$), and has the advantages of high reliability and speediness to ensure quick and reliable action within 3 ms . The communication time accuracy requirement on both sides of the line is low, and the scheme has a certain ability to

收稿日期: 2020-07-30。 作者简介: 高淑萍(1970—),女,副教授,硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51777166, U1766209); 中国国家留学基金资助项目。

网络出版时间: 2020-09-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200922.1104.002.html>

resist noise and abnormal data. Under different working conditions, the fault area and the faults inside or outside the area can be quickly identified, and fault pole selection can be achieved.

Keywords: hybrid three-terminal DC system; differential protection; Hausdorff distance algorithm; T-zone; line-mode current fault component

近年来,高压直流输电(HVDC)因具有远距离大功率传输、线路造价低等优点,在电力系统中被逐步重视及应用,然而仍然存在一些急待解决的技术难题。其中,传统 HVDC 系统中的换相失败^[1-2]是造成系统稳定性差的原因之一。

为了解决换相失败问题,混合多端直流输电系统^[3]成为目前新的研究方向之一。该系统是一种新型的直流输电拓扑结构,结合了电网换相换流器(LCC)和模块化多电平换流器(MMC)两者的优势,能够实现多电源供电、多落点受电的远距离大容量输送^[4],具有良好的工程应用前景。但是,由于混合多端直流输电阻抗小,故障电流幅值大、上升速度快等因素^[5],低惯性直流电网直流侧一旦发生短路故障,各换流站立即向故障点馈入短路电流,使得保护难以快速地识别故障区域并动作。因此,混合多端直流输电线路的保护是混合多端直流输电发展的关键技术之一。

目前,我国的传统直流线路保护主要为行波保护、微分欠压保护、差动保护^[6]等。行波保护可靠性差,易受到波头信息提取不准确、高阻接地故障等因素影响。因此,将传统直流线路保护应用在混合多端直流线路时,存在适应性问题,需要研究更高性能的保护方案。文献[7]提出了基于电流突变量的单端保护,虽然该方案可以快速可靠地区分区内故障,但其门槛值整定的理论依据不足;文献[8]基于输电线路两端的纵向阻抗,提出了一种多端线路差动保护的改进算法,但其存在测量量较多的问题;文献[9]根据故障元件的差动电流极性特性,提出了故障全过程差动保护原理,然而该方案受直流滤波器放电及交流侧故障特征谐波影响,故障分量的波动可能会造成误动;文献[10]提出了一种基于电流突变率的高压直流输电线路纵联保护方案,利用 HVDC 线路中的电流突变率和特定频率下 DC 滤波器组来识别故障位置;文献[11]提出了基于 Hausdorff 距离算法的自适应线路差动保护方案,具有自适应、免整定的优良特性;文献[12]提出了基于 Hausdorff 距离算法的发变组大差保护新判据,该方案以线路两端额定电流相位相差 90° 时的 Hausdorff 距离作为保护判据,整定过程简单方便

且不受系统参数影响;文献[13]提出了一种基于 Hausdorff 距离比较的快速纵联保护算法,该算法未考虑互感器不平衡电流造成的影响。

Hausdorff 算法是一种快速波形相似度比较算法,在医学病理诊断方面得到了广泛应用。因该算法具有原理简单、时间窗短、计算量小、能针对性地识别波形特征、对于波形之间的差异识别灵敏度高的优点,目前国内已有专家学者将其初步应用在线路纵联保护、变压器保护等领域^[11-13]。文献[14]提出了一种新型图像匹配方案,由基于 SIFT 特征提取方法的遗传算法与 Hausdorff 距离算法相结合而成,其匹配精度高、匹配速度快、抗干扰性强,但算法较复杂;文献[15]提出了一种以变压器励磁涌流和故障差流两者间 Hausdorff 距离为判据的变压器保护方案,此方案的抗干扰性强且计算简单;文献[16]提出了一种基于 Hausdorff 算法的母线保护算法,该算法将动作平面划分为 3 区域以自适应区分区外故障、电流互感器饱和及区内故障,具有简单、不需要整定的优点;文献[17]提出了一种适应于主动配电网的 Hausdorff 距离算法,适用于非精准同步的配电网络,提高了保护的可靠性。

综上所述,为保证混合三端直流输电系统的安全可靠运行,本文基于文献[14-17],对昆柳龙混合直流输电线路及 T 区母线进行差动保护研究,提出了利用改进 Hausdorff 距离算法的差动保护方案。该保护方案可以实现故障区域的判别,并实现区内故障的判别及故障极的识别,提升了并联型混合三端直流输电线路差动保护的性能。采用 PSCAD 建立混合三端直流输电系统模型,利用 MATLAB 对故障数据进行处理,对保护方案进行仿真验证。仿真结果表明所提保护方案正确有效。

1 T 型混合三端直流输电系统

1.1 系统结构

昆柳龙直流工程的并联型三端直流系统采用 ± 800 kV 混合三端直流输电系统。整流站采用由两组 12 脉冲换流器串联而成的 LCC,逆变侧两个换流站均采用 MMC 结构。直流线路总长 1 452 km,线路 1 长 932 km,线路 2 长 520 km。

图 1 是并联型三端混合直流输电系统结构,直流输电线路的平波电抗器为天然的物理边界,HVDC 输电线路保护分为区内、区外两部分。 a 、 b 、

c 、 d 、 a' 、 b' 、 c' 、 d' 分别为各线路正极与负极出口侧的保护安装处, Z 为交流侧的等值电抗。 $f_1 \sim f_{20}$ 为不同种类的故障点,将在 4.1 小节表 1 中具体介绍。

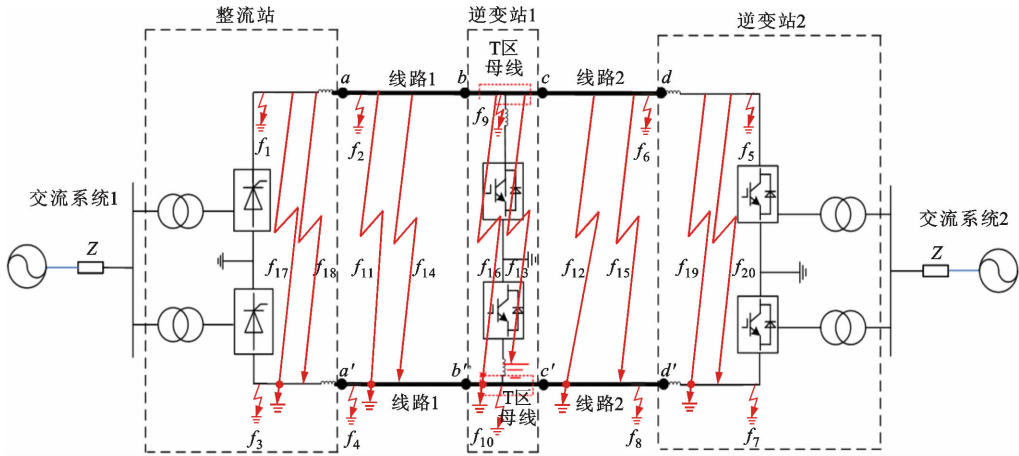


图 1 并联型三端混合直流输电系统结构

1.2 T 区母线结构

与传统直流线路相比,图 1 等值电路模型的最大特点在于 T 区的存在。又因逆变侧存在 MMC 结构,故需保护动作快速切除故障。

对于不同拓扑结构的 MMC,其线路故障的特性不同,但是故障初始阶段都是以电容放电为主导,伴随少量的交流馈入^[18]。因此,在对 T 区进行故障分析时,可将 MMC 换流器等效成一个 RLC 串联阻抗^[19]。

2 直流线路故障保护原理

2.1 相模变换矩阵

对于直流正负双极间存在的电磁耦合,采用相模变换将各电气量从相域转换到模域进行研究。以线路 1 为例,对直流线路电气量相模解耦得到

$$\left. \begin{aligned} S &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \end{bmatrix} &= S^{-1} \begin{bmatrix} I_a \\ I_{a'} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_{a'} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

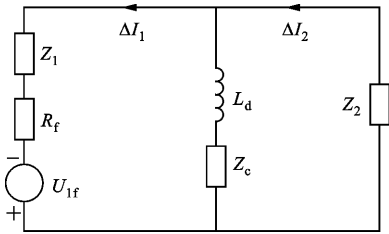
式中: I_0 与 I_1 分别为直流线路的零模电流和线模电流; I_a 与 $I_{a'}$ 分别为直流线路首端的正极电流与负极电流; S 为模相变换矩阵; S^{-1} 是 S 的逆矩阵,为相模变换矩阵。

零模电气量在正负极线路间不能形成环流,只能流入大地,且零模分量在传播的过程中衰减较为严重。在直流线路中,只有发生单极接地故障时,线路上才含有零模分量。然而,对于不同的故障类型,线模分量却可以充分应对。因此,本文对线路的线

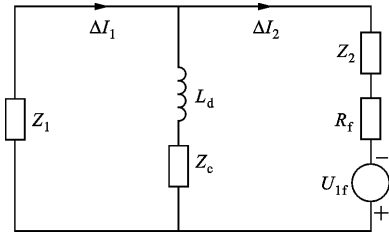
模分量进行提取分析,构成线路区域故障判据。

2.2 故障区域判别原理

图 1 中,对于任意一条线路,规定电流由母线流向线路为参考方向。当非 T 区发生故障时,可得其故障分量等效图,如图 2 所示。图 2 中: U_{1f} 是故障点处附加线模电压源; Z_1 和 Z_2 分别为线路 1 和线路 2 两侧的等效阻抗; ΔI_1 和 ΔI_2 分别为经过 T 区两侧的故障暂态线模电流分量; R_f 是故障处的过渡电阻; L_d 和 Z_c 等效为 T 区的等值阻抗。因 ΔI_1 和 ΔI_2 测量点在 T 区母线两侧,其参考方向为 T 区母线流向线路。



(a) T 区母线左侧故障



(b) T 区母线右侧故障

图 2 非 T 区故障等效电路

由图 2a 可以看出,当故障发生在 T 区母线左

侧时, $\Delta I_1 > 0, \Delta I_2 < 0$; 由图 2b 可以看出, 当故障发生在 T 区母线右侧时, $\Delta I_1 < 0, \Delta I_2 > 0$ 。

T 区母线故障等效电路如图 3 所示。可以看出, 当故障发生在 T 区母线处时, $\Delta I_1 < 0, \Delta I_2 < 0$ 。

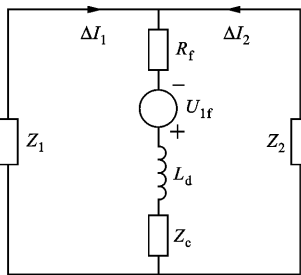


图3 T区母线故障等效电路

根据本小节分析可知, 依据电流 ΔI_1 和 ΔI_2 的大小和方向可以实现 T 区故障区域的判别: 当 $\Delta I_1 > 0, \Delta I_2 < 0$ 时, T 区母线左侧故障; 当 $\Delta I_1 < 0, \Delta I_2 > 0$ 时, T 区母线右侧故障; 当 $\Delta I_1 < 0, \Delta I_2 < 0$ 时, T 区母线故障。

2.3 线路区正负极电流差动保护原理

区内故障差动保护简图如图 4 所示。以 LCC 侧线路 1 为例, I_b 为故障线路末端正极电流。取线路首末两侧电流电气量, 区内故障时, $I_a \neq I_b, I_f = I_a - (-I_b) \gg 0$ 。区外故障差动保护简图如图 5 所示。区外故障时, $-I_a = I_b, I_a - (-I_b) = 0$ 。

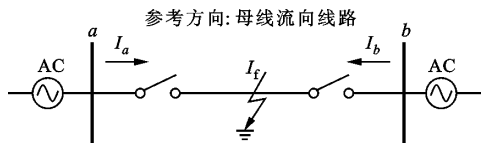


图4 区内故障差动保护简图

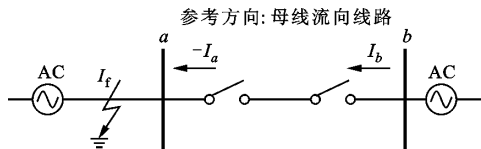
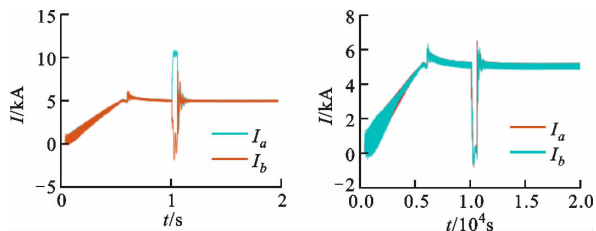


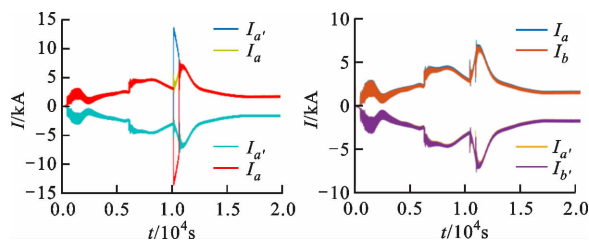
图5 区外故障差动保护简图

故障区内外故障电流仿真图如图 6 所示。可以看出, 当区内外故障时, 直流线路双端电流的幅值特征不同。由此, 可识别高压直流输电线路是否发生



(a) 单极区内故障

(b) 单极区外故障



(c) 双极区内故障

(d) 双极区外故障

图6 故障区内外故障电流仿真图

区内外故障。

2.4 T 区母线差动保护原理

对 T 区母线进行故障判别, 与 2.3 小节判别原理相似。图 7 是 T 区母线保护设置点简图, 对 T 区三端线路正极的 b_1, c_1, e_1 测量点取电流, 对 T 区三端线路负极的 b'_1, c'_1, e'_1 测量点取电流。当 T 区内发生正极故障时, $I_f = I_{b1} + I_{c1} + I_{e1} \gg 0$, 而当 T 区母线处没有发生故障时, $I_{b1} + I_{c1} + I_{e1} = 0$, 负极同理。该识别方案与输电线路区内外故障识别方案相同, 因此不再赘述。

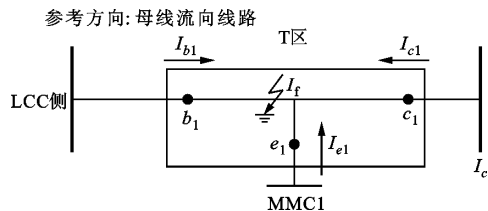


图7 T区母线保护设置点简图

2.5 Hausdorff 距离算法原理

在较多种类的度量特征匹配方法中, Hausdorff 距离算法以其简单有效的优点成为常用的一种算法。Hausdorff 距离是一种考虑了空间目标整体形状且能描述两个点集之间相似程度的度量。Hausdorff 距离没有建立在逐点对应关系上, 而是通过计算 2 个点集之间的相似程度来衡量点集的匹配程度。因此, Hausdorff 距离算法不仅简化了计算, 并且可以快速有效地处理庞大数量特征点的情况。假设空间内存在两点集分别为

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_p\} \quad (2)$$

$$Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_p\} \quad (3)$$

定义点集 X 到 Y 的双向 Hausdorff 距离为

$$X(X, Y) = \max_{x \in X} [h(X, Y), h(Y, X)] \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} h(X, Y) &= \max_{y \in Y} \min_{x \in X} \|X - Y\| \\ h(Y, X) &= \max_{x \in X} \min_{y \in Y} \|Y - X\| \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $\|\cdot\|$ 表示求两点集之间的距离范数; $H(X, Y)$ 为双向 Hausdorff 距离; $h(X, Y)$ 为从点集 X 到

点集 Y 的单向 Hausdorff 距离; $h(Y, X)$ 为从点集 Y 到点集 X 的单向 Hausdorff 距离。

式(5)中 $h(X, Y)$ 代表两点集间的欧氏距离。对于集合 X 中的元素任一 x_i , 求取与集合 Y 中元素的最小距离, 然后将所得最小距离集合中的最大距离视作 X 对 Y 的 Hausdorff 单向距离, 同理可以计算 Y 对 X 的 Hausdorff 单向距离, 两者中的较大值即为点集 X 对点集 Y 的 Hausdorff 距离, 距离越小, 则证明两组点集的相似性越大。

结合 Hausdorff 距离与差动保护的算法为: 当区内故障时, 两侧电流采样值的 Hausdorff 距离将远大于 0, 即 $H(I_a, -I_b) \gg 0$; 当线路发生区外故障或其他区段线路故障时, 理论上 Hausdorff 距离将重合为 0, 即 $H(I_a, -I_b) = 0$ 。

Hausdorff 距离算法与差动保护结合的优点在于其具有一定的抗非同步能力。当动作电流在非线路区内发生小幅度相移时, 仍然具有辨识能力, 使得直流差动保护的准确性提升。但是, 由于直流电压等级高, 电磁干扰大, 微型计算机保护的数据采集系统易因噪声过大产生数据采集错误。为消除数据异常点对 Hausdorff 距离的影响, 引入部分 Hausdorff 距离^[20]: 将集合 X 中的点到集合 Y 中的点的 Hausdorff 距离从大到小排序, 考虑异常数据较少, 本文舍弃集合 X 中 Hausdorff 距离最大的 3 个点来减少采样异常点对 Hausdorff 距离算法电流差动保护的影响。

根据 2.4 和 2.5 小节所述, 判定 T 区正负极故障的 Hausdorff 距离算法如下。当 T 区母线内发生故障时, 先对 c_1 、 e_1 两点求电流和, 再用 b_1 点电流与所求电流和作 Hausdorff 距离差。当 T 区母线故障时, $H(X, -Y) \gg 0$, 非 T 区母线故障时, $H(X, -Y) = 0$ 。由此, 对于正极和负极, 可分别得到

$$H(X, -Y) = H(I_{b1}, -(I_{c1} + I_{e1})) \gg 0 \quad (6)$$

$$H(X', -Y') = H(I_{b1'}, -(I_{c1'} + I_{e1'})) \gg 0 \quad (7)$$

3 基于 Hausdorff 距离算法的差动保护判据及流程

3.1 启动判据

以线路电流故障后的幅值变化作为启动判据, 公式为

$$\left. \begin{aligned} K_{p1} &= \left| \frac{d\Delta I_p}{dt} \right| > K_{set} \\ K_{p2} &= \left| \frac{d\Delta I_n}{dt} \right| > K_{set} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: ΔI_p 是线路的正极电流变化量; ΔI_n 是线路负极电流变化量。当线路故障时, 电流故障分量发生较大变化, 远大于 0, 即 K_{p1} 或 K_{p2} 大于 0, 因此设 K_{set} 为 0.1。当线路电流满足判据式(8)时, 线路故障保护启动。

3.2 故障区域识别判据

为了解决线路正负极间电磁耦合的影响, 对 T 区两侧的采样电流进行相模变换, 得到其线模电流。T 区左右两侧的线模电流故障分量 ΔI_1 和 ΔI_2 为

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_1 &= I_{f1} - I_{n1} \\ \Delta I_2 &= I_{f2} - I_{n2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: I_{f1} 和 I_{f2} 为故障后电流的线模分量; I_{n1} 和 I_{n2} 为正常运行时负荷电流的线模电流。由 2.1 小节分析可知, T 区母线故障、T 区母线左侧故障、T 区母线右侧故障的识别判据分别为

$$\Delta I_1 < 0; \Delta I_2 < 0 \quad (10)$$

$$\Delta I_1 > 0; \Delta I_2 < 0 \quad (11)$$

$$\Delta I_1 < 0; \Delta I_2 > 0 \quad (12)$$

3.3 线路区内外故障识别判据

根据故障线路的正极和负极电流识别区内外故障, 根据 2.2、2.3 小节分析, 以线路 1 为例, 可得

$$\left. \begin{aligned} K_{pp} &= H(I_a, -I_b) \\ K_{pn} &= H(I_{a'}, -I_{b'}) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: K_{pp} 表示故障线路正极首末两端电流 Hausdorff 距离; K_{pn} 表示故障线路负极首末两端电流 Hausdorff 距离; $I_{b'}$ 为故障线路末端负极电流。

依据混合直流控制特性^[21], 将区内外故障识别判据按额定电流 I_N 的 0.1 倍整定。为可靠区分区内外故障, 应针对最严重的故障情况选取保护整定值, 即以区内高阻接地故障躲过区外金属性接地故障为整定原则。通过大量仿真实验可知, 故障发生在区内和区外时的 Hausdorff 距离差异较大 (Hausdorff 距离算法不要求双端数据严格同步)。因此, 在保留一定的裕度下, 最终区内外判据选择为

$$K_{pp} < 0.7 \& K_{pn} < 0.7 \quad (14)$$

若满足式(14)为区外故障, 若不满足式(14)则为区内故障。

3.4 线路区故障选极判据

3.4.1 正负极故障判据 当发生单极故障时, 由于线路的耦合作用, 健全极也会受到故障极的影响。此时, 需要区分故障极, 从而切除故障。按躲过 $0.1I_N$ 整定, 保留一定的裕度可得

$$K_{pp} > 0.7 \quad (15)$$

$$K_{pp} < 0.7 \& K_{pn} > 0.7 \quad (16)$$

当 $K_{pp} > 0.7$ 时,判为正极区内故障;当 $K_{pn} > 0.7$ 且 $K_{pp} < 0.7$ 时,判为负极区内故障。

3.4.2 单双极故障判据 当线路发生双极故障时,线路同侧正负极电流幅值波动相同,其 Hausdorff 距离为 0;当线路发生单极故障时,线路同侧正负极电流幅值波动相差较大,其 Hausdorff 距离远远大于 0。以此,构成保护判据

$$K_{px} = H(I_a, -I_a') < 0.005 \quad (17)$$

式中 K_{px} 为线路首端的正极电流与负极电流的 Hausdorff 距离。实际中,线路同侧正负极电流幅值存在一定的偏差,因此需对保护判据留有一定的裕度,本文通过大量仿真实验,最终设为 0.005 的阈值。

当 K_{px} 小于 0.005 时,判定为双极接地故障,保护动作。整定值 K_{px} 可根据实际可靠性进行调整。

3.5 T 区母线故障保护动作判据

躲过 $0.1I_N$ 整定,保留一定的裕度,可得 T 区母线故障保护动作判据为

$$\left. \begin{aligned} K_{pp'} &= H(X, -Y) > 0.7 \\ K_{pn'} &= H(X', -Y') > 0.7 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式中: $K_{pp'}$ 表示 T 区正极故障时, b_1 点与 e_1 、 c_1 两点电流和的 Hausdorff 距离; $K_{pn'}$ 表示 T 区负极故障时, b'_1 点与 e'_1 、 c'_1 两点电流和的 Hausdorff 距离。

当 $K_{pp'} > 0.7 \parallel K_{pn'} > 0.7$, 母线保护动作,切除 T 区母线故障;当 $K_{pp'} < 0.7 \& K_{pn'} < 0.7$, 母线保护不动作。

3.6 保护流程

根据 3.1~3.3 小节所设计的混合三端高压直流线路保护启动及故障识别判据,可得混合三端高压直流输电系统保护算法流程图,如图 8 所示。

保护算法实现的具体流程为:先进行保护启动判据,若否,则返回,继续采集数据,若是,则用线模电流故障分量大小判别故障区域,再用 Hausdorff 距离算法对故障区域采集到的数据进行处理,得到故障区域两端的波形相似度,进行区内外故障识别和区内故障选极,以此实现混合三端系统的差动保护。

4 仿真验证

区外故障可分为交流侧故障和换流器出口处直流线路故障,由于后者与区内故障仅隔一个平波电抗器,故障信息较为接近,识别较为困难,所以本文选取的区外故障为换流器出口处直流线路故障。此时,以区外最严重的故障情况进行仿真,即金属性接地故障(过渡电阻为 0.01Ω)。

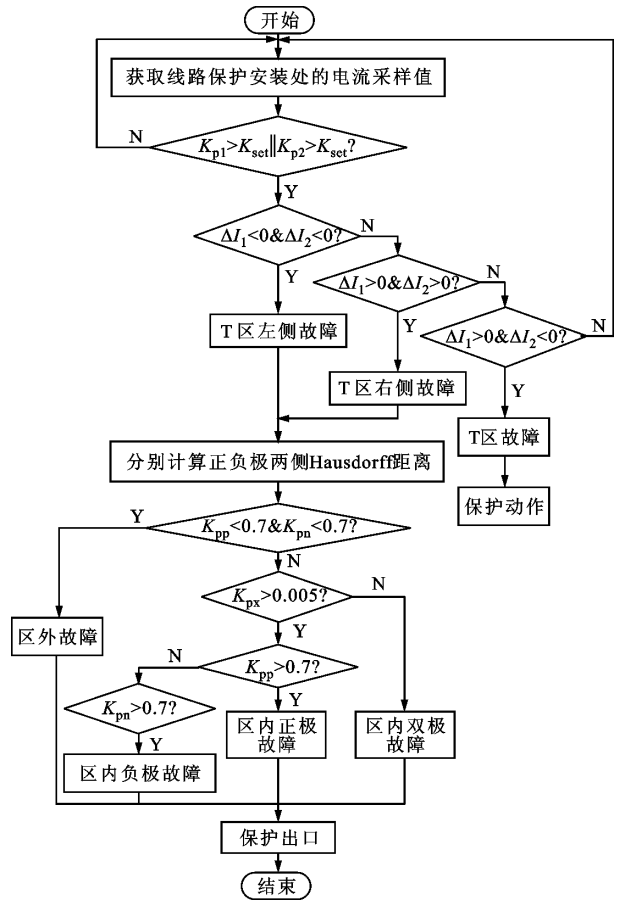


图 8 混合三端高压直流输电线路保护算法流程

结合实际情况,设定 1 s 时发生接地故障(此时系统已趋于稳定),故障持续时间为 0.05 s,采样频率为 10 kHz。对各线路进行 PSCAD 仿真,得出不同故障状态下单双极故障线路首末端电流波形。利用 Matlab 对故障数据进行处理,计算同线路两端线路电流幅值的 Hausdorff 距离。由于理论上其时间窗更短,故本文取故障后 3 ms 的数据进行计算。

4.1 仿真系统介绍

为测试基于幅值差动保护的 Huasdorff 距离算法能否满足昆柳龙直流输电工程系统,本文设置了多个不同种类的故障点 $f_1 \sim f_{20}$,如表 1 所示。

表 1 故障位置及故障类型

故障点	故障类型
f_1	整流站侧区外正极接地故障
f_2	整流站侧区内正极接地故障
f_3	整流站侧区外负极接地故障
f_4	整流站侧区内负极接地故障
f_5	逆变站 2 侧区外正极接地故障
f_6	逆变站 2 侧区内正极接地故障
f_7	逆变站 2 侧区外负极接地故障

续表

故障点	故障类型
f_8	逆变器 2 侧区内负极接地故障
f_9	T 区正极接地故障
f_{10}	T 区负极接地故障
f_{11}	整流站侧区内双极接地故障
f_{12}	逆变器 2 侧区内双极接地故障
f_{13}	T 区双极接地故障
f_{14}	整流站侧区内双极跨接故障
f_{15}	逆变器 2 侧区内双极跨接故障
f_{16}	T 区双极跨接故障
f_{17}	整流站侧区外双极接地故障
f_{18}	逆变器 2 侧区外双极跨接故障
f_{19}	整流站侧区外双极接地故障
f_{20}	逆变器 2 侧区外双极跨接故障

4.2 故障区域判别仿真

不同故障类型下,故障时间为 1~1.03 s 时,T 区左侧、T 区右侧、T 区母线故障时的线模电流故障分量如图 9~11 所示。

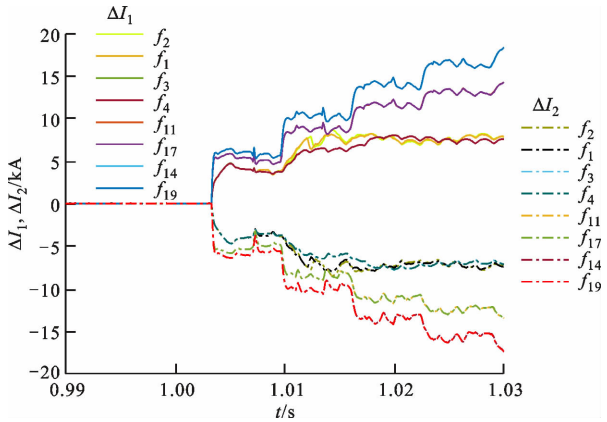


图 9 T 区左侧故障时的 ΔI_1 和 ΔI_2

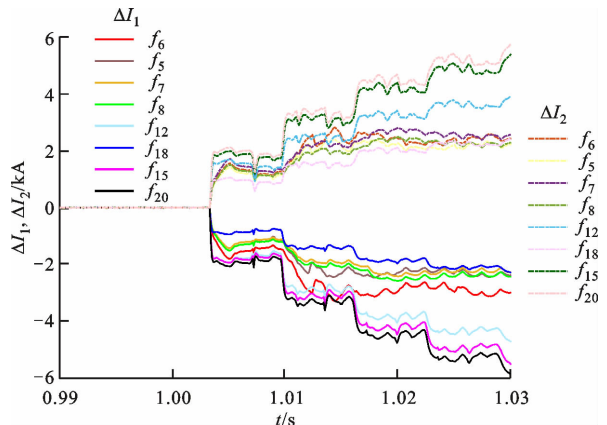


图 10 T 区右侧故障时的 ΔI_1 和 ΔI_2

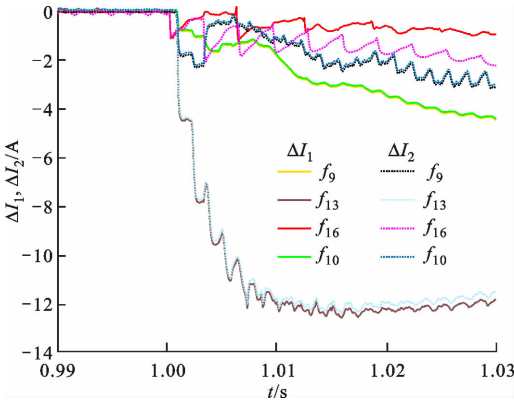


图 11 T 区母线故障时的 ΔI_1 和 ΔI_2

由图 9~11 可以看出:根据 3.1 小节原理能清楚区分故障发生区域;当 T 区左侧或 T 区右侧发生故障时, ΔI_1 与 ΔI_2 异号,检测其故障极后,保护动作,切除故障;当 T 区母线故障时, $\Delta I_1 < 0, \Delta I_2 < 0$,由直流母线保护动作切除故障。

4.3 线路区内外故障仿真

为消除数据异常点对 Hausdorff 距离的影响,分别模拟直流输电线路、T 区母线在区内高阻和区外金属性接地情况下的单双极故障。对 PSCAD 模拟所取的故障点进行数据处理,舍去 Hausdorff 距离最大的 3 个点来减少采样异常点对 Hausdorff 距离算法电流差动保护的影响。后续仿真在进行 Hausdorff 距离算法前,均首先舍去 Hausdorff 距离最大的 3 个点来减少采样值异常点。

将进行过编程处理后的数据进行 Hausdorff 距离运算,可得随时间变化的 Hausdorff 距离,如图 12 所示,图中实线为区内故障,虚线为区外故障。可以看出:当区内发生单双极故障时, K_{pp} 大于保护门槛值 0.7,保护动作切除故障;当区外发生单双极故障时, K_{pp} 小于保护门槛值,保护不动作。

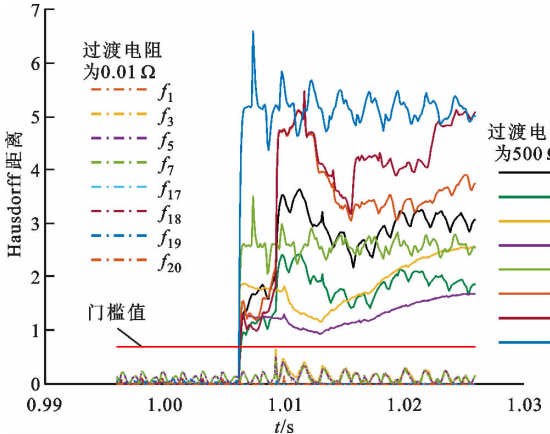


图 12 区内外故障时的 Hausdorff 距离

4.4 线路区故障选极仿真

4.4.1 双极故障仿真结果 不同过渡电阻下,T 区左侧、T 区母线、T 区右侧双极故障时的 Hausdorff 距离如图 13 所示。

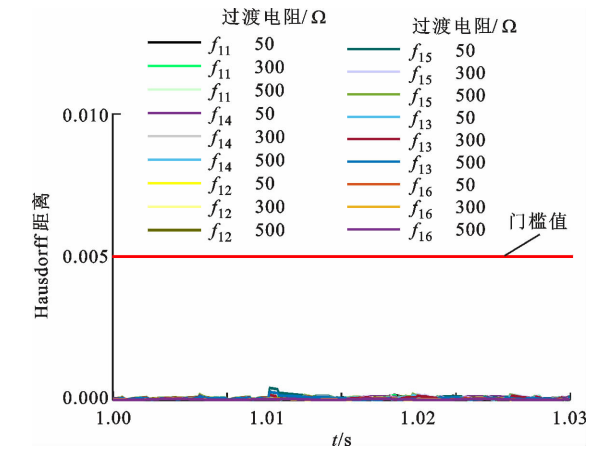


图 13 区内双极故障时的 Hausdorff 距离

根据编程算法可得双极故障的 Hausdorff 距离,如表 2 所示。

表 2 不同过渡电阻下双极故障数据

故障	过渡电阻 /Ω	K_{px}	故障	过渡电阻 /Ω	K_{px}
f_{11}	50	0.000 437	f_{14}	50	0.000 034
	200	0.000 136		200	0.000 021
	500	0.000 059		500	0.000 006
f_{12}	50	0.000 36	f_{15}	50	0.000 437
	200	0.000 34		200	0.000 136
	500	0.000 38		500	0.000 108
f_{13}	50	0.000 06	f_{16}	50	0.000 037
	200	0.000 04		200	0.000 036
	500	0.000 08		500	0.000 059

由表 2 和图 13 可以看出,Hausdorff 距离算法能清楚区分单双极故障,本文 K_{px} 的门槛值设为 0.005,保护程序中设非门,当 K_{px} 小于 0.005 时,双极保护装置动作。

4.4.2 正极区内外高阻故障 T 区左侧、T 区母线、T 区右侧正极在不同过渡电阻下发生区内外故障时,Hausdorff 距离如图 14 所示,图中实线为区内故障,虚线为区外故障。可以看出:当区内发生单极接地故障时(接地电阻为 50~500 Ω), K_{pp} 大于保护门槛值,保护动作切除故障;当区外发生单极接地故障时,应考虑最严重的故障类型——金属性接地,设其接地电阻为 0.01~500 Ω, K_{pp} 小于保护门槛

值,保护不动作。

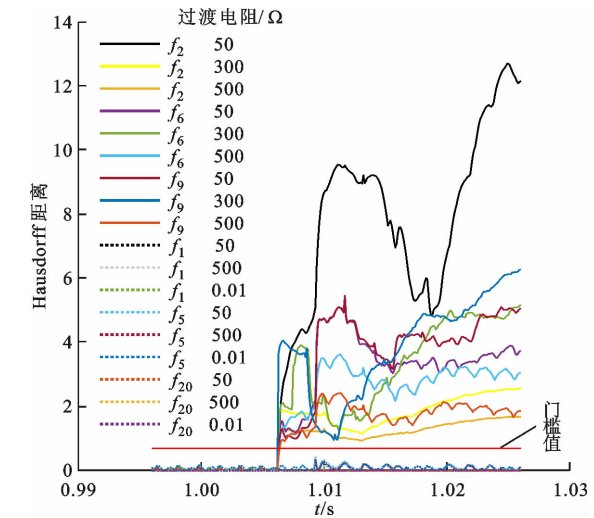


图 14 区内外正极线路故障时的 Hausdorff 距离

因此,可通过判据式(14)(15)得出, f_2 、 f_6 为区内正极故障, f_1 、 f_5 为区外故障。

4.4.3 负极区内外高阻故障 当负极线路发生故障时,用保护判据式(14)(16)区分出在不同过渡电阻下的负极区内外故障,故障保护判据与正极相同,不再赘述。根据编程算法可得负极故障时的 Hausdorff 距离,如表 3 所示。

表 3 不同过渡电阻下负极故障数据

故障	过渡电阻 /Ω	K_{pn}	故障	过渡电阻 /Ω	K_{pn}
f_4	50	12.074	f_3	50	0.564
	300	4.125		300	0.324
	500	2.195		500	0.224
f_8	50	8.916	f_7	50	0.082
	300	3.921		300	0.052
	500	1.921		500	0.047
f_{10}	50	4.936			
	300	3.221			
	500	1.621			

由表 3 可知:在不同的过渡电阻下, f_4 、 f_8 故障时 K_{pn} 大于 0.7, f_3 、 f_7 、 f_{10} 故障时 K_{pn} 小于 0.7。

从 4.2~4.4 小节可以看出,本文所提的保护方案在混合高压直流输电线路和 T 区母线中均可准确识别故障区域线路区内外故障,并进行故障选极。

4.5 T 区母线故障保护动作仿真

对 T 区母线处的数据进行 Hausdorff 距离运算,得到随时间变化的 Hausdorff 距离,如图 15 所示,图中实线为区内故障,虚线为区外故障。可以看

出:当 T 区内发生单双极故障(f_9 、 f_{10} 、 f_{13} 、 f_{16})时, K_{pp} 大于保护阈值 0.7,保护动作切除故障;当 T 区无故障时, K_{pp} 小于保护阈值,保护不动作。

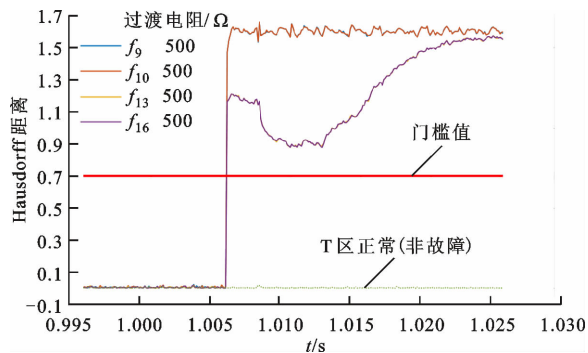


图 15 随时间变化的 Hausdorff 距离

5 结 论

针对传统保护方案的耐过渡电阻能力差、耗时长等缺点,本文利用 Hausdorff 距离算法,提出一种线模电流和正负极电流相结合的针对混合三端直流输电线路的快速差动保护方案。本文结论如下。

(1)本文方案对噪声干扰、异常数据、双端通信延时有一定的降低措施,可以准确、快速辨识故障。

(2)本文方案不需要双端数据的严格同步,采样频率要求不高,仅需达到 10 kHz,易于硬件实现。

(3)本文方案采样数据窗长度为 3 ms,可以实现故障快速识别,减少故障对系统的危害,满足保护速动性的要求。

(4)本文方案可以识别过渡电阻为 500 Ω 的故障,耐过渡电阻能力强,满足保护灵敏性的要求。

(5)本文方案可以实现线路差动保护及 T 区汇流母线差动保护,能可靠、快速保护输电线路及 T 区母线,可应用在昆柳龙三端直流系统中。

参考文献:

- [1] 沈郁,熊永新,姚伟,等. ± 1100 kV 特高压直流输电受端接入方式的综合评估 [J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 195-202.
SHEN Yu, XIONG Yongxin, YAO Wei, et al. Comprehensive evaluation for receiving end connection scheme of ± 1100 kV UHVDC power transmission [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 195-202.
- [2] 林圣,刘健,刘磊,等. 基于控制保护的高压直流输电系统换相失败抑制方法综述 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6045-6058.
LIN Sheng, LIU Jian, LIU Lei, et al. Overview of

control based HVDC system commutation failure suppression methods [J]. Proceeding fo the CSEE, 2020, 40(19): 6045-6058.

- [3] 陈少宇,黄文焘,郇能灵,等. 多端柔性直流配电网高频功率相关性纵联保护方法 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 150-159.
CHEN Shaoyu, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Longitudinal protection method of high frequency power correlation in multiterminal flexible DC distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 150-159.
- [4] 徐政,王世佳,李宁璨,等. 适用于远距离大容量架空线路的 LCC-MMC 串联混合型直流输电系统 [J]. 电网技术, 2016, 40(1): 55-63.
XU Zheng, WANG Shijia, LI Ningcan, et al. A LCC and MMC series hybrid HVDC topology suitable for bulk power overhead line transmission [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 55-63.
- [5] 张芳,杜雪靓,陈堃. MMC-HVDC 系统换流器桥臂短路故障暂态特性分析 [J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 180-189.
ZHANG Fang, DU Xuejing, CHEN Kun. Transient characteristic analysis of converter bridge arm short circuit fault in MMC-HVDC system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 180-189.
- [6] 高淑萍,索南加乐,宋国兵,等. 高压直流输电线路电流差动保护新原理 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 45-49.
GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. A new current differential protection principle for HVDC transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 45-49.
- [7] 高淑萍,索南加乐,宋国兵,等. 利用电流突变特性的高压直流输电线路纵联保护新原理 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 52-56, 86.
GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. A new pilot protection principle for HVDC transmission lines based on current fault component [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 52-56, 86.
- [8] 夏经德,秦瑞敏,钱慧芳,等. 多端线路差动保护改进算法的研究 [J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 140-147.
XIA Jingde, QIN Ruimin, QIAN Huifang, et al. Study on improved algorithm in differential protection of multi-terminal line [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 140-147.

- [9] 侯俊杰, 张国兵, 常仲学, 等. 基于故障分量差动电流极性特征的直流线路故障全过程保护原理 [J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 11-19.
HOU Junjie, SONG Guobing, CHANG Zhongxue, et al. DC line fault protection principle based on polarity characteristics of differential current of fault components for whole process of failure [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 11-19.
- [10] 李小鹏, 田瑞平, 罗先觉, 等. 基于电流突变量比值的高压直流输电线路纵联保护方案 [J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 33-38.
LI Xiaopeng, TIAN Ruiping, LUO Xianjue, et al. Pilot HVDC line protection scheme based on ratio of superimposed current [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 33-38.
- [11] 李一泉, 吴梓亮, 王峰, 等. 基于 Hausdorff 距离算法的自适应线路差动保护方案 [J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7): 175-180, 187.
LI Yiquan, WU Ziliang, WANG Feng, et al. Self-adaptive differential protection scheme for transmission line based on Hausdorff distance algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 175-180, 187.
- [12] 王峰, 黄明辉, 李一泉, 等. 基于改进 Hausdorff 距离算法的发电机大差保护新原理 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 40-47.
WANG Feng, HUANG Minghui, LI Yiquan, et al. New principle of generator-transformer large differential protection based on improved Hausdorff distance [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 40-47.
- [13] 陈乐, 薄志谦, 林湘宁, 等. 基于波形相似度比较的线路快速纵联保护研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5018-5027, 5221.
CHEN Le, BO Zhiqian, LIN Xiangning, et al. Waveform similarity comparison based high-speed pilot protection for transmission line [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5018-5027, 5221.
- [14] 李伟峰, 周金强, 方圣辉. 基于改进 Hausdorff 距离的图像配准方法 [J]. 国土资源遥感, 2014, 26(2): 93-98.
LI Weifeng, ZHOU Jinqiang, FANG Shenghui. Image registration method based on improved Hausdorff distance [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2014, 26(2): 93-98.
- [15] 翁汉琰, 刘华, 林湘宁, 等. 基于 Hausdorff 距离算法的变压器差动保护新判据 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 475-483, 678.
WENG Hanli, LIU Hua, LIN Xiangning, et al. A novel criterion of the transformer differential protection based on the Hausdorff distance algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 475-483, 678.
- [16] 戎子睿, 金能, 林湘宁, 等. 基于 Hausdorff 距离的自适应母线保护新原理 [J/OL]. 电网技术, 2020. [2020-05-18]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1280>.
RONG Zirui, JIN Neng, LIN Xiangning, et al. New principle of adaptive bus protection based on Hausdorff distance [J/OL]. Grid Technology, 2020. [2020-05-18]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1280>.
- [17] 陈星宇. 基于 Hausdorff 距离的主动配电网纵联保护方案 [J]. 自动化技术与应用, 2020, 39(3): 113-117.
CHEN Xingyu. Active distribution network pilot protection scheme based on Hausdorff distance [J]. Techniques of Automation and Applications, 2020, 39(3): 113-117.
- [18] 罗永捷, 李耀华, 李子欣, 等. 全桥型 MMC-HVDC 直流短路故障穿越控制保护策略 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1933-1943.
LUO Yongjie, LI Yaohua, LI Zixin, et al. DC short-circuit fault ride-through control strategy of full-bridge MMC-HVDC systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1933-1943.
- [19] 李海锋, 张坤, 王钢, 等. 并联型多端混合高压直流线路故障区域判别方法 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 173-182, 262.
LI Haifeng, ZHANG Kun, WANG Gang, et al. Fault area discrimination method for parallel multi-terminal hybrid HVDC line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 173-182, 262.
- [20] 赵航, 林湘宁, 喻锐, 等. 基于模量 Hausdorff 距离波形比较的直流输电线路选择性快速保护方案 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6888-6900, 7079.
ZHAO Hang, LIN Xiangning, YU Kun, et al. A high-speed protection scheme for HVDC transmission line based on Hausdorff distance comparison [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6888-6900, 7079.
- [21] 韩啸. 基于 LCC 和 VSC 的混合直流输电技术研究 [D]. 秦皇岛, 河北: 燕山大学, 2016: 28-42.

(编辑 陶晴)