

一种适用于混合三端直流系统的纵联保护方案

高淑萍¹, 沈渠旺^{1†}, 宋国兵²

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

摘要:为提升多端系统的输电可靠性,提出一种基于 Mann-Kendall 检验法的混合三端直流输电线路纵联保护方法.该方法利用 T 接汇流母线三端电流故障分量判定故障发生区域;再利用 Mann-Kendall 检验法对故障区域内线路两端电流的变化趋势进行分析,进而实现故障类型的判别以及故障极的选择;最后,通过 PSCAD/EMTDC 搭建模型并对不同故障情况进行仿真,使用 MATLAB 对所提保护方法进行仿真验证.仿真结果表明:不同故障情况下,所提方法均可在 2.5 ms 内可靠动作,速动性好,并且具有较强的抗噪声干扰能力以及耐过渡电阻能力.

关键词:混合三端直流输电线路;Mann-Kendall 检验法;相模变换;故障电流;继电保护
中图分类号:TM773;TM75 **文献标志码:**A

A Pilot Protection Scheme for Hybrid Three-terminal DC Systems

GAO Shuping¹, SHEN Quwang^{1†}, SONG Guobing²

(1. School of Electrical and Control, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
2. School of Electric Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To improve the transmission reliability of multi-terminal systems, this paper proposes a hybrid three-terminal DC trans-mission line pilot protection method based on the Mann-Kendall test method. The method uses the T-connected bus three terminal current fault component to determine the fault area, then uses the Mann-Kendall test method to analyze the changing trend of the current at both ends of the line in the fault area, and realizes the fault type identification and the fault pole selection. Finally, the model is built in PSCAD/EMTDC and different fault conditions are simulated, and the proposed protection method is verified with MATLAB. Simulation results show that the proposed method can operate reliably within 2.5 ms under various fault conditions, with good quick-action, and has strong resistance to noise interference and transition resistance.

Key words: hybrid three-terminal DC transmission lines; Mann-Kendall test method; phase-mode transformation; electric fault currents; relay protection

* 收稿日期:2022-09-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777166), National Natural Science Foundation of China(51777166);国家自然科学基金国际合作与交流项目(52061635105), National Natural Science Foundation of China (NSFC-UKRI_EPSRC) (52061635105)

作者简介:高淑萍(1970—),女,陕西西安人,西安科技大学副教授,博士

† 通信联系人, E-mail:s1169531794@163.com

基于电网换相换流器的高压直流输电(Line Commutated Converter based High Voltage Direct Current, LCC-HVDC),也被称为传统高压直流输电.其优点主要体现在经济成本相对较低、可快速控制有功功率、传输容量大、输电距离远等方面,但其逆变侧却存在换相失败的问题^[1-3].基于模块化多电平换流器的高压直流输电(Modular Multilevel Converter based High Voltage Direct Current, MMC-HVDC),具有可调节有功、无功功率,不存在换相失败,没有无功补偿问题等优点,但其运行损耗较大、设备成本高、容量相对小、不适合长距离架空线输电^[4].随着中西部新能源的迅速发展,以及对大容量、长距离、可靠高效的输电技术的迫切需求,兼具两者优势的混合直流输电技术应运而生^[5].昆柳龙直流工程便是世界首条混合三端直流输电线路,它的投产标志着我国混合输电技术逐步走向成熟^[6].然而,目前国内对于混合三端输电线路保护的研究依然存在不足,寻找更加快速、可靠的保护方案很有必要.

目前,混合电网的保护仍是以传统保护方案为切入点,文献[7]基于补偿电流提出保护方案,利用故障时分布参数模型的不平衡电流差异,构造保护判据.文献[8]提出一种基于前行波波形特征的保护方案,根据所提取波头的陡度及波尾下降的时间完成故障识别,该方案可快速有效识别雷击故障,可靠性高,然而其对线路两端故障的保护辅助判据仍有待研究.文献[9-10]提出一类单端量保护方案,其利用边界元件对暂态信号的阻滞作用,根据边界元件阻抗幅频特性,构造识别判据.文献[11]提出一种基于最小二乘法的纵联保护方法,通过拟合电容放电阶段线路两端电流信号斜率,识别电流变化趋势,进而判断故障类型.该方案对双端数据同步有一定要求,并且易受噪声干扰.综合上述分析,当前线路保护方案大多将单端量保护作为线路的主保护,其具备快速动作的优点,但却易受过渡电阻的影响且过度依赖边界条件^[12].双端量保护多用于后备保护,主流的双端量保护可分为:纵联保护、电流差动保护以及波形相关性保护.其可靠性高,但对双端通信有一定要求,速动性差.

Mann-Kendall 检验法是一种非参数检验(无分布检验),主要用于气候诊断与预测,对河流、气温、降雨等时间序列的突变点与变化趋势进行分析.因其不受异常值干扰的特点,电力系统中常应用于输电线路运动趋势、断线预测以及输电工程造价研究^[13-14].

当混合输电线路发生故障时,由于不同换流器控制策略及时间尺度的差异,传统保护方案可能不适用,为解决当前混合线路保护方案存在的耐过渡电阻能力弱、抗干扰能力差、保护速动性不足等问题,结合文献[15-17],分析了输电线路不同故障时的故障特征,提出了基于 Mann-Kendall 检验法的混合三端直流输电线路纵联保护方案,该方案利用故障发生后线路两端电流的变化趋势完成故障类型判别以及故障极的选择.并在此基础上对过渡电阻、噪声干扰等因素的影响进行分析.最后利用 PSCAD/EMTDC 搭建仿真模型,输出各种不同故障情况下的故障数据,利用 MATLAB 对故障数据进行处理,用以实现保护算法,对所提保护方法的可靠性与速动性进行仿真验证.仿真结果表明该保护方法具有速动性好、可靠性高的优点,并且具有较强的抗噪声干扰能力及耐过渡电阻能力.

1 混合三端特高压直流输电系统结构

本文针对昆柳龙直流输电系统展开研究,该系统为并联型混合三端直流输电线路,如图 1 所示,其整流站为双 12 脉动 LCC,两逆变站均采用半桥型 MMC 结构,各换流站通过架空线连接并在出口处设置电抗器与滤波器,直流线路电压等级为 ± 800 kV.

与传统直流输电系统不同,三端系统由于存在 T 区,为保证非故障线路不发生误动,在判断故障类型前,需先对故障发生区域进行选择,即故障发生在 T 区左侧、右侧或是 T 区.本文沿用文献[17]所提故障区域选择判据,下文不再赘述.

2 直流线路故障保护原理

2.1 混合输电系统故障特征分析

由于 LCC 换流站两极对称且相对独立,因此,当线路发生双极故障时,可近似等效为两极同时发生单极故障,其故障回路相互独立.下文以线路发生单极接地故障为例,分析故障时电流变化特征.如图 2(a)所示,当直流侧接地时,回路阻抗减小、交流侧电流增大,使得直流侧电流增加并流向故障点,且在低压限流控制作用前继续如图 2(a)所示方向增大.直至电压跌落至低压限流保护门槛值,此时换流器增大触发角以抑制故障电流,最后通过强制移相到 120° 以上,使得整流器变成逆变状态,故障电流在控制过程中呈减小趋势^[1].

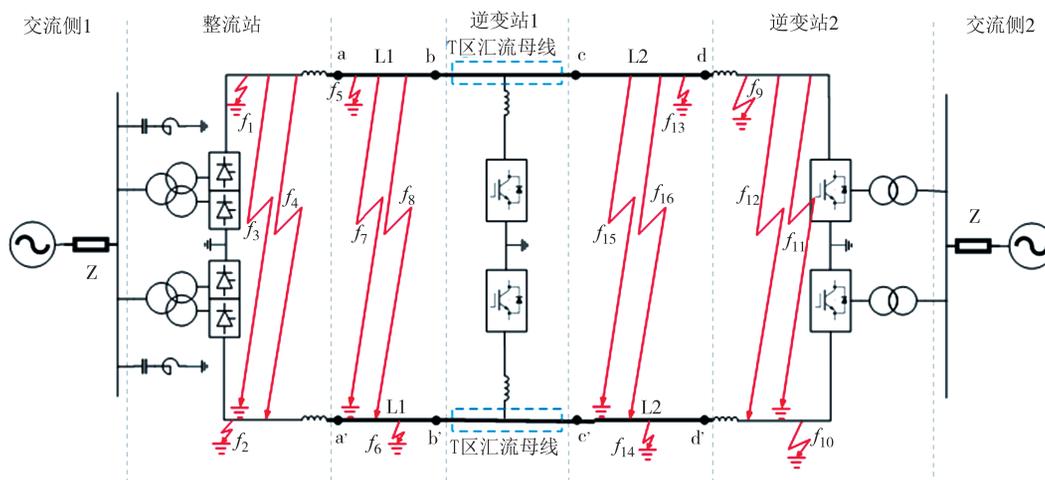


图1 混合三端直流输电系统拓扑图

Fig. 1 Structure of a hybrid three-terminal DC transmission system

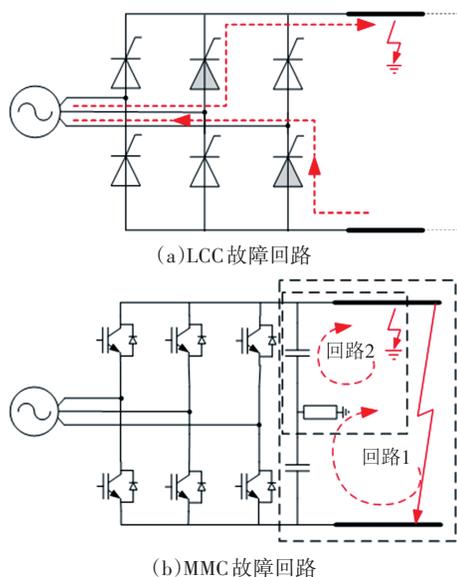


图2 故障初始阶段换流站故障回路

Fig. 2 Fault circuit of the converter station during the initial phase of the fault

对于 MMC 侧,文献[18]对其直流侧发生极间短路故障的暂态过程进行了分析:当故障发生后,换流器进入直流电容放电阶段,该阶段直流侧电容向故障点放电,短路电流上升,直流电压下降;当直流电压低于交流系统线电压时,进入二极管自由换相阶段,在该阶段内二极管自由换向,经过并联电容共同向故障点继续放电;当直流电压降为 0 后,进入二极管自由导通阶段,此阶段所有二极管自然导通,由线路电感续流,电流下降直至与交流系统不控整流的电流相等后,进入不可控整流阶段;发生单极接地故障时,其暂态过程与极间故障类似,却不包含二极管自由导通阶段.尽管两种故障暂态过程存在差异,但其第一阶段均为电容放电,此阶段直流侧电流增加,

并流向故障点.故障回路如图 2(b)所示,回路 1、2 分别为极间故障短路、单极接地故障.

综合上述分析,无论哪一侧直流线路发生故障,故障初始阶段换流站均向故障点馈流,直至保护控制启动.相对于传统直流输电系统,混合系统由于不同换流器控制方式、时间尺度的差异,导致输电线路可利用的有效故障信息受到影响.因此,为准确识别故障,本文选择换流器控制作用前的初始阶段电流进行故障特征的分析.

2.2 故障线路电流特征

结合上节分析,故障发生首段换流器向故障点放电.以 LCC 侧线路为例,如图 3、图 4 所示,取输电线路首末两端电流 I_a 、 I_b ,规定其正方向为母线指向线路, ΔI_a 、 ΔI_b 分别为线路两端电流故障分量.

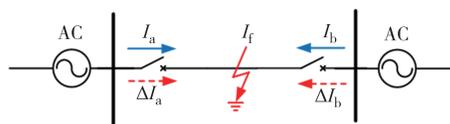


图3 区内故障电流变化

Fig. 3 Current change of internal faults

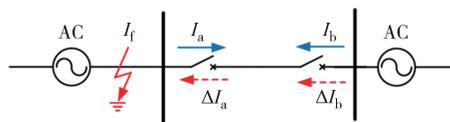


图4 区外故障电流变化

Fig. 4 Current change of external faults

区内故障时,如图 3 所示,故障电流流向故障点,首末两端电流变化方向与参考方向相同,极性为正,区内故障电流仿真图如图 5(a)所示.

区外故障时,如图 4 所示,线路首端电流突变方向与参考方向相反,极性为负;末端电流突变方向与

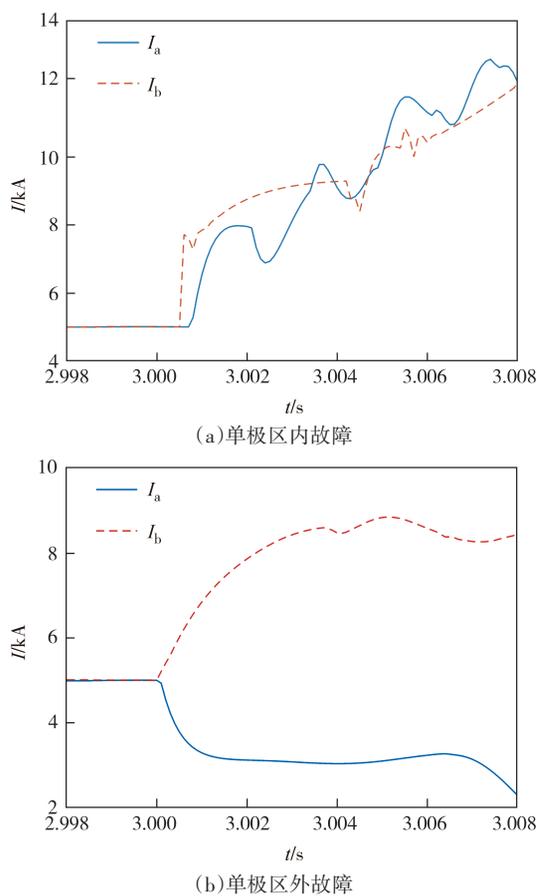


图5 区内、外故障电流图

Fig. 5 Current diagrams for internal and external faults

参考方向相同,极性为正,区外故障电流仿真图如图5(b)所示.

据此,根据线路两端电流变化趋势的差异可识别区内、外故障.

3 基于 Mann-Kendall 检验算法的纵联保护方法

根据故障初始阶段线路电流的变化特征,利用 Mann-Kendall 检验算法描述故障时电流变化趋势,根据变化趋势的差异,构造故障识别判据.

3.1 启动判据

输电线路发生故障时,线路电流将会发生突变.因此,利用保护安装处电流故障分量的变化率来设计启动判据:

$$\begin{cases} K_p = |d(\Delta I_p)/dt| > K_{set} \\ K_n = |d(\Delta I_n)/dt| > K_{set} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ΔI_p 、 ΔI_n 分别为正、负极线路的电流变化量.当线路发生故障时, K_p 或 K_n 将发生远大于0的变化,若判据满足,保护启动.

3.2 相模变换

针对双极输电系统极间存在的电磁耦合作用,常采用 Clarke 变换将线路正负极相域电气量转换为模量来进行分析.如式(2)所示,对直流侧线路电流进行解耦:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: I_p 、 I_n 分别为输电线路正、负极电流; I_0 、 I_1 分别为解耦后的零模与线模电流.

由于零模量通过大地传播且无法在极间形成环流,仅会出现在单极接地故障情况下.同时,数据传输过程中,零模量衰减较为严重.因此,本文选择输电线路线模电流来完成对不同故障类型识别的研究.

3.3 区内外故障识别

由 2.2 节故障特征分析可知,当发生区内故障时,线路首、末端电流变化方向相同;区外故障时,两者变化方向相反.据此,对短时电流数据进行趋势检测,得衡量趋势大小的指标 β .通过分析 β 的正负以及其绝对值的大小,完成对故障的识别.

3.3.1 Mann-Kendall 检验引入

Mann-Kendall 检验法是一种非参数检验(无分布检验),其优点是不要求样本遵从一定的分布,不要求变化趋势为线性.由于其计算简便,不受异常值干扰,现已被广泛应用于时间序列趋势和突变检验中^[19].

Mann-Kendall 检验旨在检验是否拒绝原假设(null hypothesis: H_0),并接受备择假设(alternative hypothesis: H_1).假设 H_0 没有单调趋势, H_1 有单调趋势,最初的假设为: H_0 为真,因此,若要拒绝原假设并接受备择假设,则要求数据超过合理怀疑,即达到一定的置信度.

原假设 H_0 为具有 n 个样本容量的时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n ; 备择假设 H_1 为双边检验,检验的统计量 S 计算为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (3)$$

式中: x_i, x_j 分别为 i, j 时刻的数据,且 $i < j$; sgn 为符号函数.

$$\text{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i = x_j \\ -1, & x_i < x_j \end{cases} \quad (4)$$

统计量 S 计算的实质为:前后两数据差值为正的数量减去差值为负的数量.若 S 为正,则表明后一

部分数据相较于前部数据趋于变大;若为负,则趋于变小.因此,整体数据中少数异常值不影响整体趋势判断,对于坏数据有较强的抗干扰能力.

当样本容量 $n \geq 10$ 时,统计量 S 大致服从正态分布^[19],在不考虑序列存在等值数据点的情况下,标准化后的检验统计量 Z 计算如式(5):

$$Z = \begin{cases} (S - 1) / \sqrt{n(n - 1)(2n + 5) / 18} \\ (S + 1) / \sqrt{n(n - 1)(2n + 5) / 18} \end{cases} \quad (5)$$

对于双边趋势检验,在给定的 α 置信水平上,如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$,表示原假设 H_0 是不可接受的,即所检测的时间序列存在明显的变化趋势, Z 的正负代表上升或下降趋势.以 $\alpha=0.1$ 为例, $Z_{1-\alpha/2}=Z_{0.95}$,查询标准正态分布表 $Z_{0.95}=1.645$,表明当 $Z \geq 1.645$ 时通过了90%的显著性检验,原假设 H_0 不成立, $Z > 0$,时间序列呈上升趋势.

通过查询标准正态分布表,部分统计变量 Z 与置信度对照如表1所示.

表1 置信度对照

Tab. 1 Confidence comparison

$Z_{1-\alpha/2}$	置信度/%	$Z_{1-\alpha/2}$	置信度/%
1.645	90	1.960	95
1.695	91	2.054	96
1.751	92	2.170	97
1.813	93	2.326	98
1.880	94	2.576	99

在 Mann-Kendall 检验中,利用倾斜度 β 来衡量趋势的大小:

$$\beta = \text{media} \left(\frac{x_i - x_j}{i - j} \right) \quad (6)$$

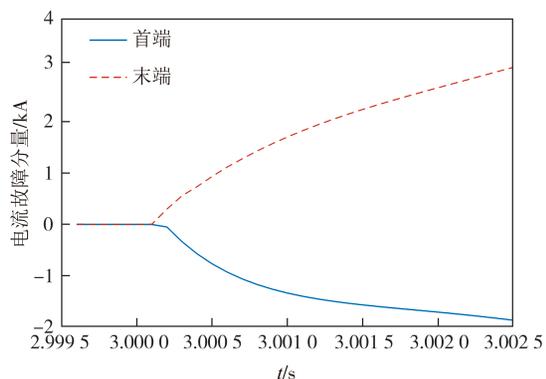
式中:media 表示中位值; β 的正负代表上升或下降趋势,其绝对值的大小表征趋势变化的强弱.

3.3.2 区内外故障识别判据

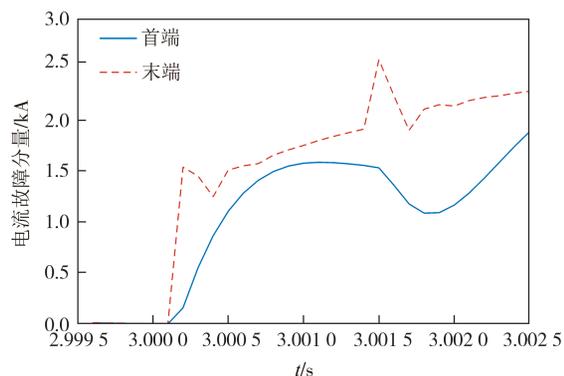
以 LCC 侧正极线路发生接地故障为例,在完成故障区域判别后,截取 3 ms 数据窗内的线模电流,如图6所示,对其进行 Mann-Kendall 趋势检验,得两端数据统计量 Z 以及倾斜度 β ,如表2所示.

表2数据中, $|Z|_{\min}=2.780 > 2.57$,查询表1可知:假设通过了99%的置信度检验,表明线模电流曲线存在明显的单调趋势,利用倾斜度 β 描述电流变化趋势具有较高的可靠性.

本文后续分析中,计算统计变量 Z 仅为验证 Mann-Kendall 检验法运用于线路保护中的可靠性,



(a) 区外故障



(b) 区内故障

图6 正极故障时线路两端线模电流故障分量曲线

Fig.6 The fault component curves of line mode current at both ends of the line during positive fault

表2 Mann-Kendall 检验计算结果

Tab. 2 Mann-Kendall test calculation results

故障类型	首端		末端	
	Z	β	Z	β
区外故障	-6.983	-0.053	6.983	0.110
区内故障	2.779	0.029	5.956	0.042

实际保护算法只需计算倾斜度 β ,利用倾斜度 β 的正负来表示故障时电流的变化方向,利用 β 绝对值的大小揭示幅值变化的大小,以此构建故障识别判据.

输电线路发生区内故障时,线路两端电流极性变化相同,因此线路两端线模电流倾斜度 β 同号;发生区外故障时,线路两端电流极性变化相反,倾斜度 β 异号.据此,可得区内外故障判别参数:

$$\gamma = \beta_h / \beta_l \quad (7)$$

式中: β_h 表示线路首端线模电流倾斜度; β_l 表示线路末端线模电流倾斜度.

当发生区内故障时, γ 为正数;区外故障时, γ 为负数,由此可得线路区内外识别判据:

$$\begin{cases} \gamma > 0, \text{ 区内故障} \\ \gamma < 0, \text{ 区外故障} \end{cases} \quad (8)$$

3.4 故障选极判据

当线路发生单极故障时,电容向故障点放电,故障极电流迅速变化,原则上非故障极电流不发生改变.但由于正负极线路间存在电磁耦合,非故障极线路受互感影响,电流亦会发生改变,但其变化程度远小于故障极;同时,由于本文输电线路为双极对称系统,当发生双极故障时,线路正负极电流幅值变化相同.

据此,利用 β 绝对值大小表征电流突变强度:单极故障时,故障极 β 绝对值远大于非故障极;双极故障时,正负极 β 绝对值相同.定义故障选极系数 η :

$$\eta = \frac{|\beta_{ph}| - |\beta_{nh}|}{|\beta_{ph}| + |\beta_{nh}|} \quad (9)$$

式中: β_{ph} 、 β_{nh} 分别表示正、负极线路近换流站端电流数据的倾斜度.

原则上当发生双极故障时, η 约等于0,但实际输电工程中,线路同侧正、负极电流波动并非完全一致.因此,为避免保护装置误动,增强保护可靠性,保护整定值保留一定裕度.通过大量仿真试验,引入可靠系数 $K=0.1$,保护判据如下:

$$\begin{cases} \eta > 0.1, & \text{区内正极故障} \\ -0.1 \leq \eta \leq 0.1, & \text{区内双极故障} \\ \eta < -0.1, & \text{区内负极故障} \end{cases} \quad (10)$$

3.5 保护方案实现

根据3.1节至3.4节的判据设计,可得混合三端直流输电系统总体保护方案,保护流程如图7所示.

算法具体流程如下:当电流突变量大于所设定值时,保护启动,对启动后的短时窗数据进行相模变换处理,利用T区汇流母线三端线模电流变化差异判断故障发生区域,其后,使用Mann-Kendall检验法处理所采集到的故障区域数据,经计算得故障线路首末两端线模电流倾斜度,以及线路同侧正、负极电流倾斜度,以此判断故障类型及故障极,由此实现混合三端直流输电线路的保护.

4 仿真验证

为测试本文所提方法的可靠性,利用PSCAD/EMTDC搭建混合三端直流输电系统模型,系统参数参照昆柳龙直流输电工程,如表3所示,系统仿真步

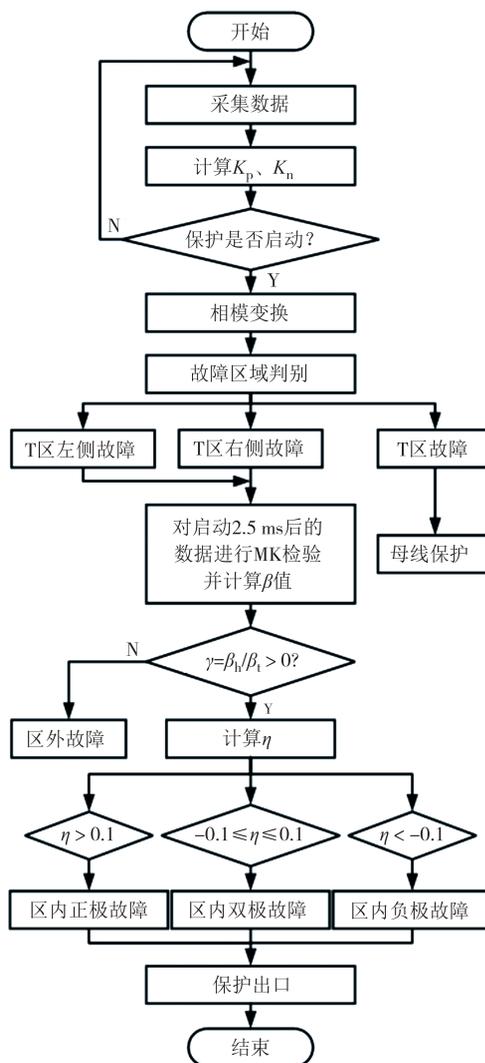


图7 保护方案流程图

Fig. 7 Protection programme flow chart

长为 $10 \mu\text{s}$.

表3 输电系统参数

Tab. 3 Transmission system parameters

换流站	直流侧电压等级/kV	额定容量/MW
LCC	± 800	8 000
MMC1	± 800	3 000
MMC2	± 800	5 000

4.1 故障设置

为验证所提方法能准确识别线路故障,本文设置多种故障 $f_1 \sim f_{16}$,如表4所示.同时,为使方案识别效果最大化,选择最难识别的换流站出口处作为区外故障设置处.

根据模型运行情况,选择3 s时(系统已稳定运行)发生故障,故障持续0.05 s,采样频率为10 kHz,利用MATLAB处理故障数据,验证本文所提方案的

表 4 不同故障位置及其对应故障类型

Tab. 4 Different fault locations and their corresponding fault types

故障位置	故障区域	故障类型	故障极
f_1	整流站侧	区外故障	正极接地
f_2			负极接地
f_3			双极接地
f_4			双极跨接
f_5	整流站侧	区内故障	正极接地
f_6			负极接地
f_7			双极接地
f_8			双极跨接
f_9	逆变站 2 侧	区外故障	正极接地
f_{10}			负极接地
f_{11}			双极接地
f_{12}			双极跨接
f_{13}	逆变站 2 侧	区内故障	正极接地
f_{14}			负极接地
f_{15}			双极接地
f_{16}			双极跨接

准确性与可靠性。

4.2 数据窗的选择

为保证保护方案的可靠性与速动性,合理的数据窗选择尤为重要。长数据窗有助于提高保护可靠性,但其速动性将会受到影响,同时易受噪声干扰;短数据窗虽可提高保护速动性,但其可靠性仍有待商榷。

3.3 节中提到,利用统计变量 Z 的大小检验备择假设的置信度,从而验证 Mann-Kendall 检验法的可靠性,即 Z 值越高,曲线单调趋势越明显,倾斜度 β 对电流信号趋势的描述越准确。针对不同故障位置,以最严重故障情况进行仿真,即区内高阻接地故障(500 Ω 过渡电阻),区外金属性接地故障(0.01 Ω 过渡电阻)。计算检验统计量 Z ,为保证保护方案可靠性与速动性,结合文献[7-21],数据窗分别选择 2 ms、2.5 ms、3 ms,计算结果如表 5 所示,表中 Z_h 、 Z_l 分别表示线路首、末两端线模电流数据的统计变量。

由表 5 可知,不同数据窗下统计量 Z 的绝对值的最小值分别为 1.660、2.686、1.646,通过查询表 1 可知,三种数据窗下计算值均通过了 90% 的置信度检验,具有较高的可靠性。其中,2.5 ms 数据窗数据更是通过了 99% 的置信度检验。因此,为提高保护方案可靠性,下文选取 2.5 ms 数据窗进行分析。

表 5 不同数据窗下的检验统计量

Tab. 5 Test statistics under different data windows

故障类型	2 ms		2.5 ms		3 ms	
	Z_h	Z_l	Z_h	Z_l	Z_h	Z_l
f_1 (0.01)	-6.002	6.002	-4.321	5.348	-2.105	3.925
f_5 (500)	1.660	5.094	2.686	4.367	4.532	3.461
f_9 (0.01)	-6.132	4.704	-3.994	3.106	-1.927	2.034
f_{13} (500)	4.640	5.483	2.919	6.516	1.646	7.386

由于文章篇幅有限,后文所有仿真分析中,统计量 Z 的值不一列举,仅给出 Z 绝对值的最小值,以验证所提算法的可靠性。

4.3 区内、外故障识别

由于 Mann-Kendall 检验具有不要求样本分布、不受异常数据干扰的优点,因此对于电流数据可直接进行计算,无需处理少数异常值,计算结果不受影响。

对本文所设的不同类型故障进行仿真,过渡电阻为 0.01 Ω 。识别故障区域后,对故障线路首末两端线模电流进行 Mann-Kendall 检验运算,可得检验统计量 Z 以及倾斜度 β ,其中, $|Z|_{\min}=2.639 > 2.57$,查询表 1 可知,所有数据均通过了 99% 的置信度检验,趋势检验效果好,利用倾斜度 β 表征趋势变化具有很高的可靠性。倾斜度 β 与判别参数 γ 仿真结果分别如图 8、图 9 所示。

由图 8 可知,由于 $f_1 \sim f_4$ 、 $f_9 \sim f_{12}$ 为区外故障,因此计算所得两端电流倾斜度 β_h 与 β_l 极性相反; $f_5 \sim f_8$ 、 $f_{13} \sim f_{16}$ 为区内故障, β_h 与 β_l 极性相同均为正。

结合图 8、图 9 可知,所提保护方法可以准确识别区内、外故障, β_h 与 β_l 异号, $\gamma < 0$,判定线路发生区

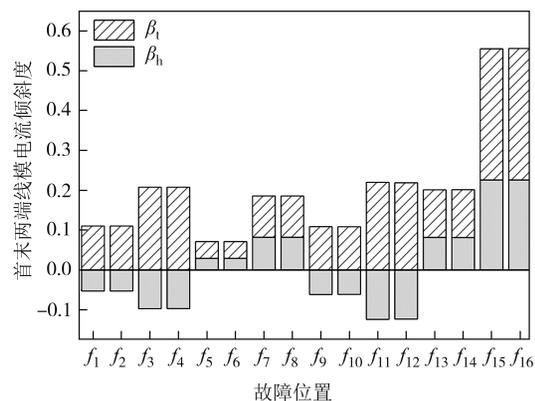


图 8 不同故障时的线模电流倾斜度

Fig. 8 Tilt of the line mode current at different faults

外故障,保护不动作; β_h 与 β_l 同号, $\gamma > 0$,判定线路发生区内故障,保护开启动作。

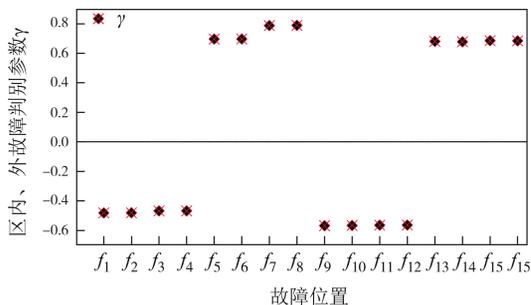


图9 不同故障下的判别参数值

Fig. 9 Values of discriminatory parameters under different faults

当输电线路发生故障时,不同的过渡电阻会对保护方法的准确性造成较大影响,因此,为测试保护方法的准确性及其耐过渡电阻能力,设置50~500Ω的电阻对保护方案进行验证.经计算得 $|Z|_{\min}=1.845 > 1.813$,查询表1可知,所有数据均通过了93%的置信度检验,倾斜度 β 的可靠性高,不同故障情况下判别结果如表6、图10所示。

表6 不同过渡电阻下整流侧故障判别结果

Tab. 6 Fault identification results of rectifier side under different transition resistance

故障位置	过渡电阻/Ω	β_h	β_l	γ	定位
f_1	50	-0.044	0.086	-	区外故障
	300	-0.023	0.043	-	区外故障
	500	-0.016	0.030	-	区外故障
f_2	50	-0.044	0.086	-	区外故障
	300	-0.023	0.043	-	区外故障
	500	-0.016	0.030	-	区外故障
f_3	50	-0.084	0.167	-	区外故障
	300	-0.045	0.084	-	区外故障
	500	-0.032	0.060	-	区外故障
f_5	50	0.024	0.034	+	区内故障
	300	0.013	0.021	+	区内故障
	500	0.009	0.016	+	区内故障
f_6	50	0.024	0.034	+	区内故障
	300	0.013	0.021	+	区内故障
	500	0.009	0.016	+	区内故障
f_7	50	0.062	0.089	+	区内故障
	300	0.029	0.046	+	区内故障
	500	0.019	0.033	+	区内故障

随着过渡电阻的增大,线模电流曲线倾斜度将会减小,但电流突变方向并不会发生改变,如表6所示,对于不同的过渡电阻, $f_1 \sim f_3$ 故障下 β_h 与 β_l 极性相

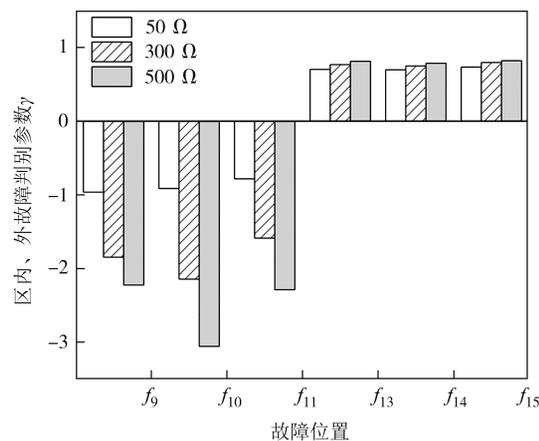


图10 不同过渡电阻下逆变器站2侧故障判别参数值

Fig. 10 The fault identification parameter values of the second inverter station under different transition resistance

反,仍满足区外故障识别判据; $f_5 \sim f_7$ 故障下 β_h 与 β_l 极性相同,仍满足区内故障识别判据.同样地,由图10可知, $f_9 \sim f_{11}$ 故障时 $\gamma < 0$,满足区外故障识别判据; $f_{13} \sim f_{15}$ 故障时 $\gamma > 0$,满足区内故障识别判据.在不同过渡电阻情况下,保护均能可靠动作。

综合本节仿真分析,本文所提保护方案能够有效识别区内外故障,避免误动,且具有较强的耐过渡电阻能力。

4.4 故障极识别

在完成故障类型判别后,对所有区内故障数据进行仿真,以验证故障选极判据的正确性,仿真结果如图11所示。

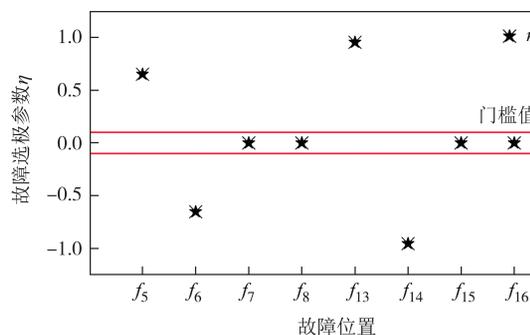


图11 不同区内故障下的选极系数值

Fig. 11 Values for pole selection parameters under different internal faults

由图11可知, f_5, f_{13} 故障下判别参数 η 均大于0.1,通过式(10)可知为正极故障.同样地, f_6, f_{14} 故障下判别参数 η 均小于-0.1,为负极故障; f_7, f_8, f_{15}, f_{16} 故障下判别参数 η 均在-0.1~0.1,为双极故障.本文所提方案能够正确完成故障选极。

为测试过渡电阻对选极判据的影响,下文对不同故障设置50~500Ω的过渡电阻并进行仿真验证。

随着过渡电阻的增加,故障极与非故障极电流的 β 值同时降低,这便使得过渡电阻对选极系数的影响较小,如表 7 所示,不同过渡电阻条件下, f_5, f_{13} 故障时 η 均大于 0.1,满足正极故障选极判据; f_6, f_{14} 故障时 η 均小于-0.1,满足负极故障选极判据; f_7, f_8, f_{15}, f_{16} 故障时 η 均在-0.1~0.1,满足双极故障选极判据.识别结果依然准确.

表 7 不同过渡电阻下选极系数值

Tab. 7 Values of pole selection parameters for different transition resistances

故障	过渡电阻/ Ω	η	故障	过渡电阻/ Ω	η
f_5	50	0.650	f_{13}	50	0.974
	300	0.658		300	0.999
	500	0.666		500	0.985
f_6	50	-0.651	f_{14}	50	-0.978
	300	-0.659		300	-0.989
	500	-0.667		500	-0.969
f_7	50	-2.707E-05	f_{15}	50	-1.280E-05
	300	-1.437E-05		300	-7.690E-06
	500	5.499E-05		500	-1.610E-07
f_8	50	-2.037E-06	f_{16}	50	7.059E-06
	300	-1.157E-05		300	1.362E-05
	500	5.772E-05		500	1.943E-05

结合 4.3 节与 4.4 节仿真分析,可得线路故障下保护动作情况:当发生区外故障时,保护不动作;发生区内单极故障时,故障极保护可靠动作,且非故障极不发生误动;区内双极故障时,双极线路保护均能可靠动作.

4.5 噪声干扰影响

在实际线路运行过程中,由于传感器误差以及不同电子器件之间的干扰,使得信号产生不同程度的噪声.为验证本文所提保护方案的抗干扰能力,对仿真所得电流信号掺入不同信噪比的高斯白噪声干扰,并对其进行算法检验.计算结果如表 8 所示,表中 Z_h, Z_l 分别表示线路首、末两端线模电流数据的统计变量.

由表 8 可知, $|Z_{l_{\min}}|=2.032 > 1.96$,查询表 1 可知,所有故障情况下,假设均通过了 95% 的置信度分析,可靠性高;同时,所有判别参数均满足保护判据,保护正常动作.可见,本文所提方案能在 20 dB 噪声干扰下仍识别故障,具有较强的抗干扰能力.

4.6 与其他方法对比

文献[11]提出一种基于拟合电流斜率特征的纵

表 8 不同噪声下的判别参数结果

Tab. 8 Results of identification parameters with different noise

故障	信噪比/dB	Z_h	Z_l	γ	η
f_1	40	-6.936	6.983	-0.505	—
	20	-5.582	6.236	-0.609	—
f_4	40	-6.890	6.983	-0.466	—
	20	-5.862	6.796	-0.509	—
f_5	40	2.592	5.956	0.710	0.678
	20	2.125	4.367	0.791	0.556
f_8	40	2.919	6.843	0.791	-0.013
	20	2.032	6.609	0.690	0.090
f_9	40	-6.609	6.843	-0.566	—
	20	-4.881	5.862	-0.605	—
f_{12}	40	-6.750	6.890	-0.587	—
	20	-5.161	6.236	-0.576	—
f_{13}	40	6.750	6.329	3.308	0.955
	20	5.629	4.648	2.953	0.956
f_{16}	40	6.843	6.423	2.602	-0.001
	20	6.282	5.255	3.323	0.007

联保护方法,该方法同样利用区内、外故障时线路两端电流突变方向的差异构造保护判据,引入最小二乘法,以首端数据为 x ,末端数据为 y ,对 (x, y) 进行曲线拟合,通过比较两者相关性的正负来对线路故障进行识别,仿真结果如表 9 所示,表中 k 表示拟合曲线斜率.结果表明,文献[11]所提方法能够正确识别故障.

表 9 基于拟合斜率特征方法的识别数据

Tab. 9 Experimental data based on fitted current slope characteristics method

故障	信噪比/dB	k	R^2	定位
f_1	—	-0.928	0.964	区外故障
	40	-0.922	0.965	区外故障
	20	-1.144	0.900	区外故障
f_5	—	0.651	0.843	区内故障
	40	0.658	0.853	区内故障
	20	0.764	0.766	区内故障
f_9	—	-1.065	0.979	区外故障
	40	-1.089	0.977	区外故障
	20	-1.065	0.722	区外故障
f_{13}	—	0.690	0.593	区内故障
	40	0.679	0.583	区内故障
	20	0.658	0.471	区内故障

运用曲线拟合时,常使用相关系数 R^2 来检验拟合优度, R^2 值越接近 1,表示拟合效果越好,可靠性也越高.由表 9 可知,对于故障 f_{13} ,文献[11]所提方法拟

合优度较低,且随着噪声干扰的加入,拟合优度下降明显,方法可靠性降低.经4.3节至4.5节验证,本文所提方案在不同过渡电阻及噪声干扰情况下,均通过了90%的置信度检验,表明所提方案灵敏性更好,可靠性更高.

同时,文献[11]所提方案取双端电流数据进行计算,对通信同步要求较高,本文所提方案仅需传递经正负极性,速动性更高,且更易于硬件实现.

5 结论

本文以混合三端直流输电线路为研究对象,分析了其故障时的相关特征,提出了一种基于Mann-Kendall检验法的线路保护新原理,并利用PSCAD搭建仿真模型,使用MATLAB对保护方法进行验证,经仿真分析结论如下:

1)本文利用Mann-Kendall检验法对故障时的电流进行趋势检验,经验证,使用倾斜度 β 来衡量趋势的大小可靠性高,因此,可根据倾斜度的正负及大小实现故障判别.

2)该方案仅需2.5 ms短时窗数据便可完成故障识别,满足速动性要求,并且数据窗存在进一步缩小的可能.

3)该方案采样频率仅为10 kHz,同时,线路两端只需传递经计算后的倾斜度,无须双端数据同步,易于硬件的实现.

4)该方案可耐受20 dB噪声干扰以及500 Ω 的过渡电阻,且不受异常数据影响,抗干扰能力强,满足保护灵敏性要求.

参考文献

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004: 1-17.
ZHAO W J, High voltage direct current transmission engineering technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 1-17.(in Chinese)
- [2] HE J B, YANG Q C, WANG Z. On-line fault diagnosis and fault-tolerant operation of modular multilevel converters a comprehensive review[J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2020, 4(4): 360-372.(in Chinese)
- [3] 赵成勇. 混合直流输电[M]. 北京:科学出版社,2014:1-14.
ZHAO C Y. Hybrid high voltage direct current transmission system [M]. Beijing: China Science Publishing& Media Ltd, 2014: 1-14.(in Chinese)
- [4] 徐政,柔性直流输电[M]. 北京:机械工业出版社,2017:1-9.
XU Z, Flexible high voltage direct transmission system [M]. Beijing: China Machine Press, 2017: 1-9.(in Chinese)
- [5] 王永平,赵文强,杨建明,等. 混合直流输电技术及发展分析[J]. 电力系统自动化,2017,41(7):156-167.
WANG Y P, ZHAO W Q, YANG J M, et al. Hybrid high-voltage direct current transmission technology and its development analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 156-167. (in Chinese)
- [6] 郭华,王德付,陈凌云,等. 昆柳龙直流不同运行方式下广西电网安全稳定分析[J]. 电力科学与工程,2019,35(8):67-72.
GUO H, WANG D F, CHEN L Y, et al. Safety and stability analysis of Guangxi power grid under different operation modes of Kun-Liu-Long HVDC [J]. Electric Power Science and Engineering, 2019, 35(8): 67-72.(in Chinese)
- [7] CHU X. Unbalanced current analysis and novel differential protection for HVDC transmission lines based on the distributed parameter model[J]. Electric Power Systems Research, 2019, 171: 105-115.
- [8] 陈森,贾科,王康达,等. 基于前行波波形特征的柔性直流输电线路单端行波保护[J]. 电网技术,2022,46(6):2386-2393.
CHEN M, JIA K, WANG K D, et al. Single terminal traveling wave protection for flexible HVDC transmission lines based on forward wave shape information [J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2386-2393. (in Chinese)
- [9] GAO S P. A novel whole-line quick-action protection principle for HVDC transmission lines using one-end voltage[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 65: 262-270.
- [10] SONG G B, CHU X, GAO S P, 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.
- [11] 张鑫宇,樊艳芳,马健,等. 基于拟合电流斜率特性的柔性直流配电路纵联保护方法[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(18):128-136.
ZHANG X Y, FAN Y F, MA J, et al. Pilot protection method for flexible DC distribution lines based on fitted current slope characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 128-136. (in Chinese)
- [12] 杨赛昭,向往,文劲宇. 架空柔性直流电网线路故障保护综述[J]. 中国电机工程学报,2019,39(22):6600-6617.
YANG S Z, XIANG W, WEN J Y. Review of DC fault protection methods for the MMC based DC grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6600-6617. (in Chinese)

- [13] 杨金显,范耀辉. 基于MIMU的Mann-Kendall输电线路运动趋势及断线预测[J]. 软件导刊,2020,19(1):135-139.
YANG J X, FAN Y H. Trend and disconnection prediction of MIMU-based Mann-Kendall transmission line motion [J]. Software Guide, 2020, 19(1): 135-139. (in Chinese)
- [14] 刘尚科. 基于Mann-Kendall法的电网输变电工程造价趋势研究[J]. 宁夏电力,2018(3):68-72.
LIU S K. Research on the cost trend of power grid transmission and transformation engineering based on Mann-Kendall method [J]. Ningxia Electric Power, 2018(3): 68-72. (in Chinese)
- [15] 束洪春,代月,安娜,等. 基于线性回归的柔性直流电网纵联保护方法[J]. 电工技术学报,2022,37(13):3213-3226.
SHU H C, DAI Y, AN N, et al. Pilot protection method of flexible DC grid based on linear regression [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3213-3226. (in Chinese)
- [16] 高淑萍,沈渠旺,宋国兵,等. 采用余弦相似度的混合三端直流输电线路保护原理[J]. 西安交通大学学报,2022,56(9):92-103.
GAO S P, SHEN Q W, SONG G B, et al. Cosine similarity-based protection of hybrid three-terminal DC transmission line [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(9): 92-103. (in Chinese)
- [17] 高淑萍,曾子璇,宋国兵,等. 一种适用于混合三端直流系统的差动保护方案[J]. 西安交通大学学报,2021,55(1):17-26.
GAO S P, ZENG Z X, SONG G B, et al. A differential protection scheme for hybrid three-terminal DC system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(1): 17-26. (in Chinese)
- [18] 李斌,何佳伟. 柔性直流配电系统故障分析及限流方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(12):3026-3036.
LI B, HE J W. DC fault analysis and current limiting technique for VSC-based DC distribution system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3026-3036. (in Chinese)
- [19] 万浩,齐明臣,李红梅. 雅砻江流域降水时空变化特征分析[J]. 水资源开发与管理,2022,8(4):34-42.
WAN H, QI M C, LI H M. Analysis of temporal and spatial variation characteristics of rainfall in Yalong River Basin [J]. Water Resources Development and Management, 2022, 8(4): 34-42. (in Chinese)
- [20] 张应华,宋献方. 水文气象序列趋势分析与变异诊断的方法及其对比[J]. 干旱区地理,2015,38(4):652-665.
ZHANG Y H, SONG X F. Techniques of abrupt change detection and trends analysis in hydroclimatic time-series: advances and evaluation [J]. Arid Land Geography, 2015, 38(4): 652-665. (in Chinese)
- [21] 高淑萍,邵明星,宋国兵,等. 一种适用于中压直流配电网单极故障的保护方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2021,48(8):78-89.
GAO S P, SHAO M X, SONG G B, et al. A new type of protection method suitable for single-pole fault in medium voltage DC distribution network [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(8): 78-89. (in Chinese)