

采用余弦相似度的混合三端 直流输电线路保护原理

高淑萍¹, 沈渠旺¹, 宋国兵², 王建新¹, 侯李祥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: 为提高混合三端直流输电线路保护的可靠性、选择性、速动性和灵敏性,根据输电线路发生故障时电压和电流的变化差异,提出了一种基于余弦相似度算法的线路保护原理。该原理利用输电线路T区三端电流暂态分量构成故障区域选择判据;再将故障线路单端电流、电压故障分量进行数据标准化处理,利用两者余弦相似度的差异,完成区内、外故障及故障极识别。使用PSCAD/EMTDC搭建混合三端高压直流输电线路模型,运用Matlab对所提保护原理进行仿真验证。仿真结果表明:所提保护原理在不同故障情况下,均可在3 ms内识别故障,可靠性高、速动性好;可耐受500 Ω 过渡电阻,具有较强的耐过渡电阻能力;在20 dB噪声情况下,依旧可以识别故障,具有较强的抗噪声干扰能力。

关键词: 混合三端直流输电线路;余弦相似度;故障分量;故障极识别;线路保护

中图分类号: TM773;TM75 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202209010 **文章编号:** 0253-987X(2022)09-0092-12



OSID 码

Cosine Similarity-Based Protection of Hybrid Three-Terminal DC Transmission Line

GAO Shuping¹, SHEN Quwang¹, SONG Guobing², WANG Jianxin¹, HOU Lixiang¹

(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 protection reliability, selectivity, rapidness and sensitivity of the hybrid three-terminal DC transmission line, this paper proposes a line protection principle based on the cosine similarity algorithm according to the voltage and current fault characteristics of the transmission line. The principle uses the transient current components of three terminals in T-area to form the fault area selection criterion to realize fault area identification. Then data normalization is performed on the single-end current-voltage fault component of the fault line, and the difference in cosine similarity between the two is used to identify internal or external fault and fault pole. A hybrid three-terminal HVDC transmission line model is established in PSCAD/EMTDC, and the proposed protection principle is simulated and verified in MATLAB. The simulation results show that the proposed protection principle can identify faults within 3 ms under different fault conditions, with high reliability and good rapidity; it can withstand 500 Ω transition resistance, with strong resistance to transition resistance; it can still identify faults

收稿日期: 2022-01-21。 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);国家自然科学基金国际合作与交流资助项目(52061635105);陕西省教育厅自然科学专项一般资助项目(17JK0503)。

网络出版时间: 2022-05-18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220518.1344.002.html>

under 20 dB noise, with strong resistance to noise interference.

Keywords: hybrid three-terminal DC transmission line; cosine similarity; transient fault component; fault pole identification; line protection

混合直流输电是指将以不同换流器为基础的直流输电系统取长补短,通过一定的接线方式或特定的拓扑结构相连接所形成的新型直流输电系统,当前在直流输电领域中,混合多端直流输电技术得到普遍应用。于2020年12月正式投运的昆柳龙直流工程便是世界首个LCC-MMC特高压混合多端直流输电系统,其具备电网换相换流器(LCC)低成本大容量输电、可快速控制有功功率的优点;同时如模块化多电平换流器(MMC)一般,无无功补偿、换相失败等问题^[1-7]。当线路检测出故障时,不同于传统单一输电系统,混合系统中不同换流站清障方式不同,这便需要系统能准确识别故障类型,深入研究适应于混合多端系统的保护新原理很有必要。

当前国内外学者主要以传统直流输电线路保护为切入点来进行研究,但是由于混合直流输电系统拓扑结构的特殊性,保护方案存在灵敏度低、耐过渡电阻能力弱等问题,因此需要设计准确度更高的保护方案。文献[8]所提出的Hausdorff距离算法是以两端电流为依据而形成的差动保护方案,该方案在具体确定内外故障方面有很多优势,但是在整定门槛值方面存在缺点。文献[9]推导了线路故障时的行波表达式,分析了不同故障类型的行波相位特征,基于Morlet小波相位设计了保护方案,该方案考虑了汇流母线这一结构,但是存在所需采样频率过高的问题。文献[10]提出一种基于时域电压比的单端保护方案,该方案无需对行波故障特征进行提取,同时有效地削弱了过渡电阻的影响,但是受T区影响较大。文献[11]所提出的纵联保护方案是以电流能量比为依据而形成的,但是此方案要求两侧边界元件具备统一特性。文献[12]利用不同故障位置线模电压衰减特性不一致的特点构造未失真因子,进而根据线路两侧线模电压的未失真因子比值特性识别区内、外故障,但是其对通信同步要求较高,需配置GPS同步装置。

综上,目前混合多端直流输电线路多选择行波保护、差动保护来设计线路保护方案,但是由于行波保护易受到波头信息提取失真、高过渡电阻接地以及线路特殊拓扑结构(如T区)的影响,保护可靠性降低。同时差动保护为避免分布电容的影响需要在线路两侧确定构造边界条件,可靠性与边界条件相

关,以及需要运用到双端通信,存在较为复杂的算法,从而影响保护的速动性。

余弦相似度算法因具有受幅值影响小、评估精确性高等特点,被广泛应用于电力系统。文献[13]提出一种用户负荷形态组合分析方法,但是由于余弦相似度只考虑了向量的方向而忽略了其大小,因此尽管该方案对于用电轨迹趋势识别能力更强,但其并不符合欧式距离类内紧凑的聚类准则。文献[14]提出了一种适用于配电混合线路故障区段定位的方法,使用余弦相似度反映暂态相电流相位谱的相似度,同时配合欧式距离,弥补其无法直观反映相电流幅值谱数值上的差异的问题。

相较于在电力系统其他领域的应用缺陷,余弦相似度因其不考虑向量大小,而只考虑它们方向的特点,常被用于电力系统故障检测,以减小幅值变化对识别准确性的影响。文献[15]利用单端线模电流提出了一种基于余弦相似度的环状柔性直流输电网区内外故障保护方法,该方案不受过渡电阻影响。文献[16]通过比较柔性直流配电系统中暂态电流的波形的相似度来实现线路保护,选择余弦相似度建立判据,可更高效获得多频段特征。文献[17]利用双端电流突变量的差异,基于余弦相似度提出一种直流电网线路纵联保护方法。

混合直流输电系统发生故障时,由于线路两端采用不同的换流器件,其各自所采用的控制原理不同、故障暂态过程所持续的时间也不一致,将传统保护算法直接应用于混合直流输电系统,保护方案可靠性将受到影响。为了解决目前混合直流输电线路保护方案存在的一些问题,结合文献[15-25],本文以昆柳龙混合三端直流输电系统为原型,运用PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真软件,建立混合三端直流输电系统的仿真模型,模拟不同线路故障情况。基于该模型,分析了故障线路电流与电压的暂态特征,提出了以余弦相似度算法为基础的输电线路保护原理。通过Matlab处理故障数据,对保护原理进行仿真验证,根据仿真实验结果,证明所提保护原理可快速识别线路故障。

1 混合三端特高压直流输电系统结构

本文以昆柳龙直流工程为原型,运用PSCAD/

EMTDC 电磁暂态仿真软件,建立±800 kV 并联型混合三端直流输电系统的仿真模型,其拓扑结构如图 1 所示,双 12 脉动单元组成 LCC 整流站,两受端均由模块化多电平换流器(MMC)构成逆变站,输电线路全长为 1 452 km,L1 线路长度为 932 km,L2 线路长度为 520 km。图 1 中 a 、 b 、 c 、 d 、 a' 、 b' 、 c' 、 d' 分别为输电线路正、负极保护安装处。

为了测试所提保护原理能否达到线路保护所需要求,本文设置多种类型故障加以验证,各故障对应类型见表 1。

2 直流线路故障保护原理

2.1 输电系统故障分析

由于 LCC 端两极采用相同的换流单元,两极相对独立,因此当双极线路同时发生接地故障时,相当于单极线路各自发生故障,各极形成独立的故障回路;当线路两极发生短路故障时,其故障特征与发生双极接地故障类似。由此,下文以正极接地故障为例进行分析。如图 2(a)所示,LCC 直流侧线路接地时,直流回路阻抗变小,换流阀及交流侧电流急剧增大,因此导致直流侧电流增加并流向故障位置,线路电压迅速降低。同时由于晶闸管单向导通的特性,在电压到达低压限流保护所设门槛之前,线路电流将始终沿图 2(a)所示方向增大。直至保护控制启动,整流站转换为逆变状态,故障电流减小^[1]。

同样地,MMC 换流站双极亦为对称结构,以直流线路正极接地故障为例进行分析。如图 2(b)所示,当故障发生时,MMC 子模块电容向故障点急剧放电。在故障初始阶段,子模块未能及时闭锁,仍按照原数量进行投切,此时可等效为二阶振荡放电回

表 1 故障类型一览表

Table 1 List of fault types

故障位置	故障区域	故障类型	故障极
f_1	LCC 侧	区外故障	正极接地
f_2	LCC 侧	区外故障	负极接地
f_3	LCC 侧	区外故障	双极接地
f_4	LCC 侧	区外故障	双极跨接
f_5	LCC 侧	区内故障	正极接地
f_6	LCC 侧	区内故障	负极接地
f_7	LCC 侧	区内故障	双极接地
f_8	LCC 侧	区内故障	双极跨接
f_9	T 区汇流母线		正极接地
f_{10}	T 区汇流母线		负极接地
f_{11}	T 区汇流母线		双极接地
f_{12}	T 区汇流母线		双极跨接
f_{13}	MMC2 侧	区外故障	正极接地
f_{14}	MMC2 侧	区外故障	负极接地
f_{15}	MMC2 侧	区外故障	双极接地
f_{16}	MMC2 侧	区外故障	双极跨接
f_{17}	MMC2 侧	区内故障	正极接地
f_{18}	MMC2 侧	区内故障	负极接地
f_{19}	MMC2 侧	区内故障	双极接地
f_{20}	MMC2 侧	区内故障	双极跨接

路。通过分析得该阶段特征为电容电压迅速下降,直流线路故障电流迅速增加,电流方向如图 2(b)所示。直至保护检测到故障,闭锁子模块以隔离故障电流^[4]。

通过上述分析可知,无论 LCC 还是 MMC,电

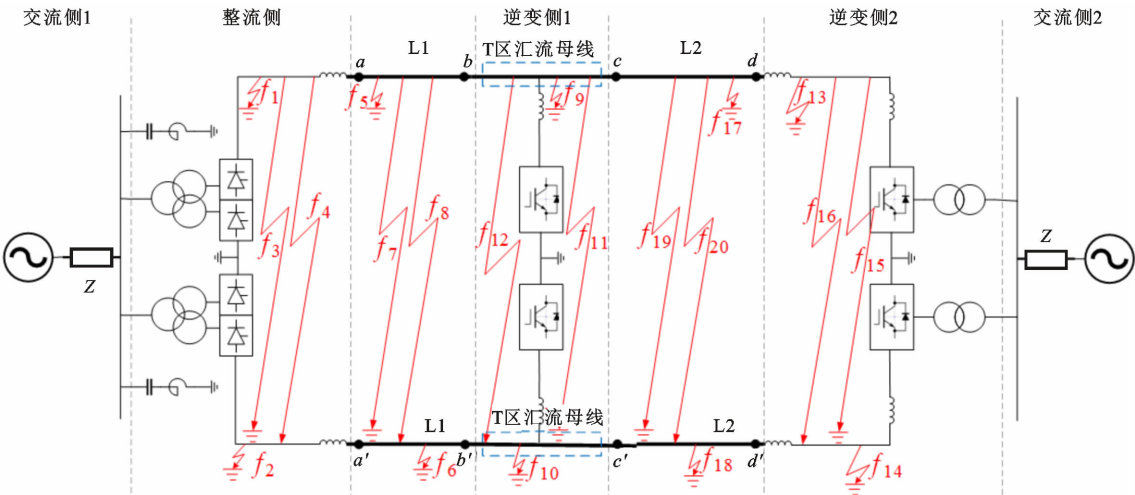


图 1 混合三端直流输电系统拓扑图

Fig. 1 Hybrid three-terminal DC transmission system topology

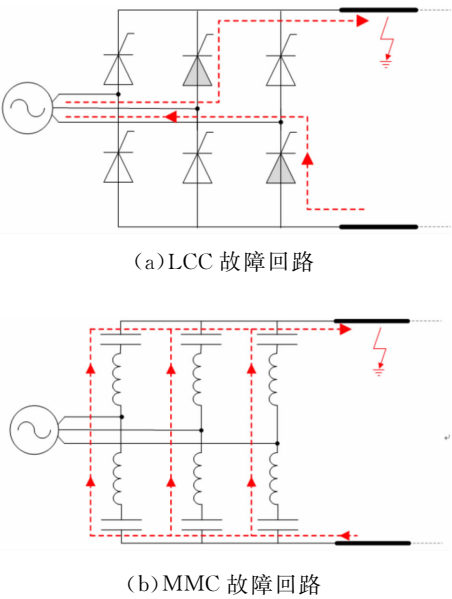


图 2 各换流站故障初始阶段故障回路
Fig. 2 Fault circuits in the initial phase of each converter station fault

流故障分量在故障初始阶段皆由换流站指向故障点。当控制策略作用于故障线路时,由于不同换流器控制方案、作用时间的不一致,相对于传统的高压直流输电系统以及柔性直流输电系统,混合直流输电系统可利用的故障信息将受到一定影响。因此本文选择换流站控制作用前的暂态分量来进行研究。

2.2 故障区域的识别

由于并联型混合三端直流输电系统中 T 区这一特殊拓扑结构的存在,因此需先对故障区域进行识别,结合 2.1 节电流故障分量分析,以 T 接母线保护安装处三端暂态电流故障分量为研究对象,研究其不同区域故障的规律,用以构成输电线路区域故障判据。

混合三端直流输电线路拓扑图如图 3 所示,以正极线路为例,未发生故障运行条件下,T 区三端电流分别为 I_1 、 I_2 、 I_3 ,选定正方向为母线指向线路。

线路故障时,故障等效电路如图 4 所示,其中: Z_1 、 Z_2 分别为 T 区左、右两侧 L1、L2 线路的等效阻抗; ΔI_1 、 ΔI_2 、 ΔI_3 分别为故障后 T 接母线三端的电流突变量。

当左侧 L1 线路发生故障时,由叠加定理可得其故障等效回路,如图 4(a)所示,此时故障电流分量 ΔI_1 方向与设定电流参考方向相反,则极性为负,故障电流分量 ΔI_2 与 ΔI_3 方向与设定电流参考方向相同,则极性为正。

当右侧 L2 线路发生故障时,如图 4(b)所示,此

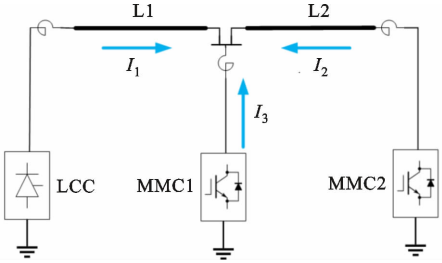
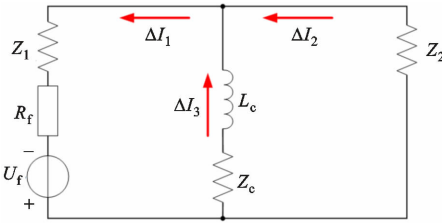
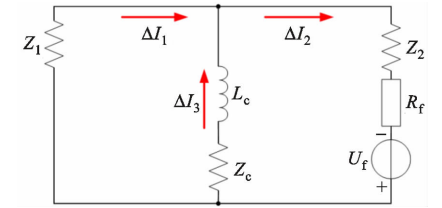


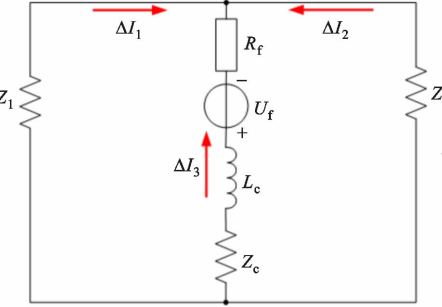
图 3 混合三端直流输电线路拓扑图
Fig. 3 Hybrid three-terminal DC transmission line topology



(a) T 区左侧 L1 线路故障



(b) T 区右侧 L2 线路故障



(c) T 区故障

图 4 输电线路故障等效电路

Fig. 4 Transmission line fault equivalent circuits

时故障电流分量 ΔI_2 方向与设定电流参考方向相反,则极性为负,故障电流分量 ΔI_1 与 ΔI_3 方向与设定电流参考方向相同,则极性为正。

当 T 接汇流母线发生故障时,等效电路图如图 4(c)所示,可得故障电流分量 ΔI_1 、 ΔI_2 、 ΔI_3 方向均与设定参考方向相同,极性为正。

综合上述研究,若发生故障的线路为 L1 时,则 I_3 、 I_2 两者变化方向相同,即 ΔI_3 与 ΔI_2 同为正;而

I_3 、 I_1 变化方向相反,即 ΔI_3 与 ΔI_1 极性相反。如果出现故障的是右侧 L2 线路,则呈现出相同的极性特征的是 ΔI_3 与 ΔI_1 ;而 ΔI_3 与 ΔI_2 会呈现出不同的极性变化;当 T 区发生故障时,则上述三者将会呈现出一样的极性变化特征。

2.3 线路区内外故障识别

以两端直流输电系统为例,规定电流正方向为母线指向线路,根据叠加定理,线路区内、外故障等效图如图 5、图 6 所示。其中 M、N 为线路两端保护装置安装点, Δu_{re} 、 Δi_{re} 分别为整流侧电压和电流的故障分量, Δu_{in} 、 Δi_{in} 分别为逆变侧电压和电流的故障分量。

当故障为区内故障时,等效图如图 5 所示: Δi_{re} 和 Δi_{in} 突变量均为正值, Δu_{re} 和 Δu_{in} 突变量为负值。

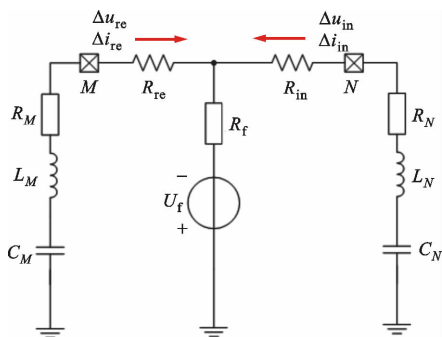


图 5 线路区内故障等效图

Fig. 5 Internal fault equivalent diagram

当故障为整流侧区外故障时,等效图如图 6 所示: Δi_{re} 突变量为负值, Δi_{in} 突变量为正值, Δu_{re} 和 Δu_{in} 突变量均为负值。同理可得,当故障为逆变侧区外故障时, Δi_{re} 突变量为正值, Δi_{in} 突变量为负值, Δu_{re} 和 Δu_{in} 突变量为负值。

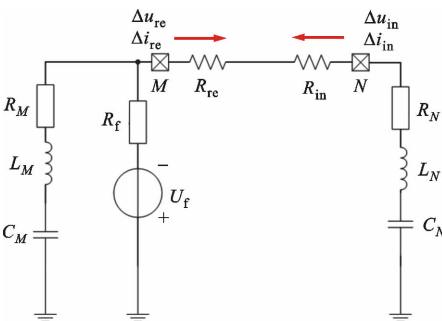
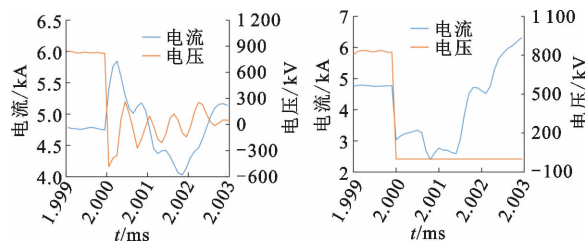


图 6 线路区外故障等效图

Fig. 6 External fault equivalent diagram

通过上述分析,当系统发生故障时,可根据电流及电压增量方向的差异来进行线路区内、外故障判断:即当发生区内故障时同一端的电流与电压突变

方向相反;区外故障时故障端电流与电压突变方向相同。以 LCC 侧线路正极为例,仿真波形如图 7 所示。



(a) 正极区内故障

(b) 正极区外故障

图 7 线路故障电流与电压波形图

Fig. 7 Line fault current and voltage waveforms

2.4 余弦相似度算法基本原理

电力系统中经常会运用到余弦相似度这一相关性分析法,在分析电力系统谐波、识别负荷形态以及预测风电输出功率等方面都得到广泛应用。与距离相似度算法相比,不同于其在几何意义上对空间曲线间绝对或相对距离的计算,余弦相似度更体现的是不同曲线代数意义上的夹角余弦值,突出不同向量方向上的差别,由此便可不受幅值的影响而进行识别,准确度更高。假设空间中存在两个离散信号分别为

$$\mathbf{X} = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\} \quad (1)$$

$$\mathbf{Y} = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_n\} \quad (2)$$

$$\cos(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i y_i)}{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right)^{1/2} \left(\sum_{i=1}^n y_i^2\right)^{1/2}} \quad (3)$$

在两个向量间会形成一个夹角,用 $\cos(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ 来表示,即余弦值,其范围为 $[-1, 1]$ 。正常情况下,若两条曲线越相似,则这两向量之间形成的夹角便越接近于 0,其余弦值也便愈接近于 1;反之,若余弦值愈接近于 -1,则说明向量间的差异越明显,这便称为“余弦相似度”。

将余弦相似度与故障特征相联系,结合 2.2 节中的故障特征分析,提出基于余弦相似度的故障区域判别方法。

当 T 接汇流母线左侧发生故障时, I_3 与 I_1 变化方向相反,所以 ΔI_3 与 ΔI_1 之间的余弦夹角大于 90° ,而 ΔI_3 与 ΔI_2 的余弦夹角小于 90° 。因此, $\cos(\Delta I_3, \Delta I_1) < 0$, $\cos(\Delta I_3, \Delta I_2) > 0$;而当 T 接汇流母线右侧发生故障时, $\cos(\Delta I_3, \Delta I_1) > 0$, $\cos(\Delta I_3, \Delta I_2) < 0$;当 T 区发生故障时, $\cos(\Delta I_3, \Delta I_1) > 0$, $\cos(\Delta I_3, \Delta I_2) > 0$ 。

根据2.3节的故障特征分析,亦可基于余弦相似度得出区内外故障识别方法:以LCC侧为例,当发生区内故障时, Δi_{re} 与 Δu_{re} 之间的余弦夹角大于 90° ,余弦相似度小于0;当发生区外故障时, Δi_{re} 与 Δu_{re} 之间的余弦夹角小于 90° ,余弦相似度大于0。

余弦相似度的优点与保护原理故障特征相结合,消除了幅值变化对保护原理的影响,同时无需两端数据同步,仅需单端量判别故障类型,提升了保护的准确性。

2.5 数据标准化

数据标准化,即无量纲化、规范化数据。考虑到电压、电流间分别存在不同的量纲,这就导致两者无可比性,由此需要标准化处理各指标量,在消除量纲影响后,再进行后续分析。本文运用反正切函数转换来进行数据标准化处理,其公式如下

$$y = \frac{2\arctan(x)}{\pi} \quad (4)$$

反正切函数转换可对数据进行 $[-1,1]$ 归一化处理,满足余弦相似度对于向量方向的要求。同时,随着 x 的增大,反正切函数值的变化量将逐渐减小, y 值趋近于1。因此,反正切函数转换标准化方法能较好地反映电流电压增量的方向变化,同时消除过渡过程数据对算法的影响。

3 基于余弦相似度算法的保护判据及流程图

3.1 启动判据

输电线路发生故障时,电压将会发生突变,以电压变化率作为启动判据

$$\begin{cases} K_{S1} = \left| \frac{dU_p}{dt} \right| > K_{set} \\ K_{S2} = \left| \frac{dU_n}{dt} \right| > K_{set} \end{cases} \quad (5)$$

式中: K_{S1} 表示单位时间内正极线路电压变化率; K_{S2} 表示单位时间内负极线路电压变化率。一旦发生故障,线路电压将会产生一定量的突变,电压变化率 K_{S1} 或 K_{S2} 将发生变化,为正确识别故障避免误动, K_{set} 设为 8×10^5 。当启动判据满足时,识别为故障发生,保护启动识别故障区域及类型。

3.2 故障分量提取

由2.2、2.3节的故障特征分析可知,当故障发生时,电流、电压会产生突变,根据叠加定理可以提取各电气量的故障分量,即

$$\Delta \alpha_m(i) = \alpha_m(i) - \alpha_m(i-j) \quad (6)$$

式中: i 为所选数据窗中的各采样点,取其为1~30;

$\Delta \alpha_m(i)$ 为 i 时刻保护安装处的各故障电气分量; $\alpha_m(i)$ 为 i 时刻保护安装处所测量的电气量; j 为未发生故障时的采样点,本文 j 取30。

3.3 故障区域识别判据

按照上节故障分量提取方法可得三端电流故障分量 ΔI_1 、 ΔI_2 和 ΔI_3 。由2.4节可得

$$\begin{cases} C_{31} = \cos(\Delta I_1, \Delta I_3) \\ C_{32} = \cos(\Delta I_2, \Delta I_3) \end{cases} \quad (7)$$

式中: C_{31} 表示电流故障分量 ΔI_1 和 ΔI_3 的余弦相似度; C_{32} 表示电流故障分量 ΔI_2 和 ΔI_3 的余弦相似度。根据2.2、2.4节分析可得故障区域识别判据。

若故障发生在汇流母线左侧

$$C_{31} < 0 \ \& \ C_{32} > 0 \quad (8)$$

若T区汇流母线发生故障

$$C_{31} > 0 \ \& \ C_{32} > 0 \quad (9)$$

若故障发生在汇流母线右侧

$$C_{31} > 0 \ \& \ C_{32} < 0 \quad (10)$$

通过上述判据,可快速判别出故障区域。

3.4 区内外故障识别判据

由上节判断出故障区域后,再根据线路首端电流与电压可识别区内、外故障,依据2.4、2.5节的分析,以LCC输电侧为例,可得

$$\begin{cases} C_p = \cos(\Delta I_a, \Delta U_a) \\ C_n = \cos(\Delta I_{a'}, \Delta U_{a'}) \end{cases} \quad (11)$$

式中: C_p 、 C_n 分别表示故障区域正负极线路近换流站端电流与电压的余弦相似度; ΔI_a 、 ΔU_a 分别是正极线路故障电流增量 Δi_{re} 和电压增量 Δu_{re} 经标准化处理后的数据; $\Delta I_{a'}$ 、 $\Delta U_{a'}$ 分别是负极线路故障电流增量和电压增量经标准化处理后的数据; $\cos(\Delta I_a, \Delta U_a)$ 为余弦相似度算法的函数方程。

为了使保护原理的识别能力做到最大化,同时能够准确地识别故障类型,整定值的设定需保证在极端故障情况下,保护也能做到准确识别。本文以区内直流输电线路末端高阻接地故障躲过区外金属性接地故障为整定原则。通过2.3、2.4节分析可知,区内、外故障时,同一端电压与电流之间的余弦相似度存在较大差异,通过对三端线路不同故障位置及不同故障极的大量仿真验证,在保留一定裕度情况下可得区内、外判据

$$C_p > -0.7 \ \& \ C_n > -0.7 \quad (12)$$

若满足式(12)则判定为区外故障,反之则为区内故障。

3.5 故障选极判据

3.5.1 线路单、双极故障识别判据

双极故障产生时,输电线路同一端正、负两极将会产生大小相同、方向相反的电流暂态量。以 LCC 侧为例, $\Delta I_a = -\Delta I_{a'}$, 两者余弦夹角为 0° , 余弦相似度值为 1; 当输电线路发生单极故障时, 正、负两极线路同一端电流突变量不同, 因此其余弦相似度的值也将远小于 1。由此特征, 可以构造线路单、双极故障识别判据。在输电系统实际运行过程中, 无论故障与否, 同侧线路正、负极电流波动亦非完全一致, 为避免因波动偏差而引起保护装置误动, 整定值保留一定的误差裕量。经由理论分析与大量仿真验证, 误差裕量定为 5×10^{-3} 。故障选极判据如下

$$C_b = \cos(I_a, -I_{a'}) > 0.995 \quad (13)$$

式中: I_a 为直流线路正极电流; $I_{a'}$ 为直流线路负极电流。当线路同一端的正、负极电流之间的余弦相似度 C_b 大于 0.995 时, 判定为双极接地故障, 保护动作。区外单、双极故障保护判据与区内相同, 此处不做赘述。

3.5.2 线路正、负极故障保护判据

因为输电线路中互感耦合的存在, 当线路只有单极发生故障时, 故障极电流变化会影响到非故障极。因此, 为了避免保护误动, 正确切除故障, 线路正、负极故障选择判据如下

$$|C_p| > 0.7 \quad (14)$$

$$|C_p| < 0.7 \ \& \ |C_n| > 0.7 \quad (15)$$

当 C_p 的绝对值大于 0.7 时, 判为正极故障; 当 C_p 的绝对值小于 0.7, 并且 C_n 的绝对值大于 0.7 时, 判为负极故障。

3.6 保护流程

根据本章 3.1 至 3.5 节所提出的保护原理, 可设计出一种针对混合三端高压直流输电系统的保护算法, 算法流程图如图 8 所示。

本文所提保护原理工作流程为: 当启动判据检测到故障发生时, 先将 T 区汇流母线左右两侧暂态电流故障分量与 T 区故障分量进行余弦相似度的计算与比较, 实现故障区域判别; 再将该区域单端正、负两极电流、电压故障分量经标准化处理后, 计算余弦相似度, 从而实现对输电线路的区内、外故障的识别, 以及线路故障极的选择。进而实现对混合三端直流输电线路的保护。

4 保护原理仿真验证与分析

为了使识别能力做到最大化, 同时能够有效证

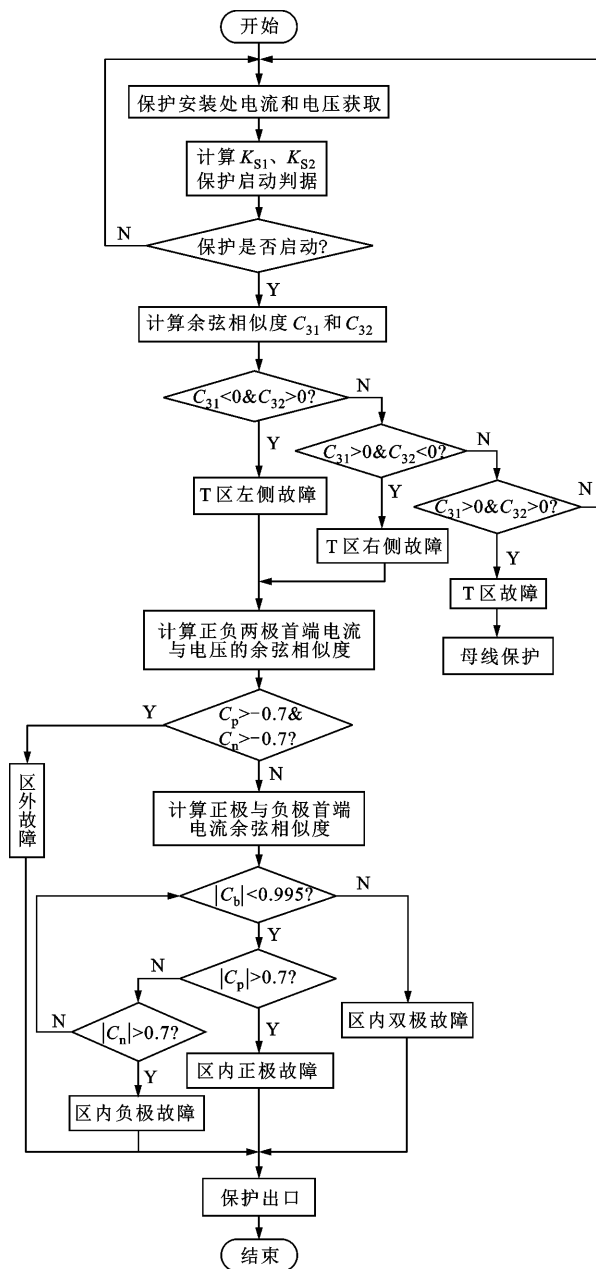


图 8 混合三端直流输电线路保护原理流程图

Fig. 8 Hybrid three-terminal DC transmission line protection principle flow chart

明保护原理的可靠性, 下述仿真选取识别难度更大的换流站出口处为区外故障发生位置。

选取系统稳定运行(本文选取 3 s)后发生故障, 故障持续时间为 0.05 s。利用 PSCAD/EMTDC 搭建 ± 800 kV 混合三端直流输电系统仿真模型, 系统仿真步长为 $10 \mu\text{s}$, 采样频率为 10 kHz, 模拟线路发生不同故障, 采集保护安装处的电流与电压波形。在 Matlab 中对运行数据进行算法处理, 计算得出不同判据所需的余弦相似度, 本文选取故障采样窗口长度为 3 ms。

4.1 故障区域判别仿真

在仿真模型中不同位置设置故障,选取 3~3.003 s 时数据,观察比较 T 区及其左、右两侧分别发生故障时,三端线路的电流故障分量,结果如图 9~11 所示。

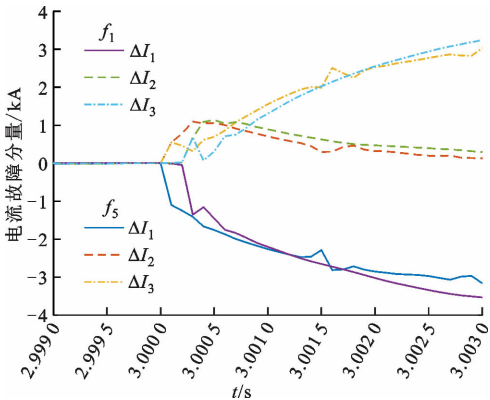


图 9 L1 线路故障时的三端电流故障分量

Fig. 9 Three-terminal current fault component in case of L1 line fault

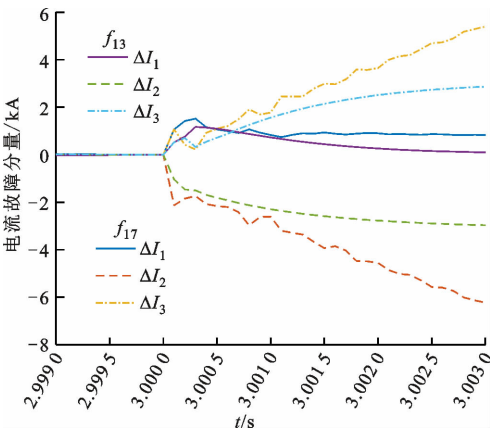


图 10 L2 线路故障时的三端电流故障分量

Fig. 10 Three-terminal current fault component in case of L2 line fault

为了消除数据异常点以及换流站控制过程对相似度数值的影响,使用反正切函数转换方法来进行数据标准化处理的同时舍去 3 个最大的仿真数据以减小异常点对余弦相似度算法的影响。本文所有仿真过程均进行此操作,后续不做赘述。

由图 9~11 可以看出,根据 2.2 节所分析的故障特征可以很好地区分故障区域。将不同故障位置数据进行余弦相似度运算,可得不同故障区域下的余弦相似度如图 12 所示。如图 12 所示,所提保护原理可以对故障区域进行高效识别: C_{31} 与 C_{32} 异号表明 T 区两侧线路出现故障,确定故障区域后,再

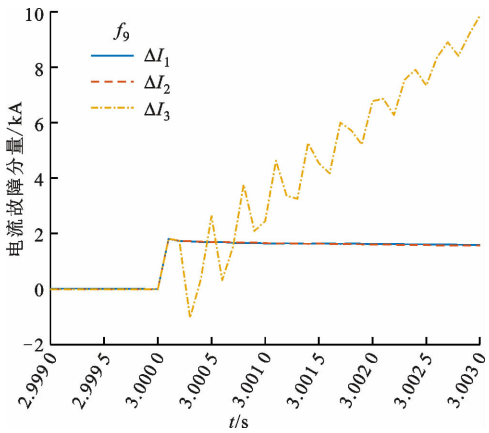


图 11 T 区故障时的电流故障分量

Fig. 11 Three-terminal current fault component in case of T-bus fault

完成故障类型及故障极的判别,保护动作切除故障; C_{31} 与 C_{32} 同号表明故障发生在 T 区,母线保护动作。

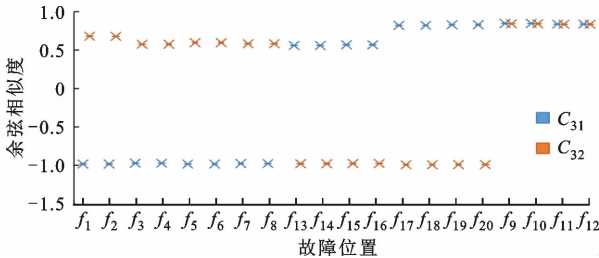


图 12 不同故障区域余弦相似度

Fig. 12 Cosine similarity of different fault areas

4.2 区内和区外故障仿真

将不同极端故障情况下的数据编程处理后,进行余弦相似度运行,可得正、负两极的余弦相似度如图 13 所示,其中 $f_1 \sim f_4$ 、 $f_{13} \sim f_{16}$ 为区外故障; $f_5 \sim f_8$ 、 $f_{17} \sim f_{20}$ 为区内故障。

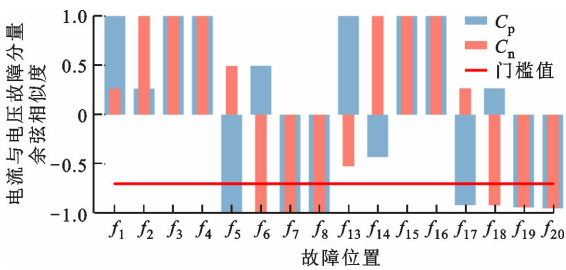


图 13 区内、外故障时的余弦相似度

Fig. 13 Cosine similarity of internal and external faults

当输电线路发生区外故障时, C_p 、 C_n 均大于设置的整定值 -0.7 ,保护不动作。当输电线路发生区内故障时, C_p 或 C_n 小于设置的整定值,保护开启动作,切除线路故障。

4.3 故障选极仿真

4.3.1 线路区内单、双极故障仿真结果

对不同线路不同类型故障进行仿真,根据算法程序可得余弦相似度 C_b 的值,如图 14 所示,其中 f_5 、 f_6 、 f_{17} 、 f_{18} 为单极故障; f_7 、 f_8 、 f_{19} 、 f_{20} 为双极故障。

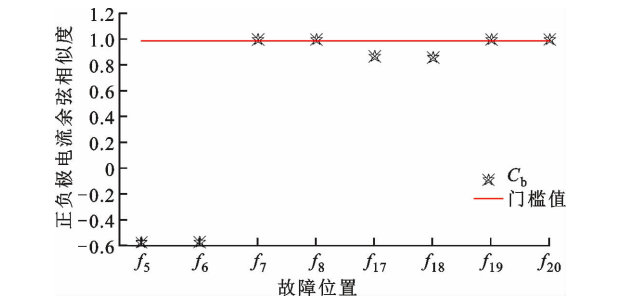


图 14 单、双极故障时的余弦相似度

Fig. 14 Cosine similarity of single and bipolar faults

针对上述故障,考虑过渡电阻对其判据的影响,经算法程序可得 C_b ,如表 2 所示。

表 2 单、双极故障时的余弦相似度
Table 2 Cosine similarity in the case of single and bipolar faults

故障位置	过渡电阻/ Ω	$1- C_b /10^{-12}$	故障位置	过渡电阻/ Ω	$C_b/10^{-12}$
f_7	50	102.70	f_5	50	-0.564 81
	300	297.22		300	-0.518 34
	500	567.54		500	-0.476 27
f_8	50	106.07	f_6	50	-0.561 40
	300	243.97		300	-0.511 14
	500	428.11		500	-0.465 29
f_{19}	50	4.61	f_{17}	50	0.843 106
	300	94.39		300	0.765 984
	500	311.00		500	0.737 385
f_{20}	50	28.00	f_{18}	50	0.830 762
	300	115.75		300	0.735 134
	500	234.04		500	0.691 125

由图 14 和表 2 能够看出,余弦相似度算法能够很明显的区分线路单、双极故障。本文设置 C_b 的门槛值为 0.995,保护程序设置非门,当 C_b 的绝对值大于 0.995,即选取误差 $1-|C_b|$ 小于 0.005 时,双极保护装置启动。区内、外双极故障保护判据相同,此处只对区内故障情况进行验证。

4.3.2 区内正、负极高阻故障仿真

模拟不同过渡电阻情况下,T 区左右两侧区内、

外单极故障,求得对应余弦相似度。

当区内发生单极接地故障时,如表 3 所示, C_p 、 C_n 的绝对值均大于所设门槛值,保护准确识别切除故障。

表 3 不同过渡电阻下区内单极故障余弦相似度
Table 3 Cosine similarity at different transition resistances for Internal single pole fault

故障位置	过渡电阻/ Ω	C_p	故障位置	过渡电阻/ Ω	C_n
f_5	50	-0.997 63	f_6	50	-0.997 63
	300	-0.994 59		300	-0.994 58
	500	-0.992 38		500	-0.992 36
f_{17}	50	-0.953 95	f_{18}	50	-0.954 33
	300	-0.757 97		300	-0.758 44
	500	-0.742 44		500	-0.743 07

当区外发生单极故障时,如图 15 所示,不同过渡电阻情况下,电流、电压暂态分量的余弦相似度 C_p 、 C_n 的绝对值均大于保护门槛值,保护快速动作。

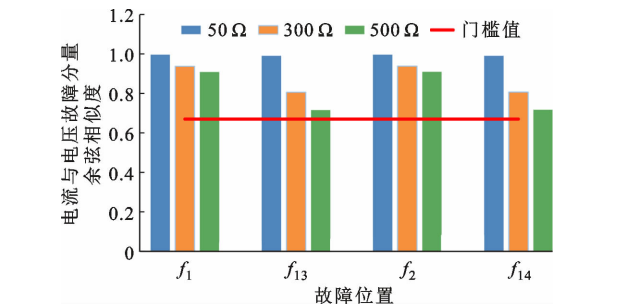


图 15 不同过渡电阻下区外单极故障数据

Fig. 15 Data with different transition resistances for external single pole fault

由表 3 和图 15 可以看出:在不同过渡电阻下,故障极电流与电压故障分量余弦相似度的绝对值均大于 0.7,结合判据式(14)、式(15)可以正确区分出单极故障的故障极,从而切除故障。

综上所述,本文所提出的基于余弦相似度算法的保护原理可准确定位混合三端直流输电线路中故障区域,辨别故障类型,完成故障选极。

4.4 抗噪声干扰能力分析

当信号经过处理设备时,会产生部分不属于原信号的无规则额外信息,将其称为噪声,原信号与噪声的比例称为信噪比(R_{SN}),单位为 dB。信噪比越大,则说明信号中所掺杂的噪声越弱。为检验所提保护方案抗干扰能力,于故障电流、电压中加入 20 ~40 dB 的高斯白噪声,并对余弦相似度进行计算,

结果见表 4。从表 4 仿真结果可以看出,本文所提保护方案在 20 dB 噪声情况下,依旧可以识别故障,具有较强的抗噪声干扰能力。

表 4 不同噪声情况下区内、外故障的余弦相似度
Table 4 Cosine similarity of internal and external faults under different noise interference conditions

故障位置	R_{SN}/dB	C_p	C_n
f_1	40	0.996 1	0.253 3
	20	0.987 3	0.550 1
f_5	40	-0.993 3	0.591 5
	20	-0.967 6	0.178 9
f_{13}	40	0.998 7	-0.421 0
	20	0.973 6	0.284 7
f_{17}	40	-0.936 8	0.144 5
	20	-0.968 4	0.192 3

4.5 与其他方法对比

文献[24]提出一种基于单端时域频谱暂态电气量的保护方案,该方案利用故障前后电流差值构造选极元件,根据电流时域频谱分量的不同占比区分故障类型。本文所提方案与文献[24]方案相比存在以下优点。

(1)保护可靠性更高。文献[24]所提方案可靠性与边界元件的强弱相关,弱边界元件特征的出现可能引起保护方案的失效;同时由于过渡电阻对故障行波特征的削弱作用,保护方案的耐过渡电阻能力有待提高。本文所提方案不依赖于边界元件,利用不同故障类型电气突变量差异构造判据,理论分析与仿真验证均表明不同故障电阻、故障位置情况下,故障特征存在较大差异,利于故障判别,并且具有较强的抗噪声干扰能力。

(2)保护速动性更高。本文所提保护方案可在 3 ms 内识别故障,且从仿真数据可以发现采样数据窗存在进一步缩小的可能。

5 结 论

针对目前已有保护方案存在耐过渡电阻能力弱、速动性不足等问题,本文根据线路故障时暂态电流、电压分量特征,基于余弦相似度算法,设计了一种适用于混合三端直流输电线路的快速保护原理。在确保方案可靠、算法简单的同时,该原理还具有以下优点。

(1)对异常数据、噪声的干扰,有一定的消除措施,能够快速、准确地辨识故障。

(2)虽需取双端数据,但是故障区域内故障类型判别仅需单端数据,无需数据同步。该原理采样频率仅需 10 kHz,利于硬件实现。

(3)仅需要获取 3 ms 数据窗,便可快速动作识别哪个环节出现了故障,最小化故障所带来的不利影响。

(4)具有较强的耐过渡电阻能力,即使故障的过渡电阻为 500 Ω,根据本原理也能够快速识别出来,能够实现更为灵敏的混合三端直流输电保护。

参考文献:

[1] 赵畹君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 163-184.

[2] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[3] 赵成勇, 郭春义, 刘文静. 混合直流输电 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 1-11.

[4] 徐政. 柔性直流输电系统 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2017: 101-277.

[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 Yongping, ZHAO Wenqiang, YANG Jianming, et al. Hybrid high-voltage direct current transmission technology and its development analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 156-167.

[6] 索之闻, 陈启超, 李晖, 等. 混合直流输电系统送端交流暂态电压特性研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 125-132.

SUO Zhiwen, CHEN Qichao, LI Hui, et al. Research on sending end AC transient voltage characteristics of hybrid HVDC transmission system [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 125-132.

[7] 蔡宜君, 文明浩, 陈玉, 等. LCC-MMC 混合直流输电系统整流侧故障穿越控制策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 1-8.

CAI Yijun, WEN Minghao, CHEN Yu, et al. Control strategy of LCC-MMC hybrid HVDC system under rectifier side fault [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 1-8.

[8] 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 Shuping, ZENG Zixuan, SONG Guobing, et al. A differential protection scheme for hybrid three-terminal DC system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong

- University, 2021, 55(1): 17-26.
- [9] 梁远升, 黄泽杰, 李海锋, 等. 基于行波相位特性的三端混合直流线路行波保护原理 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4525-4543.
- LIANG Yuansheng, HUANG Zejie, LI Haifeng, et al. Phase characteristics based travelling wave protection for transmission line of three-terminal hybrid HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4525-4543.
- [10] 陈鑫全, 李海锋, 顾广坤, 等. 基于时域电压比的高压直流输电线路暂态保护方案 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22): 62-69.
- CHEN Xinquan, LI Haifeng, GU Guangkun, et al. Transient protection scheme of HVDC transmission line based on time-domain voltage ratio [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 62-69.
- [11] 张坤. 多端混合直流线路故障特性与保护原理研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [12] 张大海, 武传健, 和敬涵, 等. 基于未失真因子的LCC-MMC混合直流输电线路保护方案 [J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 166-177.
- ZHANG Dahai, WU Chuanjian, HE Jinghan, et al. Protection scheme for transmission lines of LCC-MMC hybrid HVDC system based on undistorted factor [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 166-177.
- [13] 黄宇腾, 侯芳, 周勤, 等. 一种面向需求侧管理的用户负荷形态组合分析方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 20-25.
- HUANG Yuteng, HOU Fang, ZHOU Qin, et al. A new combinational electrical load analysis method for demand side management [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 20-25.
- [14] 汪士杰, 孙晓茜, 杨延钧, 等. 配电混合线路单相接地故障区段定位技术 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(1): 111-119.
- WANG Shijie, SUN Xiaoqian, YANG Yanjun, et al. Location technology for single phase earth fault section of distribution hybrid line [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(1): 111-119.
- [15] 蔡梦娟. 环状柔性直流输电网单端量保护研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- [16] 王聪博, 贾科, 毕天姝, 等. 基于暂态电流波形相似度识别的柔性直流配电线路保护 [J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3823-3831.
- WANG Congbo, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Protection for flexible DC distribution system based on transient current waveform similarity identification [J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3823-3831.
- [17] 周家培, 赵成勇, 李承昱, 等. 采用电流突变量夹角余弦的直流电网线路纵联保护方法 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 165-171.
- ZHOU Jiawei, ZHAO Chengyong, LI Chengyu, et al. Pilot protection method for DC lines based on included angle cosine of fault current component [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 165-171.
- [18] 贾科, 郑黎明, 毕天姝, 等. 基于余弦相似度的风电场站送出线路纵联保护 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6263-6275.
- JIA Ke, ZHENG Liming, BI Tianshu, et al. Pilot protection based on cosine similarity for transmission line connected to wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6263-6275.
- [19] 王渝红, 傅云涛, 曾琦, 等. 柔性直流电网故障保护关键技术研究综述 [J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2362-2374.
- WANG Yuhong, FU Yuntao, ZENG Qi, et al. Review on key techniques for fault protection of flexible DC grids [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2362-2374.
- [20] 戴志辉, 刘雪燕, 刘自强, 等. 基于电流故障分量的柔直配电线路纵联保护原理 [J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1684-1693.
- DAI Zhihui, LIU Xueyan, LIU Ziqiang, et al. Pilot protection scheme for flexible DC distribution grids based on superimposed current [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1684-1693.
- [21] 徐瑞东, 宋国兵, 侯俊杰, 等. 采用换流器控制信号变化量极性特征的高压直流线路纵联保护 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(5): 143-153.
- XU Ruidong, SONG Guobing, HOU Junjie, et al. Pilot protection for high voltage direct current transmission line based on polarity characteristics of converter control signal deviation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(5): 143-153.
- [22] 上官鑫, 秦文萍, 夏福良, 等. 基于暂态电压 Pearson 相关性的 MMC 多端柔性直流配电网单极接地故障保护方案 [J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1740-1749.
- SHANGGUAN Xin, QIN Wenping, XIA Fuliang, et al. Pole-to-ground fault protection scheme for MMC multi-terminal flexible DC distribution network based on Pearson correlation of transient voltage [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1740-1749.
- [23] 高淑萍, 高悦, 宋国兵, 等. 利用 Teager 能量算子瞬时能量的模块化多电平换流器多端柔性直流电网保护

方法 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(9): 40-48.

GAO Shuping, GAO Yue, SONG Guobing, et al. A protection method based on instantaneous energy of Teager energy operator for modular multilevel converter multiterminal flexible direct current grid [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(9): 40-48.

[24] 宁文元, 杨晓楠, 刘瑛琳, 等. 基于时频谱的混合直流输电线路保护方法 [J]. 电力建设, 2019, 40(10): 126-132.

NING Wen Yuan, YANG Xiaonan, LIU Yinglin, et al. Research on protection method based on time-spectrum for hybrid HVDC transmission line [J]. Electric Power Construction, 2019, 40(10): 126-132.

[25] 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 Shuping, SHAO Mingxing, SONG Guobing, 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.

(编辑 武红江 亢列梅)