

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190951

# 具备高灵敏性与速动性的柔性直流输电系统纵联保护方案

林湘宁, 胡仙清, 童宁, 陈乐, 李正天

(华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 多端柔性直流输电线路故障的快速识别对电网的安全稳定运行具有重大意义。目前, 直流线路纵联差动保护未考虑电容电流的影响, 其速动性的欠缺导致其仅用作后备保护。为解决该问题, 提出了一种足够灵敏、且能够在超短时间窗内实现故障识别的纵联保护原理。首先, 基于贝瑞隆模型, 对电容电流进行有效补偿。其次, 计及模型法对参数较为敏感这一不利因素, 设计了保护浮动门槛。最后, 基于区内/外故障情况下电流推演值与原始值间的 Hausdorff 距离存在差异性的特征, 提出了一种多端柔性直流输电线路纵联保护原理。理论分析及仿真结果表明, 所提的保护原理能灵敏、可靠地实现区内故障的识别, 并且在速动性指标上能够满足柔性直流输电系统的要求。

**关键词:** 多端柔性直流输电; 贝瑞隆模型; Hausdorff 距离; 纵联保护; 灵敏性

## A pilot protection scheme for an VSC-MTDC system with high sensitivity and rapidity

LIN Xiangning, HU Xianqing, TONG Ning, CHEN Le, LI Zhengtian

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The rapid internal-fault identification capability of an VSC-MTDC is of great significance for the safety and stability of a power system. At present, DC line differential protection does not take the capacitive current into consideration, and the lack of speed makes it suitable only as a back-up protection. To solve this problem, a novel DC line differential current protection with high sensitivity is proposed. This can identify internal faults within a very short time window. First, the capacitive current is fully compensated based on the Bergeron model. Secondly, an adaptive threshold is set against the high sensitivity of the proposed method to the parameters of the system. Finally, based on the difference of Hausdorff distance between the original measurement and the deduced measurement, a novel DC current differential protection adaptive to the characteristics of the VSC-MTDC is put forward. Theoretical analysis and simulation results indicate that the proposed protection can identify internal fault sensitively and reliably, and the speed is high enough to meet the requirements for fault-isolation of VSC-MTDC systems.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5100-201999331A-0-0-00) and National Natural Science Foundation of China (No. 51907069).

**Key words:** VSC-MTDC; Bergeron model; Hausdorff distance; pilot protection; sensitivity

## 0 引言

柔性直流输电系统是近20年兴起的一项新型技术。与传统特高压直流输电系统相比, 其具备独立的功率控制能力, 且能够免疫换相失败。因此, 柔性直流输电系统构成直流电网运行后, 可有效解决

远距离大规模送电、交/直输电混联、可再生能源集中接入等诸多难题<sup>[1-2]</sup>。然而, 目前直流电网的保护原理尚不完善<sup>[3-4]</sup>, 对于多采用架空线路的远距离输电方式而言, 提升线路保护对于故障的反应能力和电网安稳运行具有重要的意义<sup>[5]</sup>。

现有直流输电工程中, 线路纵联电流差动保护作为行波保护、微分欠压保护、低电压保护的后备保护<sup>[6-7]</sup>, 可以响应高阻故障, 但其动作速度相比于前三种保护较慢, 时间长达到秒级<sup>[8]</sup>。较长的动作

**基金项目:** 国家电网公司科技项目资助 (5100-201999331A-0-0-00); 国家自然科学基金项目资助 (51907069)

延时导致其仅用作后备保护, 探索一种能快速反应于高阻接地故障的纵联差动保护很有意义。

为了提升现有直流输电线路纵联差动保护的性, 国内外专家学者展开了大量纵联保护原理的改进工作。文献[9-10]利用线路的边界特性, 提出一种基于直流线路特征谐波的纵联保护原理。文献[11]期望通过在直流线路中应用行波差动原理来改善现有纵联差动保护的性。文献[12]基于高压直流输电线路两侧低频能量差值的特征, 提出了一种直流线路暂态能量保护原理, 可快速地识别区内故障。文献[13]利用区内/外电流突变差异构造方向元件, 通过方向元件间的配合形成了一种纵联保护原理。文献[14]针对光纤通道提出了优化纵联差动保护动作速度的方案。线路中的电容电流会影响纵联保护的性<sup>[15]</sup>, 上述文献中的纵联差动保护方案忽视了电容电流的影响, 区外故障导致的电压变化会引起保护的误动。因此, 为了避免保护误动, 需要等暂态过程消失后差动保护判据才能切除故障, 此时速动性明显不足。此时的直流输电线路中, 纵联差动保护的灵敏度和速动性达不到其应有的要求, 其动作性能有待提升<sup>[16]</sup>。

理论上, 基于线路精确模型对电容电流补偿的保护原理有望进一步提升保护的性。贝瑞隆模型不仅可以消除电容电流的影响还具有很高的精度<sup>[17-18]</sup>。实际上, 国内专家学者基于贝瑞隆模型展开了大量的判据性能优化工作, 主要有:

文献[19]分别利用贝瑞隆模型和频变参数模型解决纵差保护电容电流的影响。文献[17]采用了从原理上可以消除电容电流影响的贝瑞隆模型, 提出了差动保护原理, 有效地提高了保护的灵敏性和可靠性。文献[20]研究了贝瑞隆模型电流的计算值与不同故障位置处电流值的关系, 解决了传统贝瑞隆差动保护电流受不同参考点影响的问题。文献[21]基于贝瑞隆模型, 利用归算前后的电气量构造判据, 该类保护判据拥有较高的灵敏性。但是, 基于上述贝瑞隆模型的保护判据的共性问题保护的性窗口较长, 保护的性受到限制, 直流系统的性得不到保障。

目前, 现有的电流差动保护在可靠性和速动性上有所欠缺, 基于贝瑞隆模型采用 Hausdorff 距离算法可有效地弥补其可靠性和速动性的不足。Hausdorff 距离算法的本质是实时判断时域波形的相似性, 任何两种时域波形都可以进行 Hausdorff 距离比较<sup>[22]</sup>。随着数据窗的不断滑动, 可以实时地

反映 Hausdorff 距离值, 即波形的相似度。数据窗内的数据可为故障前或者故障后的数据。在采样率一定时, 时间窗的长度与采样点的个数成正比, 时间窗的长短只是影响着 Hausdorff 距离算法计算量的大小, 不影响判据的动作时间。Hausdorff 距离算法是将一个时间窗内每个采样点对应的 Hausdorff 距离进行求和, 若在选取的时间窗内出现个别异常数据, Hausdorff 距离算法仍能保证保护动作量的平稳输出, 且时间窗越长, 其耐受异常数据的能力也越强, 其可靠性也就越高。由后面的仿真可知, 在故障发生后的几 ms 内, Hausdorff 距离可快速实时地反映波形间的差异, 即可快速地识别出故障。本方案的速动性相比于其他纵联保护原理将大大提高, 这也是 Hausdorff 距离算法应用到直流线路纵联保护里的优势。

本文基于贝瑞隆精确模型, 利用 Hausdorff 距离算法, 提出了一种纵联差动保护判据, 理论分析及仿真结果充分验证了所提判据的有效性和优越性。

## 1 贝瑞隆模型简介

具有分布参数的均匀有损传输线模型可以用来描述高压输电线路。在特高压直流输电中通常在被保护线路加上并联电抗器有效地补偿了差动保护感受到的电容电流, 要彻底消除电容电流对保护的不利影响, 基于贝瑞隆模型的保护判据是最佳解决方案。贝瑞隆模型可以反映输电线路在不同运行状态下两端电压与电流之间的关系<sup>[17]</sup>, 该方法计算相对简单, 且精度也可以得到保证。一般地, 贝瑞隆模型可将具有分布参数的均匀有损传输线分成两段, 如图 1 所示。

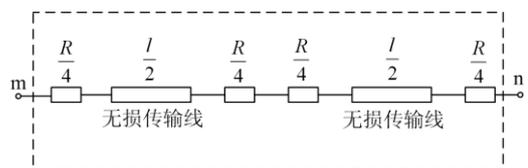


图 1 贝瑞隆分布参数线路模型

Fig. 1 Distribution parameter line model of Bergeron

其中, 长度为  $l$  的线路均匀地分为两段长度为  $l/2$  的线路,  $R_0$ 、 $L_0$ 、 $C_0$  分别为均匀有损传输线的单位长度线路电阻、电感和对地电容, 特征阻抗可表示为  $Z_c = \sqrt{L_0 / C_0}$ , 电阻为  $R_0 l$ 。

基于贝瑞隆模型, 可由线路一端的电压、电流值计算得到其经线路全长传播到对端后电压、电流值(推演值): 设线路  $m$  侧的电压、电流值分别为  $u_m(t)$ 、 $i_m(t)$ , 则可计算得到其经线路全长传播到  $n$

侧后电压、电流值, 记为  $u_{jm}(t)$ 、 $i_{jm}(t)$ , 即

$$\begin{bmatrix} u_{jm}(t) \\ i_{jm}(t) \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} u_m(t) \\ i_m(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_m(t) \\ i_m(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:

$$T_{22} = -T_{11} \quad (2)$$

$$T_{11} = D_e(\tau) \left[ \frac{1}{2} + \frac{R^2}{32Z_c^2} + \frac{R}{4Z_c} \right] + \quad (3)$$

$$D_e(-\tau) \left[ \frac{1}{2} + \frac{R^2}{32Z_c^2} - \frac{R}{4Z_c} \right] - \frac{R^2}{16Z_c^2}$$

$$T_{12} = -D_e(\tau) \left[ \frac{3R}{8} + \frac{R^3}{128Z_c^2} + \frac{3R^2}{32Z_c} + \frac{Z_c}{2} \right] - \quad (4)$$

$$D_e(-\tau) \left[ \frac{3R}{8} + \frac{R^3}{128Z_c^2} - \frac{3R^2}{32Z_c} + \frac{Z_c}{2} \right] - \frac{R}{4} + \frac{R^3}{64Z_c^2}$$

$$T_{21} = D_e(\tau) \left[ \frac{R}{8Z_c^2} + \frac{1}{2Z_c} \right] + \quad (5)$$

$$D_e(-\tau) \left[ \frac{R}{8Z_c^2} - \frac{1}{2Z_c} \right] - \frac{R}{4Z_c^2}$$

上述各式中:  $Z_c$  为线路波阻抗;  $\tau = l/v$  为波由线路一端传至另一端的时间;  $D_e(\tau)$  为延迟因子。

根据贝瑞隆模型计算得到  $m$  侧线模电流经线路全长传播到  $n$  侧的线模电流, 将其与  $n$  侧线模电流(测量值)真实值比较, 发现在不同故障类型下波形相似性的差异。当系统正常运行或者发生区外故障时, 由于故障对线路贝瑞隆模型未造成破坏,  $n$  侧的线模电流推演值  $i_{jm}(t)$  应与  $n$  侧线模电流真实值  $i_n(t)$  的波形几乎重合。当系统发生区内故障时, 由于线路贝瑞隆模型受到故障支路的破坏,  $n$  侧的线模电流推演值  $i_{jm}(t)$  应与  $n$  侧线模电流真实值  $i_n(t)$  的波形出现较大差异。利用区外/内  $n$  侧线模电流推演值与真实值波形相似性的差异特征, 可以构造保护判据。

## 2 Hausdorff 距离原理及特性

### 2.1 Hausdorff 距离原理

Hausdorff 距离是一种描述两组点集之间相似程度的度量方式<sup>[22]</sup>。假设有  $A$ 、 $B$  两组点集:

$$A = \{a_1, L, a_q\} \quad (6)$$

$$B = \{b_1, L, b_q\} \quad (7)$$

利用集合  $A$  中某点(如  $a_i$ )与集合  $B$  中所有点进行欧式距离计算并比较, 找到对于  $a_i$  最近的点  $b_j$ , 使  $b_j$  满足式(8)。

$$\|a_i - b_j\| \leq \|a_i - b_k\|, \quad 1 \leq k \leq q \text{ 且 } k \neq j \quad (8)$$

式中,  $\|\cdot\|$  表示两点之间的欧式距离。则式中的  $\|a_i - b_j\|$  为对应  $a_i$  点的最小距离, 即

$$\min_{b \in B} \|a_i - b\| = \|a_i - b_j\| \quad (9)$$

对于集合  $A$  中所有的元素, 满足式(8)的最大值为从集合  $A$  到集合  $B$  的 Hausdorff 单向距离, 即

$$h(A, B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\| \quad (10)$$

以此类推, 从集合  $B$  到集合  $A$  的 Hausdorff 单向距离为

$$h(B, A) = \max_{a \in B} \min_{b \in A} \|a - b\| \quad (11)$$

定义点集  $A$  与点集  $B$  之间的 Hausdorff 距离  $H(A, B)$  为

$$H(A, B) = \max[h(A, B), h(B, A)] \quad (12)$$

从点集  $A$  到点集  $B$  与从点集  $B$  到点集  $A$  两者之间 Hausdorff 单向距离较大值即为 Hausdorff 距离值。

### 2.2 基于贝瑞隆模型的 Hausdorff 距离算法优势

贝瑞隆模型解决了电容电流对保护不利影响的问题。以区外故障为例, 当未采用贝瑞隆模型补偿时, 计算得到的线模电流推演值将会与对端线模电流存在较大的差异, 采用 Hausdorff 距离算法时, 可能会导致判据误动; 当采用贝瑞隆模型补偿时, 计算得到的线模电流推演值与对端线模电流的波形几乎重合, 此时 Hausdorff 距离算法可以准确识别故障, 即满足

$$H(i_{jm}, -i_n) = 0 \quad (13)$$

Hausdorff 距离算法能精确地反映推演值与真实值波形的相似度, 利用 Hausdorff 距离算法来表示波形相似度时有一定的优势。一方面, 保护的动作速度不受 Hausdorff 时间窗大小的影响; 另一方面, Hausdorff 时间窗的选取不受故障类型的限制, 且在一个特定的时间窗内, 个别异常数据不会影响判据的动作情况, 也就是说 Hausdorff 距离算法还具有抗异常数据的能力, 选取合适的时间窗是关键。

## 3 基于贝瑞隆模型的 Hausdorff 距离算法主保护判据

根据上文分析, 本文提出的基本原理思路如下: 首先由保护安装处测量得到线路两侧的线模电流; 其次, 将线路一端线模电流经贝瑞隆模型计算得到传播至线路另一端的线模电流推演值, 利用区外/内线模电流推演值与真实值波形相似性的差异特征, 可构造保护判据; 最后, 对线模电流推演值与线模电流真实值间进行 Hausdorff 距离计算, 考虑互感

器传变误差参数和模型误差参数, 设计合适的保护门槛, 并据此确定故障性质。

### 3.1 保护判据设计

以张北四端柔直电网为例, 考虑电容电流的不利影响, 采用贝瑞隆模型, 对本方案提出的纵联保护判据进行说明。

如图2所示, 线路Line1两侧线模电流的采样值序列分别为 $i_m$ 和 $i_n$ , 根据图2所示的正方向, 需要对n侧线模电流反向处理, 即将n侧的线模电流数值均取反, 得到电流采样序列 $-i_n$ 。将m端线模电流 $i_m$ 经贝瑞隆模型计算得到其传播线路全长后在n端的线模电流推演值 $i_{jm}$ 。

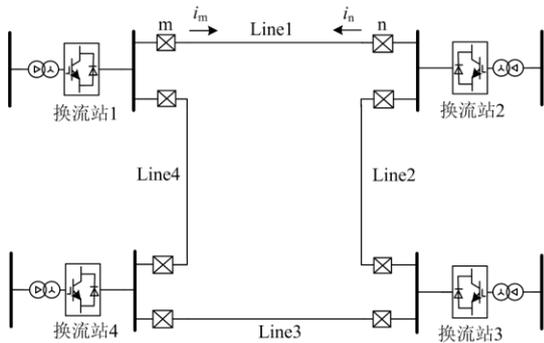


图2 多端柔性直流电网示意图

Fig. 2 Schematic diagram of VSC-MTDC

理论上, 区外故障时, 由于故障没有破坏Line1线路的贝瑞隆模型, 再加上对电容电流进行了有效补偿, 电流推演值 $i_{jm}$ 和 $-i_n$ 的波形几乎重合, 此时的Hausdorff距离为0, 若考虑互感器和模型参数误差, Hausdorff距离为一个接近0的数值, 即

$$H(i_{jm}, -i_n) \approx 0 \quad (14)$$

区内故障时, 故障支路破坏了贝瑞隆模型的成立基础, 故 $i_{jm}$ 和 $-i_n$ 的波形存在较大差异, 此时其Hausdorff距离远大于0, 与式(14)差异明显。因此, 需要设计合适的门槛值来区分故障类型。可用 $H_{set}$ 表示整定门槛, 区内故障时,  $i_{jm}$ 和 $-i_n$ 的Hausdorff距离应始终大于一定值, 用此判据来区分区内故障和区外故障, 此时应满足

$$H(i_{jm}, -i_n) > H_{set} \quad (15)$$

为确保保护的可靠性, 另设置附加延时, 即保证式(15)在任意一个附加延时周期内持续为真的前提下, 方允许保护动作; 一旦在附加延时周期内有任意不满足式(15)的情况, 保护不会动作。

### 3.2 保护整定

本方案保护的整定依据为: 充分考虑线路模型误差, 区外故障可靠不误动, 区内故障可准确识别。

由于电容电流在利用贝瑞隆模型补偿后几乎为0。首先, 在线路测量装置测量众多电气量参数时, 首先应考虑互感器的传变误差。其次, 应考虑基于贝瑞隆模型计算电流推演值中模型参数变化导致的误差, 高压直流输电线路跨越区域复杂, 工作环境恶劣<sup>[5,23]</sup>, 电阻参数易受温度变化的影响, 线路的分布参数影响着电感电容, 进而导致线路波阻抗的变化。然而, 在计算电流推演值时, RLC参数的变化会直接导致得到电流推演值产生较大误差。所以, 为了确保判据在工程应用中的适用性, 整定动作门槛时必须考虑模型参数误差, 利用该误差系数, 结合传变误差系数, 共同整定判据的门槛值, 即可得到保护的整定门槛, 如式(16)所示。

$$H_{set} = \max(I_{mrms}, I_{nrms}) \cdot (K_{trans} + K_{error}) \cdot K_{rel} \quad (16)$$

式中:  $I_{mrms}$ 、 $I_{nrms}$ 分别为m端和n端线模电流采样值的有效值;  $K_{error}$ 为模型误差系数;  $K_{rel}$ 为可靠系数;  $K_{trans}$ 为互感器传变误差系数, 代表最大传变误差, 可设为0.1。  $K_{rel}$ 可按主保护的整定惯例设为1.15。对模型误差系数 $K_{error}$ 的整定, 下面给出简要分析。

线路电阻随着温度的变化而变化, 一般情况下, 线路的电阻参数是在温度为20℃时的值。t℃时的电阻 $r_t$ 可按式(17)计算<sup>[24]</sup>。

$$r_t = r_{20}[1 + \alpha(t - 20)] \quad (17)$$

式中,  $\alpha$ 为电阻温度系数, 对于铜 $\alpha = 0.003821/^\circ\text{C}$ , 对于铝 $\alpha = 0.00361/^\circ\text{C}$ 。在VSC-MTDC特高压输电线路的基础上, 考虑最低温度和最高温度分别为-40℃和60℃, 其对应的参数变化分别为-21.66%和+14.4%, 这为贝瑞隆模型计算电流推演值中的电阻参数提供了变化范围。

线路的电感和电容一般不受温度的影响。电感电容的求解源于线路参数对应微分方程的求解, 其精度与基波频率与采样间隔大小的乘积即 $\omega \cdot \Delta t$ 成正比, 文献[25]中给出对应60Hz下 $\Delta t = 1\text{ms}$ 时的误差为1.2%。由于电感和电容参数变化很小, 在50Hz下电感和电容参数变化范围可近似地认为与该文献中的场景相同。由 $Z_c = \sqrt{L/C}$ 可知, 波阻抗的变化范围为-1.2%~1.2%。

在电阻变化范围内等间距选取20个点, 同时在波阻抗变化范围内等间距选取20个点, 一共400组参数。基于贝瑞隆模型, 计算这400种参数场景下对应正常运行、各种区外严重故障暂态过程中的Hausdorff距离最大值, 并与参数精确时的Hausdorff距离最大值进行比较, 得到的最大误差即为模型误差系数 $K_{error}$ 的整定依据。得到因电阻和波阻抗参数

波动导致的 Hausdorff 距离相对其真值的相对误差分布, 如图 3 所示。

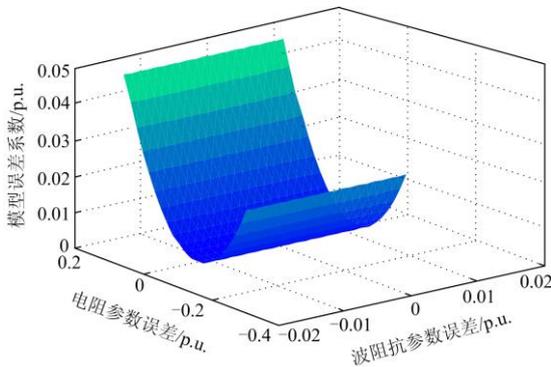


图 3 模型误差系数变化情况

Fig. 3 Variation of model error coefficient

由图 3 可知, 当电阻与波阻抗参数同时出现最大正误差时, Hausdorff 距离的变化率最大为 4.64%, 即模型误差系数  $K_{error}$  可取为 0.05。

此外, 互感器传变误差参数和模型误差参数进行求和的整定方法具有良好的裕度。实际上两种误差不能认为完全独立, 对两种参数求和的方法基本符合传统继电保护的整定原则, 有效地保障了本方案保护的可靠性和安全性。

### 4 仿真验证

#### 4.1 仿真模型

基于 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件, 建立张北四端 VSC-MTDC 输电系统, 系统参数和拓扑结构均与张北工程中一致。如图 2 所示, 记多端柔性直流输电线路编号为 Line 1、Line 2、Line 3、Line 4, 其长度分别为 184.4 km、101 km、131.1 km、78.3 km。保护采样频率为 50 kHz, Hausdorff 时间窗的长度为 2 ms(相当于 100 个采样点)。以长度为 184.4 km 的线路 Line 1 为研究对象, 分别对所提出原理在区内/区外线路故障场景、金属性/高阻线路故障下保护的動作性能展开研究及分析。

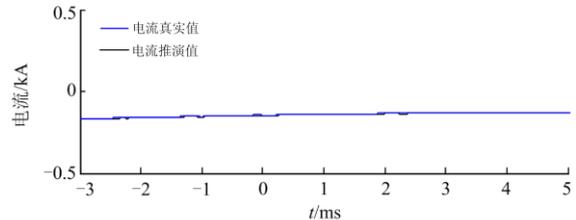
#### 4.2 系统正常运行及区外故障分析

算例 1: 系统正常运行

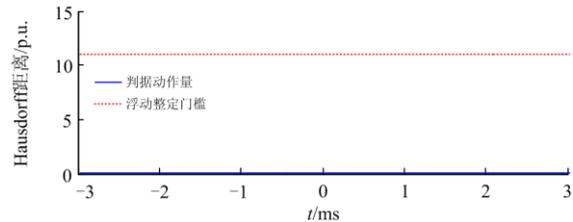
记系统于  $t=0$  ms 时刻处于正常运行状态。利用贝瑞隆模型对电容电流进行补偿后, 可以由线路 m 端的线模电压电流时间序列计算得到 n 端的线模电流的推演值, 如图 4 所示。其中图 4(a)给出了电流真实值与推演值的波形示意图, 图 4(b)为此时所提出判据的動作情况。

可见系统正常运行时, 图 4(a)中 n 侧模电流实际值与推演值的波形完全重合。图 4(b)中, 保护的

Hausdorff 距离值(H 值)的曲线完全处于浮动整定门槛曲线下方, 不满足保护判据式(15), 保护能够在系统正常运行时保持可靠不动作。



(a) n侧电流真实值与推演值波形



(b) Hausdorff距离判据動作情况

图 4 正常运行仿真结果图

Fig. 4 Simulation results of normal operation

算例 2: Line 3 中点极间短路故障, 金属性

考虑区外严重故障场景, 设置 Line 3 线路中点处发生极间金属性短路故障, 记系统故障时刻为  $t=0$  ms。此时对于线路 Line 1 的保护而言, 该故障属于区外故障, 应要求本条线路的保护可靠不动作。

当未补偿电容电流时, 记录线路 Line 1 两端线模电流测量值。利用贝瑞隆模型对电容电流进行补偿后, 可以由线路 m 端的线模电压电流时间序列计算得到其经过线路(Line 1)全长传播到 n 端的线模电流的推演值。未补偿电容电流时线路两端线模电流波形及判据動作情况如图 5(a)、图 5(b)所示, 补偿电容电流后 n 侧线模电流推演值与测量值(真实值)的波形及判据動作情况如图 5(c)、图 5(d)所示。

由图 5(a)可见, 未补偿电容电流时, 线路两端电流波形差异性较大, 两路波形具有较低的波形相似度。图 5(b)中, 较大的差异性会导致 Hausdorff 距离值(H 值)大于整定门槛  $H_{set}$ , 从而会造成区外故障时保护误动。Line 3 发生故障时, 故障支路不会破坏 Line 1 贝瑞隆模型成立的基础, 图 5(c)中 n 侧线模电流实际值与推演值的波形完全重合, 两路波形具有较高的波形相似度。图 5(d)中, 故障发生后, 保护的 Hausdorff 距离值(H 值)的曲线处于浮动整定门槛曲线下方, 不满足保护判据式(15), 辨识为区外故障, 保护能可靠不动作。由于内容有限, 未补偿电容电流与补偿电容电流两种场景下的区别在后文算例中不再一一赘述。

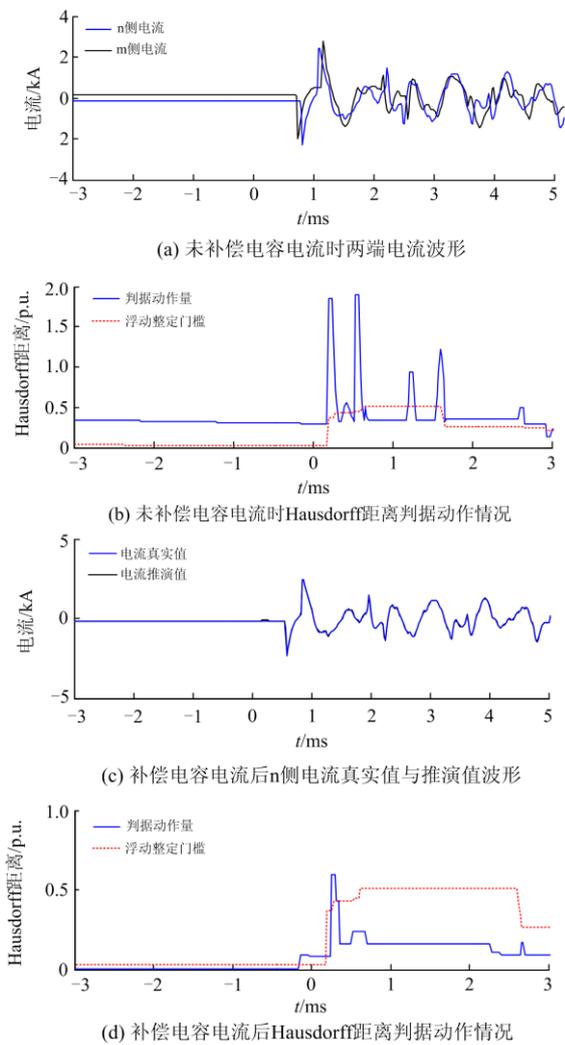


图5 Line 3 中点极间金属性短路故障仿真结果图

Fig. 5 Simulation results of bi-polar solid faults at the midpoint of Line 3

## 算例 3: Line 3 中点单极接地故障

进一步考察区外故障下保护判据的可靠性, 设置 Line 3 线路中点处发生单极金属性接地故障, 故障时刻为  $t=0$  ms。n 侧线模电流推演值与测量值(真实值)的波形及判据动作情况如图 6 所示。

可见, 图 6(a)中 n 侧线模电流实际值与推演值的波形完全重合。图 6(b)中, 故障发生后, 保护的 H 值曲线处于浮动整定门槛曲线下方, 不满足保护判据式(15), 保护能可靠不动作。

当过渡电阻为  $300 \Omega$  时, 设置 Line 3 线路中点处发生单极接地故障, 故障时刻为  $t=0$  ms。n 侧线模电流推演值与测量值(真实值)的波形及判据动作情况如图 7 所示。

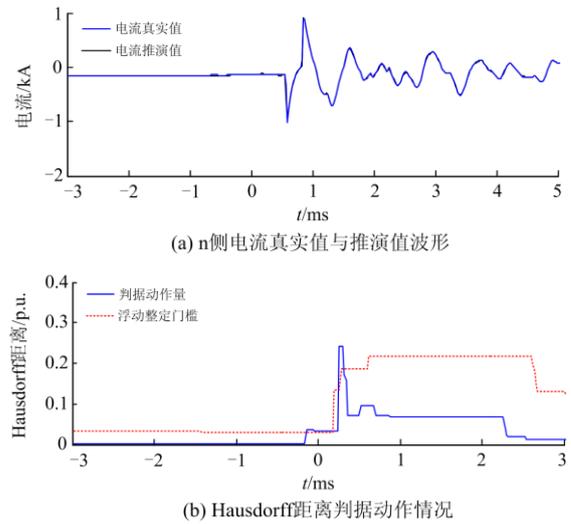
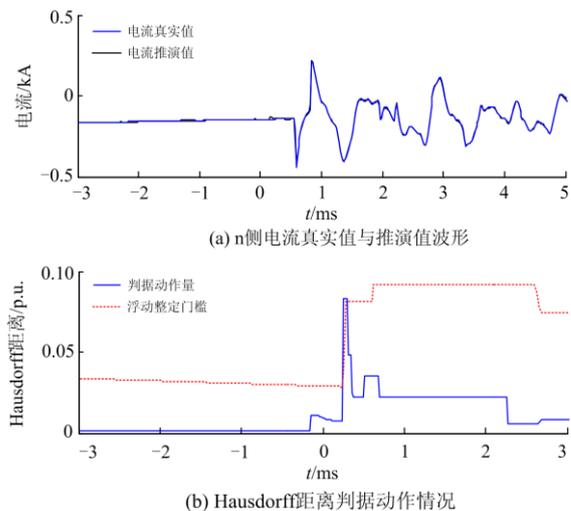


图6 Line 3 中点单极金属性接地故障仿真结果图

Fig. 6 Simulation results of mono-polar solid faults at the midpoint of Line 3

图7 Line 3 中点经  $300 \Omega$  过渡电阻接地故障仿真结果图Fig. 7 Simulation results of solid faults at the midpoint of Line 3 with  $300 \Omega$  resistance

可见, 图 7(a)中 n 侧线模电流实际值与推演值的波形完全重合。图 7(b)中, 故障发生后, 保护的 H 值曲线处于浮动整定门槛曲线下方, 也不满足保护判据式(15), 保护能可靠不动作。

此外, 线路 Line 4 故障时, 仿真结果与上述一致, 保护也能可靠不动作, 此处不再赘述。综上, 线路发生区外故障时, 所提出的保护可靠不动作。

## 4.3 区内故障分析

## 算例 4: Line 1 中点极间短路故障, 金属性

考察区内故障保护判据的动作性能, 设置 Line 1 线路中点处发生极间金属性短路故障, 故障时刻

为  $t=0$  ms。基于贝瑞隆模型,可以由线路 m 端的线模电压电流时间序列计算得到其经过线路(Line 1)全长传播到 n 端的线模电流的推演值。n 侧线模电流推演值与测量值(真实值)的波形及判据动作情况如图 8 所示。

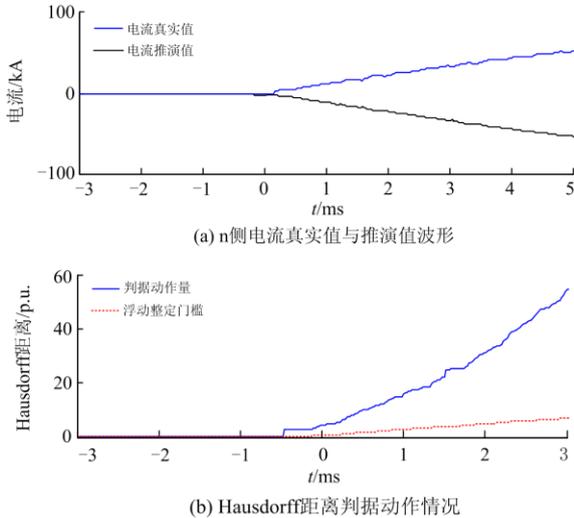
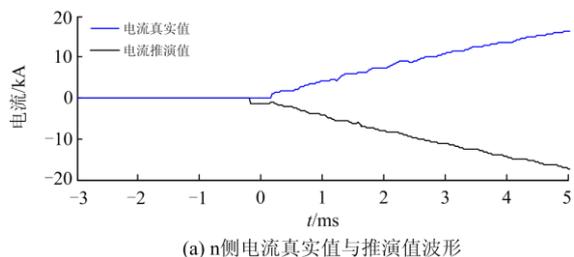


图 8 Line 1 中点极间金属性短路故障仿真结果图  
Fig. 8 Simulation results of bio-polar solid faults at the midpoint of Line 1

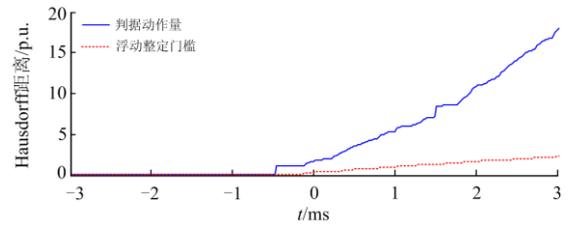
可见, Line 1 故障时,故障支路会破坏贝瑞隆模型成立的基础,图 8(a)中 n 侧线模电流实际值与推演值的波形出现较大差异。图 8(b)中,故障发生后,保护的 H 值曲线完全处于浮动整定门槛曲线上方,满足保护判据式(15),辨识为区内故障,保护动作。

算例 5: Line 1 中点单极接地故障,金属性设置 Line 1 线路中点处发生单极金属性接地故障,故障时刻为  $t=0$  ms。n 侧线模电流推演值与测量值(真实值)的波形及判据动作情况如图 9 所示。

可见,故障后,图 9(a)中 n 侧线模电流实际值与推演值的波形出现较大差异,图 9(b)中保护的 H 值曲线完全处于浮动整定门槛曲线上方,满足保护判据式(15),辨识为区内故障,保护动作。结合算例 4 和算例 5,保护在极间金属性短路故障和单极金属性接地故障下均可有效辨识区内故障。



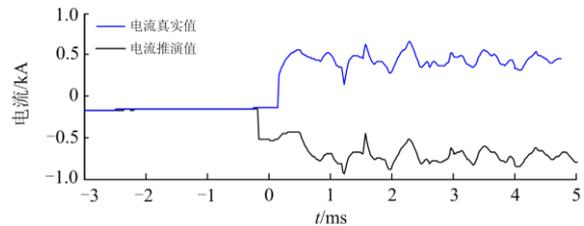
(a) n侧电流真实值与推演值波形



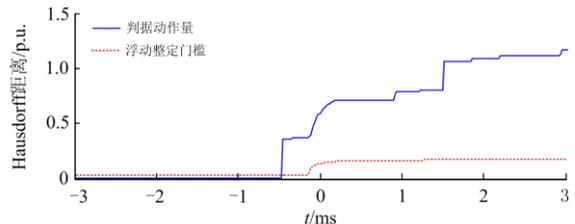
(b) Hausdorff距离判据动作情况

图 9 Line 1 中点单极金属性接地故障仿真结果图  
Fig. 9 Simulation results of mono-polar solid faults at the midpoint of Line 1

算例 6: Line 1 中点单极接地故障,  $R_g=300 \Omega$  单极接地故障大多伴随着过渡电阻的存在,考虑线路发生高阻故障的场景,设置 Line 1 中点单极接地故障,过渡电阻为  $300 \Omega$ ,故障时刻为  $t=0$  ms。n 侧线模电流推演值与测量值(真实值)的波形及判据动作情况如图 10 所示。



(a) n侧电流真实值与推演值波形



(b) Hausdorff距离判据动作情况

图 10 Line 1 中点经  $300 \Omega$  过渡电阻接地故障仿真结果图  
Fig. 10 Simulation results of solid faults at the midpoint of Line 1 with  $300 \Omega$  resistance

可见,故障后,与算例 5 相似,图 10(a)中 n 侧线模电流实际值与推演值的波形出现较大差异,图 10(b)中保护的 H 值曲线完全处于浮动整定门槛曲线上方,满足保护判据式(15),仍能有效地识别为区内故障,保护动作。此时,保护能有效地响应过渡电阻高达  $300 \Omega$  的接地故障。

当接地故障的过渡电阻增大到一定程度时,保护的绩效会受到相应的减弱。电压等级越高,需要考虑的过渡电阻也越大,过渡电阻为  $300 \Omega$  作为上限来验证保护的灵敏性太过于保守,因此需要进一

步考察本方案所能耐受过渡电阻能力的大小。为进一步验证本方案保护原理的耐受过渡电阻能力, 设置过渡电阻为  $600\ \Omega$  的单极接地故障, n 侧线模电流推演值与测量值(真实值)的波形及判据动作情况如图 11 所示。

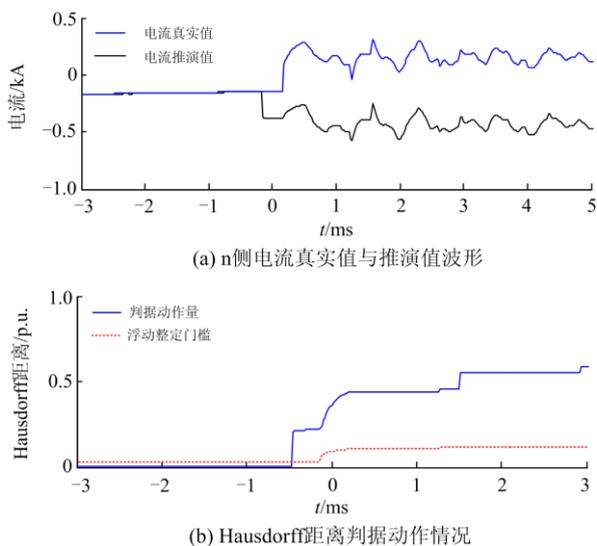


图 11 Line 1 中点经  $600\ \Omega$  过渡电阻接地故障仿真结果图  
Fig. 11 Simulation results of solid faults at the midpoint of Line 1 with  $600\ \Omega$  resistance

可知, 当线路发生过渡电阻为  $600\ \Omega$  的单极接地故障时, 所提出的保护原理仍可有效识别为区内故障。所提出的保护原理具有良好的灵敏性, 可以识别高阻故障。

#### 4.4 通信延时对算法适应性的影响

为确保多端直流电网在故障场景下的不间断运行, 保护的動作速度应能确保故障在换流器闭锁之前可靠切除。因此, 各動作时间应满足式(18)。

$$t_{\text{brk}} + t_{\text{win}} + t_{\text{delay}} + t_{\text{od}} < t_{\text{endure}} \quad (18)$$

式中:  $t_{\text{endure}}$  为故障行波到达后换流器的故障耐受时间, 一般取为  $6\ \text{ms}$ <sup>[26-27]</sup>;  $t_{\text{brk}}$  为断路器的動作时间, 可取为  $2\ \text{ms}$ <sup>[28]</sup>;  $t_{\text{win}}$  为 Hausdorff 时间窗, 因本文所提出的保护原理需要未来  $2\ \text{ms}$  时间窗内的数据, 因此固有延时为  $2\ \text{ms}$ ;  $t_{\text{delay}}$  为通信时间, 取光在光纤介质中以  $v_c$  的速度从一侧传递到对侧所需要消耗的时间;  $t_{\text{od}}$  为保障保护可靠性的  $0.5\ \text{ms}$  附加延时。当线路长度增加到一定程度时, 对侧保护向本侧传输加速信号的通信延时会过长, 导致式(18)不成立, 最终结果是换流器在保护動作、直流断路器切除故障前闭锁。根据式(18)可得线路长度上限约束为

$$t_{\text{brk}} + t_{\text{win}} + \frac{l}{v_c} + t_{\text{od}} < t_{\text{endure}} \quad (19)$$

式中:  $l$  为线路总长;  $v_c$  为光纤信号的传播速度, 取为  $2 \times 10^5\ \text{km/s}$ 。解式(19)可以得出, 线路长度的上限约束为  $l < 300\ \text{km}$ 。当线路长度在上述范围内时, 保护延时(包括通信延时)在换流器的极限耐受能力范围内; 当线路长度大于  $300\ \text{km}$  时, 受到所增加的通信延时的影响, 换流器可能在保护動作、直流断路器切除故障之前已经闭锁。因此在  $l < 300\ \text{km}$  的情况下, 所提出的保护原理能够做主保护使用, 否则只能做后备保护使用。在目前已建设的张北四端柔性直流电网工程中, 由于四条柔性直流线路长度在  $78.3 \sim 184.4\ \text{km}$  之间, 均小于上述线路长度上限, 因此通信延时不会影响保护動作性能。

## 5 结论

为解决现有纵联差动保护应用到多端柔性直流电网时速动性不足的问题, 本文基于贝瑞隆模型有效地消除电容电流的影响, 利用 Hausdorff 距离算法得到电流推演值与原始值的差异, 实现了一种多端柔性直流输电线路超高速纵联保护原理。本文直流通理论分析和仿真测试, 研究结论如下:

- 1) 所提出的保护原理能响应高达  $600\ \Omega$  过渡电阻的高阻故障;
- 2) 所提出的保护原理能在  $3\ \text{ms}$  内对区内/外故障进行准确有效地辨识, 可靠性高。
- 3) 当输电线路小于  $300\ \text{km}$  时, 所提出的保护原理能够在换流器关断前实现故障的隔离。在此前提下, 通信延时不对保护的速动性构成影响。

## 参考文献

- [1] 童宁, 林湘宁, 张雪松, 等. 不依赖于边界元件的架空型多端柔直电网就地测距式接地保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(7): 2049-2060.  
TONG Ning, LIN Xiangning, ZHANG Xuesong, et al. Fault location based single-ended protection strategy for overhead VSC-MTDC independent on boundary component[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(7): 2049-2060.
- [2] 于洋, 孙学锋, 高鹏, 等. 高压直流输电线路暂态保护分析与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 148-154.  
YU Yang, SUN Xuefeng, GAO Peng, et al. Analysis and prospect on transient protection for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2015,

- 43(2): 148-154.
- [3] 高锡明, 张鹏, 贺智. 直流输电线路保护行为分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(14): 96-99.  
GAO Ximing, ZHANG Peng, HE Zhi. Analysis of protection behavior of DC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(14): 96-99.
- [4] 宋国兵, 蔡新雷, 高淑萍, 等. 利用电流频率特性的 VSC-HVDC 直流输电线路纵联保护[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1989-1996.  
SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. New pilot protection for VSC-HVDC transmission lines using natural frequency characteristic of current[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(8): 1989-1996.
- [5] 戴志辉, 张程, 刘宁宁, 等. 基于反行波差值的特高压直流线路纵联保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 1-10.  
DAI Zhihui, ZHANG Cheng, LIU Ningning, et al. A pilot protection scheme for UHVDC lines based on backward traveling-wave difference[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 1-10.
- [6] 戴志辉, 严思齐, 张程, 等. 基于电流特征量相关系数的 UHVDC 线路纵联保护新原理[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 31-38.  
DAI Zhihui, YAN Siqi, ZHANG Cheng, et al. A new pilot protection for UHVDC lines based on correlation coefficient of designed current variables[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 31-38.
- [7] 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.
- [8] 张楠, 陈潜, 王海军, 等. 直流线路纵差保护算法的改进及仿真验证[J]. 南方电网技术, 2009, 3(4): 56-59.  
ZHANG Nan, CHEN Qian, WANG Haijun, et al. Improvement and simulation validation of DC line longitudinal differential protection[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(4): 56-59.
- [9] ZHENG Xiaodong, TAI Nengling, THORP J S, et al. A transient harmonic current protection scheme for HVDC transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2278-2285.
- [10] ZHENG Xiaodong, TAI Nengling, WU Zhongyu, et al. Harmonic current protection scheme for voltage source converter-based high-voltage direct current transmission system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(9): 1509-1515.
- [11] HA Hengxu, YU Yang, YI Ruipeng, et al. Novel scheme of travelling wave based differential protection for bipolar HVDC transmission lines[C] // Proceedings of International Conference on Power System Technology, October 24-28, 2010, Hangzhou, China: 1-6.
- [12] 王钢, 罗健斌, 李海锋, 等. 特高压直流输电线路暂态能量保护[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 28-31.  
WANG Gang, LUO Jianbin, LI Haifeng, et al. Transient energy protection for  $\pm 800$  kV UHVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 28-31.
- [13] KATO Y, WATANABE A, KONISHI H, et al. Cable section fault detection for HVDC line protection[J]. IEEE Power Engineering Review, 1986, 6(7): 69-70.
- [14] 张培东, 何杰. 高压直流输电线路纵联差动保护研究[J]. 电工技术, 2008, 29(11): 32-34.  
ZHANG Peidong, HE Jie. Study of current differential protection of HVDC line[J]. Electric Technology, 2008, 29(11): 32-34.
- [15] 夏经德, 索南加乐, 王志恩, 等. 基于纵联阻抗相角的输电线路纵联保护[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(5): 20-27.  
XIA Jingde, SUONAN Jiale, WANG Zhi'en, et al. Transmission line pilot protection based on pilot impedance angle[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(5): 20-27.
- [16] 宋国兵, 高淑萍, 蔡新雷, 等. 高压直流输电线路继电保护技术综述[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 123-129.  
SONG Guobing, GAO Shuping, CAI Xinlei, et al. Survey of relay protection technology for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 123-129.
- [17] 李岩, 陈德树, 张哲, 等. 超高压长线电容电流对差动保护的影响及补偿对策仿真分析[J]. 继电器, 2001, 29(6): 6-9.  
LI Yan, CHEN Deshu, ZHANG Zhe, et al. The emulation analysis for the influence of capacitance current of UHV transmission line on differential current protection and compensating countermeasure[J]. Relay, 2001, 29(6): 6-9.
- [18] 申志成, 张慧媛, 周庆捷, 等. 基于贝瑞隆模型的故障

- 分量相位相关特高压输电线路保护新方法[J]. 智能电网, 2016, 4(5): 447-451.
- SHEN Zhicheng, ZHANG Huiyuan, ZHOU Qingjie, et al. A new method of phase-related UHV transmission lines protection based on fault component of bergeron model[J]. Smart Grid, 2016, 4(5): 447-451.
- [19] 宋国兵, 蔡新雷, 高淑萍, 等. VSC-HVDC 频变参数电缆线路电流差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 105-111.
- SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. A new current differential protection principle of VSC-HVDC considering frequency-dependent characteristic of cable line[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 105-111.
- [20] 李斌, 郭子煊, 姚斌, 等. 适用于半波长线路的贝瑞隆差动改进算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 80-85.
- LI Bin, GUO Zixuan, YAO Bin, et al. Bergeron model based current differential protection modified algorithm for half-wavelength transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 80-85.
- [21] 薛士敏, 贺家李, 李永丽. 特高压输电线路基于贝瑞隆模型的距离保护[J]. 继电器, 2005, 33(19): 1-4, 13.
- XUE Shimin, HE Jiali, LI Yongli. Distance protection based on Bergeron model for UHV transmission lines[J]. Relay, 2005, 33(19): 1-4, 13.
- [22] 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.
- [23] 杨亚宇, 邵能灵, 范春菊, 等. 利用峰值频率的高压直流输电线路纵联保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15): 4304-4314, 4570.
- YANG Yayu, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. A pilot protection scheme for HVDC transmission lines based on specific-frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15): 4304-4314, 4570.
- [24] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析(上册)[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [25] DOMMEL H W. Electromagnetic transients program reference manual[M] // EMTP Theory Book, Bonneville Power Administration, 1986.
- [26] TONG Ning, LIN Xiangning, LI Yan, et al. Local measurement-based ultra-high-speed main protection for long distance VSC-MTDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 353-364.
- [27] 孙栩, 曹士冬, 卜广全, 等. 架空线柔性直流电网构建方案[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 678-682.
- SUN Xu, CAO Shidong, BU Guangquan, et al. Construction scheme of overhead line flexible HVDC grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 678-682.
- [28] 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.

收稿日期: 2019-08-06; 修回日期: 2019-09-29

作者简介:

林湘宁(1970—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护和新能源发电等; E-mail: xiangning.lin@hust.edu.cn

胡仙清(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护及其自动化; E-mail: 894937678@qq.com

童宁(1988—), 男, 通信作者, 博士后, 工程师, 研究方向为继电保护及直流输电技术。E-mail: tongning@hust.edu.cn

(编辑 周金梅)