

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201613

基于高压直流输电线路分布参数模型的模态电流 差动保护算法

邵庆祝¹, 赵晓东², 赵创业³, 平夏⁴

(1. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230000; 2. 国网安徽省电力有限公司宿州供电公司, 安徽 宿州 234000; 3. 国网安徽省电力有限公司淮北供电公司, 安徽 淮北 235000; 4. 国网安徽省电力有限公司淮南供电公司, 安徽 淮南 232000)

摘要: 高压直流输电传输线分布电容电流会造成电流差动保护无法立即区分区内、外故障, 为避免保护误动作需要增加保护时间延迟和阈值, 大大降低了电流差动保护的動作速度和靈敏性。为了使电流差动保护不受传输线分布电容电流影响, 在基于传输线分布参数模型上考虑了正负极线路耦合特性, 提出了适用于高压直流输电线路的模态电流差动保护算法。该算法以共模补偿电流作为故障识别依据, 以差模补偿电流作为故障选极依据。该模态电流差动保护算法在故障期间可以进行故障选区和故障判极, 且靈敏度高、動作速度快。最后通过 PSCAD/EMTDC 仿真验证了该保护方法的可行性和有效性。

关键词: 高压直流输电; 差动保护; 分布参数模型; 模态电流; 耦合特性

Modal current differential protection method based on distributed parameter model of an HVDC transmission line

SHAO Qingzhu¹, ZHAO Xiaodong², ZHAO Chuangye³, PING Xia⁴

(1. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230000, China; 2. Suzhou Power Supply Company, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Suzhou 234000, China; 3. Huaibei Power Supply Company, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Huaibei 235000, China; 4. Huainan Power Supply Company, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Huainan 232000, China)

Abstract: The distribution capacitor current of a high voltage DC transmission line will cause the current differential protection to fail to distinguish between faults within and outside the zone immediately. In order to avoid the incorrect trip of protection, the time delay and threshold need to be increased. This greatly reduces the action speed and sensitivity of current differential protection. In order not to be influenced by capacitor current of transmission line, this paper considers the coupling characteristics of positive and negative lines on the transmission line distribution parameter model, and puts forward a new mode current differential protection algorithm for a HVDC transmission line. The algorithm uses common mode compensation current as the fault identification basis and differential mode compensation current as the fault pole selection basis. This mode current differential protection can select fault zone and distinguish fault pole during the fault, with high sensitivity and high speed of movement. Finally, the feasibility and effectiveness of this protection method are verified by PSCAD/EMTDC simulation.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600).

Key words: HVDC; differential protection; distributed parameter model; mode current; coupling characteristics

0 引言

高压直流输电系统以其输电距离长、输电能力强、工程造价低等显著优势被越来越多地应用于远

距离、大容量输电和异步互联电网中^[1-2]。然而, 由于高压直流输电线路距离长、输电走廊环境复杂致使直流线路短路故障频发, 因此能改善直流输电线路保护性能的保护方案受到了越来越广泛的关注^[3]。

传统的差动保护算法利用两端电流实现对输电线路的选择性, 并作为 HVDC 输电线路的备用保

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900600)

护^[4-7]。随着传输距离和电压水平的增加,线路的分布电容显著增大,传统差动保护的延时效应越来越明显,使得保护难以发挥有效作用。因此,目前的电流差动保护必须提高阈值和延时,以避免系统在受到干扰或外部故障时受分布电容电流影响而引起误动^[8]。针对该问题,目前已有大量的学者进行了广泛研究。文献[9]提出了一种针对多端子直流(MTDC)栅极的差动保护,沿传输线安装多点光学电流传感器,根据传感器测得的电流,制定差动保护准则。然而,该保护通过控制传感器之间的距离来降低分布电容电流的影响,意味着该差动保护需要使用大量的传感器,因此其经济效益和可行性不高;文献[10]提出了一种适用于VSC-HVDC频变参数电缆电路的电流差动保护新原理和整定原则,同时给出计算频变参数线路沿线电流分布的新方法,从理论上消除了故障暂态以及负荷调整过程中直流电压变化引起的分布电容电流的影响。

为了进一步提高线路差动保护的性能,文献[11-14]采用分布参数模型对线路分布电容电流进行补偿,计算得到精度更高的线路电流,以此作为线路差动保护阈值,保护动作正确性显著提高,但得到的线路差分电流会在区外故障时出现振荡,可能导致保护误动作;文献[15]优化行波传输速度,使其不受线路参数的影响,能有效克服环境因素给沿线波速带来的误差;文献[16]针对直流输电单极故障通过等效模量法建立了等效模型。文献[17]提出利用边界元件、特征频率、控制与保护结合方式,消除了电容电流的影响,进一步提高了保护控制的可靠性。

本文针对输电线路参数分布特性和耦合特性引起的问题,首先分析了区内外单极接地故障下的不平衡电流,基于此提出了基于电流补偿的电流差动保护改进方案;然后在直线路分布参数模型的基础上,提出了基于补偿电流的直流输电线路模态电流差动保护算法;最后搭建电磁暂态模型,对所提出差分算法的有效性进行验证。仿真结果表明,在不考虑线路传播特性影响的情况下,所提差动保护算法在外部故障和内部故障中均能正常运行,同时具有较高的灵敏度,验证了所提差动保护算法的有效性和可行性。

1 差动保护的基本原理

双极高压直流输电系统的配置结构如图 1 所示。其由换流变压器、换流器、直流滤波单元和直流输电线路组成。传输线路(正极和负极)连接整流站和逆变站,在换流站出口安装测量单元。

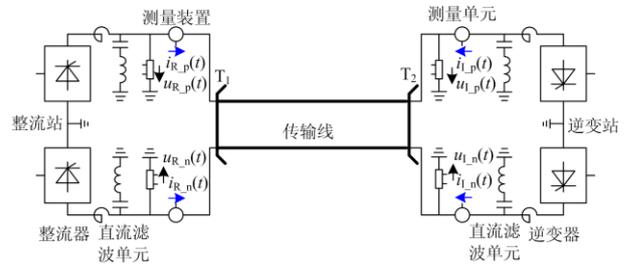


图 1 HVDC 输电系统电路图

Fig. 1 Circuit diagram of the HVDC transmission system

传统电流差动保护^[10]使用整流站和逆变站直流出口的电流($i_{R,p}, i_{R,n}, i_{I,p}, i_{I,n}$)作为保护判据,其具体判断标准如式(1)所示。

$$i_{diff_φ}(t) = |i_{R_φ}(t) + i_{I_φ}(t + \Delta t_{delay})| \geq I_{op} \quad (1)$$

式中: $\phi = (p, n)$; Δt_{delay} 为传输延时; I_{op} 为电流阈值。当传输线发生区外故障时,该线路没有故障分支,保护不误动;当传输线发生内部故障时,直流线路之间存在故障支路和故障电流,当根据式(1)计算的差动电流 $i_{diff_φ}$ 大于阈值 I_{op} 时,将启动保护功能,因此可以用式(1)作为常规电流差动保护判据。

当考虑传输线分布参数特性之后,分布电容电流可能导致区外故障时的差动电流 $i_{diff_φ}$ 大于阈值 I_{op} ,造成保护误动作。区外单极接地故障如图 2 所示, F 为线路区外故障点, C 为沿传输线分布的电容, $i_c(t)$ 为区外故障时传输线分布电容的充电电流。当线路较长时,分布电容电流的影响更显著。当式(1)计算出的差动电流 $i_{diff_φ}(t) = \sum i_c(t)$ 超过保护阈值 I_{op} 时,常规电流差动保护在区外故障下将会误动作。

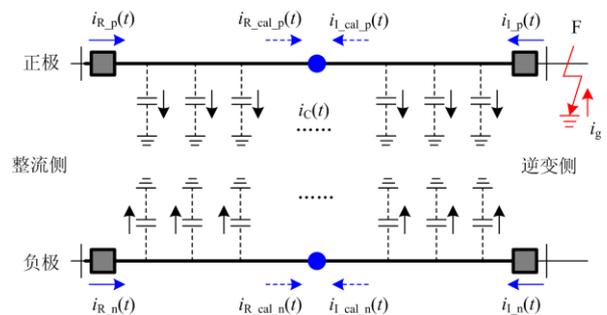


图 2 区外单极接地故障

Fig. 2 Out-of-area unipolar ground fault

2 基于模态补偿电流的改进保护判据

2.1 补偿电流保护判据

如图 2 所示,选择传输线上的任意区内故障点

作为补偿点, 使用整流侧和逆变侧的电流测量值 ($i_{R_p}, i_{R_n}, i_{L_p}, i_{L_n}$) 计算补偿点的电流值 ($i_{R_cal_p}, i_{R_cal_n}, i_{L_cal_p}$ 和 $i_{L_cal_n}$), 改进的保护判据如式(2)所示。

$$i_{diff_cal_p}(t) = |i_{R_cal_p}(t) + i_{L_cal_p}(t + \Delta t_{delay})| \geq I'_{op} \quad (2)$$

当式(2)计算的差分电流 $i_{diff_cal_p}$ 大于保护阈值 I'_{op} 时, 保护启动, 其中差分电流 $i_{diff_cal_p}$ 是基于补偿点计算得出的电流, 当线路发生区外故障或系统干扰时, 差分电流 $i_{diff_cal_p}$ 很小, 该保护判据可以消除分布电容电流的影响。

要确定式(2)中的保护判据, 应先计算补偿点电流。在双极高压直流输电系统中, 由于正负极线路参数的耦合特性, 首先根据极模转换将正负极电流转换为差模和共模电流分量, 如式(3)和式(4)^[18-21]。

$$\begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_p(t) \\ i_n(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_p(t) \\ i_n(t) \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $i_p(t)$ 和 $i_n(t)$ 分别为正负极线路电流; $i_d(t)$ 和 $i_c(t)$ 是线路电流的差模和共模分量, 其通过式(3)的解耦矩阵, 将测得的正极和负极线路电流解耦为共模和差模分量, 再根据传输线的分布参数模型计算补偿点的模态电流, 最后通过式(4)的反变换矩阵, 将计算出的模态电流分量转换为补偿点处的正负极电流。

2.2 补偿电流计算方法

输电线路单极接地故障如图 3 所示, 图中: l 为线路全长; l_c 为补偿点到整流侧换流站的距离, l'_c 为补偿点到逆变侧换流站的距离; x 为故障点到整流侧换流站的距离; x' 为故障点到补偿点的距离。

图中故障分支电流 i_g 用红线表示, $i_{R_cal_p}(l_c, t)$ 和 $i_{R_cal_n}(l_c, t)$ 是使用整流侧实测值计算出的补偿点 C 的正极电流和负极电流; $i_{L_cal_p}(l'_c, t)$ 和 $i_{L_cal_n}(l'_c, t)$ 是使用逆变侧实测值计算出的补偿 C 点的正极电流和负极电流; $i_{g_cal_p}(x')$ 和 $i_{g_cal_n}(x')$ 是在补偿点 C 上计算出的模态电流。 $i_{R_cal_p}(x, t)$ 和 $i_{R_cal_n}(x, t)$ 是使用整流侧电流实测值计算出的故障点 F 的正极和负极电流, $i_{L_cal_p}(l-x, t)$ 和 $i_{L_cal_n}(l-x, t)$ 是使用逆变侧实测值计算出的补偿点 C 的正极电流和负极电流。

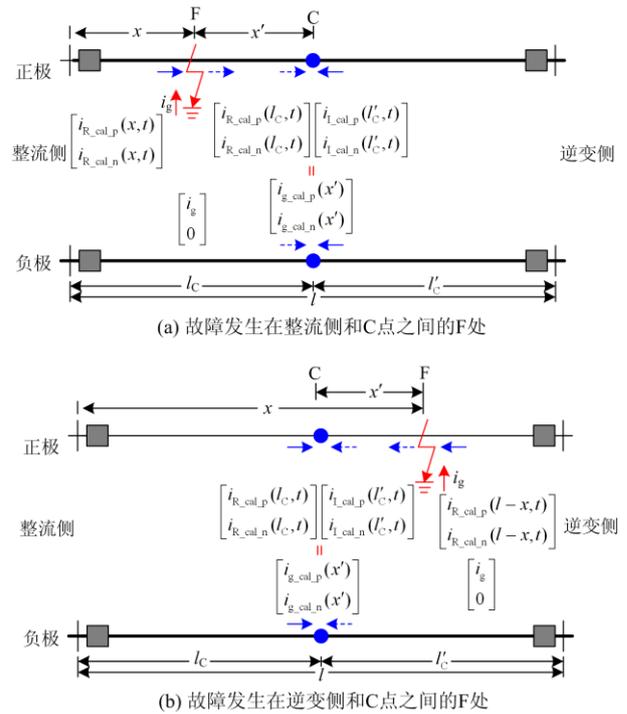


图 3 单极接地故障

Fig. 3 Unipolar ground fault

如图 3(a)所示, 正极接地故障发生在整流侧和补偿点 C 之间的 F 点。逆变侧与补偿点 C 之间没有故障点, 因此逆变侧计算的补偿点 C 的电流 [$i_{L_cal_p}(l'_c, t)$, $i_{L_cal_n}(l'_c, t)$] 与补偿点的实际电流相等。

当整流侧和补偿点 C 之间存在故障点 F, 在故障点之前, 使用整流侧电流计算出的故障点 F 的电流 [$i_{R_cal_p}(x, t)$, $i_{R_cal_n}(x, t)$] 等于故障点的实际电流; 在故障后, 实际电流包含两部分: 计算出的电流 [$i_{R_cal_p}(x, t)$, $i_{R_cal_n}(x, t)$] 和故障分支电流 [$i_g, 0$]。因此可利用补偿点 C 计算出的电流, 通过式(2)转换为模态电流 [$i_{g_cal_p}(x')$, $i_{g_cal_n}(x')$], 其中差模电流 $i_{g_cal_n}(x')$ 是由故障分支电流 [$i_g, 0$] 引起的。图 3(b) 为逆变侧与 C 点之间的 F 点发生单极接地故障, 具体分析过程与图 3(a)相同, 不再展开叙述。

以下进行故障电流的具体计算^[22-24]。由波动方程推导, 带距离的电流计算公式如式(5)所示。

$$I_{cal} = \cosh(\gamma \cdot d) \cdot \dot{I} - \sinh(\gamma \cdot d) \cdot \dot{U} / Z_c \quad (5)$$

式中: 传播系数 $\gamma = \sqrt{(R + j\omega \cdot L) \cdot (G + j\omega \cdot C)}$; 波阻抗 $Z_c = \sqrt{(R + j\omega \cdot L) / (G + j\omega \cdot C)}$; d 为计算距离; \dot{U} 和 \dot{I} 为测得的电压和电流。

故障后的实际电流包含两部分, 当其中一部分电流被排除时, 就会产生差动电流。如式(6)所示,

电流 i 包含 i_{p1} 与 i_{p2} 两个部分。当 i_{p2} 被排除时，得到的差分电流等于 $\cosh(\gamma \cdot d) \cdot \dot{I}_{p2}$ 。

$$\begin{aligned} i_{cal} &= \cosh(\gamma \cdot d) \cdot [i_{p1} + i_{p2}] - \sinh(\gamma \cdot d) \cdot \frac{\dot{U}}{Z_c} = \\ & [\cosh(\gamma \cdot d) \cdot i_{p1} - \sinh(\gamma \cdot d) \cdot \frac{\dot{U}}{Z_c}] + \cosh(\gamma \cdot d) \cdot i_{p2} \end{aligned} \quad (6)$$

当发生正极接地故障时，故障极的差分电流 $i_{diff_cal_p}$ 和非故障极补偿点 C 的不平衡电流 $i_{diff_cal_n}$ 的计算过程为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_{diff_cal_p} \\ i_{diff_cal_n} \end{bmatrix} &= \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_{0_d} \cdot x') & 0 \\ 0 & \cosh(\gamma_{0_c} \cdot x') \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_g \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_g \\ 0 \end{bmatrix} = \\ & \frac{i_g}{2} \cdot \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_{0_c} \cdot x') + \cosh(\gamma_{0_d} \cdot x') \\ \cosh(\gamma_{0_c} \cdot x') - \cosh(\gamma_{0_d} \cdot x') \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

接下来分析补偿点位置对电流保护的影响，并将正极故障点的位置固定在距整流侧 $0.1l$ 处，通过改变补偿点位置对差分电流进行分析。本文选取传输线上两个距离不同的补偿点，与整流侧的距离分别为 $0.25l$ 和 $0.5l$ ，图 4 和图 5 为计算得到的故障极(正极)和正常极的差分电流。

从图 4 和图 5 中可以看出，在正极接地故障情形下，正极差分电流的数值基本在 2000 A 以上，由于传输线的延迟作用，补偿点越远，正极差分电流到达峰值的时间越长，但在不同补偿点下正极差分电流的峰值均在 4000 A 以上。针对负极差分电流，虽是正极发生接地故障，但由于传输线的耦合作用，仍会出现负极差分电流，其峰值在 1000 A 以下。负极差分电流随着补偿点离故障点越远，其峰值越大，但其与正极差分电流仍存在明显差异。

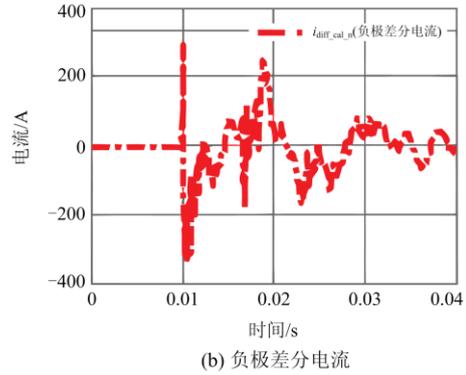
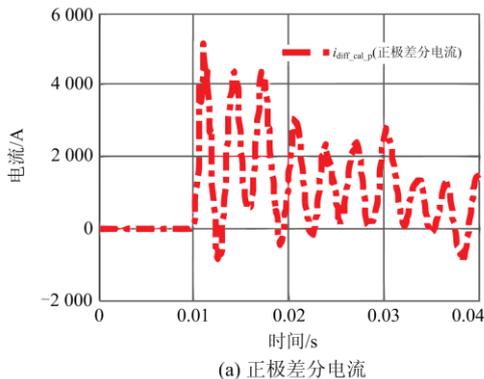


图 4 补偿点为 $0.25l$ 处的差分电流
Fig. 4 Differential current at compensation point $0.25l$

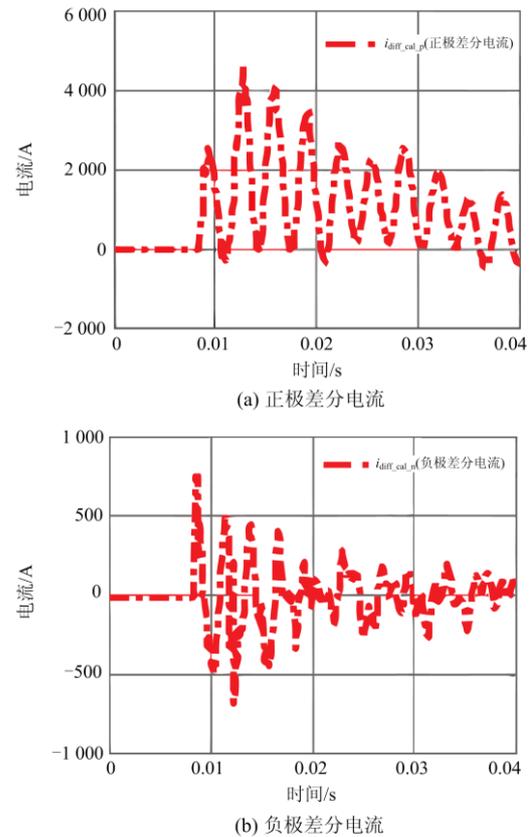


图 5 补偿点为 $0.5l$ 处的差分电流
Fig. 5 Differential current at compensation point $0.5l$

由此得到的差分电流差模分量和共模分量差异更为显著，可通过设置阈值作为故障选极的判据，而不影响差动保护的灵敏度。

3 新型模态电流差动保护算法

由上节可知，在单极接地故障过程中，传输线分布参数的耦合特性会引入相当大的不平衡电流，

使差动保护无法区分故障极, 同时也降低了保护灵敏度。为解决以上问题, 本节提出了一种基于补偿点模式电流的新型差动保护算法。

3.1 区内外判据

不同故障情况下补偿点处的共模差分电流 $i_{\text{diff_cal_c}}$ 和差模差分电流 $i_{\text{diff_cal_d}}$ 可以用式(8)一式(10)表示。

$$\begin{bmatrix} i_{\text{diff_cal_d}} \\ i_{\text{diff_cal_c}} \end{bmatrix}_{\text{正}} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_{0_d} \cdot x') & 0 \\ 0 & \cosh(\gamma_{0_c} \cdot x') \end{bmatrix} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_g \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2} \cdot i_g}{2} \cdot \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_{0_d} \cdot x') \\ \cosh(\gamma_{0_c} \cdot x') \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\text{diff_cal_d}} \\ i_{\text{diff_cal_c}} \end{bmatrix}_{\text{负}} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_{0_d} \cdot x') & 0 \\ 0 & \cosh(\gamma_{0_c} \cdot x') \end{bmatrix} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -i_g \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2} \cdot i_g}{2} \cdot \begin{bmatrix} -\cosh(\gamma_{0_d} \cdot x') \\ \cosh(\gamma_{0_c} \cdot x') \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\text{diff_cal_d}} \\ i_{\text{diff_cal_c}} \end{bmatrix}_{\text{极}} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_{0_d} \cdot x') & 0 \\ 0 & \cosh(\gamma_{0_c} \cdot x') \end{bmatrix} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_g \\ -i_g \end{bmatrix} = \sqrt{2} \cdot i_g \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \cosh(\gamma_{0_c} \cdot x') \end{bmatrix} \quad (10)$$

在系统正常运行或区外故障时, 输电线路不存在故障点和故障支路电流, 线路共模和差模下的差动电流均为零, 以此作为保护的区内外判据, 提高系统运行可靠性。

当内部故障发生时, 共模差动电流增加至 $i_g \cdot \cosh(\gamma_{0_c} \cdot x')$, 其中双曲余弦函数 $\cosh(\gamma_{0_c} \cdot x')$ 必须大于 1。因此, 可以利用共模电流制定保护判据, 以区分内部故障和外部故障。保护判据如式(11)所示。

$$\begin{cases} i_{\text{diff_cal_c}} > I_{\text{op_fd}} \Rightarrow \text{内部故障} \\ i_{\text{diff_cal_c}} \leq I_{\text{op_fd}} \Rightarrow \text{外部故障} \\ i_{\text{diff_cal_c}} = |i_{\text{R_cal_c}}(I_C, t) + i_{\text{L_cal_c}}(I'_C, t + \Delta t_{\text{delay}})| \end{cases} \quad (11)$$

上述新型模式电流差动保护不受线路分布电容参数的影响, 并且保护阈值的选择仅需考虑电流测量误差和计算误差, 根据发生区外故障时的最大不平衡电流来设置保护阈值。本文中保护阈值 $I_{\text{op_fd}}$ 设置为 $0.025I_N$, I_N 为高压直流输电系统的额定电流。

3.2 故障极选择判据

通过比较式(8)一式(10)可以看出: 当发生正极

接地故障时, 差模差分电流为正($\sqrt{2} \cdot i_g \cdot \cosh(\gamma_{0_c} \cdot x')/2$); 当发生负极接地故障时, 差模差分电流为负($-\sqrt{2} \cdot i_g \cdot \cosh(\gamma_{0_c} \cdot x')/2$); 当发生极间故障时, 差模差分电流趋近于零。因此, 可以使用差模差分电流进行故障选极, 其故障极选择判据如式(12)所示。

$$\begin{cases} i_{\text{diff_cal_d}} > I_{\text{op_ps}} \Rightarrow \text{正极故障} \\ i_{\text{diff_cal_d}} < -I_{\text{op_ps}} \Rightarrow \text{负极故障} \\ |i_{\text{diff_cal_d}}| \leq I_{\text{op_ps}} \Rightarrow \text{极间故障} \\ i_{\text{diff_cal_d}} = i_{\text{R_cal_d}}(I_C, t) + i_{\text{L_cal_d}}(I'_C, t) \end{cases} \quad (12)$$

如式(12)所示, 可以根据极间故障下传输线的最大差模差分电流设置阈值, 本文将保护阈值 $I_{\text{op_ps}}$ 设置为 $0.05I_N$ 。

图 6 为新型模式电流差动保护算法流程图。首先通过整流侧与逆变侧样本计算补偿点的共模电流, 当共模差动电流超过保护阈值时, 将故障类型确定为内部故障。然后根据差模差分电流分量的极性选定故障极。当差模分量大于正极故障检测阈值 $I_{\text{op_ps}}$ 时, 该故障被识别为正极接地故障; 当差模分量小于负极故障检测阈值 $-I_{\text{op_ps}}$ 时, 该故障被识别为负极接地故障; 当差模分量计算值在正、负故障检测阈值之间时, 该故障被识别为极间故障。

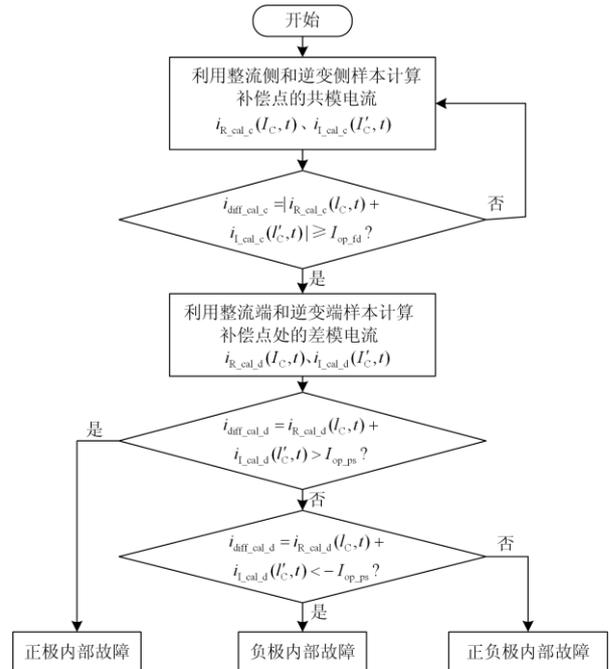


图 6 新型模式电流差动保护算法流程图

Fig. 6 Flowchart of the new mode current differential protection algorithm

4 仿真验证

本文基于PSCAD/EMTDC仿真平台搭建±500 kV HVDC输电系统，其具体结构见图1，仿真系统参数见表1。使用Matlab实现所提出的新型差动电流保护算法，并采用换流站出口测量单元测量电流数据，验证了该新型算法的可行性及有效性。

表1 仿真系统的参数

Table 1 Parameters of the simulated system

Table 1 Parameters of the simulated system		
系统	参数	数值
交流系统	额定电压/kV	525
直流系统	额定电压/kV	±500
	额定电流/kA	2
直流传输线	线路长度/km	1 000
	类型	6×LGJ-630/45
	外径/mm	33.6
	单位电阻/(Ω km ⁻¹)	0.046 33
	分裂导线间距/mm	450
	传输线间距/m	22.2
	悬挂高度/m	33.5
	接地电阻率/(Ω m)	1 000

由于本文算法是基于传输线分布式参数模型得到的，适合任何频率的信号。故理论上，所提差动保护的性能不受采样频率的影响。根据文献[15]对HVDC电力系统故障特征的分析表明，故障信号的频谱几乎集中在600 Hz、1 200 Hz和1 800 Hz处。因此，根据香农定理，本文将采样频率设置为3.6 kHz。

4.1 传输线发生区内故障

图7为距整流侧出口处正极接地故障下补偿点C处的差动电流，可以看出共模差动电流增大并超过故障识别阈值 I_{op_fd} ，差模差动电流增大并超过正极故障识别阈值 I_{op_ps} 。根据式(11)和式(12)中的保护判据，可以正确识别出故障发生在输电线路正极上。从图7中也可以看出，新型差动保护算法不受分布电容电流的影响，保护阈值相对较小，且小于故障暂态期间的差分电流与故障稳态期间恒定直流控制特性的确定值(即 $0.1I_N$)，从而在故障发生的整个过程中，保护功能均可以正确运行，并具有足够的灵敏度。

在图7的运行结果图中，值0表示外部故障，值1表示内部故障，值3表示正极对地故障，值4表示负极对地故障，值5表示极对地故障(图8—图11的运行结果图中均是如此表示)。

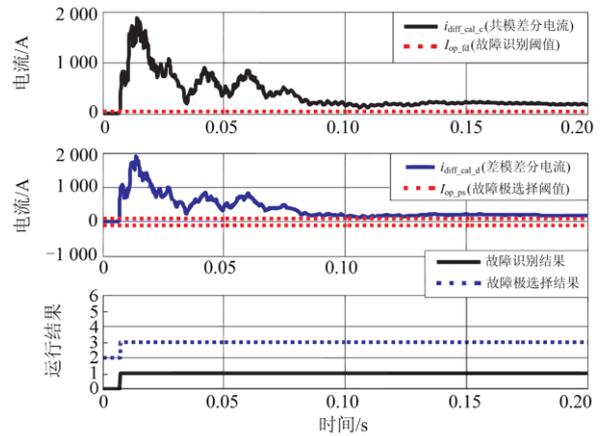


图7 在整流侧出口的正极接地故障

Fig. 7 A positive-pole-to-ground fault at the rectifier terminal

图8为距整流侧500 km处发生负极接地故障时补偿点C处计算出的差分电流，故障过程中共模差动电流增大并超过故障识别阈值 I_{op_fd} ，差模差动电流减小且小于负极故障识别阈值 $-I_{op_ps}$ ，可以正确识别出故障发生在传输线的负极上。

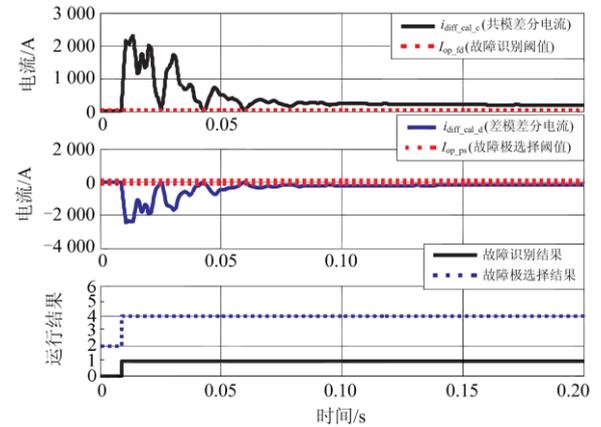


图8 距整流侧500 km的负极接地故障

Fig. 8 A negative-pole-to-ground fault at 500 km from the rectifier terminal

图9为距整流侧900 km处发生具有300 Ω过渡电阻的极间故障，在补偿点 C_M 处计算出的差动电流。故障过程中共模差动电流增大并超过故障识别阈值 I_{op_fd} ；差模差动电流在正负故障极点选择阈值之间略有波动，可以确定故障发生在传输线上的正极和负极上。

综上所述可以看出，当发生区内故障时，共模差动电流增加并超过故障识别阈值，以此作为区内外故障的判别依据，并根据差模差动电流来正确选择故障极。

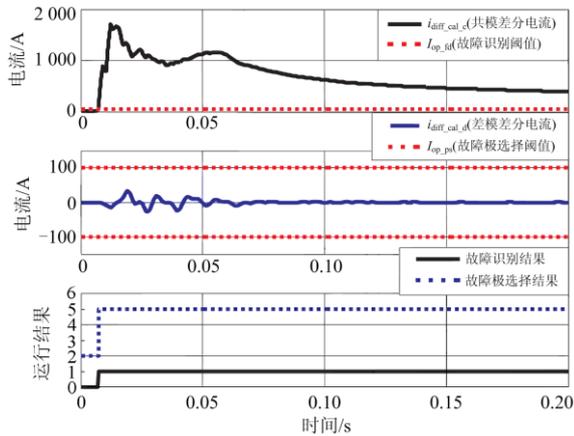


图 9 在整流侧 900 km 处具有 300 Ω 过渡电阻的极间故障
Fig. 9 A pole-to-pole fault with 300 Ω transition resistance at 900 km from the rectifier terminal

4.2 区外故障

针对整流侧和逆变侧区外故障来验证新型电流差动保护的可靠性, 图 10 和图 11 分别为传输线区外整流侧和逆变侧发生正极接地故障的仿真结果。

由图 10 可以看出, 当整流侧发生区外故障时, 共模差分电流小于故障识别阈值 I_{op_fd} , 新型差分电流保护不误动。同理从图 11 中也可以看出, 在逆变侧发生区外故障时, 保护也不动作。

图 7—图 11 的仿真结果表明, 在传输线区内发生故障时, 所提出的新型电流差动保护算法能够准确识别故障线路并正确动作; 在区外发生故障时, 能够不误动, 提高了整个系统的运行可靠性。

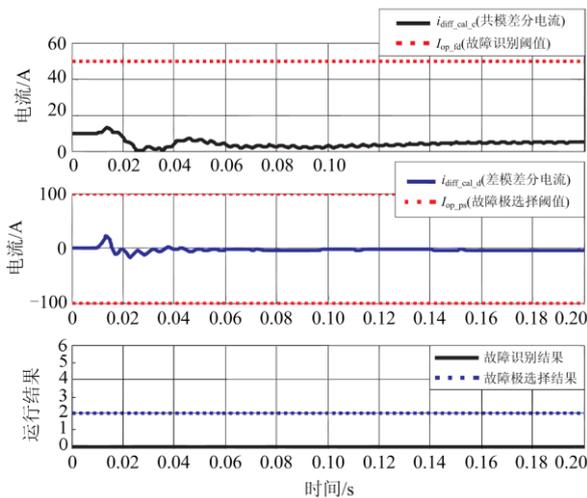


图 10 传输线区外整流侧正极接地故障
Fig. 10 A positive-pole-to-ground fault at rectifier terminal out of transmission line

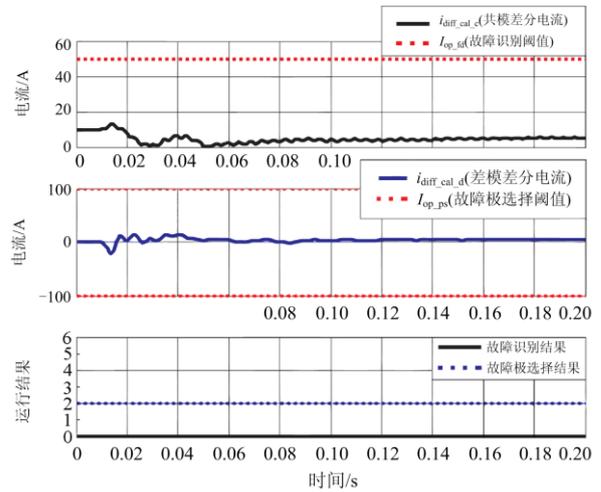


图 11 传输线区外逆变侧正极接地故障
Fig. 11 A positive-pole-to-ground fault at the inverter terminal out of the transmission line

4.3 不同保护算法结果对比

为了进一步证明所提算法的优势, 本文选取了不同电流差动保护算法进行了仿真比较, 并分别根据式(1)、式(2)和式(12)计算差分电流, 其中判据式(12)为本文所提算法。图 12、图 13 分别为三种算法在区内和区外故障的仿真结果。

如图 12 所示, 在距整流侧 50 km 处发生负极接地故障, 图 12(a)分别为利用整流侧和逆变侧测量单元实测电流数据, 并根据保护判据(1)计算出非故障极(正极)的差分电流 i_{diff_p} , 利用 C 点的补偿电流, 根据保护判据(2)计算非故障极(正极)的差分电流 $i_{diff_cal_p}$, 虚线表示故障识别的阈值。当输电线路发

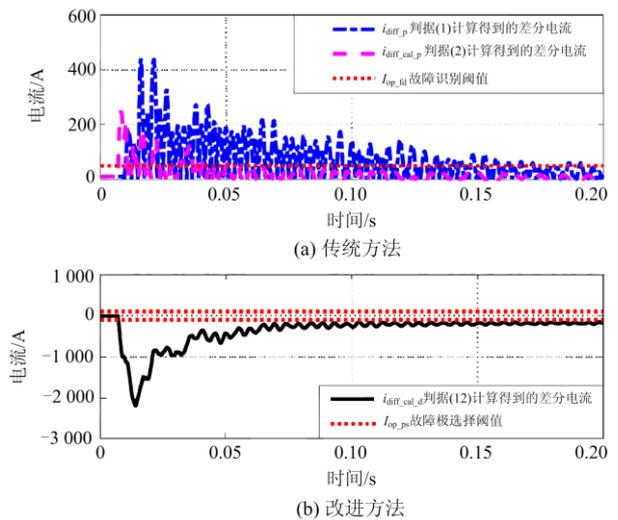


图 12 仿真结果的比较(区内故障)
Fig. 12 Comparison of the simulation results (internal fault)

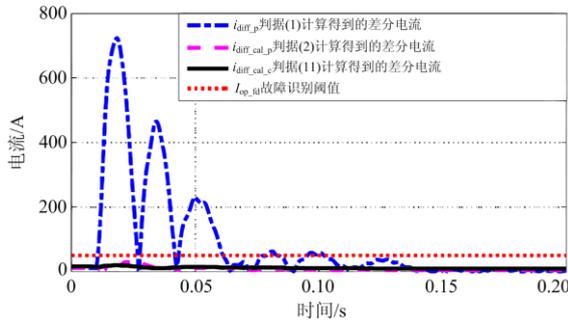


图 13 仿真结果的比较 (区外故障)

Fig. 13 Comparison of the simulation results (external fault)

生单极对地故障时, 非故障极(正极)的差分电流 i_{diff_p} 和 $i_{diff_cal_p}$ 超过故障识别的阈值, 传统的非故障极保护失效, 发生误动作。

图 12(b)为采用保护判据(12)计算出的差模差动电流, 其小于选择故障极的阈值 $-I_{op_ps}$ 。根据判据(12), 识别出故障发生在负极, 非故障极(正极)不会发生误动作。图 13 为传输线整流侧发生区外正极接地故障, 此时根据式(11)作为本文所提算法的故障判别依据, 其余两种传统算法仍以式(1)和式(2)作为判别依据。

从图 13 可以看出, 利用判据(1)计算得到的差分电流出现较大的振荡现象, 超出了故障识别阈值, 导致电流差动保护在区外故障时误动作, 而用本文所提方法计算的差分电流能够很好地消除振荡现象, 不受区外故障干扰。

表 2 为区内故障下不同保护算法的动作时间对比。

表 2 保护算法动作时间对比

Table 2 Comparison of protection algorithm action time

	出口处 极间故障	出口 500 km 极间故障	出口 900 km 极间故障
判据(1) 动作时间/ms	2.48	2.97	3.07
判据(2) 动作时间/ms	2.57	3.52	3.86
判据(11) 动作时间/ms	2.06	2.54	2.85

从表 2 可以看出, 三种保护算法都存在故障在线路上传播造成的时间延迟, 但模态电流差动保护算法无论在出口处故障还是在线路上故障, 其差动保护动作时间均小于另外两种传统差动保护算法, 其动作速度更快。

5 结论

本文提出了基于补偿点模态电流的新型差动保

护算法, 该算法根据传输线分布电容特性及正负极耦合特性来计算线路补偿点故障电流, 并以此作为电流差动保护判据。

所提算法不受区外故障、线路分布电容、运行工况等影响, 能够准确快速地判别区内外故障, 并进行故障极判别, 有效避免了传输线单极接地故障时正常线路保护的误动作。

与传统电流差动保护算法进行对比, 本文所提算法能够在各类型故障下准确识别故障线路, 解决了传统算法区外故障和单极接地故障的误动作问题。

参考文献

- [1] 梁旭明, 张平, 常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 1-9.
LIANG Xuming, ZHANG Ping, CHANG Yong. Recent advances in high-voltage direct-current power transmission and its developing potential[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 1-9.
- [2] 王伟. 特高压直流输电控制保护系统实时仿真技术的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 142-147.
WANG Wei. Research and application of real-time simulation technology for UHVDC control and protection system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 142-147.
- [3] 李勇, 时伯年, 谢俊, 等. 渝鄂柔性直流工程接入对 500 kV 交流线路差动保护影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 149-155.
LI Yong, SHI Bonian, XIE Jun, et al. Influence study of Chongqing-Hubei VSC-HVDC interconnection on 500 kV AC line differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 149-155.
- [4] 罗立波, 朱咏明, 吴伟丽. 多直流单极运行下的偏磁直流分布关键点辨识方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(23): 54-62.
LUO Libo, ZHU Yongming, WU Weili. Identification method of key substation of DC bias distribution under multi DC monopole operation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(23): 54-62.
- [5] TANG L X, DONG X Z, LUO S X. A new differential protection of transmission line based on equivalent travelling wave[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1359-1369.
- [6] 褚旭, 孙锦琛. 直流输电线路单极故障不平衡电流分析及差动保护改进方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 47-56.
CHU Xu, SUN Jinchen. Analysis of single-pole fault unbalanced current and improvement of a differential protection scheme for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 47-56.
- [7] KHAZAEI J, IDOWU P, ASRARI A, et al. Review of HVDC control in weak AC grids[J]. Electric Power

- Systems, 2018, 162(1): 194-206.
- [8] 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.
- [9] TZELEPIS D, DYSKO A, FUSIEK G, et al. Single-ended differential protection in MTDC networks using optical sensors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1605-1615.
- [10] 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. Novel current differential protection principle of VSC-HVDC considering frequency-dependent characteristic of cable line[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 105-111.
- [11] 郭征, 贺家李. 输电线纵联差动保护的新原理[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(11): 1-5.
GUO Zheng, HE Jiali. Novel principle of pilot differential relay protection transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 1-5.
- [12] 彭宇锋, 张英敏, 李俊松, 等. 考虑线路电容的 MMC-HVDC 系统 直流接地故障电流计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23): 57-63.
PENG Yufeng, ZHANG Yingmin, LI Junsong, et al. Ground fault current calculation method for an MMC-HVDC system considering line capacitance[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 57-63.
- [13] 张斯淇. 基于分布参数模型的高压输电线路故障测距算法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
ZHANG Siqi. Research on high voltage transmission line fault location algorithm based on distributed parameter model[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [14] 李文睿. 特/超高压输电线路参数计算的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
LI Wenrui. Research on parameter calculation of UHV/UHV transmission lines[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [15] 田斌, 方覃绍阳, 李振兴, 等. 基于波速修正的多回输电线路行波测距算法[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 184-189.
TIAN Bin, FANG Qinshaoyang, LI Zhenxing, et al. Parallel multiloop transmission line travelling wave location algorithm based on amending wave velocity[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 184-189.
- [16] 杨楠, 崔伟, 王智伟, 等. 含风电特高压直流系统单极接地故障暂态特性研究[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 142-149.
YANG Nan, CUI Wei, WANG Zhiwei, et al. Research on transient characteristics of monopolar grounding fault for wind power integrated UHVDC[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 142-149.
- [17] 李振兴, 谭洪, 叶诗韵, 等. 特高压直流线路保护研究现状分析[J]. 高压电器, 2018, 54(5): 184-189.
LI Zhenxing, TAN Hong, YE Shiyun, et al. Current status analysis on protection of UHVDC transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(5): 184-189.
- [18] 李化, 林福昌, 何俊佳, 等. 相模变换法分析特高压直流输电线路接地故障[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 51-55.
LI Hua, LIN Fuchang, HE Junjia, et al. Analysis of grounding fault in HVDC system by phase-modal transformation[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11): 51-55.
- [19] TANG L X, DONG X Z. A travelling wave differential protection scheme for half wavelength transmission line[J]. Electric Power Energy Systems, 2018, 9(10): 376-384.
- [20] 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.
- [21] 李娟, 薛永端, 徐丙垠, 等. 单相均匀传输线暂态模型参数计算[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1083-1089.
LI Juan, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. Parameter calculation of transient model for single-phase uniform transmission line[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1083-1089.
- [22] 吴娜, 杨征贤, 樊淑娴, 等. 架空配电线路行波依频传输特性分析[J]. 电测与仪表, 2021, 58(1): 165-171.
WU Na, YANG Zhengxian, FAN Shuxian, et al. Analysis of traveling wave frequency-dependent transmission characteristics of overhead distribution lines[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(1): 165-171.
- [23] 高海龙, 卿俊杰. 高压直流电力线路分布参数计算分析[J]. 电气技术, 2019, 20(9): 69-72.
GAO Hailong, QING Junjie. Calculation and analysis of distributed parameters of high-voltage DC power lines[J]. Electrical Technology, 2019, 20(9): 69-72.
- [24] 鲍乐, 丛伟, 胡姝, 等. 基于同步采样值的输电线路参数非解耦算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(5): 23-28.
BAO Le, CONG Wei, HU Shu, et al. Transmission line parameter non-decoupling algorithm based on synchronous sampling value[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2016, 28(5): 23-28.

收稿日期: 2020-12-24; 修回日期: 2021-05-06

作者简介:

邵庆祝(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: gexia92159766@yeah.net

赵晓东(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: cfxtox@163.com

赵创业(1987—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: jdffv@163.com

(编辑 姜新丽)