

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200333

# 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

褚旭, 孙锦琛

(国家电能变换与控制工程技术研究中心(湖南大学), 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 电流差动保护基于基尔霍夫电流定律, 其从原理上具有绝对的选择性。但随着输电距离日益增加、线路分布特征愈加显著, 传统电流差动保护需要增长延时、提高门槛以避免故障暂态分布电容电流引起的误动, 降低了保护速动性、灵敏度。为了解决上述问题, 研究了利用线路补偿点计算电流的差动保护改进判据, 对由线路参数耦合特性引入的健全极不平衡电流的产生机理进行理论分析及仿真验证, 提出了基于分布参数模型利用多补偿点计算电流的高压直流输电线路差动保护方案。所提出差动保护方案不受输电线路参数分布特性、耦合特性的影响, 能够在故障全过程投入, 实现直流线路分极保护, 保护灵敏度高。多种故障情况下数字仿真结果及与传统差动保护的对比仿真验证结果, 均表明了所提出差动保护原理的可行性及有效性。

**关键词:** 高压直流输电线路; 差动保护; 分布特性; 耦合特性; 不平衡电流

## Analysis of single-pole fault unbalanced current and improvement of a differential protection scheme for HVDC transmission lines

CHU Xu, SUN Jinchun

(National Electric Power Conversion and Control Engineering Technology Research Center (Hunan University),  
Changsha 410082, China)

**Abstract:** Based on Kirchhoff's law, current differential protection can protect a transmission line with superior selectivity. The influence of the parameter distribution characteristic increases with the length of the transmission line. The differential current protection scheme presently being used for an HVDC transmission line has to increase the time delay and protection threshold to avoid mis-operation induced by distributed capacitor current along the line, which leads to low operational speed and sensitivity. To solve these issues, an improved differential protection criterion using the calculated current at a compensation point of the transmission line is studied. The mechanisms which produce its unbalanced current induced by the coupling characteristic are analyzed and simulated. Based on the distributed parameter model, a current differential protection algorithm using the compensation current of multiple points is presented for HVDC transmission lines. The proposed algorithm is independent of the parameter characteristics of the transmission line and can split-pole operate during the fault transient process with high sensitivity. Its feasibility and validity are verified based on the simulation results and comparative results of a variety of fault scenarios.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51807053), the Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2020JJ5056), the Fundamental Research Funds for Central Universities (No. 531107051113), and the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904600).

**Key words:** HVDC transmission line; differential protection; distributed characteristic; coupling characteristic; unbalanced current

## 0 引言

高压直流输电具有输电距离远、输送容量大、

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51807053); 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ5056); 中央高校基本业务费资助项目(531107051113); 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904600)

经济性好的特点<sup>[1-6]</sup>。针对我国能源、负荷呈逆向分布的现状, 高压直流输电定位于大型能源基地的远距离、大容量外送, 以及区域电网互联<sup>[7-10]</sup>。自 1954 年瑞典哥特兰岛直流输电工程投运以来, 目前世界上已投入运行的直流工程达 150 余项。自 1990 年首个大容量、远距离直流输电工程——葛南直流投入运行, 到 2017 年为止, 我国已投运高压直流输电工程近 30 项。未来我国直流输电工程将按照  $\pm 500$  kV、

±660 kV、±800 kV、±1 100 kV 电压等级序列进行选择,其中,±500 kV 经济输电距离在 900 km 以内;±660 kV 经济输电距离在 700~1 350 km;±800 kV 经济输电距离在 1 100~2 400 km;±1 100 kV 经济输电距离在 2 200~4 500 km。

高压直流输电线路输电距离远,为避免线路参数分布特性的影响,差动保护延时投入<sup>[11-12]</sup>。文献[13-16]对实际工程中故障实例进行了分析、研究,提出了纵联保护改进方案及差动保护延时策略。文献[17]利用故障分量电流、文献[18]利用低通滤波电流构成差动保护判据。文献[19]在电气量低通滤波基础上,基于线路沿线电压线性化等效,对暂态电容电流进行近似补偿。但上述保护均未能有效消除故障暂态过程中电容电流的影响。文献[20]提出了一种采样数据平移对时方法,改进了电流差动保护判据,减小了数据不同步对电流差动保护的影响。文献[21]在输电线路沿线装设电流互感器,利用多测量点电流构成差动保护判据,通过增加测点数量以减小暂态电容电流的影响,其适用性、经济性有待进一步讨论。文献[22]基于输电线路分布参数模型,提出了利用补偿点(该点未装设测量元件,电气量需要利用输电线路首端、末端测量电气量,通过补偿计算获得,因此称为补偿点)计算电流的高压直流输电线路差动保护原理,并且在高压直流输电系统控制特性分析的基础上,给出了高、低定值保护判据及门槛整定原则。利用线路补偿点计算电流的差动保护原理,由于线路极间耦合作用的影响,会引入健全极不平衡电流,造成单极故障健全极线路差动保护误动,使得具有绝对选择性的差动保护丧失天然选极能力,为避免保护误动,需要提高保护门槛值,降低了差动保护的灵敏度。

为了解决上述问题,本文研究了利用补偿点计算电流的差动保护改进判据,分析了单极故障健全极不平衡电流,提出了基于输电线路分布参数模型的多补偿点差动保护方案,给出了保护门槛整定原则。所提差动保护方案不受线路参数分布特性、耦合特性的影响,能够在故障全过程投入,具有故障选极能力,动作速度快,保护灵敏度高。

## 1 电流差动保护基本原理及改进判据

### 1.1 电流差动保护基本原理

如图 1 所示,高压直流系统包括整流站、逆变站及输电线路,输电线路两端均装设有测量装置。图中:  $i_{R_p}(t)$ 、 $u_{R_p}(t)$ 、 $i_{R_n}(t)$ 、 $u_{R_n}(t)$  分别为整流侧测量得到的正极、负极电气量;  $i_{L_p}(t)$ 、 $u_{L_p}(t)$ 、

$i_{L_n}(t)$ 、 $u_{L_n}(t)$  为逆变侧测量电气量;  $t$  为采样时刻。

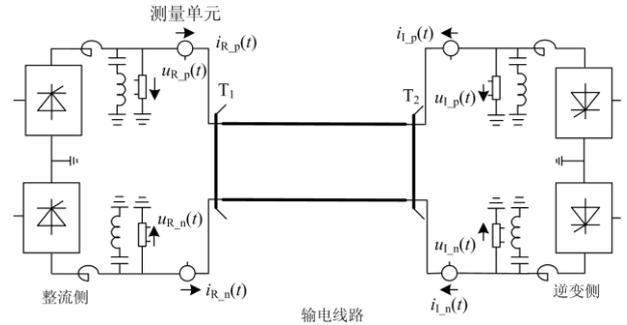


图 1 高压直流输电系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of HVDC transmission system

传统电流差动保护利用输电线路整流侧、逆变侧测量电流构成电流差动保护判据,如式(1)所示。

$$|i_{R_\phi}(t) + i_{L_\phi}(t)| \geq I_{op} \quad (1)$$

式中:  $\phi = p, n$  分别表示正极、负极;  $I_{op}$  为电流差动保护门槛值。

### 1.2 差动保护改进判据

#### 1) 改进判据

输电线路参数具有分布特性,如图 2 所示。当发生系统扰动或线路区外故障时,引起分布电容  $C_{DC}$  充放电电流  $i_{DC}$ ,若计算得到的差动电流大于保护门槛,将会引起电流差动保护误动作。随着电压等级提升、输电距离增加,线路参数分布特性的影响愈加显著,使得电流差动保护需要延时投入、提高门槛,以避免误动作,降低了保护的灵敏度。

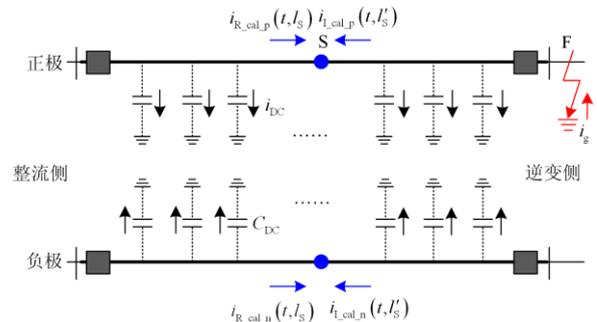


图 2 改进差动保护原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of improved differential protection

为了消除输电线路参数分布特性的影响,文献[22]基于分布参数模型利用补偿点计算电流构成差动保护改进判据,如式(2)所示。

$$|i_{R\_cal_\phi}(t, l_S) + i_{L\_cal_\phi}(t, l'_S)| \geq I'_{op} \quad (2)$$

式中:  $\phi = p, n$  分别表示正极、负极;  $i_{R\_cal_p}(t, l_S)$ 、 $i_{R\_cal_n}(t, l_S)$ 、 $i_{L\_cal_p}(t, l'_S)$ 、 $i_{L\_cal_n}(t, l'_S)$  分别为利用整

流侧、逆变侧测量电气量得到的补偿点 S 正极、负极电流;  $l_s$ 、 $l'_s$  分别为整流侧、逆变侧与故障点 F 之间的距离。

## 2) 补偿点电流时域计算

为了消除输电线路参数分布特性的影响, 构造式(2)所示差动保护改进判据, 需要计算补偿点电流。对于长距离输电线路, 为了兼顾高计算精度及低计算量的需求, 将输电线路电阻进行三段式等效, 其等效模型如图 3 所示, 集中电阻之间为具有分布特性的无损传输线,  $l$  为线路全长。

$$i_m(t, l) = \frac{1}{2 \cdot Z_c} \cdot \left( \frac{Z_c + R_0 \cdot l/4}{Z_c} \right) \cdot [u_k(t + 2 \cdot \tau_0) - i_k(t + 2 \cdot \tau_0) \cdot (Z_c + R_0 \cdot l/4)] - \frac{1}{2 \cdot Z_c} \cdot \left( \frac{Z_c - R_0 \cdot l/4}{Z_c} \right) \cdot [u_k(t - 2 \cdot \tau_0) + i_k(t - 2 \cdot \tau_0) \cdot (Z_c - R_0 \cdot l/4)] \quad (3)$$

式中:  $u_k$ 、 $i_k$  为线路首端测量电气量;  $R_0$ 、 $L_0$ 、 $C_0$  分别为线路单位长度电阻、电感、电容; 传输时间  $\tau_0 = l \cdot \sqrt{L_0 \cdot C_0}$ 。

## 2 单极故障健全极不平衡电流分析

### 2.1 理论分析

对于双极直流输电系统, 考虑到线路极间耦合作用的影响, 因此: 首先, 利用式(4)所示解耦矩阵, 对整流侧 R、逆变侧 I 测量电气量进行解耦变换<sup>[23]</sup>, 将相互耦合的正极、负极电气量解耦为相互独立的地模、线模分量; 其次, 分别利用线路地模、线模参数, 根据输电线路沿线电气量计算公式(3), 计算补偿点线模、地模电流; 进而, 经式(5)所示解耦反变换得到补偿点正极、负极计算电流。

$$\begin{bmatrix} i_{\psi_e}(t) \\ i_{\psi_l}(t) \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\psi_p}(t) \\ i_{\psi_n}(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\psi_{cal_p}}(t, l_s) \\ i_{\psi_{cal_n}}(t, l_s) \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\psi_{cal_e}}(t, l_s) \\ i_{\psi_{cal_l}}(t, l_s) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $\Psi = R, I$ , 分别表示整流侧、逆变侧;  $i_{\psi_p}(t)$ 、 $i_{\psi_n}(t)$  分别表示正极、负极测量电流;  $i_{\psi_e}(t)$ 、 $i_{\psi_l}(t)$  分别表示解耦变换得到的地模、线模电流;  $i_{\psi_{cal_e}}(t, l_s)$ 、 $i_{\psi_{cal_l}}(t, l_s)$  分别为计算得到的补偿点地模、线模电流;  $i_{\psi_{cal_p}}(t, l_s)$ 、 $i_{\psi_{cal_n}}(t, l_s)$  分别为计算得到的补偿点正极、负极电流。

如图 4 所示, 本文以正极近整流侧故障为例, 给出单极接地故障时, 补偿点电流及差动电流计算过程, 用于健全极不平衡电流的分析。其中,  $x$ 、 $x'$  分别为故障点 F 与整流侧 R 及补偿点 S 之间的距离。

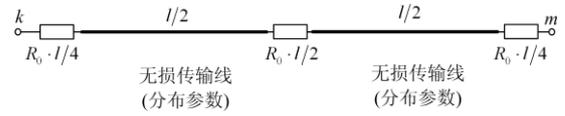


图 3 传输线等效模型

Fig. 3 Equivalent model of transmission line

基于基尔霍夫电压、电流定律, 结合分布参数无损传输线电压、电流计算公式, 可得基于集中电阻分布参数模型的输电线路沿线电流时域计算公式(3)。

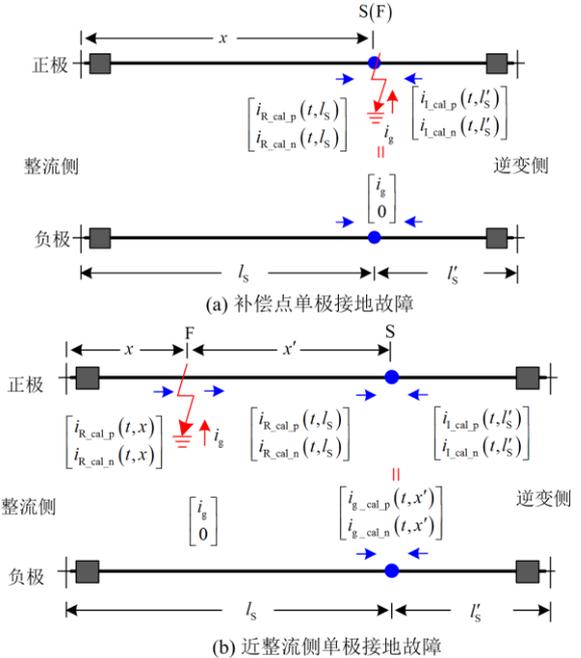


图 4 健全极不平衡电流分析

Fig. 4 Analysis of unbalanced current of healthy pole

由图 4(a)可知, 当单极故障发生在补偿点 S 时(即, 故障点 F 与补偿点 S 一致), 整流侧、逆变侧与补偿点 S 之间均没有其他故障支路, 利用整流侧、逆变侧测量电气量计算得到的补偿点电流分别为  $[i_{R_{cal_p}}(t, l_s), i_{R_{cal_n}}(t, l_s)]$ 、 $[i_{I_{cal_p}}(t, l'_s), i_{I_{cal_n}}(t, l'_s)]$ , 利用 S 点补偿电流计算得到的正极(故障极)、负极(健全极)差动电流分别为  $[i_g, 0]$ 。

由图 4(b)可知, 当故障点与补偿点不一致, 以近整流侧故障为例(即, 故障点 F 位于整流侧 R 与补偿点 S 之间): 1) 逆变器 I 与补偿点 S 之间没有其他故障支路, 利用逆变侧测量电气量计算得到的补偿点

电流为 $[i_{l\_cal\_p}(t, l'_s), i_{l\_cal\_n}(t, l'_s)]$ ; 2) 整流侧 R 与补偿点 S 之间存在故障支路, 利用整流侧测量电气量计算得到的故障点电流为 $[i_{r\_cal\_p}(t, x), i_{r\_cal\_n}(t, x)]$ , 计算得到的补偿点电流为 $[i_{r\_cal\_p}(t, l_s), i_{r\_cal\_n}(t, l_s)]$ ; 3) 故障点 F 所在故障极、健全极故障支路电流分别为 $[i_g, 0]$ , 故障点 F 之后的实际电流包括两部分(整流侧电气量计算值 $[i_{r\_cal\_p}(t, x), i_{r\_cal\_n}(t, x)]$ , 故障支路注入值 $[i_g, 0]$ ), 而故障位置随机、故障直流电流不可获得, 仅利用整流侧计算值、未计入故障直流注入电流将会引起差动电流; 4) 由于线路极间耦合作用的影响, 在补偿点电流计算过程中, 将故障极的故障支路电流 $i_g$ 引入健全极, 此时, 利用 S 点补偿电流, 计算得到正极(故障极)、负极(健全极)差动电流分别为 $[i_{g\_cal\_p}(t, x'), i_{g\_cal\_n}(t, x')]$ 。

为便于说明, 本文首先在频域中对单极接地故障健全极不平衡电流进行理论分析, 进而在时域中进行仿真验证。根据沿线电气量频域计算公式和式(4)、式(5)所示解耦变换及反变换公式, 基于输电线路分布参数模型, 计算得到的补偿点 S 正极(故障极)、负极(健全极)差动电流如式(6)所示。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_{p\_cal\_diff} \\ I_{n\_cal\_diff} \end{bmatrix} &= \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_{0_e} \cdot x') & 0 \\ 0 & \cosh(\gamma_{0_l} \cdot x') \end{bmatrix} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_g \\ 0 \end{bmatrix} = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_{0_e} \cdot x') & 0 \\ 0 & \cosh(\gamma_{0_l} \cdot x') \end{bmatrix} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \begin{bmatrix} I_g \\ I_g \end{bmatrix} = \\ &= \frac{I_g}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_{0_e} \cdot x') \\ \cosh(\gamma_{0_l} \cdot x') \end{bmatrix} = \\ &= \frac{I_g}{2} \cdot \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_{0_l} \cdot x') + \cosh(\gamma_{0_e} \cdot x') \\ \cosh(\gamma_{0_l} \cdot x') - \cosh(\gamma_{0_e} \cdot x') \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $I_g$  为正极(故障极)故障支路电流;  $x'$  为故障点 F 与补偿点 S 间距离;  $\gamma_{0_e} = \sqrt{(R_{0_e} + j\omega \cdot L_{0_e}) \cdot (j\omega \cdot C_{0_e})}$ ,  $\gamma_{0_l} = \sqrt{(R_{0_l} + j\omega \cdot L_{0_l}) \cdot (j\omega \cdot C_{0_l})}$  分别为输电线路地模、线模传播系数;  $R_{0_e}$ 、 $R_{0_l}$ 、 $L_{0_e}$ 、 $L_{0_l}$ 、 $C_{0_e}$ 、 $C_{0_l}$  分别为输电线路单位长度地模及线模电阻、电感、电容。

由式(6)可知, 由于输电线路间耦合作用的影响, 输电线路地模、线模参数不相等, 当线路发生单极故障时, 健全极存在不平衡电流  $I_{n\_cal\_diff} = I_g \cdot [\cosh(\gamma_{0_l} \cdot x') - \cosh(\gamma_{0_e} \cdot x')]/2$ , 且健全极不平

衡电流随故障点 F 与补偿点 S 之间的距离  $x'$  的增大而增大。

## 2.2 仿真验证

为验证上述健全极不平衡电流理论分析结果, 建立  $\pm 500$  kV 高压直流输电系统仿真模型, 对线路近整流侧故障(故障点距离整流侧  $0.1D$ ,  $D$  为输电线路全长)补偿点处正极(故障极)、负极(健全极)差动电流进行对比仿真。

图 5—图 7 分别为选取线路  $S_R$ 、 $S_M$ 、 $S_I$  为补偿点(距离整流侧  $0.25D$ 、 $0.50D$ 、 $0.75D$ )的补偿点电流波形。图 5—图 7 中(a)、(b)分别为正极(故障极)、负极(健全极)电流波形; 黑色实线为利用整流侧测量电气量计算得到的补偿点电流, 蓝色虚线为利用逆变侧测量电气量计算得到的补偿点电流, 红色点划线为补偿点差动电流。

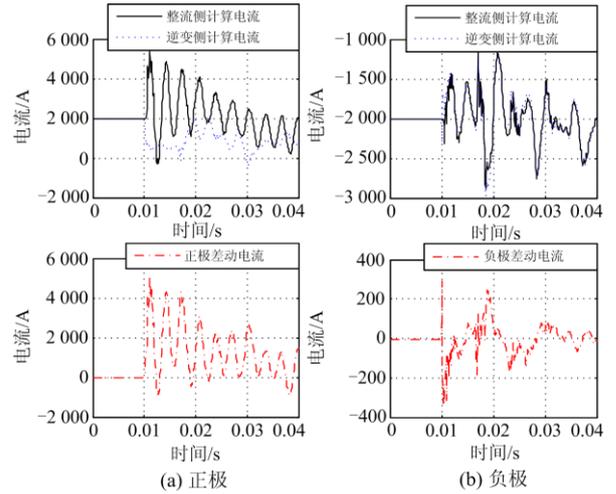


图 5 不平衡电流分析(补偿点  $S_R$ )  
Fig. 5 Analysis of unbalanced current ( $S_R$ )

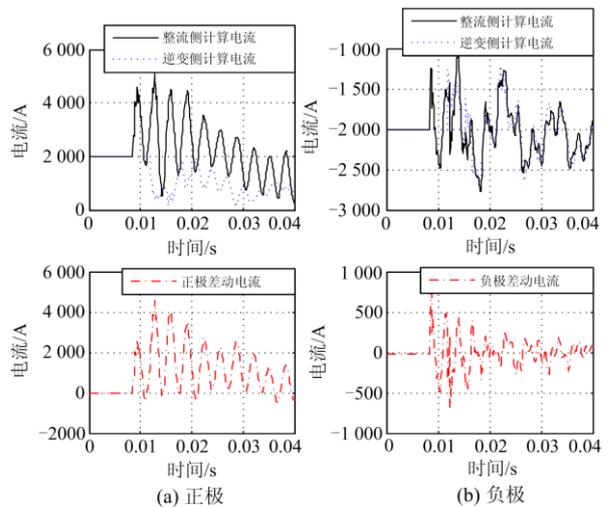
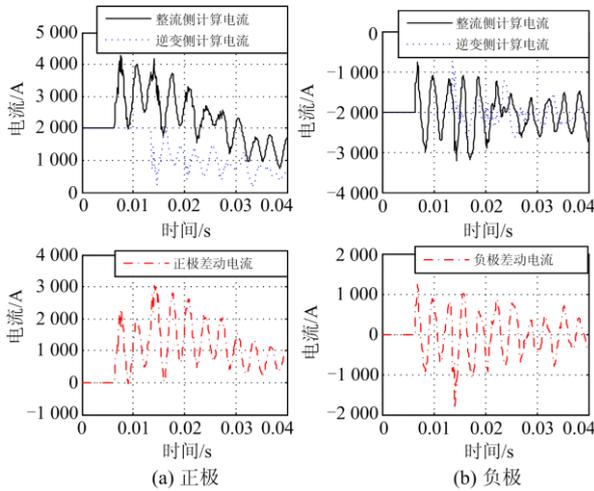


图 6 不平衡电流分析(补偿点  $S_M$ )  
Fig. 6 Analysis of unbalanced current ( $S_M$ )

图7 不平衡电流分析(补偿点  $S_I$ )Fig. 7 Analysis of unbalanced current ( $S_I$ )

由图5—图7对比可知, 仿真与理论分析结果一致: 1) 当输电线路正极发生单极接地故障时, 正极(故障极)存在差动电流, 同时由于输电线路极间耦合作用, 负极(健全极)存在不平衡电流; 2) 故障点位于线路首端, 补偿点  $S_R$ 、 $S_M$ 、 $S_I$  与故障点  $F$  之间距离依次增加, 不平衡电流依次增大。

根据理论分析及仿真验证可知: 双极直流输电系统发生单极接地故障时, 由于线路极间耦合作用, 会在健全极中引入不平衡电流; 健全极不平衡电流与输电线路地模、线模参数差异以及故障点与补偿点间距离有关, 且随故障点与补偿点之间距离的增大而增大。当健全极不平衡电流超过保护门槛时, 将导致差动保护误动作, 为防止差动保护误动, 需要提高保护门槛, 降低了差动保护灵敏性, 甚至导致差动保护丧失保护功能。

### 3 基于分布参数模型的差动保护方案

根据上述分析可知, 为消除输电线路参数分布特性的影响, 利用补偿点计算电流构成差动保护判据; 但在补偿点电流计算过程中, 由于线路参数耦合特性的影响会引入健全极不平衡电流, 降低保护灵敏度, 甚至造成单极故障健全极保护误动作。

为解决上述问题, 本文在对单极故障健全极不平衡电流分析的基础上, 基于分布参数模型, 利用多补偿点计算电流构成差动保护判据, 实现区内、区外故障快速可靠判别, 提高差动保护灵敏度; 并根据故障波传播时序分析, 给出了保护流程。

#### 3.1 保护判据

根据单极接地故障健全极不平衡电流分析可知, 健全极不平衡电流随故障点与补偿点间距离增大而增大。如果所选取补偿点与故障点重合, 此时,

计算得到的补偿点处健全极差动电流为零, 完全不受不平衡电流的影响; 如果所选取补偿点完全覆盖整条输电线路, 当输电线路任意一点发生故障时, 故障点所对应的补偿点处差动电流一定小于保护门槛、保护判据不受不平衡电流的影响、差动保护可靠不误动且灵敏度高, 但此时保护算法的计算量将会大大增加。

补偿点个数的选取需要考虑: 输电线路长度、保护灵敏度要求、保护装置计算能力与计算速度。输电线路越长, 不平衡电流越大, 所需补偿点个数越多; 对保护灵敏度要求越高, 所需补偿点个数越多。但同时, 补偿点个数的增加将对保护装置的计算能力、计算速度提出更高的要求。因此, 补偿点个数的选取需要计及输电线路长度、灵敏度要求及保护装置计算能力与速度, 权衡选取。因此为了兼顾计算量和保护性能, 本文采用距离整流侧  $0.25D$ 、 $0.50D$ 、 $0.75D$  补偿点  $S_R$ 、 $S_M$ 、 $S_I$  计算电流构成差动保护判据(其他补偿点选取方案同样可行), 如式(7)所示。此时, 能够保证线路任意一点故障时, 补偿点距离故障点的最小距离在  $0.25D$  范围内, 从而能够有效限制不平衡电流、避免单极接地故障健全极差动保护误动作、提升差动保护灵敏度。

$$\begin{cases} |i_{R\_cal\_phi}(t, l_{S_I}) + i_{I\_cal\_phi}(t, l'_{S_I})| \geq I_{op\_fd} & \text{区} \\ |i_{R\_cal\_phi}(t, l_{S_M}) + i_{I\_cal\_phi}(t, l'_{S_M})| \geq I_{op\_fd} & \text{内} \\ |i_{R\_cal\_phi}(t, l_{S_R}) + i_{I\_cal\_phi}(t, l'_{S_R})| \geq I_{op\_fd} & \text{故} \\ & \text{障} \end{cases} \quad (7)$$

式中: 基于分布参数模型, 根据时域计算公式(3)计算得到补偿点电流, 利用补偿点电流计算差动电流, 当各个补偿点处差动电流均超过保护门槛时, 判定为区内故障;  $l_{S_\varphi}$ 、 $l'_{S_\varphi}$  分别为补偿点与整流侧  $R$ 、逆变侧  $I$  之间的距离,  $\varphi=R$ 、 $M$ 、 $I$  分别表示补偿点  $S_R$ 、 $S_M$ 、 $S_I$ ;  $I_{op\_fd}$  为差动保护动作门槛, 其根据系统扰动及区外故障时最大不平衡电流进行整定, 本文4.4节将结合仿真验证结果给出进一步分析。

#### 3.2 保护流程

图8为故障行波传播时序图, 其中, 图8(a)、图8(b)分别表示线路近整流侧、近逆变侧故障。  $\Delta t_{st}$  为通信时间延迟,  $t_R$ 、 $t_M$ 、 $t_I$  分别为故障行波到达补偿点  $S_R$ 、 $S_M$ 、 $S_I$  的时刻(即, 故障后利用逆变侧电气量计算得到各补偿点电气量的时刻)。

如图8所示, 当线路发生故障, 故障行波从故障点分别向线路两端传播, 线路两端均装设有电气量测量装置, 利用测量电气量计算线路补偿点电流。以高压直流输电线路整流侧所配置保护装置为例, 逆变侧信息通过通信通道传输到整流侧, 整流侧保



(7), 负极(健全极)差动保护可靠不误动。

## 2) 线路中点负极高阻故障

输电线路中点发生负极经  $300\ \Omega$  过渡电阻接地故障, 仿真验证结果如图 11 所示。

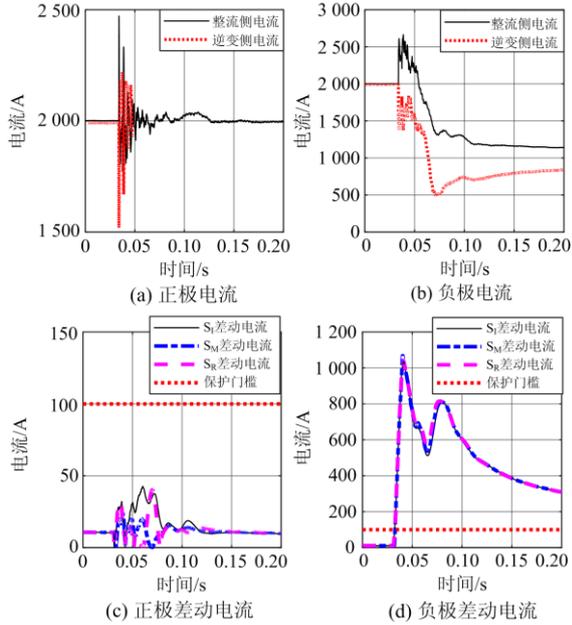


图 11 电流波形(高阻故障)

Fig. 11 Current waveform (fault with transition resistance)

由验证结果可知, 当发生负极接地故障时: 1) 正极(健全极)补偿点差动电流均小于差动保护门槛, 保护可靠不误动; 2) 负极(故障极)补偿点差动电流均超过差动保护门槛, 根据式(7)所示差动保护判据, 负极(故障极)差动保护正确动作。

## 4.2 区外故障仿真验证结果

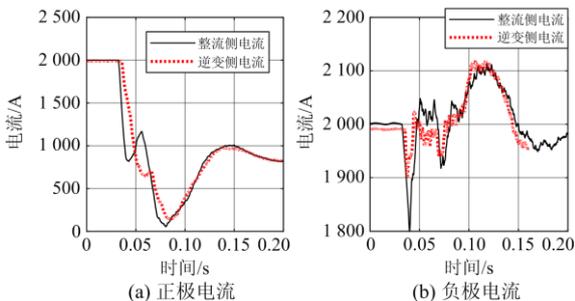
### 1) 整流侧区外故障

输电线路整流侧平波电抗器外发生线路区外极间故障, 仿真验证结果如图 12 所示。

由图 12 所示验证结果可知, 当输电线路发生区外故障时, 线路正极、负极补偿点差动电流均小于保护门槛, 差动保护可靠不误动。

### 2) 逆变侧区外故障

输电线路逆变侧平波电抗器外发生线路区外极间故障, 仿真验证结果如图 13 所示。



(a) 正极电流

(b) 负极电流

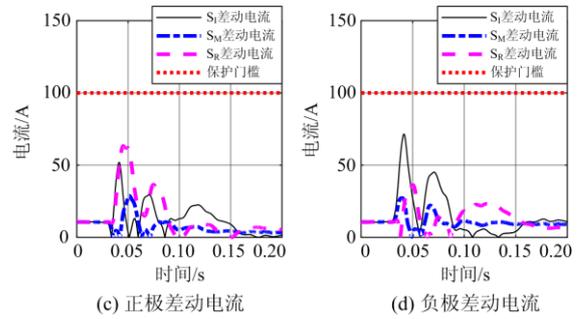


图 12 电流波形(整流侧区外故障)

Fig. 12 Current waveform (external fault at end R)

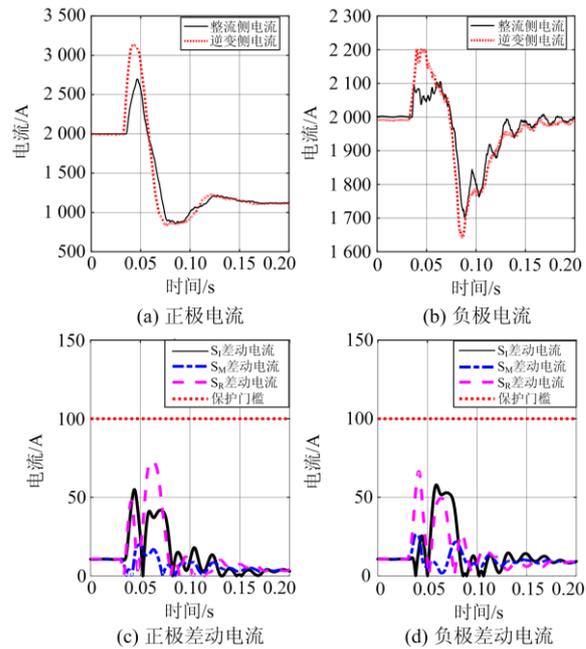


图 13 电流波形(逆变侧区外故障)

Fig. 13 Current waveform (external fault at end I)

由图 13 所示验证结果可知, 当输电线路发生逆变侧区外故障时正极、负极补偿点差动电流均小于保护门槛, 差动保护可靠不误动。

## 4.3 与传统差动保护方法对比仿真验证结果

线路距离整流侧 990 km 处发生负极金属性接地故障, 对比仿真结果如图 14—图 16 所示。

图 14 为故障电流波形, 其中, 黑色实线为整流侧测量电流, 红色虚线为逆变侧测量电流。图 15 为利用整流侧、逆变侧测量电流, 根据式(1)计算得到的差动电流; 图 16 为利用补偿电流根据式(7)计算得到的差动电流, 其中, 黑色实线、蓝色点划线、紫色点线分别为补偿点  $S_R$ 、 $S_M$ 、 $S_I$  处差动电流, 红色虚线为差动保护门槛值。

由图 15 与图 16 对比分析可知: 对于负极(故障极), 利用测量电流计算得到的差动电流、利用补偿

电流计算得到的差动电流均超过保护门槛，差动保护正确动作。

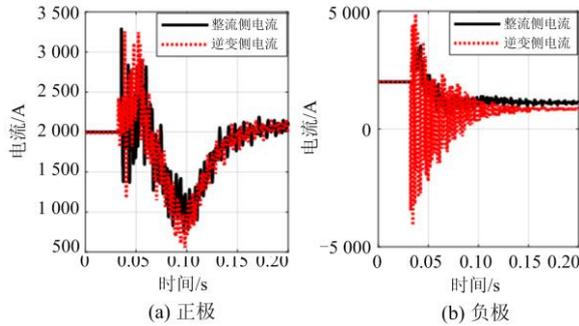


图 14 电流波形

Fig. 14 Current waveform

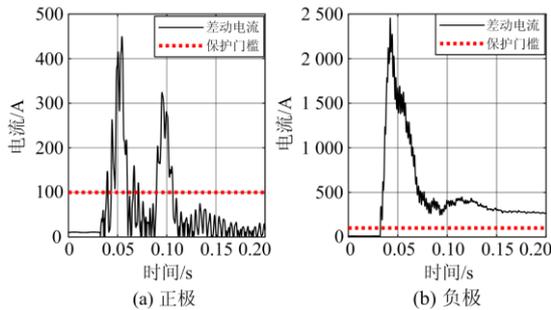


图 15 差动电流(传统保护)

Fig. 15 Differential current (the traditional protection)

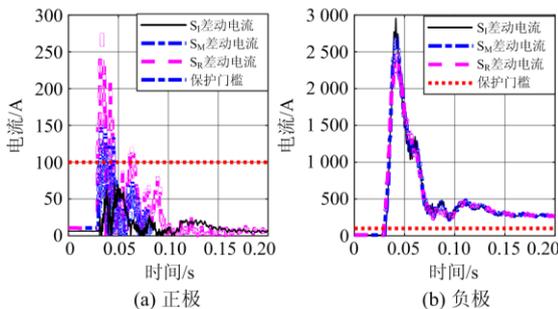


图 16 差动电流(改进保护方案)

Fig. 16 Differential current (the improved protection)

对于正极(健全极): 1) 如图 15 所示, 传统电流差动保护未考虑暂态分布电容电流的影响, 利用整流侧、逆变侧测量电流计算得到的差动电流超过保护门槛, 保护误动作; 2) 如图 16 蓝色点划线所示, 改进保护判据(2)未考虑线路极间耦合特性的影响, 利用补偿点  $S_M$  计算电流构成保护判据, 健全极存在不平衡电流, 超过保护门槛, 保护误动作; 3) 如图 16 所示, 所提出利用多补偿点电流的差动保护方案, 考虑线路参数分布特性及耦合特性的影响, 利

用多补偿点电流构成保护判据, 距离故障点最近的补偿点  $S_I$  差动电流未超过保护门槛, 根据保护判据(7), 所提出差动保护可靠不误动。

由上述对比验证结果可知, 所提出基于分布参数模型利用多补偿点电流的差动保护方案能够在故障全过程实现区内、区外故障可靠判别, 无需高、低门槛及延时配合, 单极故障时健全极可靠不误动, 保护灵敏度高。

#### 4.4 线路参数误差及保护门槛整定分析

在工程实际中, 高压直流输电系统电流差动保护门槛值的整定依据: 暂态过程中, 大于系统正常运行、扰动、区外故障时的最大不平衡电流; 稳态过程中, 小于定电流控制电流裕度  $0.1I_N$ , 以防止保护误动作。

仿真系统中输电线路采用最接近工程实际的频变参数模型, 本文根据高压直流输电系统故障谐波分析<sup>[25]</sup>, 采用固定频率(600 Hz)线路参数进行计算。由图 10—图 16 所示输电线路区内、区外故障仿真验证结果可知, 所提出差动保护方案不受线路参数分布、耦合特性的影响, 仅由线路参数偏移、参数误差引起的不平衡电流较小(最大不平衡电流为  $0.035I_N$ ), 考虑差动保护可靠性, 选取可靠系数 1.4, 差动保护门槛设定为  $0.05I_N$ , 并且差动保护门槛小于定电流控制电流裕度  $0.1I_N$ , 因此, 所提出电流保护方案能够在故障全过程(包括故障暂态、故障稳态)正确判别区内、区外故障。本文所提出电流差动保护原理不受暂态分布电容电流的影响, 能够在故障全过程投入, 因此, 无需设定动作时间门槛。

差动保护为过量保护(即: 当差动电流大于门槛值时保护动作), 线路参数偏移、参数误差不会影响区内故障保护动作, 但将产生不平衡电流、降低保护灵敏度, 因此, 在线路参数偏移、误差过大时, 需要将由此引起的电流计算误差及不平衡电流计入到差动保护门槛值的整定, 以防止保护误动作, 提高工程适用性。

## 5 结论

本文研究了基于分布参数模型的差动保护原理, 分析了单极接地故障健全极不平衡电流, 提出了利用多补偿点电流的差动保护方案。所提出差动保护方案不受输电线路参数分布特性、耦合特性的影响, 能够在故障全过程投入, 实现区内、区外故障可靠判别, 具备故障选极能力, 保护灵敏度高。理论分析及对比仿真验证, 均表明了所提出差动保

护方案的有效性及其可行性, 能够实现高压直流输电线路可靠、有效的后备保护, 具有工程实用价值。

### 参考文献

- [1] 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, 2018, 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, 2018, 47(15): 142-147.
- [2] 张国辉, 景柳铭, 王宾, 等. 谐波引起的高压直流输电连续换相失败抑制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 33-41.  
ZHANG Guohui, JING Liuming, WANG Bin, et al. Study on HVDC consecutive commutation failures mitigation method caused by harmonics[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 33-41.
- [3] 艾红杰, 方扬, 陈大鹏, 等. 晋北-南京特高压直流输电工程安稳系统及其控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 118-125.  
AI Hongjie, FANG Yang, CHEN Dapeng, et al. Study on stability system and control strategy in Jinbei-Nanjing HVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 118-125.
- [4] 张怿宁, 郝洪民, 李京, 等. 脉冲注入法和单端故障行波法相结合的直流输电系统接地极线路故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 117-122.  
ZHANG Yining, HAO Hongmin, LI Jing, et al. Fault location of HVDC grounding electrode lines based on combination of pulse injection method and single-ended fault travelling wave method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 117-122.
- [5] 梁英, 杨嘉, 李勤新, 等. 基于时频谱相似度的高压直流线路行波保护方法[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 182-186.  
LIANG Ying, YANG Jia, LI Qinxin, et al. Traveling wave protection method for HVDC lines based on time spectrum similarity[J]. Journal of Electrical Power Science & Technology, 2019, 34(2): 182-186.
- [6] 郑思琦, 陈皓, 高传新, 等. 一种基于简化能量比的直流线路故障区间定位[J]. 电测与仪表, 2020, 57(16): 17-22.  
ZHENG Siqi, CHEN Hao, GAO Chuanxin, et al. Fault location of DC transmission line based on simplified energy ratio[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(16): 17-22.
- [7] 王鑫, 王海云, 王维庆. 大规模海上风电场电力输送方式研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(22): 55-62.  
WANG Xin, WANG Haiyun, WANG Weiqing. Research on power transmission process of large scale offshore wind farm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(22): 55-62.
- [8] 刘晨蕾, 潘卓洪, 文习山, 等. 一种基于碳化硅 IGBT 的可控型直流偏磁抑制方法[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1): 67-73.  
LIU Chenlei, PAN Zhuohong, WEN Xishan, et al. A controllable DC bias suppression method based on silicon carbide IGBT[J]. Journal of Electrical Power Science & Technology, 2019, 34(1): 67-73.
- [9] 王永进, 樊艳芳, 唐勇, 等. 考虑强非线性和波速变化特性的特高压直流输电线路故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 17-22.  
WANG Yongjin, FAN Yanfang, TANG Yong, et al. Fault location method for UHVDC transmission lines considering strong nonlinearity and wave velocity variation characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 17-22.
- [10] SONG Guobing, HOU Junjie, GUO Bing, et al. Pilot protection of hybrid MMC DC grid based on active detection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 82-96. DOI: 10.1186/s41601-020-0152-2.
- [11] XIAO H, LI Y H, LIU R P, et al. Single-end time-domain transient electrical signals based protection principle and its efficient setting calculation method for LCC-HVDC lines[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 11(5): 1233-1242.
- [12] 张延旭, 蔡泽祥, 竹之涵, 等. 基于传输延时补偿的继电保护网络采样同步方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(18): 81-85.  
ZHANG Yanxu, CAI Zexiang, ZHU Zhihan, et al. Sampling synchronization method for relay protection network based on transmission delay compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18): 81-85.
- [13] 李晓华, 戴扬宇, 丁晓兵, 等. 高压直流纵差保护动作特性分析及改进[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 283-289.  
LI Xiaohua, DAI Yangyu, DING Xiaobing, et al. HVDC longitudinal differential protection operating characteristic analysis and improvement[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 283-289.
- [14] 刘剑, 邵能灵, 范春菊, 等. 基于特定频率电流波形特征的高压直流线路故障判别方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(1): 20-31.  
LIU Jian, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. A fault

- identification method for HVDC transmission lines based on waveform characteristic of specific frequency current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(1): 20-31.
- [15] 杨亚宇, 郇能灵, 范春菊, 等. 基于计算电阻的高压直流输电线路纵联保护[J]. 电工技术学报, 2017, 32(7): 84-94.  
YANG Yayu, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. A pilot protection scheme for HVDC transmission lines based on calculated resistance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7): 84-94.
- [16] 李爱民, 蔡泽祥, 孙奇珍, 等. 基于频谱比较的直流线路差动保护闭锁判据[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 115-120.  
LI Aimin, CAI Zexiang, SUN Qizhen, et al. Criterion of HVDC line differential protection blocking based on spectrum comparison[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 115-120.
- [17] KONG F, HAO Z G, ZHANG B H. Improved differential current protection scheme for CSC-HVDC transmission lines[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 11(4): 978-986.
- [18] ZHENG J C, WEN M H, CHEN Y, et al. A novel differential protection scheme for HVDC transmission lines[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 94(1): 171-178.
- [19] 郑俊超, 文明浩, 秦瑜, 等. 具备故障选极能力的高压直流输电线路差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 1-9.  
ZHENG Junchao, WEN Minghao, QIN Yu, et al. A novel differential protection scheme with fault line selection capability for HVDC transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 1-9.
- [20] 刘琪, 宋国兵. 利用时域波形比对的高压直流输电线路电流差动保护[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(24): 87-95.  
LIU Qi, SONG Guobing. A current differential protection using time-domain waveform comparison for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(24): 87-95.
- [21] 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.
- [22] 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 System, 2010, 34(17): 45-49.
- [23] 褚旭, 王亮, 王华伟, 等. 高压直流输电线路极间耦合影响及故障选极方案[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 140-146.  
CHU Xu, WANG Liang, WANG Huawei, et al. Analysis of inter-pole coupling effect and faulty pole selection for HVDC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 140-146.
- [24] 李斌, 郭子焯, 姚斌, 等. 适用于半波长输电线路的快速方向纵联保护方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 114-121.  
LI Bin, GUO Zixuan, YAO Bin, et al. Fast directional pilot protection method for half-wavelength transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 114-121.
- [25] CHU Xu, SONG Guobing. Analytical method of fault characteristic and non-unit protection for HVDC transmission lines[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2016, 2(4): 37-43.

收稿日期: 2020-03-30; 修回日期: 2020-10-14

作者简介:

褚旭(1988—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子化电力系统继电保护原理与故障定位。

E-mail: xu.chu@hnu.edu.cn

(编辑 魏小丽)