

±800 kV 特高压直流输电线路单端电气量暂态保护

束洪春¹, 刘可真², 朱盛强¹, 张广斌², 朱子钊¹, 张敏¹

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 云南省昆明市 650051;

2. 哈尔滨工业大学电气工程与自动化学院, 黑龙江省哈尔滨市 150001)

±800 kV UHVDC Transmission Line Protection Based on Single End Electrical Transient Signal

SHU Hongchun¹, LIU Kezhen², ZHU Shengqiang¹, ZHANG Guangbin², ZHU Zizhao¹, ZHANG Min¹

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, Yunnan Province, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: The physical boundary of a high voltage direct current (HVDC) transmission line consists of smoothing reactor and DC filter. It has the stop-band characteristic to the high-frequency transient voltage components. The high-frequency voltage signal from the external of DC transmission lines will be weakened when it travels through the smoothing reactor and DC filter. Its power will also be much smaller. The wavelet energy of the high-frequency transient voltage can be gotten through wavelet transformation. The identification criterion of internal and external faults is based on the conspicuous difference of the wavelet energy of high-frequency transient voltage at the point of relay installation. The wavelet transformation modulus maximum of the fault transient voltage was used as the criterion of starting. The correlation coefficients between the bipolar transient voltage and +800 kV lines and the correlation coefficients between the bipolar transient voltage and -800 kV lines were calculated to identify the lightning interference. The fault line was selected based on the polarity wave of the two lines. The scheme of single-ended electrical transient protection of the ultra high voltage direct current (UHVDC) transmission lines was presented. The simulation was performed considering the impact of lightning interference, the action of ZnO arrester on the boundary, commutation failure, and the fault distance to the single-ended electrical transient protection. The simulation results show that the protection has absolute selectivity, which can steadily and effectively protect the whole lines.

KEY WORDS: single-ended electrical transient protection; ultra high voltage direct current (UHVDC) transmission line; boundary element; lightning strike; ZnO arrester, wavelet transform

摘要: 高压直流(high voltage direct current, HVDC)输电线路两端的平波电抗器和直流滤波器构成现实的边界元件,对暂态电压高频分量呈带阻转变特性,来自直流线路区外的高频电压信号通过平波电抗器和直流滤波器后被衰减,其能量显著减小,不同频带的高频电压信号小波能量可应用小波变换求得。利用区内、外故障时于保护安装处获得的暂态电压小波能量的显著差异来构造直流输电线路区内、外故障判据;利用故障暂态电压小波变换模极大值,构造启动判据;利用正极和负极暂态电压分别与+800和-800 kV的相关系数,构造雷击干扰识别判据;利用两极线极波,构造故障选极判据。给出了特高压直流(ultra high voltage direct current, UHVDC)输电线路单端电气量暂态保护方案。对该保护进行了大量仿真分析,计及了雷击干扰、边界上避雷器动作、不同过渡电阻、换相失败故障等因素的影响。仿真结果表明,该保护具有绝对选择性,能可靠有效地保护直流线路全长。

关键词: 单端电气量暂态保护;特高压直流输电线路;边界元件;雷击;ZnO避雷器;小波变换

0 引言

现有的直流输电线路保护主要包括行波保护、直流欠压保护、差动保护、交-直流导线碰线保护和金属回路导线保护,其中行波保护为主保护,其他为后备保护^[1-3]。行波保护和直流欠压保护是以电压变化率为动作判据,需要整定,当直流线路发生高阻接地故障(high impedance fault, HIF)时,这2种保护容易拒动^[4-6]。此外,直流输电线路行波保护

基金项目: 国家自然科学基金项目(50977039, 50847043, 90610024, 50467002, 50347026); 云南省自然科学基金项目(2005F0005Z)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50977039, 50847043, 90610024, 50467002, 50347026); Project Supported by Yunnan Natural Science Foundation of China (2005F0005Z)。

的可靠性还受到下列因素的影响: 1) 雷电、噪声干扰引起的数据采样值波动; 2) 耦合电容分压式电压互感器行波传变能力差; 3) 高阻故障、线路太长以及线路直流电晕将使故障行波波头不明显。电流差动保护需要避免因区外故障引起的线路电压变化而导致的线路分布电容充放电电流造成的误动作, 动作延时较长, 其他后备保护将先于电流差动保护动作, 故电流差动保护难以发挥直流输电线路的后备保护作用^[7-10]。因此, 有必要进一步研究新的稳定可靠、响应快速、具有绝对选择性的高压直流线路暂态保护。

交流输电线路的阻波器和母线对地等效电容组成的线路边界对高频信号具有衰减作用^[11], 文献[12-17]根据区内、外的故障信号的高频分量存在明显差异, 提出了一种交流输电线路的暂态量保护。对于特高压直流(ultra high voltage direct current, UHVDC)输电系统, 本文提出一种以平波电抗器和直流滤波器为现实的物理边界的直流输电线路单端电气量暂态保护。当直流输电线路发生区外故障时, 由于边界对电压高频分量传变的衰减作用, 使得保护安装处获得的线模电压小波能量显著减小, 相对于区外故障而言, 直流输电线路区内故障时, 于保护安装处获得的线模电压小波高频能量较大。本文应用该边界元件的带阻传变特性, 利用线路单端保护安装处所获得的暂态线模电压高频分量小波能量之差异来构造区内、外故障判据; 利用两极线极波, 构造选极判据; 利用正极和负极暂态电压分别与+800 和-800kV 的相关系数, 构造雷击干扰识别判据。

1 UHVDC 输电线路边界元件的特性分析

采用文献[1-2,18]中的云广±800kV 直流输电工程的参数, 利用 PSCAD/EMTDC 电磁仿真软件建立±800kV 特高压直流输电系统模型, 如图 1 所示。图 1 中: 送电容量为 5000MW; 整流侧和逆变侧的无功补偿容量分别为 3000 和 3040Mvar; 每极换流单元由 2 个 12 脉冲换流器串联组成, 直流输电线路为六分裂导线, 线路长取为 1500km, 采用 J. R. Marti 频率相关模型; 线路两侧装有 400 mH 的平波电抗器; 直流滤波器为 12/24/36 三调谐滤波器。

由平波电抗器和直流滤波器构成的边界特征阻抗不等于输电线路波阻抗, 即直流线路边界处波阻抗不连续。平波电抗器和直流滤波器组合构成了直流输电线路现实的物理边界^[19]。

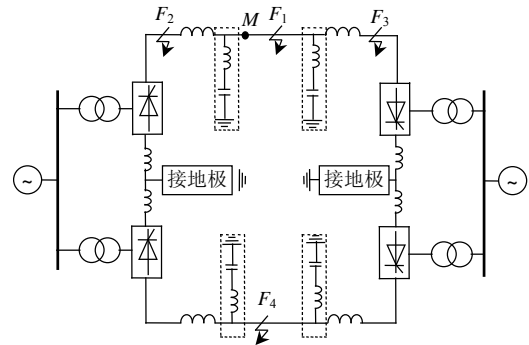


图 1 云广±800 kV 直流输电系统结构图
Fig. 1 Configuration of Yun-Guang ±800 kV UHVDC system

本文考虑的输电系统故障主要包括直流线路故障、交流系统故障和换流器故障, 其中: 直流线路故障包括单极接地故障、两极短路故障、两极接地故障; 换流器故障主要包括换相失败、误开通故障、不开通故障、换流站接地故障^[20-21]。保护安装于换流站直流线路侧, 文中区内故障以直流线路单极接地故障为例, 区外故障以换流器接地故障、换相失败为例。

当区外发生接地故障时^[22-23](如图 1 中的 F_2 点), 区外的线模电压暂态量将经平波电抗器和直流滤波器构成的边界传变至直流线路保护安装处。现以整流侧平波电抗器和 12/24/36 三调谐直流滤波器构成的物理边界进行分析, 如图 2 所示, 其中: U_1 为区外暂态电压, U_2 为 U_1 经边界传变至直流线路保护安装处的电压; B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 为直流滤波器避雷器, D_1 为平波电抗器避雷器, D_2 为直流母线避雷器, 本文将避雷器 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 D_1 、 D_2 统称为边界避雷器。

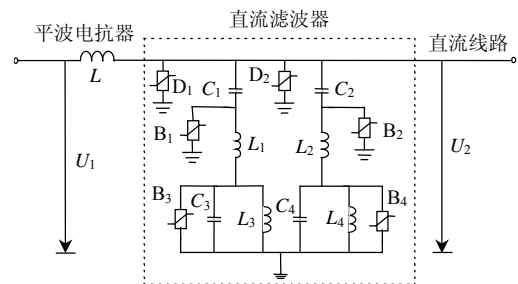
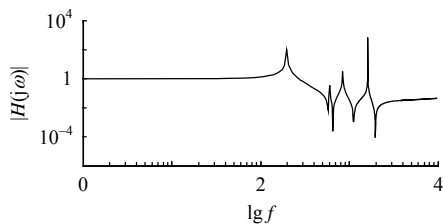


图 2 平波电抗器和直流滤波器构成的边界元件
Fig. 2 Boundary consisting of the smoothing reactor and DC filter

定义边界元件的传递函数 $H(j\omega)$ 为

$$H(j\omega) = U_2 / U_1 = [Z_1(j\omega)] / [Z_1(j\omega) + Z_2(j\omega)] \quad (1)$$

式中: $Z_1(j\omega)$ 为直流滤波器阻抗; $Z_2(j\omega)$ 为平波电抗器阻抗。由式(1)可得边界元件传递函数 $H(j\omega)$ 的幅频特性, 如图 3 所示。

图3 $H(j\omega)$ 的幅频特性Fig. 3 Amplitude-frequency characteristics of $H(j\omega)$

从图3可看出：对于直流分量及低频段 $0 < f \leq 100$ Hz, $|H(j\omega)|=1$ 。3个局部极值点 $f=600$ Hz、 $f=1.2$ kHz、 $f=1.8$ kHz处 $|H(j\omega)|$ 出现明显衰减。在高频段 $f > 2$ kHz, $|H(j\omega)|$ 远小于1, 可见边界元件对高频信号具有很强的衰减作用。对区外故障, 其暂态电压经边界传变至直流线路保护安装处的高频分量很小; 对于直流线路区内故障, 高频暂态电流不易通过边界, 于保护安装处获得的暂态电压高频分量较大。利用区内、外故障时暂态电压高频分量小波能量的这种差异就能准确识别区内、外故障。

本文选用 dB3 小波, 采样率 f_s 取为 20 kHz。时窗长度取为 $2T$, 其中 T 为行波从线路一端传播到另一端的时间, 文中时间窗长度为 10 ms。故障暂态电压高频小波能量取自第一尺度 ($5 < f < 10$ kHz), 低频小波能量取自第 6 尺度 ($156.25 < f < 312.5$ Hz)。根据边界的幅频特性: 对于 [5, 10] kHz 范围内的信号, 经过边界后将发生严重衰减; 而对于 [156.25, 312.5] Hz 范围内的信号, 边界对其影响不明显。故采样率采用 20 kHz 合理。

2 特高压直流输电系统电磁暂态仿真分析

2.1 控制系统和边界元件避雷器的动作特性

本文计及直流控制系统的响应作用和 ZnO 避雷器非线性伏安特性的影响, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建了 CIGRE 的典型直流控制系统, 其中: 整流侧控制系统为定电流控制; 逆变侧控制系统主要为定电流控制、电流偏差控制、定关断角控制。避雷器采用 IEEE 的频率相关模型。

现设 0.505 s 时直流线路发生故障, 整流侧直流电流变化曲线如图 4 所示, 整流侧触发延迟角 α 的变化曲线如图 5 所示, 整流侧有功功率变化曲线如图 6 所示。

从图 4—6 可以看出, 直流线路发生故障时, 整流侧触发延迟角 α 、直流电流增大, 直流线路传输的有功功率减小。随着控制系统的启动, 整流侧触发延迟角、直流电流、直流线路传输的有功功率逐渐恢复到正常水平。

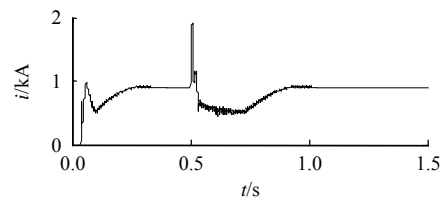


图4 整流侧直流电流的变化曲线

Fig. 4 Curve of DC current at rectifier side

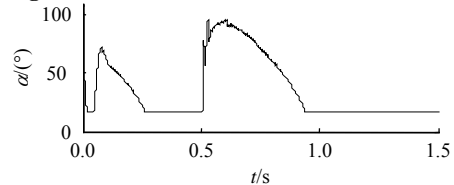
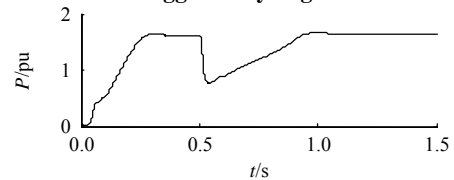
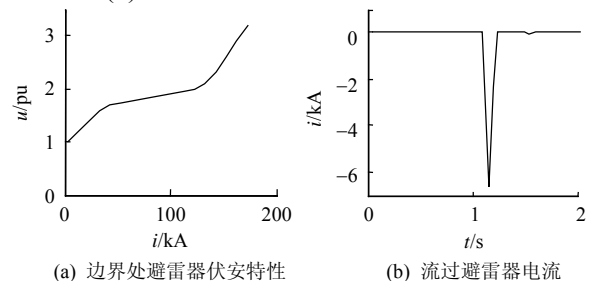
图5 整流侧触发延迟角 α 的变化曲线Fig. 5 Curve of trigger delay angle α at rectifier side

图6 整流侧有功功率的变化曲线

Fig. 6 Curve of positive power at rectifier side

图 2 中的避雷器的伏安特性如图 7(a)所示, 仿真结果表明: 线路故障时, 避雷器 B_1 — B_4 不导通, 避雷器 D_1 、 D_2 导通; 雷击线路故障时避雷器 B_1 — B_4 导通, 避雷器 D_1 、 D_2 不导通, 此时流过 B_1 的电流如图 7(b)所示。



(a) 边界处避雷器伏安特性 (b) 流过避雷器电流

图7 边界避雷器 B_1 的伏安特性及其电流Fig. 7 Volt-ampere characteristic and the current of the boundary arrester B_1

后文仿真分析均考虑控制系统的作用、边界避雷器的动作特性及其响应的影响。

2.2 故障暂态电压特征的分析及启动判据

当直流输电线路发生故障时, 电压行波首波头的小波变换模极大值幅值随着尺度的增加而增大, 而噪声或脉冲扰动的小波变换模极大值幅值随着尺度的增加而迅速减小为 0^[24]。

现设直流线路发生正极线接地故障, 两极电压 $u_1(k)$ 、 $u_2(k)$ 的波形如图 8 所示。对故障极正极电压 $u_1(k)$ 进行多尺度小波变换, 前 3 个尺度的小波系数如图 9 所示。

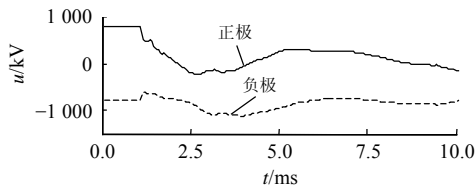


图 8 正极故障时两极电压波形

Fig. 8 Voltage waveforms of the lines when a short fault on positive line occurs

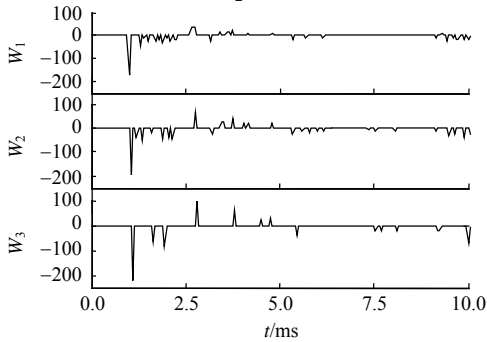


图 9 正极线故障时小波变换模极大值放大图

Fig. 9 Wavelet transformation modulus maximum when a short fault on positive line occurs

从图 9 可以看出, 前 3 个尺度的首波头模极大值幅值为: $M_1 = |-171.85|$; $M_2 = |-194.93|$; $M_3 = |-220.83|$ 。这表明随着小波变换尺度的增加, 故障极 $u_1(k)$ 行波首波头的小波变换模极大值幅值增大。

现设直流线路发生负极线接地故障, 两极电压 $u_1(k)$ 、 $u_2(k)$ 的波形如图 10 所示。对故障极负极电压 $u_2(k)$ 进行多尺度小波变换, 前 3 个尺度的小波系数如图 11 所示。

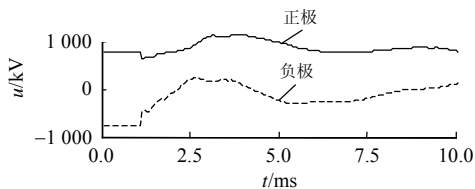


图 10 负极故障时两极电压波形

Fig. 10 Voltage waveforms of the lines when a short fault on negative line occurs

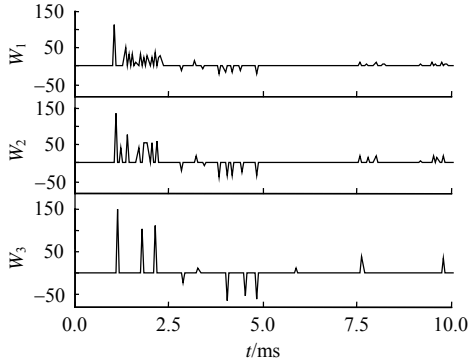


图 11 负线故障时小波变换模极大值放大图

Fig. 11 Wavelet transformation modulus maximum when a short fault on negative line occurs

从图 11 可以看出, $M_1 = |114.36|$, $M_2 = |133.39|$, $M_3 = |160.14|$, 即随着小波变换尺度的增加, 故障极 $u_2(k)$ 行波首波头的小波变换模极大值幅值增大。

根据上述分析, 利用暂态电压行波首波头的小波变换模极大值幅值构造的启动判据如下:

$$\begin{cases} \text{若 } M_1 < M_2 < M_3, & \text{则保护启动} \\ \text{若 } M_1 > M_2 > M_3, & \text{则保护不启动} \end{cases} \quad (2)$$

该启动判据为相对比较, 它毋需门槛值, 毋需整定, 与传统的 du/dt 启动判据相比, 耐受高阻能力强, 可靠性更高。

2.3 故障极线的暂态特征分析及选极判据

为使保护能够准确地动作于故障极线, 保证非故障极仍能正常输送功率, 需准确识别故障极线。

定义正极线极波 $P_1(k)$ 、负极线极波 $P_2(k)$ 为

$$\begin{cases} P_1(k) = Z_p i_1(k) - u_1(k) \\ P_2(k) = Z_p i_2(k) - u_2(k) \end{cases} \quad (3)$$

式中: Z_p 为线路极波阻抗; $i_1(k)$ 、 $i_2(k)$ 为正、负极线电流采样值。正常运行时, 式(3)等于 0。可以看出, 极波就是故障情况下极线电压的变化量。

对 $2T$ (T 为行波从线路一端传播到另一端的时间) 时窗内的正极线极波 $P_1(k)$ 、负极线极波 $P_2(k)$ 进行积分并取绝对值。

$$\begin{cases} P_1 = \left| \sum_{k=1}^N P_1(k) \right| \\ P_2 = \left| \sum_{k=1}^N P_2(k) \right| \end{cases} \quad (4)$$

定义正极线极波积分绝对值 P_1 与负极线极波积分绝对值 P_2 的比值 K_j 为

$$K_j = P_1 / P_2 \quad (5)$$

当图 1 所示系统于正极线 F_1 点发生接地故障 (其中过渡电阻取 0.1Ω , F_1 点距保护安装处 100km) 时, 两极线的极波如图 12 所示。

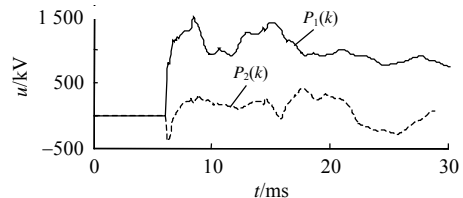


图 12 正极线故障时两极线上的极波
Fig. 12 Polarity wave on the DC lines when an line-ground fault on positive line occurs

当图 1 所示系统于负极线 F_4 点发生接地故障 (其中过渡电阻取 0.1Ω , F_4 点距保护安装处 100km) 时, 两极线路的极波如图 13 所示。

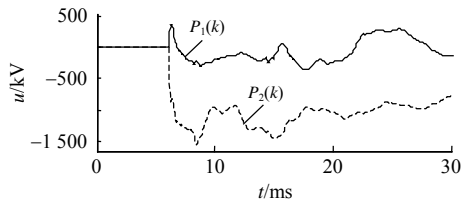


图13 负极线故障时两极线上的极波
Fig. 13 Polarity wave on the DC lines when a line-ground fault on negative line occurs

当图1所示系统于正极线 F_1 点、负极线 F_4 点同时发生接地故障(其中过渡电阻取 0.1Ω ,故障距保护安装处 100km)时,两极线路极波如图14所示。

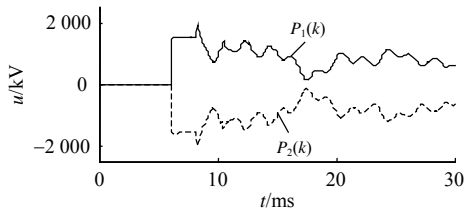


图14 两极线故障时两极线上的极波
Fig. 14 Polarity wave on the DC lines when an line-line-ground fault occurs

从图12—14可以看出:系统正常运行时,正、负极线极波为零;当极线发生故障时正极线极波与负极线的极波差异很大,对于正极线故障,正极线极波在远大于0的范围内变化,负极线极波在0附近变化,例如此时 $K_j=11.06$,对于负极线故障,负极线极波在远小于0的范围内变化,正极线极波在0附近变化,例如此时 $K_j=0.13$;对于两极线同时故障,正、负极线极波在远大于0的范围内变化且波形对称,例如此时 $K_j=1.01$ 。

因此,若对故障后一个时间段内的极波进行积分并取积分的绝对值,那么当正极线发生故障时,正极线极波积分绝对值要远远大于负极线极波积分绝对值,即 $K_j \geq 1$;当负极线发生故障时负极线极波积分绝对值要远远大于正极线极波的积分绝对值,即 $K_j < 1$ 。故可以利用故障后时间窗 $2T$ 内的正、负极线极波积分绝对值的比值 K_j 来识别故障极线。为增强可靠性,可将故障选极判据确定为

$$\begin{cases} \text{若 } K_j \geq 1.5, \text{ 则正极线发生故障} \\ \text{若 } K_j \leq -1.5, \text{ 则负极线发生故障} \\ \text{若 } 0.5 < K_j < 1.5 \text{ 且 } K_j \approx 1, \text{ 则两极线发生故障} \end{cases} \quad (6)$$

2.4 区内、外故障的暂态特征分析及识别判据

$\pm 800\text{ kV}$ 直流输电两极线路间存在电磁耦合,对两极线电压进行凯伦鲍尔极模变换,可得到独立的线模量电压:

$$u_{m1}(k) = u_1(k) - u_2(k) \quad (7)$$

定义某尺度下的信号小波能量为该尺度小波变换系数平方沿时间轴的积分,表达式为

$$E = \sum_{k=1}^N |W(k)|^2 \quad (8)$$

式中: E 为信号能量; N 为时窗数据宽度; $W(k)$ 为小波变换系数。低尺度下的信号小波能量代表高频信号小波能量,而高尺度下的信号小波能量代表低频信号小波能量。

对检测到故障后时间窗 $2T$ 内保护安装处获得的暂态线模电压 $u_{m1}(k)$ 进行六尺度小波变换,求出第一尺度高频信号小波能量 E_1 和第六尺度低频信号能量 E_6 。现定义 E_1 与 E_6 的比值 K_q 为

$$K_q = E_1/E_6 \quad (9)$$

区外发生接地故障时,如图1所示系统于 F_2 点发生接地故障,过渡电阻为 0.1Ω ,保护安装处获得的暂态线模电压波形及其低频分量的小波能量曲线、高频分量的小波能量曲线,如图15所示。

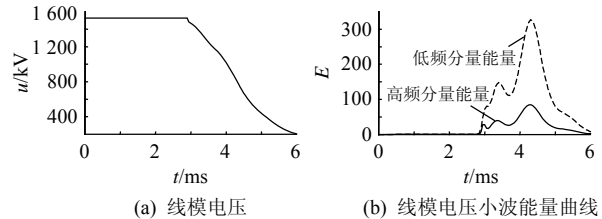


图15 区外故障时暂态线模电压波形及其小波能量

Fig. 15 Waveform of transient voltage and its wavelet energy of the fault at F_2

从图15可以看出,区外故障时,由于边界元件对高频量的衰减作用,保护安装处获得的线模电压高频分量的小波能量远小于低频分量的小波能量,此时 $K_q=0.281$ 。

区内发生故障时,如图1所示系统于 F_1 点发生接地故障,过渡电阻为 0.1Ω , F_1 点距保护安装处 100km ,直流线路上的暂态线模电压波形及其低频分量的小波能量曲线、高频分量的小波能量曲线如图16所示。

从图16可以看出,由于直流线路区内故障暂态线模电压行波直接到达保护安装处 M 点,故保护

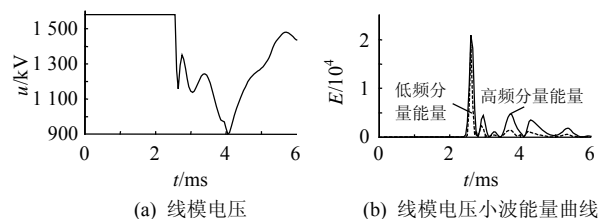


图16 区内故障时暂态线模电压波形及其小波能量

Fig. 16 Waveform of transient voltage and its wavelet energy of the fault at F_1

安装处获得的线模电压中的高频的小波能量大于或等于低频的小波能量, 此时 $K_q=2.61$ 。

根据上述分析, 高频信号通过平波电抗器和直流滤波器构成的物理边界后明显衰减, 即: 区外故障时, 高频信号经过边界后将发生严重衰减, 保护安装处获得的小波能量较小, 此时 $K_q < 1$; 区内故障时, 保护安装处获得的线模电压中的高频小波能量大于或等于低频的小波能量, 此时 $K_q \geq 1$ 。故可利用高低频能量比值 K_q 构成区内、外故障识别判据。

为提高判断区内故障的裕度, 将故障判据定义为

$$\begin{cases} \text{若 } K_q < 0.8, \text{ 则为区外故障} \\ \text{若 } K_q \geq 0.8, \text{ 则为区内故障} \end{cases} \quad (10)$$

2.5 雷击干扰的特征分析及识别

线路暂态保护应能正确识别雷击干扰。从继电保护的角度看, 线路雷击可分为雷击故障和雷击干扰 2 种情况。雷击干扰的识别任务是区分雷击未故障、雷击故障和非雷击故障。

定义

$$\begin{cases} V_1(k) = a, a = +800 \\ V_2(k) = b, b = -800 \end{cases} \quad (11)$$

为刻画两极线电压暂态波形的变化特征, 引入两极电压与直线的相关系数:

$$\begin{cases} \gamma_a = \frac{\sum_{k=1}^N V_1(k)u_1(k)}{[\sum_{k=1}^N V_1^2(k) \sum_{k=1}^N u_1^2(k)]^{1/2}} \\ \gamma_b = \frac{\sum_{k=1}^N V_2(k)u_2(k)}{[\sum_{k=1}^N V_2^2(k) \sum_{k=1}^N u_2^2(k)]^{1/2}} \end{cases} \quad (12)$$

现设一个负极性雷落在正极线上, 一般雷电流选用 2.6/50 μs 双指数波, 绝缘子采用压控开关模拟实现, 杆塔采用多波阻抗模型^[25]。仿真中, 雷击线路如图 17 所示, 雷击分为绕击和反击, 反击分为雷击杆塔顶部和雷击避雷线档距中央 2 种情况。

从电路角度而言, 线路雷击故障的物理过程可

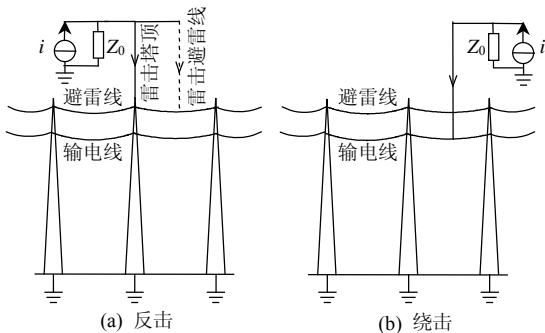


图 17 雷击线路示意图

Fig. 17 Drawing of lightning stroke of DC lines

视为 3 个阶段: 第 1 个阶段为线路遭雷击的过程, 即雷电流注入线路阶段; 第 2 个阶段为相应绝缘子两端反电势建立的过程; 第 3 个阶段为绝缘子闪络、故障附加电源合闸激励的阶段。因此, 后文将分为雷击未故障、非雷击故障和雷击故障 3 种情况展开讨论, 取保护安装处获得的时间窗 $2T$ 内的两极电压进行讨论。

1) 雷击未故障情况。

图 1 所示系统于直流线路 F_1 点(距保护安装处 300 km)发生雷电绕击未故障时, 两极电压波形如图 18 所示, 发生正极线雷击杆塔顶部未故障时, 两极电压波形如图 19 所示, 发生正极线雷击避雷线档距中央未故障时, 两极电压波形图 20 所示。

从图 18—20 可以看出, 对于雷击未故障即雷击干扰情况, 由于雷电行波没有入地通路, 它在线路上发生来回折反射, 直至衰减到 0, 因此两极电压波形表现为围绕原直流量值上下变化, 并最终趋于原直流量值, 且电压波形不会过 0(坐标轴)。通过计算: 图 18 中 γ_a 和 γ_b 分别为 0.9821 和 0.9876; 图 19 中 γ_a 和 γ_b 分别为 0.9875 和 0.9843; 图 20 中 γ_a 和 γ_b 分别为 0.9832 和 0.9869。可见, 雷击未故障时, γ_a 和 γ_b 为正相关且幅值均接近于 1。

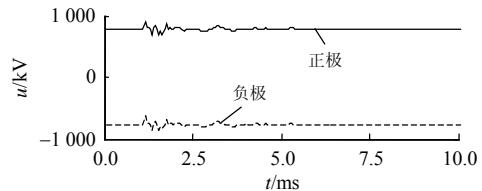


图 18 绕击未故障时两极电压波形

Fig. 18 Voltage waveforms of the lines when a shielding failure occurs without forming a fault

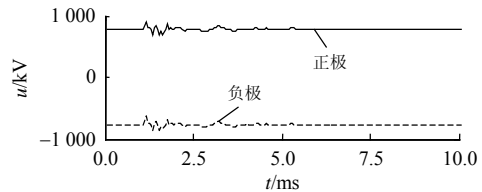


图 19 雷击杆塔顶部未故障时两极电压波形

Fig. 19 Voltage waveforms of the lines when a back striking on the tower occurs without forming a fault

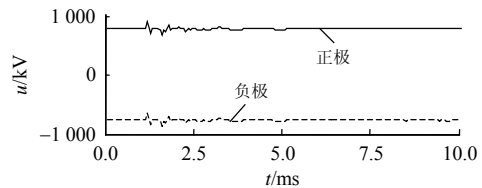


图 20 反击(雷击避雷线中央)未故障时两极电压波形

Fig. 20 Voltage waveforms of the lines when a back striking in the mid-span occurs without forming a fault

2) 非雷击故障情况。

现设 1.505 s 时图 1 所示系统于直流线路 F_1 点 (距保护安装处 300 km) 发生非雷击故障 (正极线接地故障), 此时两极电压波形如图 21 所示。

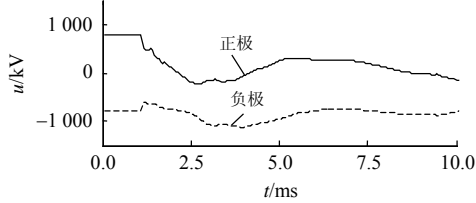


图 21 非雷击故障时两极电压波形
Fig. 21 Voltage waveforms of the lines when a short fault occurs

从图 21 可以看出, 对于非雷击故障, 由于故障电流行波具有入地通路, 因此故障极电压暂态量在原直流量值上变化显著, 且出现多次过 0 (坐标轴), 而非故障极线电压围绕原直流量值上下变化, 变化幅度较小, 且不过 0 (坐标轴)。通过计算, 图 21 中的 γ_a 和 γ_b 分别为 -0.124 5 和 0.957 46。可见, 非雷击故障时, 故障极的 γ_a 为负相关且幅值很小, 非故障极的 γ_b 为正相关且幅值接近于 1。

3) 雷击故障情况。

雷电冲电晕会大大降低雷电行波的陡度和幅度。仿真结果表明, 对于云广 ± 800 kV 直流输电线路, 在土壤电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 、杆塔接地阻抗不大于 15Ω 的情况下, 线路耐受雷电反击的耐雷水平在 345 kA 以上, 反击闪络率极小, 因此一般认为雷击避雷线档距中央不易造成绝缘子闪络^[26], 限于篇幅, 下文未给出雷击避雷线档距中央情况的仿真结果。

图 1 所示系统于直流线路 F_1 点 (距保护安装处 300 km) 发生雷电绕击正极线故障时, 其两极电压波形如图 22 所示; 雷击杆塔致反击故障 (正极线故障) 时, 其两极电压波形图 23 所示。

从图 22—23 可以看出, 对于雷击故障而言, 由于雷击故障电流行波具有入地通路, 因此故障极电压在原直流量值上变化显著, 且出现多次过 0 (坐标轴), 非故障极线电压围绕原直流量值变化较小,

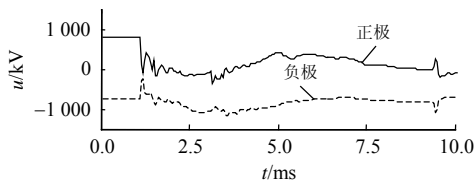


图 22 绕击故障时两极电压波形
Fig. 22 Voltage waveforms of the lines when a shielding failure occurs with forming a fault

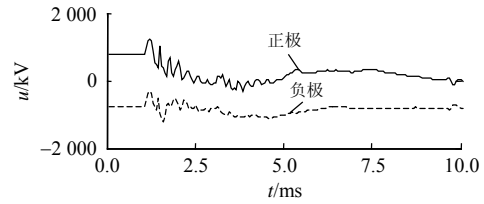


图 23 反击时电压波形
Fig. 23 Voltage waveforms of the lines when a back striking occurs without forming a fault

且不会过 0 (坐标轴)。通过计算: 图 22 中 γ_a 和 γ_b 分别为 -0.123 6 和 0.987 42; 图 23 中 γ_a 和 γ_b 分别为 -0.102 4 和 0.984 35。可见, 雷击故障时, 故障极的 γ_a 为负相关且幅值很小、非故障极的 γ_b 为正相关且幅值接近于 1。

定义:

$$K_g = \min(\gamma_a, \gamma_b) \quad (13)$$

由前文分析可知: 对于雷击未故障, K_g 为正相关且接近于 1; 对于雷击故障或非雷击故障, K_g 为负相关且远小于 1。

为提高防拒动的裕度, 定义雷击干扰识别判据为

$$\begin{cases} \text{若 } K_g \geq 0.8, \text{ 则为雷击干扰, 保护复归} \\ \text{若 } K_g < 0.8, \text{ 则发生故障, 保护动作} \end{cases} \quad (14)$$

3 UHVDC 线路单端电气量暂态保护方案

根据上述分析, 可设计出 UHVDC 线路单端电气量暂态保护方案, 其框图如图 24 所示。区外发生故障时, 由于该边界对暂态电压高频成分的衰减作用, 使得直流线路上的暂态线模电压的高频分量的小波能量与区内发生故障时的暂态线模电压的高频分量的小波能量存在明显差异。利用这种暂态线模电压高频小波能量的差异可构成单端电气量暂态保护的区内、外故障识别元件; 利用故障暂态电压多尺度小波变换模极大值比较方法与 du/dt 方

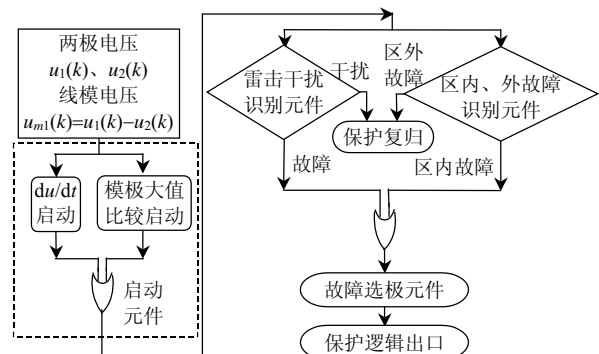


图 24 UHVDC 线路单端电气量暂态保护方案框图
Fig. 24 Scheme for UHVDC single-ended electrical transient protection

法, 并应用或逻辑来构成启动元件; 利用对正极和负极暂态电压分别与 $+800$ 和 -800 kV 的相关系数, 构造雷击干扰识别元件; 利用两极线极波, 构造故障选极元件。

4 仿真验证

应用 PSCAD/EMTDC 仿真软件对图 1 所示的系统进行了大量的仿真试验。仿真中, 分别考虑: 图 1 中的区外 F_2 点、 F_3 点的接地故障; 区内负极线 F_4 点的单极接地故障; 区内正极线 F_1 点的单极接地故障和雷击; 逆变器换相失败故障。其中: F_1 点、 F_4 点考虑距离保护安装处 100, 750, 1 400 km 三种情况, 即分别位于直流线路的始端、中点和末端; 各点的接地故障过渡电阻考虑了 0.1, 10, 100, 1 000 Ω 四种情况, 仿真结果如表 1 所示。当逆变器换相失败时, $K_q=0.54$, 判断为区外故障。

表 1 区内、外故障仿真结果

Tab. 1 Results of simulation of internal and external faults

故障位置	过渡电阻/ Ω	K_i	K_q	判断结果
F_1 点, 100 km	0.1	9.06	2.61	正极/区内
	10	10.16	2.67	正极/区内
	100	11.05	3.01	正极/区内
	1 000	12.65	3.40	正极/区内
F_1 点, 750 km	0.1	10.08	2.54	正极/区内
	10	11.08	2.56	正极/区内
	100	12.04	2.94	正极/区内
	1 000	13.98	3.24	正极/区内
F_1 点, 1 400 km	0.1	11.06	2.49	正极/区内
	10	13.06	2.38	正极/区内
	100	14.02	3.04	正极/区内
	1 000	15.96	3.15	正极/区内
F_4 点, 100 km	0.1	0.09	2.60	负极/区内
	10	0.09	2.68	负极/区内
	100	0.08	3.02	负极/区内
	1 000	0.08	3.41	负极/区内
F_4 点, 750 km	0.1	0.11	2.53	负极/区内
	10	0.10	2.55	负极/区内
	100	0.09	2.93	负极/区内
	1 000	0.09	3.24	负极/区内
F_4 点, 1 400 km	0.1	0.13	2.48	负极/区内
	10	0.12	2.39	负极/区内
	100	0.11	3.05	负极/区内
	1 000	0.10	3.16	负极/区内
F_2 点	0.1	7.06	0.28	正极/区外
	10	7.85	0.28	正极/区外
	100	8.03	0.28	正极/区外
	1 000	8.49	0.27	正极/区外
F_3 点	0.1	8.32	0.69	正极/区外
	10	8.31	0.71	正极/区外
	100	9.27	0.72	正极/区外
	1 000	9.64	0.70	正极/区外

设在雷击点 F_1 点分别发生绕击故障、绕击未故障、反击故障、非雷击故障, 其仿真结果如表 2 所示。

表 2 雷击干扰仿真结果

Tab. 2 Results of simulation of lightning interference

雷击类型	雷击位置/km	K_g	判断结果
F_1 点, 反击, 故障	100	-0.124	故障
	750	-0.523	故障
	1 400	-0.522	故障
F_1 点, 绕击, 故障	100	-0.102	故障
	750	-0.410	故障
	1 400	-0.404	故障
F_1 点, 绕击, 未故障	100	0.983	干扰
	750	0.983	干扰
	1 400	0.984	干扰
F_1 点, 非雷击故障	100	-0.124	故障
	750	-0.323	故障
	1 400	-0.521	故障

从表 1 可以看出, 由于采用两极线极波积分绝对值的比值作为故障选极线判据, 克服了传统直流行波保护故障选极线判据容易受故障过渡电阻尤其是高阻影响的缺点, 大大提高了故障选极线的可靠性。

从表 2 可以看出, 雷击干扰识别判据可以准确地识别雷击干扰和雷击故障。

当正极线发生故障时, 加入与正极线路直流电流、直流电压幅值相比为 5% 的噪声干扰, 计算得 $K_q=1.65$ (大于 0.8), 判据仍能满足。

5 结论

利用 UHVDC 线路两侧平波电抗器和直流滤波器构成的现实物理边界对高频暂态电压的衰减特性, 构造了 UHVDC 线路单端电气量暂态保护方案。

1) 利用故障暂态电压模极大值幅值随小波变换尺度的增加而增大的特性, 构成单端电气量暂态保护的启动判据。它毋需门槛值, 毋需整定, 耐受高阻能力强, 不受噪声或脉冲干扰的影响, 可靠性高。

2) 根据直流线路边界元件对暂态电压高频分量的带阻转变特性, 利用暂态电压中高频量小波能量和低频量小波能量的比值, 构成区内、外故障识别元件。

3) 利用两极暂态电压与 $+800$ 和 -800 kV 的相关系数 γ_a 和 γ_b 构成雷击干扰的识别元件。

4) 利用两极线极波积分绝对值比构成单端电气量暂态保护故障选极元件。

大量的仿真表明, 本文所提方案不受控制系统

响应、边界避雷器击穿、雷击干扰、过渡电阻和换流站故障等因素的影响,能够在线路单端实现具有绝对选择性的全线速动。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 250-257.
Liu Zhenya. UHVDC transmission technology albums[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006: 250-257(in Chinese).
- [2] 王智冬. $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电内过电压仿真研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
Wang Zidong. $\pm 800\text{kV}$ UHVDC overvoltage simulation research [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2007(in Chinese).
- [3] 邓本飞. 天广高压直流输电线路保护系统综述[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 39(19): 71-80.
Deng Benfei. HVDC line protection summary of Tian-Guang project [J]. Power System Protection and Control, 2008, 39(19): 71-80(in Chinese).
- [4] 董鑫. 高压直流输电线路行波保护的研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2008.
Dong Xin. Study on traveling wave protection on HVDC transmission line[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2008(in Chinese).
- [5] 艾琳. 高压直流输电线路行波保护的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2002.
Ai Lin. Study on traveling wave protection on HVDC transmission line[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2002(in Chinese).
- [6] 王俊生, 李海英, 曹东民, 等. $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流双极区保护的若干问题探讨[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(23): 85-88.
Wang Junsheng, Li Haiying, Cao Dongmin, et al. Discussion on some problems in bi-pole area of $\pm 800\text{kV}$ UHVDC system protect [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(23): 85-88(in Chinese).
- [7] 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 on the operation of DC transmission line protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(14): 96-99(in Chinese).
- [8] 胡宇洋, 黄道春. 葛南直流输电线路故障及保护动作分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 102-107.
Hu Yuyang, Huang Daochun. Faults and protection analysis of Gezhouba-Nanqiao DC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 102-107(in Chinese).
- [9] 周翔胜, 林睿. 高压直流输电线路保护动作分析及校验方法. 高电压技术, 2006, 32(9): 32-39.
Zhao Xiangsheng, Lin Rui. Analyses of relay protection action for HVDC line and testing method[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 32-39(in Chinese).
- [10] 李爱民, 蔡泽祥, 任达勇, 等. 高压直流输电控制与保护对线路故障的动态响应特性分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 72-75.
Li Aimin, Cai Zexiang, Ren Dayong, et al. Analysis on the dynamic performance characteristics of HVDC control and protection for the HVDC line faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 72-75(in Chinese).
- [11] 段建东, 张保会, 任晋峰, 等. 超高压输电线路单端暂态量保护元件的频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 37-43.
Duan Jiandong, Zhang Baohui, Ren Jinfeng, et al. Non-unit transient-based protection for EHV transmission lines, basic theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 37-43(in Chinese).
- [12] Johns A T, Agrawal P. New approach to power line protection based upon the detection of fault induced high frequency signals[J]. IEE Proceedings C: Generation, Transmission and Distribution, 1990, 137(4): 307-313.
- [13] Johns A T, Aggarwal R K, Bo Z Q. Non-unit protection technique for EHV transmission systems based on fault-generated noise, part 1: signal measurement[J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 1994, 141(2): 133-140.
- [14] Johns A T, Aggarwal R K, Bo Z Q. Non-unit protection technique for EHV transmission systems based on fault-generated noise, part 2: signal processing[J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 1994, 141(2): 141-147.
- [15] 段建东, 张保会. 基于暂态量的超高压电网超高速保护的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2005.
Duan Jiandong, Zhang Baohui. Study of ultra a-high-speed transient based protection for extra-high-voltage transmission system [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2005(in Chinese).
- [16] 哈恒旭, 张保会, 吕志来. 利用暂态电流的输电线路单端量保护新原理探讨[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 56-61.
Ha Hengxu, Zhang Baohui, Lu Zhilai. A novel principle of non-unit protection based on transient components for EHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 56-61(in Chinese).
- [17] 张保会, 郝治国. 智能电网继电保护研究的进展(一): 故障甄别新原理[J]. 电力系统自动化设备, 2010, 30(1): 1-6.
Zhang Baohui, Hao Zhiguo. Development of relay protection for smart grid(1): new principal of fault distinction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(1): 1-6(in Chinese).
- [18] 韩民晓, 丁辉, 陈修宇, 等. 高压直流输电系统电磁暂态建模[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(4): 7-11.
Han Minxiao, Ding Hui, Chen Xiuyu, et al. Electromagnetic transient modeling of HVDC system[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2008, 20(4): 7-11(in Chinese).
- [19] 束洪春. 电力工程信号处理应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 229-230.
Shu Hongchun. Signal processing and application for electrical engineering[M]. Beijing: Science Press, 2009: 229-230(in Chinese).
- [20] 吴敏. 基于小波多分辨率信号分解的HVDC电磁暂态保护[D]. 广州: 华南理工大学, 2005.
Wu Min. Transient based protection for HVDC lines using wavelet-multiresolution signal decomposition[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2005(in Chinese).
- [21] Keswani R A. Identification of fault in HVDC converters using wavelet based multi-resolution analysis[C]//The First International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology. Nagpur, Maharashtra: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008: 945-959.

- [22] 王钢,李志坚,李海锋,等. ± 800 kV 特高压直流线路暂态保护[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 40-43.
Wang Gang, Li Zhijian, Li Haifeng, et al. Transient based protection for ± 800 kV UHVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 40-43(in Chinese).
- [23] 王钢, 罗健斌, 李海峰, 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): 30-32.
Wang Gang, Luo Jianbin, Li Haifeng, et al. Transient energy protection for UHVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 30-32(in Chinese).
- [24] Xiao Liu. Hrbird traveling wave/boundary protection for monopolar HVDC line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2): 569-578.
- [25] 张永记,司马文霞,张志劲. 防雷分析中杆塔模型的研究现状[J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 93-97.
Zhang Yongji, Sima Wenxia, Zhang Zhijin. Summary of the study of tower models for lightning protection analysis[J]. High Voltage

Engineering, 2006, 32(7): 93-97(in Chinese).

- [26] 张纬钺,何金良,高玉明. 过电压防护及绝缘配合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 114-115.

Zhang Weipo, He Jinliang, Gao Yuming. Overvoltage protection and insulation coordination[M]. Beijing: Tshinghua University Press, 2002: 114-115(in Chinese).



束洪春

收稿日期: 2010-10-08。

作者简介:

束洪春(1961), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统新型继电保护与故障测距、故障录波、数字信号处理应用的研究, kmshc@sina.com;

刘可真(1974), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统新型继电保护与故障测距。

(责任编辑 刘浩芳)