

高压直流输电线路故障行波传播特性及其对行波保护的影响

韩昆仑¹, 蔡泽祥¹, 贺智², 徐敏¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 中国南方电网超高压输电公司, 广东 广州 510620)

摘要: 高压直流输电线路故障行波传播特性研究多采用无损传输线模型作为研究对象而未考虑行波色散的影响; 直流线路行波保护研究通常未考虑线路末端设备的影响。分析了故障行波沿直流线路传播产生色散的原因、特点以及影响因素; 分析了直流线路末端设备对故障行波中不同频率分量的影响。在此基础上研究了行波色散及末端设备对行波保护的影响。研究表明: 故障行波的色散主要体现在其地模分量上。故障行波波头幅值的变化影响行波保护的电压变化量判据, 受前述两因素的共同作用; 故障行波波头陡度的变化影响电压变化率判据, 受行波色散影响有限, 主要由故障行波的线模分量确定。

关键词: 传播特性; 故障行波色散; 线模分量; 地模分量; 行波保护

Propagation characteristic of fault traveling wave on HVDC line and its influence on HVDC line traveling wave protection

HAN Kun-lun¹, CAI Ze-xiang¹, HE Zhi², XU Min¹

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510620, China)

Abstract: The lossless transmission line model is widely used in research of propagation characteristic of fault traveling wave on HVDC line, but traveling wave dispersion is not considered in the model. And the influence of DC line terminal devices is not considered in research of traveling wave protection (TWP). The causation, the characteristic and the influencing factors of fault traveling wave dispersion are analyzed in detail. Influence of DC line terminal devices on the reflection of different frequency component of fault traveling wave is also analyzed. And then, influence of the forenamed two factors on TWP is studied. It is shown that dispersion mainly affects the earth mode component of fault traveling wave. Both the forenamed two factors also have effect on the amplitude of fault traveling wave, which affects the criterion of voltage change of TWP; the fault traveling wave gradient, which affects the criterion of voltage change rate of TWP, is affected limitedly by dispersion. And it can be confirmed by the aerial mode component of fault traveling wave.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51077055) and Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (No. 20100172110031).

Key words: propagation characteristic; fault traveling wave dispersion; aerial mode component; earth mode component; traveling wave protection

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2013)21-0020-06

0 引言

直流输电线路故障为高压直流输电系统的常见故障之一^[1-3]。由于直流输电线路结构上不存在换位和分支等问题且故障行波无需考虑初始相角的影响, 便于研究直流线路故障行波的传播特性, 因而其成为直流输电线路故障分析以及保护研究的主要

研究方向。

直流输电线路故障发生后的行波过程主要受线路参数、故障点特征以及直流线路末端设备等因素的影响。目前关于输电线路故障行波的研究多是以均匀无损传输线为基本模型^[4-6], 即未考虑输电线路基本参数的频变特性以及由此造成的故障行波色散的影响, 因而无法对故障行波各频率分量的传播特性进行更为细致的分析; 另一方面, 目前广泛采用的高压直流线路行波保护多以检测故障行波波头的到达为基本原理, 直流线路末端设备 (主要包括平

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51077055); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20100172110031)

波电抗器及直流滤波器)对故障行波波头的影响未被重点考虑^[7-13],对直流线路行波保护的性能也会产生影响。由此,分析和研究故障行波色散以及直流线路末端设备对故障行波的传播特性的影响对于直流线路行波保护性能的改善以及进行保护整定等工作都具有重要的意义。

本文在无损传输线模型的基础上考虑了输电线路基本参数的频变特性,分析了直流线路故障行波产生色散的原因、特点及其在直流线路环境下的主要影响因素。在此基础上,结合直流输电线路的末端设备,分析了故障行波在直流线路末端反射的特点,进而分析了末端设备及故障行波色散对直流线路行波保护的影响。

1 均匀无损传输线的复频域解

均匀传输线的分布参数模型认为线路的几何尺寸及媒介的电磁性能是均匀的,反映输电线路电磁过程的基本参数均匀地分布于输电线路的全长,其某一微段的电路模型可表示为图1所示。

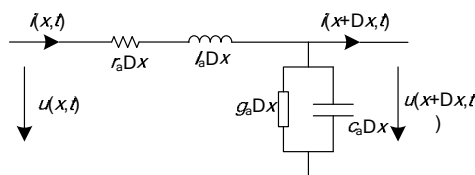


图1 一微段传输线的电路模型

Fig. 1 A segment circuit model of transmission line

其中, r_a 、 l_a 、 g_a 和 c_a 分别为单位长度线路的电阻、电感、电导和电容,称为输电线路的基本参数。线路的电压及电流分布可表示为

$$\begin{cases} -\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = r_a \cdot i(x,t) + l_a \cdot \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \\ -\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = g_a \cdot u(x,t) + c_a \cdot \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)又称为电报方程。

为方便研究,时域内的线路波动方程通常利用拉普拉斯变换转换到复频域进行求解,可得到线路上的电压及电流的复频域通解,如式(2)。

$$\begin{cases} U(x,s) = F_1(s)e^{-\gamma(s)x} + F_2(s)e^{\gamma(s)x} \\ I(x,s) = (F_1(s)e^{-\gamma(s)x} - F_2(s)e^{\gamma(s)x})/Z_C \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\gamma(s)$ 为线路的传播系数; Z_C 为线路的波阻抗; $F_1(s)$ 、 $F_2(s)$ 是由边界条件确定的系数。对长度为 l 的线路,计及两端的电气量则可得线路首末端电气量间的关系:

$$\begin{bmatrix} U(0,s) \\ I(0,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma(s)l) & Z_C(s)\sinh(\gamma(s)l) \\ \sinh(\gamma(s)l)/Z_C(s) & \cosh(\gamma(s)l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U(l,s) \\ I(l,s) \end{bmatrix} \quad (3)$$

均匀无损传输线模型在此基础上忽略了线路损耗,即忽略 r_a 、 g_a 的影响,此时线路波阻抗 Z_C 为实数。这样得到的输电线路电压电流的变化规律与实际情况存在一定的差异,因此有必要研究输电线路基本参数的频变特性,以便更准确地研究输电线路电压电流的变化情况。

2 故障行波沿直流线路传播的色散特性

2.1 行波色散的产生

输电线路发生接地故障时,在故障处产生故障行波并向线路两侧传播。在考虑输电线路参数的频变特性时, r_a 、 l_a 、 g_a 和 c_a 均随频率的变化而变化^[14], Z_C 也不再为实数,因而故障行波中的各频率分量在传播过程中会表现出明显的差异性。

若计及 $s=j\omega$,则式(2)中的 $\gamma(s)$ 转换为

$$\gamma(\omega) = \sqrt{(r_a + j\omega l_a)(g_a + j\omega c_a)} = \alpha(\omega) + j\beta(\omega) \quad (4)$$

其中: $\alpha(\omega)$ 为衰减系数; $\beta(\omega)$ 为相移系数,它们都是频率的函数。

$$\alpha(\omega) = \sqrt{\frac{1}{2}[r_a g_a - \omega^2 l_a c_a + \sqrt{(r_a^2 + \omega^2 l_a^2)(g_a^2 + \omega^2 c_a^2)}]} \quad (5)$$

$$\beta(\omega) = \sqrt{\frac{1}{2}[\omega^2 l_a c_a - r_a g_a + \sqrt{(r_a^2 + \omega^2 l_a^2)(g_a^2 + \omega^2 c_a^2)}]} \quad (6)$$

另外,计及 $s=j\omega$,则式(2)中的 Z_C 为

$$Z_C = \sqrt{\frac{r_a + j\omega l_a}{g_a + j\omega c_a}} \quad (7)$$

传输线的等相位面运动方程为

$$\omega \cdot t \pm \beta(\omega) \cdot x = \text{const} \quad (8)$$

将式(8)对时间 t 求导,得到特定频率下电压行波的波速

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{\beta(\omega)} \quad (9)$$

由式(5)、式(6)以及式(9)可看出,电压行波中不同频率分量的传播速度及畸变程度与其频率相关,因此在传播过程中故障行波波头形状发生畸变,即产生行波色散。

图2为电压行波沿直流输电线路传播过程中出现的色散现象。

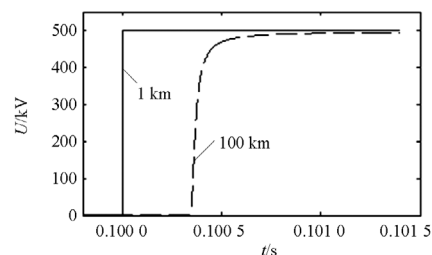


图2 直流线路行波的色散

Fig. 2 Traveling wave dispersion of HVDC line

电压行波沿直流输电线路传播的同时,其波头形状发生畸变,行波传播距离越长则波头畸变越明显。

2.2 行波色散的特点

直流输电系统在双极运行状态下,线路的电气量中包含了线路与大地之间、正负极线路之间的耦合关系,给行波的色散研究带来困难。同时,直流输电线路在结构上具有其自身的特点:不存在换位和分支问题、线路结构对称、直流线路故障发生时不必考虑初始相角影响、直流线路跨越的地质条件更复杂等。综合考虑以上因素,通常采取相模变换的方式,将各电气量从相域转换到模域进行研究。经过转换后,不同模量之间不存在相互耦合的关系,这样能更加方便地研究行波色散现象。

由于直流输电系统有两根极线且结构对称,因而采用 Karrenbauer 变换进行相模变换^[15]

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中: U_0 、 U_1 分别为线路电压在模域内的地模分量和线模分量; U_a 、 U_b 分别为相域内的正、负极电压。相应地,线路的基本参数转换为模量

$$\begin{cases} z_0 = r_0 + j\omega l_0 = z_s + z_m \\ z_1 = r_1 + j\omega l_1 = z_s - z_m \end{cases} \quad (11)$$

其中: z_0 和 z_1 分别为线路单位长度阻抗的地模分量和线模分量; z_s 和 z_m 分别为线路单位长度的自阻抗和互阻抗。对于输电线路单位长度的自阻抗 z_s 和互阻抗 z_m 为

$$\begin{cases} z_s = z_{int} + \Delta z_s \\ z_m = \Delta z_m \end{cases} \quad (12)$$

其中: z_{int} 为导线的内阻抗,与导线结构和频率相关,可由修正的贝塞尔函数计算; z_s 和 z_m 为导线阻抗关于大地效应的修正项,多采用卡松公式的展开式计算^[14],大地效应在阻抗中所占比重较大。对某一频率而言,输电线路单位阻抗的地模分量大于其线模分量。线路基本参数的频变特性如图 3 所示。

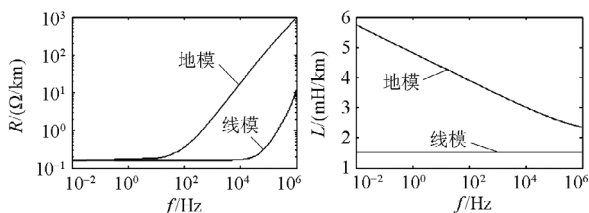


图 3 线路基本参数的频变特性

Fig. 3 Frequency dependent characteristic of DC line parameters

由式(6)和式(9)可将行波波速分解为地模波波速及线模波波速。线模波波速与地模波波速的区别在于其不受对地导纳的影响,因而线模波波速近似为恒定值,而地模波波速则随频率的变化显著,如图 4 所示。

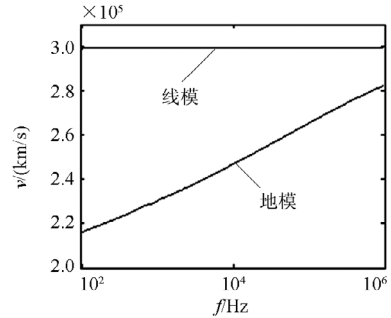


图 4 波速的频变特性

Fig. 4 Frequency dependent characteristic of wave velocity

2.3 行波色散的主要因素

影响故障行波色散的因素很多,对于直流输电线路则主要关注故障行波的传播距离、直流线路沿线的大地效应以及故障点的过渡电阻对故障行波色散的影响。

(1) 行波传播距离的影响

从前面的分析可知,故障行波中不同频率分量的波速不同,且同一频率分量的线模波速与地模波速也不相同,因此随着故障行波传播距离的增加,这种差异将不断扩大,行波色散现象也越发显著。

图 5 为线路某点故障后,在距故障点不同距离处测量得到的电压变化情况。图中的各条曲线均对其时间轴进行了平移,选择线模分量到达测量处的时刻为起始点。这样做是为了更好地比较经过不同传输距离后,故障行波各模分量的特征及其差异性,对于行波色散的规律本身没有影响。从图中可以看出故障行波中各频率分量以及各模分量之间的差异明显:各频率分量中线模分量的色散效果不明

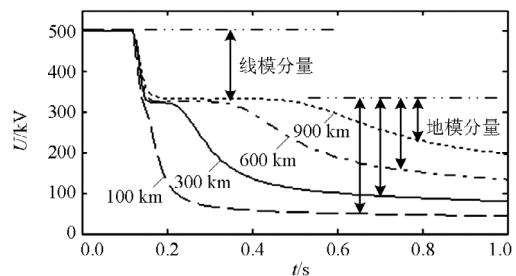


图 5 故障行波传播距离对直流线路行波色散的影响

Fig. 5 Influence of propagation distance on traveling wave dispersion

显, 其波形受传播距离的影响亦很小; 地模波的各频率分量则随着传输距离的增加其与线模波之间的时延越来越大, 因而行波波头的畸变程度也逐渐增加。

(2) 大地电阻率的影响

大地对故障行波传播的影响主要体现在其地模分量中, 而大地效应主要来自大地电阻率和频率的相互作用。图 6 为不同的大地电阻率条件下对故障行波色散的影响。

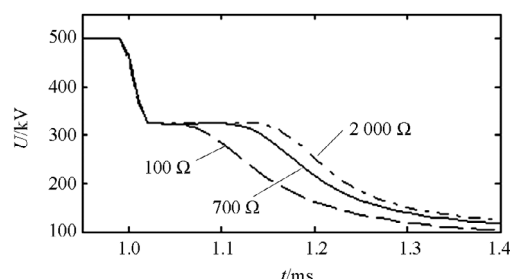


图 6 大地电阻率对直流线路行波色散的影响

Fig. 6 Influence of ground resistivity on traveling wave dispersion

图 6 中的各条曲线为不同大地电阻率条件下, 距离故障点 100 km 处测量到的故障行波的变化情况。可以看出, 在不同的大地电阻率情况下, 故障行波地模分量的变化明显, 大地电阻率越大, 地模分量的传播速度越低, 地模波形畸变程度也越大; 而线模分量由于其以直流线路为传播回路, 因而不会受到影响。

(3) 过渡电阻的影响

线路发生对地短路时, 故障点与大地之间存在着一定数值的过渡电阻。图 7 所示为不同的过渡电阻值对故障行波色散的影响。

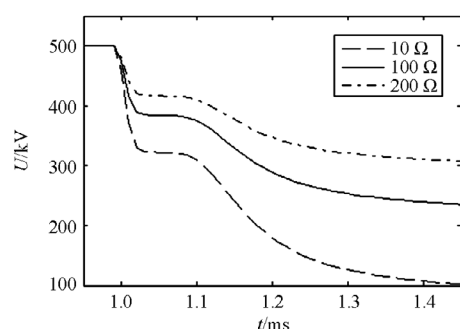


图 7 过渡电阻对直流线路行波色散的影响

Fig. 7 Influence of fault resistance on traveling wave dispersion

从图 7 中可以看出, 故障点过渡电阻值的变化对故障行波各模分量均产生明显的影响。过渡电阻值越大, 则线模分量和地模分量波形的幅值则越

小, 即剩余电压越大; 而过渡电阻的变化对于波速的影响很小。

3 故障行波在直流线路末端的反射特性

已有的研究表明, 在不考虑行波色散的情况下, 直流线路末端设备对反射后的故障行波波头的形状造成显著影响^[7]。图 8 为典型的直流线路末端设备, 主要由平波电抗器 L 以及直流滤波器构成。

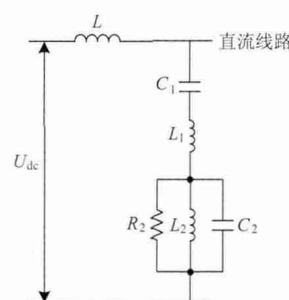


图 8 直流线路末端设备

Fig. 8 DC line terminal devices

故障行波的地模分量和线模分量在线路末端的反射系数分别为

$$\begin{cases} K_0 = \frac{Z_e - Z_{c0}}{Z_e + Z_{c0}} \\ K_1 = \frac{Z_e - Z_{c1}}{Z_e + Z_{c1}} \end{cases} \quad (13)$$

其中: Z_e 为线路末端设备的等效阻抗; Z_{c0} 和 Z_{c1} 分别为线路波阻抗的地模分量和线模分量。

在此基础上, 考虑行波色散效应, 则故障行波中各频率分量在线路末端的反射系数与频率的关系如图 9 所示。

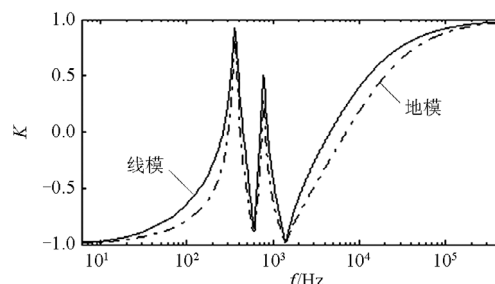


图 9 直流线路末端反射系数的频变特性

Fig. 9 Frequency dependent characteristic of reflection coefficient at DC line terminal

故障行波的地模分量及线模分量在线路末端的反射系数随频率变化的趋势一致, 差异较小。而各模量中不同的频率分量在线路末端的反射系数的差

异性则很大：在低频段（低于 200 Hz）反射系数为负，且频率越低反射系数越接近 -1；在中频段（200 Hz 与 4 000 Hz 之间），由于末端设备的谐振点在此频段内，反射系数随频率的变化较复杂；在高频段（高于 4 000 Hz）反射系数为正，且频率越高反射系数越接近 1。

综合考虑故障行波在传播过程中不同模量间的差异性、不同频率分量的差异性以及不同频率分量在直流线路末端的反射系数的差异性，线路接地故障发生后的几毫秒内，直流线路末端的电压波动依次由首次到达并发生反射的下列分量引起：线模波各频率分量、地模波的中高频分量和地模波的低频分量，如图 10 所示。

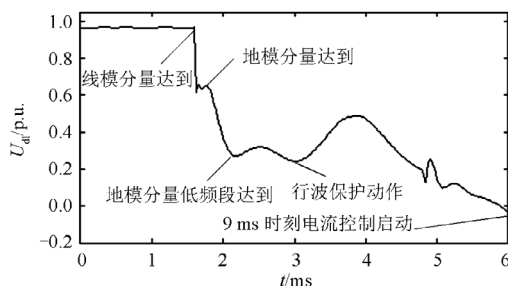


图 10 直流线路故障后线路末端电压波动过程

Fig. 10 Voltage fluctuation at line terminal after DC line fault

图 10 为某 500 kV 直流输电线路接地故障发生后几毫秒内的线路末端电压变化过程以及保护和控制的响应情况。故障点越靠近线路末端则每个过程出现的时刻越早；故障点越远离末端，情况则相反；在此之后的时段内，影响电压波动的因素将变得更为复杂，如：故障行波各模量及各频率分量在线路末端的多次反射；直流控制系统产生的影响等。对于过渡电阻，其值越小，则在地模波的低频分量到达线路末端时末端电压越低；反之，则越高。

图 10 中各分量引起的线路末端电压波动情况表明，故障行波波头的陡度主要由线模分量的波头陡度确定，故障行波波头的幅度由地模分量与线模分量共同确定，且受地模分量影响较大。

4 故障行波的传播特性对行波保护的影响

高压直流输电线路保护普遍采用行波保护作为其主保护，典型的直流线路行波保护中采用电压变化率 du/dt 和电压变化量 U_{dl} 两种电压判据来检测故障行波。

故障发生后的短暂时段内，故障行波沿线路传播产生的色散形成线模与地模分量之间以及不同频率分量之间的时延，并在线路末端发生反射。故障

行波波头的幅值（用以检测 U_{dl} ）由线模及地模分量的幅值叠加构成，其中线模分量的幅值主要受末端设备影响而地模分量的幅值则受末端设备及色散两者的共同影响。对于故障行波波头的陡度（用以检测 du/dt ），其线模分量不受色散影响，而地模分量则主要受色散影响。考虑到直流线路的实际长度，由行波色散而引起的行波波头畸变延时则十分有限，即在直流控制系统响应之前，故障行波波头的主要部分已经到达直流线路末端并发生反射，因而故障行波色散对波头陡度的影响十分有限，即 du/dt 可主要由线模分量确定。故障行波的传播特性对行波保护两个电压判据的主要影响如图 11 所示。

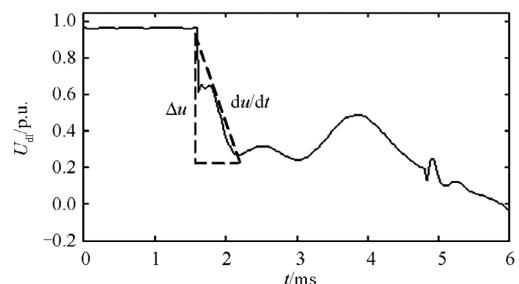


图 11 故障行波传播特性对 du/dt 和 ΔU_{dl} 的影响

Fig. 11 Influence of propagation characteristic of fault traveling wave on du/dt and ΔU_{dl}

当直流系统运行在单极大地方式下，由于其不含有线模分量，因此其规律与双极运行方式下的地模分量的规律相似。

5 结论

(1) 故障行波沿直流线路传播所产生的色散主要受传播距离、大地电阻率以及故障点过渡电阻值等因素的影响，其中故障行波的线模分量仅受过渡电阻影响明显，而地模分量则对前述各因素均具有较高的敏感度，因而故障行波色散主要体现在地模分量上。

(2) 故障行波的线模及地模分量在直流线路末端的反射系数随频率变化的趋势一致，低于 200 Hz 的分量其反射系数为负，且频率越低反射系数越接近 -1；高于 4 000 Hz 的分量其反射系数为正，且频率越高反射系数越接近 1；中间频段分量的反射系数随频率变化差异大。

(3) 故障行波波头幅值的变化主要影响行波保护电压变化量判据 U_{dl} ，其线模分量主要受末端设备影响，地模分量受末端设备及色散的共同影响；故障行波波头陡度的变化主要影响行波保护电压变化率判据 du/dt ，其线模分量不受色散影响，地模分

量主要受行波色散影响但影响有限, 即 du/dt 可主要由线模分量确定。

参考文献

- [1] 朱韬析, 王超. 一次复杂的直流线路故障分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(13): 103-106.
ZHU Tao-xi, WANG Chao. Analysis on complicated DC line fault of HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(13): 103-106.
- [2] 任达勇. 天广直流工程历年双极闭锁事故分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 173-176.
REN Da-yong. Analysis of bipole block events over the years of Tian-Guang HVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 173-176.
- [3] 丁钊, 韩伟强. 天广直流输电系统双极运行情况总结[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 49-54.
DING Zhao, HAN Wei-qiang. Summary of bipolar operation situation of Tian-Guang DC power transmission system[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 49-54.
- [4] 孙韬, 刘宗行, 江泽佳. 无畸变传输线方程的解析解[J]. 电路与系统学报, 2007, 12(6): 70-74.
SUN Tao, LIU Zong-hang, JIANG Ze-jia. An analytical solution of distortionless transmission line equations[J]. Journal of Circuits and Systems, 2007, 12(6): 70-74.
- [5] 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 Fu-chang, HE Jun-jia, et al. Analysis of grounding fault in UHVDC system by phase-modal transformation method[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11): 51-55.
- [6] 施慎行, 董新洲, 周双喜. 单相接地故障行波分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 29-32.
SHI Shen-xing, DONG Xin-zhou, ZHOU Shuang-xi. Analysis of single-phase-to-ground fault generated traveling waves[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(23): 29-32.
- [7] 李爱民, 蔡泽祥, 李晓华, 等. 高压直流输电线路行波保护影响因素分析及改进[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(10): 76-80.
LI Ai-min, CAI Ze-xiang, LI Xiao-hua, et al. Analysis of influence factors and improvement of traveling wave protections for HVDC line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10): 76-80.
- [8] 朱韬析, 侯元文, 王超, 等. 直流输电系统单极金属回线运行方式下线路接地故障及保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 133-138.
ZHU Tao-xi, HOU Yuan-wen, WANG Chao, et al. Research on the line faults and its protection of HVDC transmission system in metallic return operation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 133-138.
- [9] 朱韬析, 彭武. 天广直流输电系统线路高阻接地故障研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 137-140.
ZHU Tao-xi, PENG Wu. Research on high impedance earth fault of Tian-Guang HVDC transmission project[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(23): 137-140.
- [10] 陈锡磊, 朱韬析, 周浩. 高压直流线路低电压保护判据定值调整研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 125-130.
CHEN Xi-lei, ZHU Tao-xi, ZHOU Hao. Research on adjustment of criterion settings of DC line under-voltage protection[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 125-130.
- [11] HAN Kun-lun, CAI Ze-xiang, LIU Yang. Study on protective performance of HVDC transmission line protection with different types of line fault[C] // Proceedings of 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, June 7-9, 2011, Weihai, China.
- [12] LI Ai-min, CAI Ze-xiang. Study on the dynamic performance characteristics of HVDC control and protections for the HVDC line fault[C] // Proceedings of IEEE Power & Energy Society 2009 General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, Canada.
- [13] Naidoo D, Ijumba N M. HVDC line protection for the proposed future HVDC systems[C] // Proceedings of 2004 International Conference on Power System Technology, 2004, Singapore.
- [14] Dommel H W. 电力系统电磁暂态计算理论[M]. 李永庄, 等, 译. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [15] 施围, 郭浩. 电力系统过电压计算[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

收稿日期: 2013-01-30; 修回日期: 2013-04-11

作者简介:

韩昆仑(1978-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统保护、控制与自动化; E-mail: hkl1st@163.com

蔡泽祥(1960-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护与控制、电力系统稳定分析与控制;

贺智(1978-), 男, 工程师, 研究方向为高压直流输电系统技术管理。