

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180802

局部同塔双回直流线路故障行波传播特性及其 对行波保护的影响研究

李海锋¹, 郭履星², 王钢¹, 梁远升¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东电网公司惠州供电局, 广东 惠州 516000)

摘要: 局部同塔双回直流线路分界点各侧的线路段具有不同的耦合特性, 结合分界点各侧线路段的相模变换, 得到了不同线路段入射分界点时各电压模量行波的交叉折射系数。在此基础上, 对局部同塔双回线路不同线路区段发生单极接地故障时的故障行波传播特性及其行波保护动作量进行了定量分析, 并比较了其与单回线路及完全同塔双回线路的差异。结果表明: 同塔双回线路段的线模 1 分量与单回线路段的地模分量之间的交叉折射是造成局部同塔双回线路的故障行波传播特性与单回线路及完全同塔双回线路不同的主要原因; 就基于模量的行波保护判据而言, 局部同塔双回线路行波特性的影响主要体现在线模波变化率, 其大小介于完全同塔双回线路和单回线路之间, 且与单回线路段的总长度有关。

关键词: 局部同塔双回直流输电线路; 相模变换; 模量交叉折射系数; 行波传播特性; 行波保护

Propagation characteristics of fault travelling wave on double-circuit HVDC transmission lines partially on the same tower and its effect on travelling wave protection

LI Haifeng¹, GUO Lüxing², WANG Gang¹, LIANG Yuansheng¹

(1. College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangdong Power Grid Huizhou Power Supply Bureau, Huizhou 516000, China)

Abstract: Since there are different coupling characteristics of each side of the demarcation point for double-circuit HVDC transmission lines partially on the same tower, the approach to calculate the inter-refractive coefficient of every mode is obtained based on the phase-mode transformation in this paper. Then, propagation characteristics of fault travelling wave and criterion characteristics of travelling wave protection of single-pole-to-ground faults occurring in different line segments are investigated, and its differences from those on single-circuit HVDC lines and double-circuit HVDC lines are compared. It is shown that the travelling waves in the line-1 mode of double-circuit lines and earth mode of single-circuit lines can refract to passageways of each other, which is the important influencing factor for the propagation characteristics of double-circuit HVDC transmission lines partially on the same tower combining the extreme features of single-circuit HVDC lines and double-circuit HVDC lines. In terms of traveling wave protection based on modulus component, the influence of the traveling wave characteristics mainly embodies in the line-mode wave change rate. The size of line-mode wave change rate is between single-circuit HVDC lines and double-circuit HVDC lines and is related to the total length of single-circuit lines in double-circuit lines partially on the same tower.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577072).

Key words: double-circuit HVDC lines partially on the same tower; phase-mode transformation; inter-refractive coefficient of modulus component; propagation characteristics of travelling wave; travelling wave protection

0 引言

近年来, 同塔多回输电线路技术在直流输电系

统中开始得到了应用^[1-2]。两回直流系统共用输电走廊, 从线路结构看包括两种形式: 一种是完全同塔双回, 即两回直流的两端均落点于同一个换流站, 如溪洛渡-广东±500 kV 同塔双回直流输电工程^[3-4]; 而更具普遍意义的则是两回直流落点于不同换流

站，只有部分线路同塔架设，即所谓的局部同塔双回线路，如改造后的葛洲坝-南桥同塔双回直流输电工程^[5]、规划中的天广直流改造^[6]，及兴安直流中接地极线路与部分直流线路同塔架设的情况。

现有的高压直流输电线路主保护以及故障测距等均采用基于暂态行波的原理，而故障暂态行波波头及其折反射特性则是行波保护动作特性分析、定值整定以及保护新原理研究的基础。目前国内外专家学者对直流线路的故障暂态特性^[7-9]、保护原理^[10-17]等的研究主要以平衡的单回线路为对象。而对同塔双回直流线路，则仅针对完全同塔双回直流线路，研究了其故障行波计算方法^[18]、故障行波特性^[19]及故障选线^[20]等。

然而局部同塔双回直流线路至少存在一个分界点，且分界点各侧的线路段具有不同的耦合特性，行波从不同区段入射至分界点时，由于原来的线路结构将被打破，使得在线路传播时相互独立的各个模量在分界点将存在相互的耦合；同时由于线路参数具有频变特性，不同模量行波在传播过程中发生畸变和衰减的程度也不同，因此，相对于单回线路和完全同塔双回线路，局部同塔双回直流线路的故障暂态行波传播特征更为复杂。目前针对局部同塔双回交流线路的故障分析已开展了一定的研究，但主要着眼于工频稳态量特征及局部耦合特性对零序电流保护的影响^[21-22]，与局部同塔双回直流线路所关注的故障暂态行波分析有较大区别。

为此，本文首先结合分界点各侧线路段的相模变换，得到了局部同塔双回直流输电线路不同区段入射分界点时各电压模量行波相互交叉折射的系数矩阵；然后利用 PSCAD/EMTDC 搭建仿真模型，考虑不同线路段发生单极接地故障的情况，详细分析了局部同塔双回直流线路的故障暂态行波特性以及分界点模量行波相互交叉折射对现有行波保护动作量的影响，并比较了其与单回直流线路和完全同塔双回直流线路的差异性。

1 局部同塔双回线路分界点处模量行波交叉折射系数的计算

图 1 所示为局部同塔双回直流输电线路示意图。其中，AM、BM、CN、DN 分别为单回线路段，MN 为同塔双回线路段，M、N 均为分界点。I、II 表示第 I、II 回直流线路。

从行波角度看，两回线路从同塔到完全分开为单独的单回线路是个连续变化的过程。但由于该过渡段相对于整个局部同塔双回直流线路而言只占很少部分，在一般直流线路故障行波分析所涉及的电

气量主要频率范围内，过渡段对线路故障暂态初始行波特性不会造成本质影响。因此，为了简化理论计算分析，突出最主要的特征，本文分析中不考虑分界点 M、N 的过渡段，即认为分界点两侧分别为同塔双回线路和两个彻底解耦的单回线路。

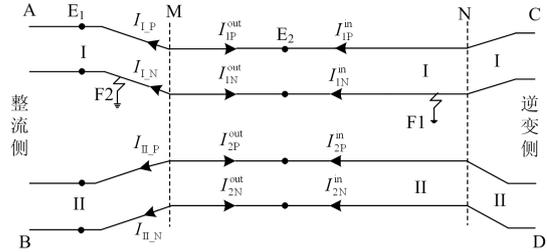


图 1 局部同塔双回直流输电线路示意图

Fig. 1 Double-circuit HVDC transmission lines partially on the same tower

1.1 不同线路段的相模变换

由模量分析原理，对于同塔双回线路段，可将其电压、电流量转变为相互独立的模量，即^[23]

$$\begin{cases} [U_{\text{dou_mode}}] = [T_v]^{-1} [U_{\text{dou_phase}}] \\ [I_{\text{dou_mode}}] = [T_i]^{-1} [I_{\text{dou_phase}}] \end{cases} \quad (1)$$

式中： $[U_{\text{dou_phase}}] = [U_{1P} \ U_{1N} \ U_{2P} \ U_{2N}]^T$ 为双回线路段极线电压相量列矩阵， $[I_{\text{dou_phase}}] = [I_{1P} \ I_{1N} \ I_{2P} \ I_{2N}]^T$ 为双回线路段极线电流相量列矩阵，下标 1P、1N 及 2P、2N 分别代表同塔架设的 I 回线路的正极、负极及 II 回线路的正极、负极； $[U_{\text{dou_mode}}] = [U_0 \ U_1 \ U_2 \ U_3]^T$ 为双回线路段极线电压模量列矩阵； $[I_{\text{dou_mode}}] = [I_0 \ I_1 \ I_2 \ I_3]^T$ 为双回线路段极线电流模量列矩阵，其下标分别对应地模、线模 1、线模 2 和线模 3 分量； T_v 、 T_i 分别为同塔双回线路段的电压、电流变换矩阵。

若考虑同塔双回直流线路段为平衡线路，有

$$[T_v] = [T_i] = [T] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

而对于单回线路段，则有

$$\begin{cases} [U_{j_mode}] = [Q_{jv}]^{-1} [U_{j_phase}] \\ [I_{j_mode}] = [Q_{ji}]^{-1} [I_{j_phase}] \end{cases} \quad (3)$$

式中： $[U_{j_phase}] = [U_{jP} \ U_{jN}]^T$ 、 $[I_{j_phase}] = [I_{jP} \ I_{jN}]^T$ 为第 j 回单回线路段的电压、电流相量列矩阵； $[U_{j_mode}] = [U_{j1} \ U_{j0}]^T$ 、 $[I_{j_mode}] = [I_{j1} \ I_{j0}]^T$ 为第 j 回单回线路段的电压、电流模量列矩阵； Q_{jv} 、 Q_{ji} 分别为第 j 回单回线路段的电压和电流相模变换矩阵； $j=I$ 、

II 分别表示第 I、II 回单回线路段。

现有实际工程中单回线路均为平衡线路, 故:

$$[Q_{Iv}] = [Q_{IIv}] = [Q_{Ii}] = [Q_{IIi}] = [S] = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由以上相模变换可知, 同塔双回线路段有四个模量通道, 而单回线路段只有两个模量通道, 行波从不同区段入射至分界点后, 在分界点处将存在相互间的耦合; 即从分界点两侧入射至分界点的不同模量行波会在分界点发生交叉折射, 这是在分析行波传播特性时必须考虑的暂态特性。为此, 本文将给出局部同塔双回直流线路在分界点处的模量行波交叉折射系数计算方法。

实际上, 虽然局部同塔双回线路的结构有多种形式, 但就分界点处的模量行波交叉特性而言, 均可归结为两类: 行波从同塔双回线路段入射至分界点; 行波从单回线路段入射至分界点。

1.2 同塔双回线路段至单回线路段的模量行波交叉折射系数计算

设双回线路段入射行波的模量电压、电流分别为 $[U_{dou_mode}^{in}]$ 、 $[I_{dou_mode}^{in}]$, 则有

$$[U_{dou_mode}^{in}] = [Z_{c,dou}] [I_{dou_mode}^{in}] \quad (5)$$

式中, $[Z_{c,dou}]$ 为双回线路段的波阻抗矩阵。

结合式(1), 式(5)可写成以下相量形式:

$$[U_{dou_phase}^{in}] = [T_v] [Z_{c,dou}] [T_i]^{-1} [I_{dou_phase}^{in}] \quad (6)$$

同理, 双回线路段的反射行波及 I、II 两回单回线路段的折射行波分别满足式(7)一式(9)。

$$[U_{dou_phase}^{out}] = -[T_v] [Z_{c,dou}] [T_i]^{-1} [I_{dou_phase}^{out}] \quad (7)$$

$$[U_{I_phase}] = [Q_{Iv}] [Z_{c,I}] [Q_{Ii}]^{-1} [I_{I_phase}] \quad (8)$$

$$[U_{II_phase}] = [Q_{IIv}] [Z_{c,II}] [Q_{IIi}]^{-1} [I_{II_phase}] \quad (9)$$

式中: $[U_{dou_phase}^{out}] = [U_{1P}^{out} \ U_{1N}^{out} \ U_{2P}^{out} \ U_{2N}^{out}]^T$ 、

$[I_{dou_phase}^{out}] = [I_{1P}^{out} \ I_{1N}^{out} \ I_{2P}^{out} \ I_{2N}^{out}]^T$ 分别为双回线路段的电压和电流反射行波; $[Z_{c,I}]$ 、 $[Z_{c,II}]$ 为 I、II 两回单回线路段的波阻抗矩阵。

入射行波及折反射行波在分界点处满足:

$$\begin{bmatrix} U_{I_phase} \\ U_{II_phase} \end{bmatrix} = [U_{dou_phase}^{in}] + [U_{dou_phase}^{out}] \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} I_{I_phase} \\ I_{II_phase} \end{bmatrix} = [I_{dou_phase}^{in}] + [I_{dou_phase}^{out}] \quad (11)$$

将式(6)一式(9)及式(11)代入式(10)中, 整理得

$$\begin{bmatrix} U_{I_phase} \\ U_{II_phase} \end{bmatrix} = 2[T_v] [Z_{c,dou}] [T_i]^{-1} [I_{dou_phase}^{in}] - [T_v] [Z_{c,dou}] [T_i]^{-1} \begin{bmatrix} I_{I_phase} \\ I_{II_phase} \end{bmatrix} \quad (12)$$

不妨将两回单回线路段并作一组双回线路, 其电压、电流相模变换矩阵分别记为

$$\begin{cases} [H_v] = \begin{bmatrix} Q_{Iv} & \\ & Q_{IIv} \end{bmatrix} \\ [H_i] = \begin{bmatrix} Q_{Ii} & \\ & Q_{IIi} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (13)$$

根据电压、电流的相量关系及式(1)一式(3)和式(13), 将式(12)整理成模量形式, 进一步简化得

$$\begin{bmatrix} U_{I_1} \\ U_{I_0} \\ U_{II_1} \\ U_{II_0} \end{bmatrix} = [\alpha]_{double-single} \begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, $[\alpha]_{double-single}$ 定义为同塔段-单回段的模量行波交叉折射系数矩阵。

$$[\alpha]_{double-single} =$$

$$2 \begin{bmatrix} [H_v] + [T_v] [Z_{c,dou}] [T_i]^{-1} [H_i] & [Z_{c,I}]^{-1} \\ & [Z_{c,II}]^{-1} \end{bmatrix}^{-1} [T_v] \quad (15)$$

结合式(2)和式(4), 则式(15)具有以下形式:

$$\begin{bmatrix} U_{I_1} \\ U_{I_0} \\ U_{II_1} \\ U_{II_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & a(f) & a(f) \\ b(f) & c(f) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d(f) & -d(f) \\ e(f) & m(f) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中, $a(f)$ 、 $b(f)$ 、 $c(f)$ 、 $d(f)$ 、 $e(f)$ 、 $m(f)$ 均由局部同塔直流线路的参数决定, 且与频率相关。

由式(16)可知, 同塔双回线路段的线模 2 或线模 3 入射分界点时, 折射出单回线路段的线模分量; 同塔双回线路段的线模 1 或地模分量入射分界点时折射出单回线路段的地模分量。即由于分界点的存在, 原本在线模通道传播的双回线路段的线模 1 分量会进入单回线路段的地模通道。

1.3 单回线路段至同塔双回线路段的模量行波交叉折射系数计算

当电压行波从单回线路段入射到同塔双回线路段时, 在分界点处的模量行波交叉折射系数计算方法与 1.2 节类似, 不再赘述其推导过程。此时, 其模量形式满足式(17)。

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = [\alpha]_{\text{single-double}} \begin{bmatrix} U_{I-1} \\ U_{I-0} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中, $[\alpha]_{\text{single-double}}$ 即为单回段-同塔段的模量行波交叉折射系数矩阵。

$$[\alpha]_{\text{single-double}} = 2 \left[[T_v] + [H_v] \begin{bmatrix} Z_{c.I} & \\ & Z_{c.II} \end{bmatrix} [H_i]^{-1} [T_i] [Z_{c.dou}]^{-1} \right]^{-1} [H_v] \quad (18)$$

同理, 结合式(2)和(4), 式(18)具有以下形式:

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & g(f) & 0 & h(f) \\ 0 & i(f) & 0 & j(f) \\ k(f) & 0 & l(f) & 0 \\ k(f) & 0 & -l(f) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{I-1} \\ U_{I-0} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中, $g(f)$ 、 $h(f)$ 、 $i(f)$ 、 $j(f)$ 、 $k(f)$ 、 $l(f)$ 均由局部同塔直流线路的参数决定, 且与频率相关。

由式(19)可知单回线路段的线模分量入射分界点后折射出双回线路段的线模 2 和线模 3 分量; 而地模分量入射分界点后, 折射出双回线路段的线模 1 和地模分量, 也出现了模量行波交叉折射。

此外, 电流模量行波交叉折射系数计算方法同上, 不再赘述。

2 模量行波交叉折射系数的仿真分析

为验证上述理论推导的正确性, 利用 PSCAD 搭建局部同塔双回直流输电线路仿真模型, 双回线路段采用溪洛渡-广东±500 kV 双回直流输电系统杆塔结构, 具体线路参数参见文献[18]。

模量行波交叉折射系数的推导满足线路不同频率的参数, 为具体仿真验证其正确性, 不妨取频率为 1 kHz 的线路参数进行分析, 将单、双回解耦矩阵及线路阻抗分别代入式(16)、式(19)中。

$$\begin{bmatrix} U_{I-1} \\ U_{I-0} \\ U_{II-1} \\ U_{II-0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1.007 & 1.007 \\ 0.8176 & 1.2159 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.007 & -1.007 \\ 0.8176 & -1.2159 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.5912 & 0 & 0.5912 \\ 0 & 0.3921 & 0 & -0.3921 \\ 0.4965 & 0 & 0.4965 & 0 \\ 0.4965 & 0 & -0.4965 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{I-1} \\ U_{I-0} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

在图 1 中的双回段末端(N)分别注入不同模量矩形波, 在 E_1 处测量单回线路段的折射波, 其相模变换后的模量电压如图 2 所示。为消除末端反射波对波头的影响, 将 AE_1 和 BE_1 的长度设置为较大值。

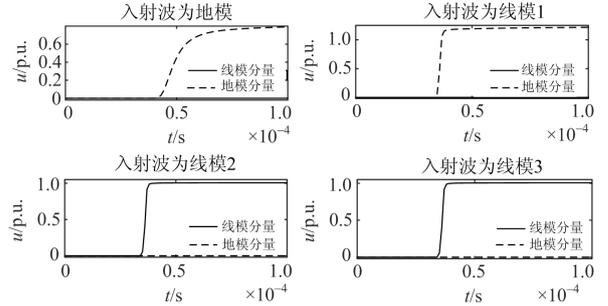


图 2 双回线路段模量入射到单回线路段的模量折射特性
Fig. 2 Refraction characteristics of voltage modulus travelling from double-circuit line to single-circuit line

由图 2 可见, 同塔双回线路段的线模 1 或地模分量入射分界点时在单回线路段上将产生地模分量的折射波; 而线模 2 或线模 3 分量入射分界点时, 在单回线路段上将产生线模分量的折射波。

同理, 在单回线路段的 A 端分别注入一个地模和线模矩形波, 在 E_2 处测量双回线路段的折射波。经相模变换后得到的模量曲线如图 3 所示。为了更加直观地分析分界点处模量的折射规律, E_2N 取足够长以消去末端反射的影响, 其他参数条件同图 2。

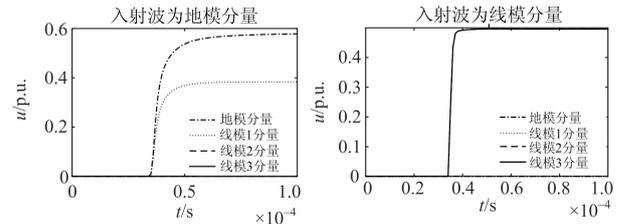


图 3 单回线路段模量入射到双回线路段的模量折射特性
Fig. 3 Refraction characteristics of voltage modulus travelling from single-circuit line to double-circuit line

由图 3 可见, 单回线路段的地模分量入射分界点时在双回线路段上将产生地模和线模 1 的折射波; 而线模分量入射分界点时, 在双回线路段上将产生线模 2 和线模 3 的折射波。此外, 对比式(20)、式(21)及图 2、图 3 可知, 根据模量行波交叉折射系数矩阵计算的各模量幅值与仿真结果一致。

由于线路参数存在频变特性, 行波频率的差异会导致行波在线路上传播、折反射等情况的不同。如图 4 给出了电压行波分别从同塔双回线路段及单回线路段分别入射分界点时各模量行波交叉折射系数随频率变化的曲线。

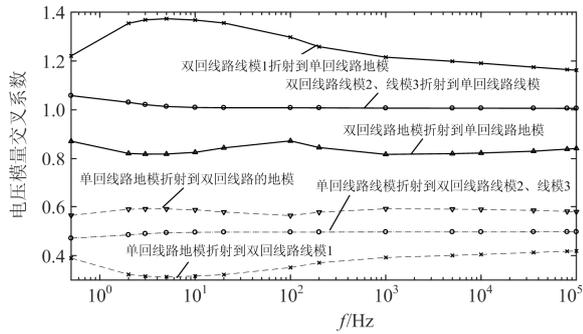


图4 行波入射分界点各模量交叉折射系数频变特性曲线

Fig. 4 Refraction coefficient curves for modulus when traveling wave propagates to the demarcation point

由图4可见, 各模量行波的交叉折射系数具有一定的频变特性。其中, 由于线路的地模参数受频率的影响较大, 因此涉及地模分量的交叉系数受频率变化也较明显; 而线模分量之间的交叉系数则受频率影响较小。

3 模量交叉折射对故障行波特性的影响

根据式(1)~式(4)可分别计算同塔双回线路及单回线路的极线电压初始行波^[18]; 在此基础上, 结合1.2、1.3节分析可知: 双回线路段的线模2和线模3均折射出单回线路段的线模分量, 在同一频率下, 不同线模分量的波速度及色散程度差异很小; 而双回线路段的线模1分量经分界点后折射进入单回线路段的地模通道, 和线模通道相比, 地模通道的线路参数衰减更加严重, 波速也更慢, 所以两者之间的交叉折射是导致局部同塔双回线路故障电气量与完全同塔双回线路产生差异的主要原因。当行波从单回线路入射分界点时也同理。

为此, 基于PSCAD分别建立单回直流系统和完全同塔双回直流系统的电磁暂态仿真模型; 局部同塔双回直流系统的线路结构如图1所示, 对三个线路模型第I回路正极线发生单极接地故障时在整流侧保护安装点测得的故障电气量进行对比分析。为便于对比, 三个线路模型的线路总长均为1200 km。

3.1 线路无畸变的故障行波传播特性仿真分析

3.1.1 同塔双回段故障, 故障行波传播到单回段

由以上分析可知, 当故障距离足够使线模分量与地模分量分开时, 三种线路模型的差异最明显。

图5为完全同塔双回线路和局部同塔双回线路第I回路及单回线路负极线(1N)中点故障时, 在整流侧测得的故障回两极线电压暂态行波。其中, case1代表单回线路; case2代表完全同塔双回线路; 局部同塔双回线路如图1所示, 为了使分界点处模

量的折反射特点更清晰, 采用三端局部同塔双回直流线路模型; 即CN=DN=0 km, 对MN段发生故障、行波传播到AM段进行仿真分析, 其中AM=BM=380 km, 对应case3。

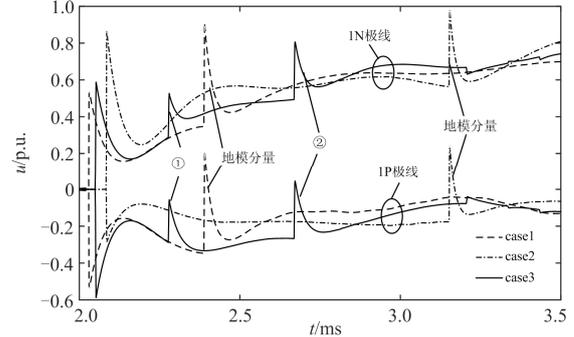


图5 三种线路模型故障回两极线电压暂态行波

Fig. 5 Voltage traveling wave of each pole of fault circuit for three kinds of line model

从图5可见, 当只有线模分量到达时, 故障回两极线极性相反, 其中单回线路两极线电压行波幅值相等, 而完全同塔双回直流线路故障极电压行波幅值约为健全极的3倍; 地模分量则在故障回两极线极性和幅值均相同。

而局部同塔双回线路则综合了单回线路与完全同塔双回线路两种极端情况的特点。如case3所示, 当只有双回线路段的线模2和线模3分量折射到单回线路段的线模分量到达时, 局部同塔双回线路故障回两极线电压初始行波波头幅值相等, 极性相反, 表现出与单回线路类似的特征; 但由于双回线路段的线模1分量和地模分量均折射出单回线路段的地模分量, 而线模1分量的传播速度明显大于地模分量, 因此在局部同塔双回线路上形成两个先后到达的地模分量, 如图5中的①、②所示。

3.1.2 单回段故障, 故障行波传播到同塔双回段

图6给出了完全同塔双回线路和局部同塔双回线路第I回路及单回线路负极线(1N)距末端40 km故障时, 在整流侧测得的故障回两极线的电压暂态行波。其中, case4代表单回线路; case5代表完全同塔双回线路; 局部同塔双回线路如图1所示, 取AM=BM=0 km, 对CN段发生故障时行波传播到MN段进行仿真分析, 其中取CN=DN=380 km, 对应图中的case6。

对比case4~case6可知: 当只有单回线路段的线模分量折射到双回线路段的线模2和线模3分量到达时, 局部同塔双回线路故障回两极线初始行波波头幅值相等, 极性相反, 表现出与单回线路类似的特征; 但由于单回线路段的地模波有一部分进入双

回线路的线模 1 通道，而线模 1 的波速度明显大于地模分量，行波远距离传播时，在局部同塔的双回段有两个波头会先后到达，如图 6 中①和②所示分别为单回线路的地模波折射到双回段的线模 1 分量和地模分量。

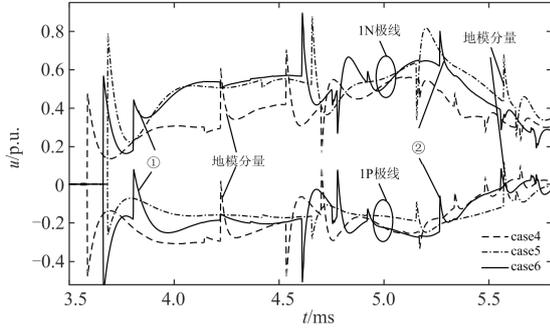


图 6 三种线路模型故障回两极线电压暂态行波
Fig. 6 Voltage traveling wave of each pole of fault circuit for three kinds of line model

3.1.3 不同结构的局部同塔线路

考虑到局部同塔双回线路结构的多样性，对四端(即线路两端均为单回线路的)局部同塔双回直流线路模型的故障行波进行仿真分析，并与三端局部同塔双回直流线路对比。如图 7 给出了局部同塔双回线路第 I 回路负极线(1N)距末端 140 km 故障时，在整流侧测得的故障回两极线电压暂态行波，行波在单回线路中的传播距离均为 240 km。其中，case6 代表三端局部同塔双回线路且故障发生在单回段并取：AM=BM=0 km，CN=DN=380 km，MN=820 km；case8 代表三端局部同塔双回线路且故障发生在双回段并取：AM=BM=240 km，MN=960 km；case7 代表四端局部同塔双回线路并取：AM=BM=CN=DN=190 km，MN=820 km。

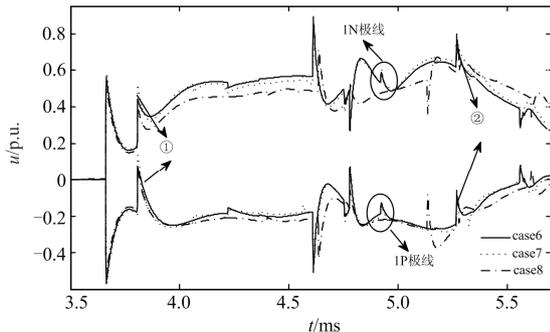


图 7 三种线路结构故障回两极线电压暂态行波
Fig. 7 Voltage traveling wave of each pole of fault circuit for three kinds of line configuration

由图 7 可以看出，对于三种不同的线路结构，其行波传播的最主要特征是相近的，如在只有线模

波折射的线模分量到达时，局部同塔双回线路故障回两极线电压初始行波波头幅值相等，极性相反，表现出与单回线路类似的特征；而由于单回线路的地模分量与双回线路的线模 1 分量及地模分量在分界点处(一个或者两个分界点)的相互折射，使其故障回两极线上也出现了先后到达的两个地模分量：如图 7 中①和②所示。当然由于折反射点位置的不同，具体的各模量行波到达时刻存在一定差异。

3.2 线路频变的故障行波传播特性仿真分析

上述分析均基于无畸变对称模型，为进一步验证以上分析对实际工程的适应性，将线路模型改为频变参数模型，并考虑了线路不对称换位。图 8 给出了三个线路模型第一回负极线中点故障时在整流侧测得的故障暂态电压行波，其中局部同塔的单回段线路长 80 km，其他条件同图 5。

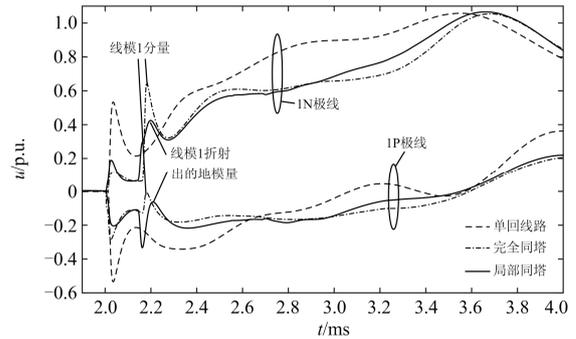


图 8 考虑实际工程的故障回两极线电压暂态行波
Fig. 8 Voltage traveling wave of each pole based three kinds of line construct based on actual parameters

由图 8 可以看出，考虑实际工程参数的故障暂态行波与基于无畸变模型存在一定差异，如由于双回线路的三个线模分量的波速度不同，完全同塔双回线路的线模分量将先后到达，且由于线路不对称换位，线模 1 分量在 1N 极线上的幅值明显大于 1P 极线。但局部同塔双回线路的行波传播的本质仍与基于无畸变模型一致，即由于分界点的模量交叉折射，极线行波的幅值发生了改变，且由于双回路段的线模 1 分量进入单回线路的地模通道，使得局部同塔双回线路的单回段新增一个地模分量。

4 模量交叉折射对行波保护判据的影响

分界点耦合对故障电气量产生影响，从而使得三种线路结构的行波保护各动作量也将产生不同程度的差异。为此，以模量行波保护为例，进行具体的仿真分析。其中，采样频率取 10 kHz，考虑线路不对称换位且参数频变。

如式(22)为典型的模量行波保护判据。

$$\begin{cases} \frac{dP_i}{dt} > \Delta_1 \\ \frac{dG_0}{dt} > \Delta_2 \\ \Delta P_i > \Delta_3 \\ \Delta G_0 > \Delta_4 \end{cases} \quad (22)$$

式中: P_i 为第 i 根极线的线模波; G_0 为地模波。
 $P_i = 0.5(Z_{cl}(I_{dl} - I_{dl_OP}) - (U_{dl} - U_{dl_OP}))$, $G_0 = 0.5(Z_{c0}(I_{dl} + I_{dl_OP}) - (U_{dl} + U_{dl_OP}))$, 其中 I_{dl} 和 U_{dl} 表示本极的电气量; I_{dl_OP} 和 U_{dl_OP} 表示同一回另外一极的电气量; Z_{cl} 和 Z_{c0} 分别代表线模波阻抗和地模波阻抗。

4.1 保护安装点在同塔双回段

完全同塔双回线路和局部同塔双回线路第 I 回路及单回线路正极线区内沿线发生单极接地故障时, 在整流侧第 I 回正极保护测得的行波保护动作量如图 9 所示。从整流侧向逆变侧编号, D 代表双回段, S 代表单回段, 则局部 D-S380 km 和局部 D-S15 km 分别表示保护安装点在同塔双回段, 且单回段线路长度各为 380 km 和 15 km。

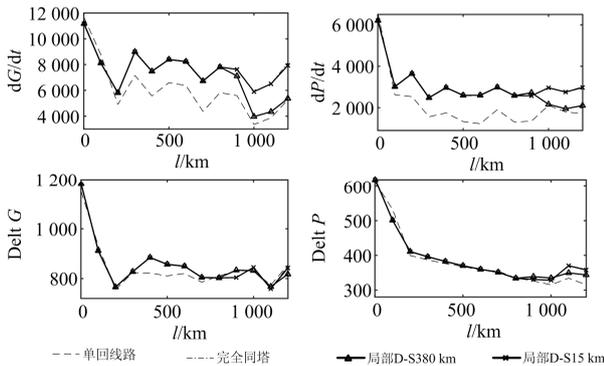


图 9 保护安装点在同塔双回段的行波保护动作量特性

Fig. 9 Values of modulus protection criteria when protection installation point in the double-circuit lines

当保护安装点在同塔双回段时, 此时在双回段故障时, 行波保护动作量和完全同塔双回线路的情况相同。而单回段故障时需根据局部同塔双回线路具体结构进行分析。

图 10 给出了完全同塔双回线路和局部同塔双回线路第 I 回路及单回线路正极线距首端 1 000 km 发生单极接地故障时在整流侧测得的模量行波。

线模波波头和地模波波头的陡度主要影响线模波变化率和地模波变化率^[9]。首先, 当单回段的长度足够长, 从而使得单回线路段的线模分量和地模分量有足够的时间差到达分界点时, 对于线模波变化率, 单回线路段的地模分量折射到双回线路段的线模 1 分量, 将不会在 dP/dt 的数据窗内到达保护

安装点(根据本文仿真系统中模量行波保护计算方法, 按 10 kHz 采样频率, 以 1 kHz 频率对应的参数, 线模波速为 295 km/ms, 地模波速为 252 km/ms, 此时单回段线路长应约为 346 km), 而只包含单回线路段的线模分量折射到双回线路段的线模 2 和线模 3 分量, 其值与完全单回线路相近。由图 9 和图 10 可以看出, 对于局部同塔 D-S380 km, 此时行波在单回段的传播满足上述情况, 所以其值小于其他情况, 而接近单回线路。

对于地模波变化率 dG/dt , 单回线路的地模波只包含地模分量; 而对于同塔双回线路, 其地模波中除了含有地模分量外, 还含有线模分量, 即地模波 $G_0 = (1 + k_{0/l})U_l + U_0$, 其中 $k_{0/l} = Z_{cg}/Z_{cl}$ 为双回线路地模波阻抗和线模波阻抗的比值^[20]; 由于通常 $Z_{c0} > Z_{cl}$, 则有 $k_{0/l} > 1$ 。当单回线路段的线模分量和地模分量有足够的时间差到达分界点时, dG/dt 的数据窗内只包含单回线路段的线模波折射到双回线路段的线模 2 和线模 3 分量, 且由于地模分量的高频含量的衰减程度明显大于线模分量的衰减程度, 因此其值大于完全单回线路, 而小于完全同塔双回线路, 且在双回线路段中传播的距离越远, 其值越大, 如图 9 局部 D-S380 km 所示, 此时行波在单回段的传播满足上述情况。

其次, 当单回段的长度较短时, 如图 9 中的局部同塔 D-S15 km, 此时局部同塔线路非常接近完全同塔线路, 因此其地模变化率和线模变化率整体上与完全同塔的十分接近。

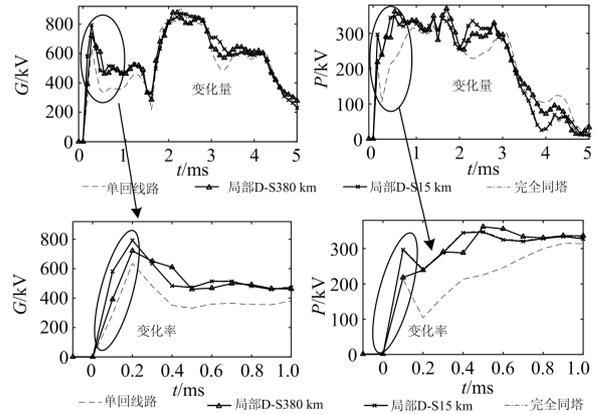


图 10 保护安装点在同塔双回段的模量行波

Fig. 10 Modulus traveling wave when protection installation point in the double-circuit lines

线模波波头和地模波波头的幅值主要影响线模变化量和地模变化量。如图 10 所示, 由于其计算数据窗较长, 三个线路模型的线模变化量和地模变化量相近。同时, 图 9 的仿真结果也证明了三个线

路模型的线模变化量和地模变化量接近。

4.2 保护安装点在单回段

图 11 为完全同塔双回线路及局部同塔双回线路第 I 回路及单回线路正极线区内沿线发生单极接地故障时在整流侧正极保护测得的模量行波保护动作量, 具体仿真情况同图 5。从整流侧向逆变侧进行编号, S 代表单回段, D 代表双回段, 则用局部 S380 km-D 和局部 S15 km-D 分别表示保护安装点在单回段, 且单回段线路长度各为 380 km 和 15 km。

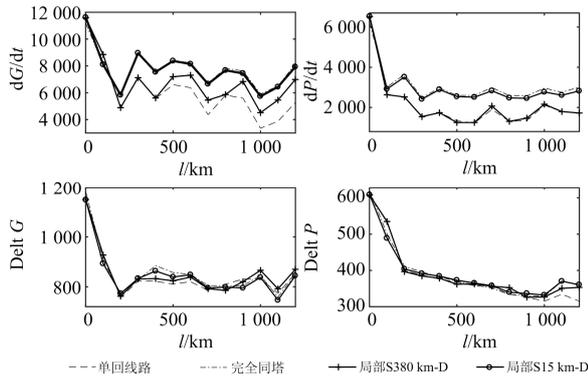


图 11 保护安装点在单回段的模量行波保护动作量特性

Fig. 11 Values of modulus protection criteria when protection installation point in the single-circuit lines

显然, 在单回段故障时, 行波保护动作量特性和完全单回线路的情况相同。而当同塔双回段故障时, 则需根据局部同塔双回线路的具体结构分析。

当单回线路段足够长时, 双回线路段的线模 1 分量由于折射为单回线路段的地模分量, 因此传播速度变慢, 此时线模 1 将不能被包含在 dP/dt 的数据窗里, 所以计算出的值将远小于其他情况, 而与完全单回线路相近; 同理, 此时只有双回线路段的线模 2 和线模 3 分量折射到单回线路段的线模波在 dG/dt 的数据窗内到达保护安装点, 因此其值大于完全单回线路, 而小于完全同塔双回线路, 且由于地模分量的高频含量的衰减程度明显大于线模分量, 因此在双回线路段中传播的距离越远, 其值越大, 如图 11 局部 S380 km-D 所示。

其次, 当单回段的长度较短时, 双回线路段的线模分量和地模分量几乎同时到达分界点并入射至单回线路段, 此时局部同塔双回线路的线模变化率和地模变化率与完全同塔双回线路接近, 如图 11 局部同塔 S15 km-D 所示。

而线模变化量和地模变化量的特性与保护安装点在双回段类似, 即由于三个线路模型的线模变化量和地模变化量计算时间窗较长, 所以三个线路模型的线模波变化量和地模波变化量相近。

4.3 不同结构局部同塔线路的情况

同理, 考虑到局部同塔双回线路结构的多样性, 采用四端局部同塔双回直流线路模型, 对分界点对模量行波保护判据量的影响进行仿真分析。图 12 为局部同塔双回线路第 I 回路正极线区内沿线发生单极接地故障时在整流侧正极保护测得的模量行波保护动作量。其中, 局部 S190 km-D-S190 km 代表局部同塔双回线路两端均为单回线路且单回段线路长度为 190 km。

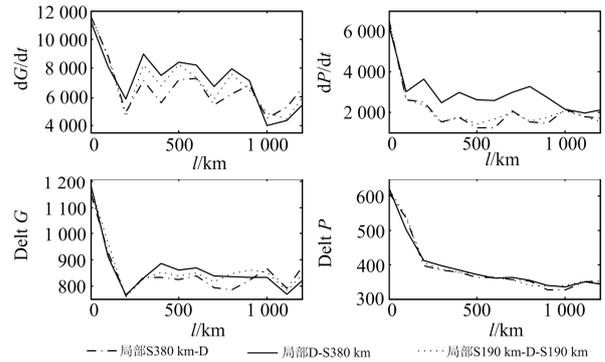


图 12 局部同塔双回线路模量行波保护动作量特性对比

Fig. 12 Values of modulus protection criteria of double-circuit lines partially on the same tower

由图 12 可以看出, 对于地模波变化率, 对比三种不同的局部同塔双回直流线路结构可知, 由于双回线路的地模波中除了含有地模分量外, 还含有线模分量, 且由于地模分量的高频含量的衰减程度明显大于线模分量, 因此同等距离故障时, 在双回线路段中传播的距离越远, 地模波变化率值越大。

对于线模波变化率, 当单回线路的总长度超过一定长度时, 就四端局部同塔双回直流线路而言, 单回段的线模分量在分界点 N 折射出双回线路的线模 2 和线模 3 分量, 而后经分界点 M 折射进入单回线路的线模通道; 而在三端局部同塔双回线路中, 对于局部 S380 km-D, 只有双回线路的线模 2 和线模 3 分量折射到单回线路的线模分量进入 dP/dt 的数据窗里; 而对于局部 D-S380 km, 也只有单回线路的线模分量折射到双回线路的线模 2 和线模 3 分量进入 dP/dt 的数据窗里, 所以三个线路结构的线模波变化率计算值相近, 且结合图 10 和图 11 可知该值接近完全单回线路。

同理, 由于三个线路结构的线模变化量和地模变化量计算时间窗较长, 所以三个线路结构的线模波变化量和地模波变化量相近。

综上所述, 以基于模量的行波保护为例, 局部同塔双回线路的行波保护动作量特点为: 1) 三个线

路模型的线模波变化量和地模波变化量相近; 2) 在双回线路中传播的距离越长, 地模波变化率越大; 3) 局部同塔双回线路的线模波变化率与单回线路段的长度有关, 当单回段线路总长度超过一定值(与行波保护采样频率和逻辑计算相关), 则其线模波变化率与完全单回线路类似。

5 结论

1) 考虑到局部同塔双回直流线路中, 行波传播到分界点时会出现模量交叉, 本文结合分界点各侧线路段的相模变换, 给出了分界点处模量行波交叉折射系数的计算方法。

2) 局部同塔双回线路的故障行波暂态特征, 综合了单回线路与完全同塔双回线路两种极端情况的特点; 同塔双回线路段的线模 1 分量与单回线路段的地模分量之间的交叉折射是导致三个线路模型差异的主要影响因素。

3) 就基于模量的行波保护而言, 局部同塔双回线路行波特性的影响主要体现在线模波变化率, 只要局部同塔双回线路的单回段线路总长度超过一定值(与行波保护采样频率和逻辑计算相关), 则线模波变化率与单回线路类似, 但整体上局部同塔双回线路的行波保护动作量介于完全同塔双回线路和单回线路之间。

参考文献

- [1] 丁玉剑, 廖蔚明, 宿志一, 等. ± 800 kV 同塔双回直流线路杆塔空气间隙的放电特性影响因素研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(18): 2983-2989.
DING Yujian, LIAO Weiming, SU Zhiyi, et al. Research on the influence factors of discharge characteristics of air gaps for ± 800 kV double line transmission towers[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(18): 2983-2989.
- [2] 谭进, 张焕青, 刘玉君, 等. ± 500 kV 三沪 II 回同塔双回直流输电线路防雷分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2173-2179.
TAN Jin, ZHANG Huanqing, LIU Yujun, et al. Analysis on lightning withstand performance of the Sanhu ± 500 kV double circuit HVDC power transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2173-2179.
- [3] 张勇, 谢惠藩, 梅勇, 等. 牛从高压直流接地极入地电流限制功能优化控制[J]. 高电压技术, 2016, 42(5): 1541-1547.
ZHANG Yong, XIE Huipan, MEI Yong, et al. Optimization control of Niu-Cong HVDC grounding electrode current limitation function[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(5): 1541-1547.
- [4] 汪娟娟, 禰小聪, 罗敬华, 等. 共站同塔双回高压直流输电系统双回控制功能及其仿真[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 119-126.
WANG Juanjuan, XUAN Xiaocong, LUO Jinghua, et al. Double-circuit control function for HVDC transmission system adopting common station and double-circuit on the Same Tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 119-126.
- [5] 李新年, 吕鹏飞, 杨鹏, 等. 同塔架设直流线路的相互影响研究[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 223-228.
LI Xinnian, LÜ Pengfei, YANG Peng, et al. Inter-influences between HVDC transmission lines erected on same tower[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 223-228.
- [6] 余雅峰, 李泰军. 天广直流改造扩容方案探讨[J]. 南方电网技术, 2014, 8(6): 39-43.
YU Yafeng, LI Taijun. Discussion on transformation and expansion plan of Tianshengqiao-Guangzhou HVDC system[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(6): 39-43.
- [7] 段建东, 刘静, 陆海龙, 等. 基于行波瞬时频率的高压直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1842-1848.
DUAN Jiandong, LIU Jing, LU Hailong, et al. Fault location method based on traveling-wave instantaneous frequency for HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1842-1848.
- [8] 张保会, 张嵩, 尤敏, 等. 高压直流输电线路单端暂态量保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 18-23.
ZHANG Baohui, ZHANG Song, YOU Min, et al. Research on transient-based protection for HVDC lines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 18-23.
- [9] 韩昆仑, 蔡泽祥, 贺智, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 20-25.
HAN Kunlun, CAI Zexiang, HE Zhi, et al. Propagation characteristic of fault traveling wave on HVDC line and its influence on HVDC line traveling wave protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 20-25.
- [10] 束洪春, 朱盛强, 田鑫萃, 等. ± 800 kV 特高压直流线路故障选极的极波面积比值法[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 888-896.
SHU Hongchun, ZHU Shengqiang, TIAN Xincui, et al. Polarity wave area ratio method of ± 800 kV UHVDC transmission line fault line selection[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 888-896.

- [11] 郭敬梅, 曾德辉. 高压直流线路短路故障行波保护动作概率计算与分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 99-107.
GUO Jingmei, ZENG Dehui. Action probability calculation and analysis method for travelling-wave protection caused by short-circuit faults on HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 99-107.
- [12] 丁浩寅, 郇能灵, 郑晓冬. 利用信号距离识别的高压直流输电线路保护方案[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1186-1193.
DING Haoyin, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong. HVDC transmission line protection method using signal distance[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1186-1193.
- [13] 张冰, 赵书强, 甄永赞. 柔性直流输电的改进行波保护仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 58-63.
ZHANG Bing, ZHAO Shuqiang, ZHEN Yongzan. Simulation study of an improved traveling wave protection for VSC-HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 58-63.
- [14] ZHANG Ruixue, GAO Benfeng, ZHANG Xuewei. A novel procedure for protection setting in an HVDC system based on fault quantities[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2017, 12(2): 513-521.
- [15] ZOU Guibin, HUANG Qiang, SONG Shenglan, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-017-0047-z.
- [16] 刘剑, 郇能灵, 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.
- [17] 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.
- [18] 李海锋, 武霁阳, 梁远升, 等. 同塔双回直流输电线路行波时域计算方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(3): 573-580.
LI Haifeng, WU Jiyang, LIANG Yuansheng, et al. A time-domain calculation method of travelling-wave on double-circuit HVDC transmission line with shared towers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(3): 573-580.
- [19] 周尚礼, 周全, 邬乾晋. 同塔双回高压直流输电线路故障行波特性的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 69-75.
ZHOU Shangli, ZHOU Quan, WU Qianjin. Study on fault travelling wave characteristics in double-circuit HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 69-75.
- [20] 李海锋, 马燕君, 王钢, 等. 基于单回线路信息的同塔双回高压直流线路故障选线方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(5): 1636-1643.
LI Haifeng, MA Yanjun, WANG Gang, et al. Fault-line selection method for double-circuit HVDC line on the same tower based on single-circuit information[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(5): 1636-1643.
- [21] 杜婉琳, 梁远升, 王钢. 局部耦合双回输电线路故障测距时域算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 59-66.
DU Wanlin, LIANG Yuansheng, WANG Gang. Fault location algorithm based on time-domain for partial coupling double-circuit transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 59-66.
- [22] 李振强, 刘传铨, 戴敏, 等. 交流 1000 kV 与 500 kV/220 kV 同塔 4 回线路的感应电压和电流[J]. 高电压技术, 2013, 39(12): 3022-3028.
LI Zhenqiang, LIU Chuanquan, DAI Min, et al. Induced voltage and induced current on AC same-tower four-circuit lines comprised of double-circuit 1000 kV lines and double-circuit 500 kV or 220 kV lines[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12): 3022-3028.
- [23] DOMMEL H W. Electromagnetic transients program manual[M]. Portland: Bonneville Power Administration, 1986: 68-70.

收稿日期: 2018-07-03; 修回日期: 2018-10-19

作者简介:

李海锋(1976—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统故障分析、电力系统控制保护新原理、高压/特高压直流输电技术; E-mail: lihf@scut.edu.cn

郭履星(1991—), 女, 硕士, 研究方向为高压直流线路故障分析及保护。E-mail: lvxingguo0802@foxmail.com

(编辑 魏小丽)