

同塔双回高压直流输电线路故障行波特性研究

周尚礼, 周全, 邬乾晋

(中国南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广东 广州 510663)

摘要: 受输电走廊的制约, 同塔双回直流线路已成为直流输电工程建设的发展趋势之一, 然而由于同塔双回直流线路极线间的电磁耦合关系导致了其故障暂态特性极为复杂。行波保护作为直流线路主保护, 故障行波特性的研究对其动作性能的分析至关重要。为此, 基于无畸变线路模型研究了同塔双回直流线路故障电压电流的相模变换方法和模量求解方法; 系统地分析了极线故障行波的特性及其与单回直流线路的差异性, 以及实际同塔双回直流线路不对称换位和参数频变等影响因素; 基于PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真软件进行了分析验证。研究成果有助于对目前基于单极线电气量的直流线路行波保护动作性能的分析以及其在同塔双回直流线路上的适应性研究。

关键词: 同塔双回; 行波特性; 模量; 高压直流

Study on fault travelling wave characteristics in double-circuit HVDC

ZHOU Shang-li, ZHOU Quan, WU Qian-jin

(Test & Maintenance Center, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510663, China)

Abstract: Owing to the shortage of transmission space, double-circuit HVDC on the same tower has been widely applied in the power construction. However, the electromagnetic coupling of different pole in two circuits makes the transient electrical characteristics complex when a fault occurs. The protection based on travelling-wave plays a main role in direct circuit protection, which makes great significance in the study of travelling-wave characteristics in double-circuit HVDC, so as to win the master of operating performance of line protection. As a result, based on the Bergeron line model, the method of phase-mode transformation and modulus calculation for line voltage and current when a fault happens in double-circuit HVDC is proposed firstly. Then the travelling wave characteristics in double-circuit HVDC and the difference from travelling-wave HVDC in single-circuit are analyzed systematically. After that, the influence factors of asymmetric transposition of transmission lines and frequency dependent parameter are taken into consideration. Finally, the theory is analyzed and verified in the platform of PSCAD/EMTDC. The results of this paper help to analyze the performance and the adaptability in double-circuit of the travelling wave protection based on single-pole electrical information.

Key words: double-circuit; travelling wave characteristics; modulus; HVDC

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)23-0069-07

0 引言

近年来, 我国加快了高压/特高压直流工程的建设速度, 一大批直流输电工程相继投运^[1-3]。由于受到线路走廊紧张的制约, 直流工程输电线路同塔架设的情况变得越来越常见, 如葛洲坝-南桥和团林-枫泾±500 kV^[4]以及溪洛渡-广东±500 kV 同塔双回直流输电工程^[5]。对于同塔双回直流工程而言, 由于直流输电线路存在复杂的电磁耦合关系^[6-7], 如同一回直流的不同极线间以及不同回直流线路间都存在电磁耦合问题, 这使得任一回路故障都会在

其他线路上耦合出相应的电压电流变化量, 从而对原设计的基于本回线或单极线电气量的控制保护动作特性造成影响。目前, 国内外投运的高压直流输电线路的主保护多采用行波保护^[8-12]。因此, 结合同塔双回直流线路电磁耦合的特点, 研究直流线路故障行波特性及其对行波保护的影响, 对于确保同塔双回直流线路的安全稳定运行具有重要的理论意义和工程实用价值。

目前, 国内外对直流线路故障暂态特性^[13-15]保护原理^[8,16-17]及测距方法^[18]已开展了很多研究工作。然而现有研究针对的是单回直流线路, 缺乏对

同塔双回直流线路故障行波特性及相应行波保护原理的研究。为此,本文基于无畸变线路模型,通过选取合适的相模变换矩阵,根据同塔双回直流线路发生单极线接地故障的边界条件联立方程,推导同塔双回直流线路故障电压电流行波模量求解公式;在此基础上,分析同塔双回直流线路故障极和非故障极的电压和电流行波特性及其与单回直流线路的差异性,以及实际同塔双回直流工程线路不对称换位和参数频变等影响因素;基于 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件进行分析验证。

1 同塔双回直流线路故障分析的相模变换

图 1 所示为一典型的同塔双回直流系统示意图。图中极线 1P、1N、2P、2N 分别表示第一回线正极、负极以及第二回线正极、负极。

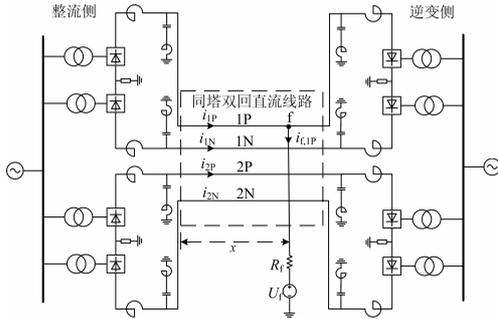


图 1 同塔双回直流输电系统

Fig. 1 HVDC system with double-circuit transmission line on the same tower

对于图 1 所示的同塔双回直流线路,假设各极线都为均匀传输线路,即可列写同塔双回的均匀传输线方程为

$$-\frac{\partial \mathbf{u}_{\text{phase}}(x,t)}{\partial x} = \mathbf{R}_0 \mathbf{i}_{\text{phase}}(x,t) + \mathbf{L}_0 \frac{\partial \mathbf{i}_{\text{phase}}(x,t)}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{i}_{\text{phase}}(x,t)}{\partial x} = \mathbf{G}_0 \mathbf{u}_{\text{phase}}(x,t) + \mathbf{C}_0 \frac{\partial \mathbf{u}_{\text{phase}}(x,t)}{\partial t} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{u}_{\text{phase}} = [u_{1P} \ u_{1N} \ u_{2P} \ u_{2N}]^T$, $\mathbf{i}_{\text{phase}} = [i_{1P} \ i_{1N} \ i_{2P} \ i_{2N}]^T$ 分别表示同塔双回线路四条极线的电压和电流,它们都是距离 x 和时间 t 的函数; \mathbf{R}_0 、 \mathbf{L}_0 、 \mathbf{G}_0 、 \mathbf{C}_0 分别表示单位长度同塔双回均匀传输线路的电阻、电感、电导和电容。其中,矩阵 \mathbf{R}_0 和 \mathbf{G}_0 只有对角线元素,而矩阵 \mathbf{L}_0 和 \mathbf{C}_0 不仅有对角线元素,还存在非对角线元素,这是因为极线之间存在互感和电容电流,从而也导致四条极线的电压和电流方程彼此不独立,因此有必要通过相模变换进行解耦。

假设同塔双回线路的四条极线呈矩形分布,如

图 2 所示,则可选取从模量到相量的变换矩阵式(3),使得 $\mathbf{u}_{\text{mode}} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{u}_{\text{phase}}$, $\mathbf{i}_{\text{mode}} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{i}_{\text{phase}}$ 。

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{u}_{\text{mode}} = [u_{F0} \ u_{F1} \ u_{F2} \ u_{F3}]^T$ 、 $\mathbf{i}_{\text{mode}} = [i_{F0} \ i_{F1} \ i_{F2} \ i_{F3}]^T$ 分别表示相模变换后的模量电压和模量电流。

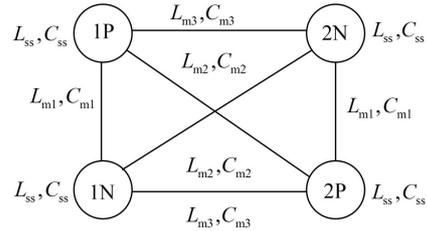


图 2 同塔双回直流线路模型

Fig. 2 Model of double-circuit HVDC line

在这种变换下,地模波阻抗 Z_{c0} 和三个线模波阻抗 Z_{c1} 、 Z_{c2} 和 Z_{c3} 分别为

$$\begin{cases} Z_{c0} = \sqrt{\frac{Z_{ss} + Z_{m1} + Z_{m2} + Z_{m3}}{Y_{ss} + Y_{m1} + Y_{m2} + Y_{m3}}} \\ Z_{c1} = \sqrt{\frac{Z_{ss} + Z_{m1} - Z_{m2} - Z_{m3}}{Y_{ss} + Y_{m1} - Y_{m2} - Y_{m3}}} \\ Z_{c2} = \sqrt{\frac{Z_{ss} - Z_{m1} - Z_{m2} + Z_{m3}}{Y_{ss} - Y_{m1} - Y_{m2} + Y_{m3}}} \\ Z_{c3} = \sqrt{\frac{Z_{ss} - Z_{m1} + Z_{m2} - Z_{m3}}{Y_{ss} - Y_{m1} + Y_{m2} - Y_{m3}}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $Z_{mi} = j\omega L_{mi}$ ($i=1,2,3$); $Z_{ss} = R_0 + j\omega L_{ss}$; $Y_{mi} = j\omega C_{mi}$ ($i=1,2,3$); $Y_{ss} = G_0 + j\omega C_{ss}$; 且实际工程地模波阻抗大约是线模波阻抗的 2~3 倍。

对应的传播常数则为

$$\begin{cases} \gamma_{c0} = \sqrt{(Z_{ss} + Z_{m1} + Z_{m2} + Z_{m3})(Y_{ss} + Y_{m1} + Y_{m2} + Y_{m3})} \\ \gamma_{c1} = \sqrt{(Z_{ss} + Z_{m1} - Z_{m2} - Z_{m3})(Y_{ss} + Y_{m1} - Y_{m2} - Y_{m3})} \\ \gamma_{c2} = \sqrt{(Z_{ss} - Z_{m1} - Z_{m2} + Z_{m3})(Y_{ss} - Y_{m1} - Y_{m2} + Y_{m3})} \\ \gamma_{c3} = \sqrt{(Z_{ss} - Z_{m1} + Z_{m2} - Z_{m3})(Y_{ss} - Y_{m1} + Y_{m2} - Y_{m3})} \end{cases} \quad (5)$$

当然实际的同塔双回直流线路四条极线呈梯形分布,求解时需要根据实际线路的阻抗矩阵和导纳矩阵进行相模变换。

2 同塔双回直流线路故障模量电压的求解

设某一极线路发生 f 点故障时,各极线路故障

点电压为 $u_{f,1P}$ 、 $u_{f,1N}$ 、 $u_{f,2P}$ 、 $u_{f,2N}$, 各模量故障点电压为 u_{f0} 、 u_{f1} 、 u_{f2} 、 u_{f3} ; 各极线路故障点电流为 $i_{f,1P}$ 、 $i_{f,1N}$ 、 $i_{f,2P}$ 、 $i_{f,2N}$, 对应的各模量故障电流为 i_{f0} 、 i_{f1} 、 i_{f2} 、 i_{f3} 。

不妨以第一回线路的正极线 f 点发生故障为例, 如图 1 所示, 设正常运行时极线电压为 U_N , 当发生接地故障时, 相当于 f 点接入一电压源 u_f 。

$$u_f = U_f \varepsilon(t) = -U_N \varepsilon(t)$$

式中, $\varepsilon(t)$ 为阶跃函数。

则相域的边界方程为

$$\begin{cases} u_{f,1P} = u_f + i_{f,1P} R_f \\ i_{f,1N} = 0 \\ i_{f,2P} = 0 \\ i_{f,2N} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

经过相模变换后, 模域边界方程为

$$\begin{cases} u_{f0} - u_{f1} + u_{f2} - u_{f3} = \\ \quad u_f + (i_{f0} - i_{f1} + i_{f2} - i_{f3}) R_f \\ i_{f0} - i_{f1} - i_{f2} + i_{f3} = 0 \\ i_{f0} + i_{f1} - i_{f2} - i_{f3} = 0 \\ i_{f0} + i_{f1} + i_{f2} + i_{f3} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

另外, 故障点的各模量电流与电压的关系为

$$\begin{cases} i_{f0} = -2u_{f0} / Z_{c0} \\ i_{f1} = -2u_{f1} / Z_{c1} \\ i_{f2} = -2u_{f2} / Z_{c2} \\ i_{f3} = -2u_{f3} / Z_{c3} \end{cases} \quad (8)$$

于是, 联立式(7)和式(8)可得

$$\begin{cases} u_{f0} = Z_{c0} u_f / (Z_{c0} + Z_{c1} + Z_{c2} + Z_{c3} + 8R_f) \\ u_{f1} = -Z_{c1} u_f / (Z_{c0} + Z_{c1} + Z_{c2} + Z_{c3} + 8R_f) \\ u_{f2} = +Z_{c2} u_f / (Z_{c0} + Z_{c1} + Z_{c2} + Z_{c3} + 8R_f) \\ u_{f3} = -Z_{c3} u_f / (Z_{c0} + Z_{c1} + Z_{c2} + Z_{c3} + 8R_f) \end{cases} \quad (9)$$

对于故障点各极线电压, 可由式(9)和变换矩阵 T 得

$$\begin{cases} u_{1P} = [-Z_{c0} - (Z_{c1} + Z_{c2} + Z_{c3})] u_m \\ u_{1N} = [-Z_{c0} + (Z_{c2} + Z_{c3} - Z_{c1})] u_m \\ u_{2P} = [-Z_{c0} + (Z_{c1} + Z_{c2} - Z_{c3})] u_m \\ u_{2N} = [-Z_{c0} + (Z_{c1} + Z_{c3} - Z_{c2})] u_m \end{cases} \quad (10)$$

式中, $u_m = U_N \varepsilon(t) / (Z_{c0} + Z_{c1} + Z_{c2} + Z_{c3} + 8R_f)$ 。

若线路采取对称换位, 则可忽略各极线间互感和互容的差异, 即认为

$$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_{c3} = Z_{cl}$$

于是, 式(10)可简化为

$$\begin{cases} u_{1P} = (-Z_{c0} - 3Z_{cl}) u_m \\ u_{1N} = (-Z_{c0} + Z_{cl}) u_m \\ u_{2P} = (-Z_{c0} + Z_{cl}) u_m \\ u_{2N} = (-Z_{c0} + Z_{cl}) u_m \end{cases} \quad (11)$$

式中, $u_m = U_N \varepsilon(t) / (Z_{c0} + 3Z_{cl} + 8R_f)$ 。

由式(9)可知, 双回线路故障时, 故障行波将产生相互解耦的三个线模分量和一个地模分量。因此, 直流线路上的故障行波传播特性可由解耦的各模量行波的传播特性所决定。而对于单一模量的行波传播特性的求解已经有较为成熟的方法, 这里不再累述。

3 同塔双回直流线路各极线故障行波特性分析

3.1 基于无畸变线路模型的行波特性分析

为了突出同塔双回直流线路故障行波的特点, 首先基于对称换位的无畸变线路模型进行分析。由上述分析可知, 各极线上的故障行波均由各模量行波叠加而成。由于线模波和地模波传播速度差异较大, 在不考虑过渡电阻的情况下, 保护测量点的故障极和非故障极的电压初始行波幅值可基于式(11)进一步推导得

$$\begin{cases} u_{1P} = -\frac{3k_l Z_{cl} \varepsilon(t - t_l) + k_0 Z_{c0} \varepsilon(t - t_0)}{3Z_{cl} + Z_{c0}} U_N \\ u_{1N} = u_{2P} = u_{2N} = \frac{k_l Z_{cl} \varepsilon(t - t_l) - k_0 Z_{c0} \varepsilon(t - t_0)}{3Z_{cl} + Z_{c0}} U_N \end{cases} \quad (12)$$

式中: t_l 、 t_0 分别表示故障发生后线模波和地模波传播到达保护测量点的时间; k_l 、 k_0 分别表示线模波和地模波的衰减系数, 且为

$$\begin{aligned} k_l &= e^{-\alpha_l x} \\ k_0 &= e^{-\alpha_0 x} \end{aligned}$$

式中: α_l 表示线模波的衰减常数; α_0 表示地模波的衰减常数。

在行波传播过程中, 线模波波速接近光速, 地模波波速约为光速的一半, 因此, 故障点处的电压行波向两端传播, 经过一定距离, 线模波和地模波必将分开, 形成线模波在前、地模波在后的情况。

当近端故障时, 电压初始行波为线模波和地模波的叠加, 且衰减很小, 可忽略不计, 近似地认为: $t_l \approx 0$, $t_0 \approx 0$, $k_l \approx k_0 \approx 1$, 则故障极和非故障极的电压初始行波幅值为

$$\begin{cases} u_{1P} = -\frac{3Z_{cl} + Z_{c0}}{3Z_{cl} + Z_{c0}} U_N \varepsilon(t) = -U_N \varepsilon(t) \\ u_{1N} = u_{2P} = u_{2N} = \frac{Z_{cl} - Z_{c0}}{3Z_{cl} + Z_{c0}} U_N \varepsilon(t) \end{cases} \quad (13)$$

可见, 式(13)与式(11)等同, 此时保护测量点的电压初始行波可近似为故障点电压; 故障极电压初始行波幅值为三个线模分量与地模分量之和, 非故障极则为线模分量与地模分量之差。若取 $Z_{c0} = 2Z_{cl}$, 故障极电压初始行波幅值近似为非故障极的 5 倍, 且极性相同。

当远处故障时, 线模波先于地模波到达保护测量点, 且在 $t_l \leq t \leq t_0$ 期间, 各极线电压初始行波不再是线模波和地模波的叠加, 故障极和非故障极的电压初始行波幅值为

$$\begin{cases} u_{1P} = -3 \frac{k_l Z_{cl} U_N}{3Z_{cl} + Z_{c0}} \varepsilon(t - t_l) \\ u_{1N} = u_{2P} = u_{2N} = \frac{k_l Z_{cl} U_N}{3Z_{cl} + Z_{c0}} \varepsilon(t - t_l) \end{cases} \quad (14)$$

可见, 故障极电压初始行波幅值为三个线模分量之和, 非故障极则仅为一个线模分量, 且极性与故障极相反。随着地模波的到达, 即 $t \geq t_0$, 电压行波将为线模波和地模波的叠加, 故障极和非故障极的电压行波幅值为

$$\begin{cases} u_{1P} = -\frac{3k_l Z_{cl} + k_0 Z_{c0} \varepsilon(t - t_0)}{3Z_{cl} + Z_{c0}} U_N \\ u_{1N} = u_{2P} = u_{2N} = \frac{k_l Z_{cl} - k_0 Z_{c0} \varepsilon(t - t_0)}{3Z_{cl} + Z_{c0}} U_N \end{cases} \quad (15)$$

可见, 基于无畸变线路模型, 当地模波到达后, 若假设衰减系数 k_l 和 k_0 为 1, 其电压行波极性和幅值与近端故障时的情况类似, 即使考虑衰减, 也仅是幅值略有减小, 但幅值比却基本不变。

综上所述, 近端故障或远处故障且地模波已到达时, 故障极与非故障极电压行波初始幅值比约为 5 倍; 远处故障且地模波未到达时, 虽然故障极和非故障极电压行波极性相反, 但幅值比则约为 3 倍, 且其故障极幅值也仅约为故障距离较近情况的 3/5, 非故障极虽然幅值不变, 但极性相反。由此可见, 若仅利用线模波, 不等待地模波的到达, 远处故障, 对基于极线行波的保护是不利的, 因此实际工程中行波保护算法具有一定的时间窗。

对于单回直流输电线路, 同样采用上述方法进行分析。首先选取相模变换矩阵为

$$\mathbf{T}' = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

于是, 极线电压可表示为

$$\begin{cases} u'_P = -\frac{k'_l Z'_{cl} \varepsilon(t - t_l) + k'_0 Z'_{c0} \varepsilon(t - t_0)}{Z'_{cl} + Z'_{c0}} U_N \\ u'_N = \frac{k'_l Z'_{cl} \varepsilon(t - t_l) - k'_0 Z'_{c0} \varepsilon(t - t_0)}{Z'_{cl} + Z'_{c0}} U_N \end{cases} \quad (17)$$

式中, u'_P 、 u'_N 、 Z'_{cl} 、 Z'_{c0} 、 k'_l 、 k'_0 分别为单回线路的电压、电流、线模波阻抗、地模波阻抗和线模波衰减系数、地模波衰减系数。

近端故障时

$$\begin{cases} u'_P = -\frac{Z'_{cl} + Z'_{c0}}{Z'_{cl} + Z'_{c0}} U_N \varepsilon(t) = -U_N \varepsilon(t) \\ u'_N = \frac{Z'_{cl} - Z'_{c0}}{Z'_{cl} + Z'_{c0}} U_N \varepsilon(t) \end{cases} \quad (18)$$

远处故障时, 且在 $t_l \leq t \leq t_0$ 期间

$$\begin{cases} u'_P = -\frac{k'_l Z'_{cl}}{Z'_{cl} + Z'_{c0}} U_N \varepsilon(t - t_l) \\ u'_N = \frac{k'_l Z'_{cl}}{Z'_{cl} + Z'_{c0}} U_N \varepsilon(t - t_l) \end{cases} \quad (19)$$

随着地模波的到达, 即 $t \geq t_0$, 电压行波将为

$$\begin{cases} u'_P = -\frac{k'_l Z'_{cl} + k'_0 Z'_{c0} \varepsilon(t - t_0)}{Z'_{cl} + Z'_{c0}} U_N \\ u'_N = \frac{k'_l Z'_{cl} - k'_0 Z'_{c0} \varepsilon(t - t_0)}{Z'_{cl} + Z'_{c0}} U_N \end{cases} \quad (20)$$

对于近端故障, 此时保护测量点的电压初始行波同样可近似为故障点电压; 故障极电压初始行波幅值为线模分量与地模分量之和, 非故障极则为线模分量与地模分量之差。若取 $Z'_{c0} = 2Z'_{cl}$, 故障极电压初始行波幅值约为非故障极的 3 倍, 且极性相同。对于远处故障的情况, 当 $t_l \leq t \leq t_0$ 时, 故障极和非故障极电压初始行波虽然极性相反, 但幅值均仅为一个线模分量, 且故障极的行波幅值也只是近端故障时的 1/3; 当 $t \geq t_0$ 时, 其故障电压行波与故障距离较近时的情况类似。可见, 单回线路总体情况与双回线路基本相似。

但是, 对比单双回直流线路可以发现, 双回直流线路不管是近端还是远处故障, 其极线故障电压行波特征更为显著, 这有利于基于极线行波的直流线路保护。

3.2 线路对称换位情况的仿真分析

基于 PSCAD/EMTDC 对上述理论分析进行仿真验证。同塔双回直流线路参数取自溪洛渡实际工

程, 如图 3 所示, 线路长度为 1 254 km; 单回线路参数取自贵广 II 回直流线路, 为了更好地分析比较, 线路长度取与溪洛渡相同。

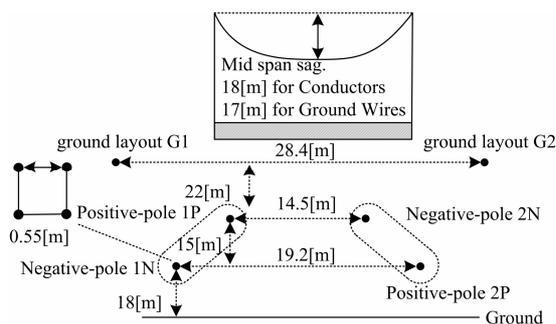


图 3 溪洛渡实际工程直流输电线路参数

Fig. 3 Parameter of HVDC transmission line in Xiluodu project

若假设线路模型采用对称换位的贝瑞隆模型, 故障点分别选取为距离始端 1 km、线路中点 (627 km) 和距离末端 1 km 处。图 4 和图 5 分别给出了不同故障点同塔双回线路和单回线路各极线故障电压和电流行波的仿真波形, 其中, 曲线组 1、曲线组 2 和曲线组 3 分别表示始端故障、中点故障和末端故障的行波波形, 实线表示故障极, 虚线表示非故障极。由于在对称换位的线路模型中, 同塔双回输电线路的三条非故障极线的故障行波完全相同, 因此图中只画出其中一条。

由图 4 可见, 当距离始端 1 km 故障时, 单双回线路的故障极和非故障极电压初始行波都为负极性, 对于第一个波头, 单回线路故障极电压行波幅值约为非故障极的 3 倍, 双回线路故障极则约为非故障极 5 倍; 单双回线路故障极电压初始行波幅值都超过了标么值, 且故障发生后的 2 ms 内故障极和非故障极的电压行波上下振荡剧烈, 这是因为线路始端故障时电压行波受平波电抗器和直流滤波器影响较大。当线路中点故障, 约 2 ms 时, 线模波到达而地模波尚未到达, 此时单双回线路非故障极电压行波的极性都与故障极相反, 非故障极为正, 故障极为负, 双回线路故障极电压行波幅值约为非故障极的 3 倍, 单回线路故障极与非故障极电压行波幅值则相等; 约 4 ms 时, 地模波到达, 单双回线路故障极电压行波极性仍不变, 非故障极极性变负, 由于衰减原因, 故障和非故障极电压行波幅值较近端故障时均有所减小, 但是幅值比特征基本不变, 即地模波到达后电压行波特征与始端故障时基本相同。当距离末端 1 km 故障, 线模波和地模波经长距离传播, 衰减严重, 尤其是地模波, 其达到始端时幅值衰减至与线模波几乎相等, 这使得约 8 ms

地模波到达后, 非故障极电压行波由于为线模分量与地模分量之差, 其幅值几乎为零。另外, 由图 5 可见, 电流行波与电压行波波形具有相似的特征。以上仿真结果与理论分析一致。

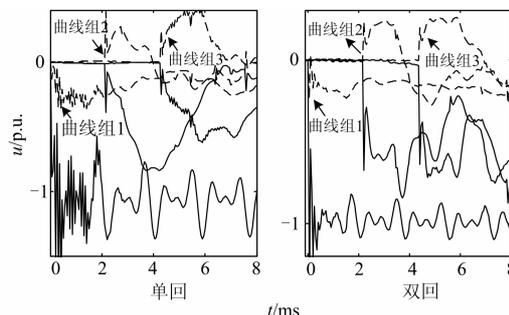


图 4 不同故障距离单回和双回线路各极线故障电压行波

Fig. 4 Voltage travelling wave of each pole in single-circuit and double-circuit in different fault distance

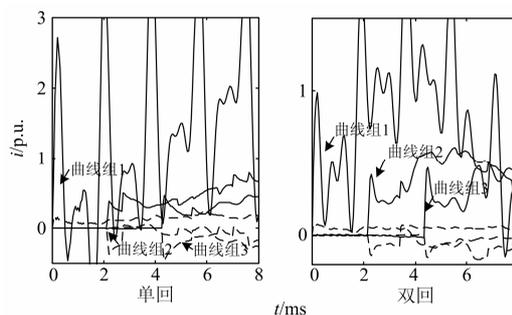


图 5 不同故障距离单回和双回线路各极线故障电流行波

Fig. 5 Current travelling wave of each pole in single-circuit and double-circuit in different fault distance

3.3 实际工程行波影响因素分析

上述理论分析是基于线路对称换位和参数恒定的条件, 而实际同塔双回直流线路不采用对称换位, 且线路参数具有频变特性。

线路不采用对称换位所带来的主要问题是导致各线模波的波速不再相等, 由此造成不同线模波到达线路始端的时间不再完全相同。表 1 给出了利用溪洛渡实际工程线路参数计算得到的不同模量的波速。由表 1 可见, 不同线模波波速虽然存在差异, 但差异并不大, 且行波在实际传播过程中波头还会拉长, 因此采用对称换位线路模型, 完全可用于分析非对称换位线路行波的基本特性。

表 1 不同模量波速对比

(10^9 m/s)				
模量	地模	线模 1	线模 2	线模 3
波速	0.176 9	0.274 7	0.294 8	0.297 5

对于线路参数的频变特性，其主要是造成行波传播的色散现象，但是不会对极线行波的传播特点造成本质的影响。

图 6 和图 7 分别为考虑线路不对称换位且参数频变时单回和同塔双回线路在 1P 极线距离始端不同距离发生故障时各极线测得的故障电压和电流行波。其中，线路采用 J Marti 模型。对比图 4~图 7 可见，考虑工程实际的极线故障行波的传播特征与采用理想线路模型的情况相比存在一定差异，如非故障极上的行波由于 3 个线模参数的一致而不再相同，但其最本质的行波特征仍然与基于理想线路模型时的分析结果类似，即线模波到达而地模波尚未到达时，故障极的最大电压变化幅值要比非故障极的大，最大可达 3 倍，只是不同极线故障情况略有不同。

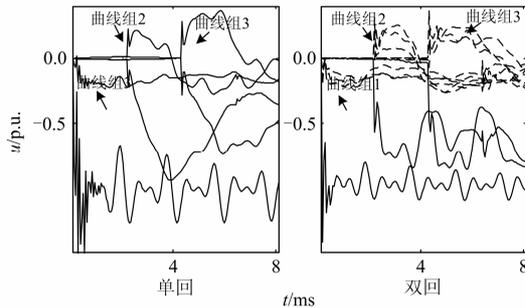


图 6 考虑实际工程影响的单回和双回线路各极线故障电压行波

Fig. 6 Voltage travelling wave of each pole in single-circuit and double-circuit based on actual parameter

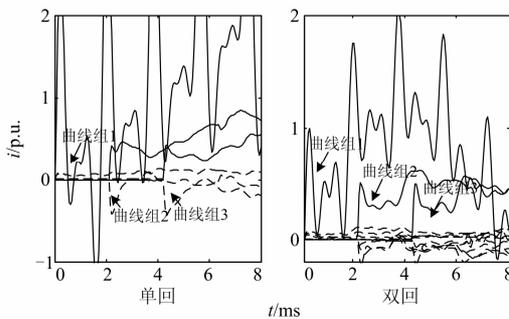


图 7 考虑实际工程影响的单回和双回线路各极线故障电流行波

Fig. 7 Current travelling wave of each pole in single-circuit and double-circuit based on actual parameter

实际工程中，非对称换位的线路布局，导致任一极线发生远端故障在其他三根非故障极线耦合的故障量并不相同。表 2 给出了四根极线分别发生中点故障时行波到达后 1 ms 在各根极线测得的最大

电压变化幅值。由表 2 可知，上层 1P 极线或 2N 极线发生中点故障时，其他三根非故障极线上耦合出的故障量差异较小，使得故障极与各非故障极间最大电压变化幅值之比较为接近，均达到 3 倍左右；而下层极线 1N 极线或 2P 极线故障时，其他三根非故障极上耦合出的故障量则存在一定的差异，此时故障极与非故障极之比也相差较大。这是由于不对称换位导致的三个线模传播的不一致。这一特征在行波保护的整定中需要特别关注。

表 2 考虑实际工程影响不同极线发生中点故障最大电压变化幅值对比

Table 2 The maximum of voltage change for fault in different pole based on actual parameter

所测极线	p.u.			
	1P	1N	2P	2N
1P	0.842	0.286	0.174	0.332
1N	0.32	0.637	0.504	0.233
2P	0.233	0.505	0.623	0.318
2N	0.337	0.179	0.289	0.902
最大比值	3.6	3.6	3.6	2.7
最小比值	2.5	1.3	1.2	3.9

4 结论

(1) 对于同塔双回直流线路故障行波，基于无畸变线路模型，可解耦为三个线模分量和一个地模分量；由于实际的同塔双回直流线路不采用对称换位，其故障行波三个线模分量性质不完全一致，但非常接近。

(2) 对称换位的理想情况下，近端故障时，单双回线路故障极与非故障极行波极性相同，双回线路故障极行波幅值约为非故障极的 5 倍，而单回线路故障极行波幅值约为非故障极的 3 倍。远处故障时，单双回线路的电压初始行波首先到达的是线模波，二者的故障极与非故障极的电压初始行波极性相反，双回线路故障极行波幅值约为非故障极的 3 倍，而单回线路故障极与非故障极行波幅值基本相等。随着地模波的到达，电压行波将与近端故障的情况类似。

(3) 考虑实际工程影响的不对称换位情况，故障极与非故障极的行波幅值差异与故障发生的极线有关，但双回线路相比单回线路故障极与非故障极行波幅值差异仍然更明显。

(4) 本文的研究有助于对目前基于单极线电气量的直流线路行波保护动作性能的分析以及其同塔双回直流线路上的适应性研究。

参考文献

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 曾南超. 高压直流输电在我国电网发展中的作用[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 11-12.
ZENG Nan-chao. Role of HVDC transmission in the power system development in China[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 11-12.
- [3] 李立涅. 直流输电技术的发展及其在我国电网中的作用[J]. 电力设备, 2004, 5(11): 1-3.
LI Li-cheng. Development of HVDC transmission technology and its role in power network in China[J]. Electrical Equipment, 2004, 5(11): 1-3.
- [4] 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): 222-228.
LI Xin-nian, LÜ Peng-fei, YANG Peng, et al. Inter-influences between HVDC transmission lines erected on same tower[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 222-228.
- [5] 张爱玲. 溪洛渡送广东同塔双回直流输电工程控制保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 72-76.
ZHANG Ai-ling. Study of control and protection strategies for Xiluodu-Guangdong double HVDC systems erected on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 72-76.
- [6] 赵宇明, 路遥, 吕金壮, 等. 溪洛渡直流工程同杆双回路电磁环境指标研究[J]. 南方电网技术, 2010, 4(6): 61-64.
ZHAO Yu-ming, LU Yao, LÜ Jin-zhuang, et al. Study on the electromagnetic environment index of double-circuit transmission lines on the same tower in Xiluodu HVDC project[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(6): 61-64.
- [7] 周原. 超特高压同塔多回输电线路内部过电压及影响因素研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [8] 艾琳, 陈为化. 高压直流输电线路行波保护判据的研究[J]. 继电器, 2003, 31(10): 41-44.
AI Lin, CHEN Wei-hua. Research on travelling wave protection criterion on HVDC transmission line[J]. Relay, 2003, 31(10): 41-44.
- [9] 宋国兵, 高淑萍, 蔡新雷, 等. 高压直流输电线路继电保护技术综述[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 123-129.
SONG Guo-bing, GAO Shu-ping, CAI Xin-lei, et al. Survey of relay protection technology for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 123-129.
- [10] 李振强, 鲁改凤, 吕艳萍. 基于小波变换的高压直流输电线路暂态电压行波保护[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 40-45.
LI Zhen-qiang, LU Gai-feng, LÜ Yan-ping. A novel scheme of HVDC transmission line voltage traveling wave protection based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 40-45.
- [11] 朱韬析, 汲广. 天广直流输电系统线路行波保护介绍[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(21): 86-89.
ZHU Tao-xi, JI Guang. Introduction of wave front protection in Tian-Guang HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(21): 86-89.
- [12] 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 Kun-lun, CAI Ze-xiang, 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.
- [13] 束洪春, 田鑫萃, 董俊, 等. 基于多重分形谱的高压直流输电线路区内故障识别方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 251-258.
SHU Hong-chun, TIAN Xin-cui, DONG Jun, et al. Recognition method of HVDC transmission line fault based on multifractal spectrum[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 251-258.
- [14] REEVE J, KAPPOOR S C. Digital simulation of travelling waves in HVDC transmission lines[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1972, 91(6): 2342-2355.
- [15] 李爱民, 蔡泽祥, 李晓华. 直流线路行波传播特性的解析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 94-100.
LI Ai-min, CAI Ze-xiang, LI Xiao-hua. Study on the propagation characteristics of travelling waves in HVDC transmission lines on the basis of analytical method[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 94-100.
- [16] 韩昆仑, 蔡泽祥, 徐敏, 等. 直流线路行波保护特征量动态特性与整定研究[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 255-260.
HAN Kun-lun, CAI Ze-xiang, XU Min, et al. Dynamic characteristics of characteristic parameters of travelling wave protection and their setting[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 255-260.
- [17] LIANG J, ELANGOVAN S, DEVOTTA J B X. Application of wavelet transform in traveling wave protection[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2000, 22(8): 537-542.
- [18] 徐敏, 蔡泽祥, 刘永浩, 等. 基于宽频信息的高压直流输电线路行波故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 259-265.
XU Min, CAI Ze-xiang, LIU Yong-hao, et al. A novel fault location method for HVDC transmission line based on the broadband travelling wave information[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 259-265.

收稿日期: 2014-06-16; 修回日期: 2014-08-20

作者简介:

周尚礼(1968-), 男, 高级工程师, 主要从事高压试验、电能计量、高压直流输电的研究与管理工作; E-mail: zhshlyh@tom.com

周全(1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事直流输电系统控制保护工作;

郭乾晋(1986-), 男, 硕士, 主要从事直流输电系统控制保护工作。