

同塔四回线参数解耦及故障分析方法

李博通¹, 李永丽¹, 陈莉¹, 苏斌², 李幼仪²

(1. 天津大学电力系统仿真控制教育部重点实验室, 天津 300072; 2. ABB集团中国研究中心, 北京 100016)

摘要: 同塔四回输电线路参数复杂, 难以进行故障分析。针对实际同塔四回线路杆塔结构和线路排布特点, 采用矩阵变换理论, 提出了同塔四回线参数解耦算法, 将四回线线路参数矩阵解耦为四回线相关联的一组双回同向序量和三组双回反向序量。该算法计算简单, 物理意义明确。以上述解耦算法为前提, 提出了同塔四回输电线路复合序网故障分析方法, 并给出了一回线内故障的复合序网图。本方法考虑了同塔四回线的序量特点, 为其新型保护原理开发和整定计算奠定了理论基础。EMTDC仿真验证了上述算法的正确性。

关键词: 同塔四回线; 解耦算法; 双回同向序量; 双回反向序量; 故障分析

Method for parameter decoupling and fault analysis of four-circuit transmission lines on the same tower

LI Bo-tong¹, LI Yong-li¹, CHEN Li¹, SU Bin², LI You-yi²

(1. Key Laboratory of Power System Simulation and Control of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. ABB (China) Research Ltd., Beijing 100016, China)

Abstract: It is difficult to make fault analysis on four-circuit transmission line on the same tower because of the complexity of its parameters. According to the characteristic of practical tower structure and conductor distributing order, an algorithm based on matrix transformation theory is put forward for decoupling the parameters of the line, which are transformed into one set of double equidirectional sequences and three sets of double opposite sequences. It has a clear physical meaning and easy to calculate. According to the decoupling algorithm, a method based on interconnection of sequence networks is put forward for fault analysis on four-circuit transmission line, and then interconnections of sequence networks for 4 typical fault types in one circuit line are presented. The method, considering the character of the sequence quality of four-circuit lines on the same tower, lays a theoretical foundation for the studies of new protection principle and setting scheme. Simulations on EMTDC verify the correctness of the approach.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50477037 and No.50607014).

Key words: four-circuit lines on the same tower; decoupling algorithm; double equidirectional sequence quantity; double opposite sequence quantity; fault analysis

中图分类号: TM744; TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)19-0001-09

0 引言

为减少输电走廊占地, 提高线路走廊单位面积的传输容量, 采用同塔架设多回输电线路已成为电力网络发展的必然趋势。在一些发达国家, 多回路架空线路的应用已比较普遍, 而且回路数较多, 一般均在四回以上, 有的甚至达到八回路同塔。例如, 考虑到土地狭小, 为有效利用线路走廊, 德国政府

规定凡新建线路必须同塔架设两回以上, 现已投入应用的最多为同塔六回, 同塔四回为常规线路; 而日本110 kV以上线路多数为同塔四回, 500 kV以上均为同塔双回及以上架设方式^[1]。我国采用同塔多回线输电始于1980年, 目前国内220 kV输电线路中已较多采用双回或四回输电, 部分500 kV输电线路中采用同塔双回路输电, 且现已有500 kV同塔四回输电线路投入运行^[2]。考虑同塔四回线线路参数复杂, 故障类型繁多, 对同塔四回线故障分析方法的研究越来越重要^[3-4]。

对称分量法是分析不对称故障的常用方法, 由

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50477037, 50607014); ABB中国研究中心合作项目

于解耦后各对称分量运算物理意义明确,运算简单,因此受到众多学者的青睐。采用对称分量法进行故障分析的前提是要把线路相量参数解耦成序分量。针对当前我国已普遍应用的同塔双回输电线路,已有众多学者对其参数解耦算法及序分量特征进行研究,并取得了一定的成果,目前较为成熟的方法有六序分量法等^[5-6]。而对于同塔四回线,在假设每两回线间互感都相等的情况下,目前已有12序分量解耦方法出现^[7-8]。但是,考虑实际线路架设情况,由于线路的排布方式使得各回线间的互感和线间电容差别很大,很难满足上述假设条件来进行精确故障计算^[9]。

本文结合实际同塔四回线的架设方式,分析了同塔四回线的线路参数特点,给出了用于同塔四回线解耦的双回同反序分量法,并提出了基于上述序分量的同塔四回输电系统复合序网故障分析方法。

1 同塔四回线阻抗矩阵解耦算法

同塔四回输电线路的杆塔结构有六层、四层、三层多种,且可能不同电压等级线路同塔架设。当前已投入实际运行的同塔四回线杆塔结构有图1中四种形式^[10-11]。

与杆塔结构对应,四回线的排布方式也各有不同。由于四回线间距离较近,使得四回线除相间互感外,每两回线间还存在线间互感。由Carson公式可知,线间互感参数与两回线间的相对距离有关,因此,考虑四回线的相对位置,不同回线间的线间互感也有所不同^[9]。

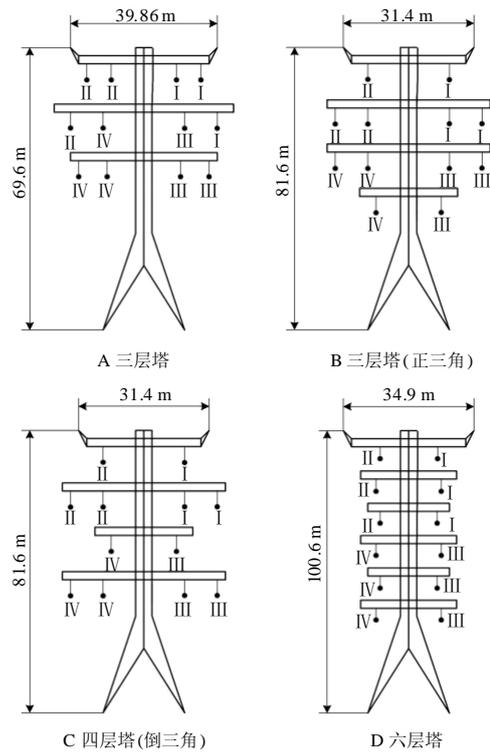


图1 同塔四回线塔形结构图

Fig. 1 Model of tower structure for four-circuit lines

以线路阻抗矩阵参数为例,考虑最一般的情况,每回线内均匀换位的同塔四回线的线路阻抗参数矩阵如式(1)。

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix}
 Z_{s1} & Z_{m1} & Z_{m1} & Z_{m12} & Z_{m12} & Z_{m12} & Z_{m13} & Z_{m13} & Z_{m13} & Z_{m14} & Z_{m14} & Z_{m14} \\
 Z_{m1} & Z_{s1} & Z_{m1} & Z_{m12} & Z_{m12} & Z_{m12} & Z_{m13} & Z_{m13} & Z_{m13} & Z_{m14} & Z_{m14} & Z_{m14} \\
 Z_{m1} & Z_{m1} & Z_{s1} & Z_{m12} & Z_{m12} & Z_{m12} & Z_{m13} & Z_{m13} & Z_{m13} & Z_{m14} & Z_{m14} & Z_{m14} \\
 Z_{m21} & Z_{m21} & Z_{m21} & Z_{s2} & Z_{m2} & Z_{m2} & Z_{m23} & Z_{m23} & Z_{m23} & Z_{m24} & Z_{m24} & Z_{m24} \\
 Z_{m21} & Z_{m21} & Z_{m21} & Z_{m2} & Z_{s2} & Z_{m2} & Z_{m23} & Z_{m23} & Z_{m23} & Z_{m24} & Z_{m24} & Z_{m24} \\
 Z_{m21} & Z_{m21} & Z_{m21} & Z_{m2} & Z_{m2} & Z_{s2} & Z_{m23} & Z_{m23} & Z_{m23} & Z_{m24} & Z_{m24} & Z_{m24} \\
 Z_{m31} & Z_{m31} & Z_{m31} & Z_{s2} & Z_{m2} & Z_{m2} & Z_{s2} & Z_{m3} & Z_{m3} & Z_{m34} & Z_{m34} & Z_{m34} \\
 Z_{m31} & Z_{m31} & Z_{m31} & Z_{s2} & Z_{m2} & Z_{m2} & Z_{m3} & Z_{s3} & Z_{m3} & Z_{m34} & Z_{m34} & Z_{m34} \\
 Z_{m31} & Z_{m31} & Z_{m31} & Z_{s2} & Z_{m2} & Z_{m2} & Z_{m3} & Z_{m3} & Z_{s3} & Z_{m34} & Z_{m34} & Z_{m34} \\
 Z_{m41} & Z_{m41} & Z_{m41} & Z_{s2} & Z_{m2} & Z_{m2} & Z_{m34} & Z_{m43} & Z_{m43} & Z_{s4} & Z_{m4} & Z_{m4} \\
 Z_{m41} & Z_{m41} & Z_{m41} & Z_{s2} & Z_{m2} & Z_{m2} & Z_{m34} & Z_{m43} & Z_{m43} & Z_{m4} & Z_{s4} & Z_{m4} \\
 Z_{m41} & Z_{m41} & Z_{m41} & Z_{s2} & Z_{m2} & Z_{m2} & Z_{m34} & Z_{m43} & Z_{m43} & Z_{m4} & Z_{m4} & Z_{s4}
 \end{bmatrix} \quad (1)$$

阻抗矩阵中对角线元素相等。 Z_i 为线路自阻抗, Z_{mi} 为相间互阻抗, Z_{mij} 为每两回线间互阻抗, i, j 为1, 2, 3, 4, 分别代表四回线。

首先对每回线参数进行相序变换,变换矩阵如式(2)。

$$S = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \alpha & \alpha^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \alpha^2 & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \alpha & \alpha^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \alpha^2 & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \alpha & \alpha^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \alpha^2 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

变换后阻抗矩阵如式(3):

$$Z' = SZS^{-1} =$$

$$\begin{bmatrix} Z_{s1} - Z_{m1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{s1} - Z_{m1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{s1} + 2Z_{m1} & 0 & 0 & 3Z_{m12} & 0 & 0 & 3Z_{m13} & 0 & 0 & 3Z_{m14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{s2} - Z_{m2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{s2} - Z_{m2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3Z_{m12} & 0 & 0 & Z_{s2} + 2Z_{m2} & 0 & 0 & 3Z_{m23} & 0 & 0 & 3Z_{m24} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{s3} - Z_{m3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{s3} - Z_{m3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3Z_{m13} & 0 & 0 & 3Z_{m23} & 0 & 0 & Z_{s3} + 2Z_{m3} & 0 & 0 & 3Z_{m34} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{s4} - Z_{m4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{s4} - Z_{m4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3Z_{m14} & 0 & 0 & 3Z_{m24} & 0 & 0 & 3Z_{m34} & 0 & 0 & Z_{s4} + 2Z_{m4} & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Z' 为每回线参数单独进行相序变换后的同塔四回线路阻抗矩阵。

可以看出, 变换后的阻抗矩阵正序和负序阻抗完全解耦, 而各回线之间零序都存在耦合。单独考虑零序阻抗矩阵如式(4)。

$$Z'_0 = \begin{bmatrix} Z_{s1} + 2Z_{m1} & 3Z_{m12} & 3Z_{m13} & 3Z_{m14} \\ 3Z_{m12} & Z_{s2} + 2Z_{m2} & 3Z_{m23} & 3Z_{m24} \\ 3Z_{m13} & 3Z_{m23} & Z_{s3} + 2Z_{m3} & 3Z_{m34} \\ 3Z_{m14} & 3Z_{m24} & 3Z_{m34} & Z_{s4} + 2Z_{m4} \end{bmatrix} \quad (4)$$

由于各回线的自阻抗、相间互阻抗及线间互阻抗均不相同, 使同塔四回线的零序阻抗矩阵仅为对称矩阵。由矩阵对角化原理可知, 上述矩阵可以对角化, 但过程非常复杂且难以进行特征值和特征向量的符号求解。因此对上述零序阻抗矩阵不能进行

符号解耦, 仅能得到数值解耦结果, 解耦矩阵随阻抗矩阵的变化而变化, 没有实际物理意义。

考虑图1中几种架设方式杆塔两侧的导线的对称性, 在导线型号一样的情况下, 由Carson公式可知线路的阻抗参数一般具有以下特征: 同一架设高度的两回线自阻抗及相间互阻抗相等; 杆塔左侧两回线间互阻抗与杆塔右侧两回线间互阻抗相等; 位于对角线位置的两对线间互阻抗相等^[11]。表述如式(5)。

$$\begin{cases} Z_{s1} = Z_{s2}; & Z_{m1} = Z_{m2} \\ Z_{s3} = Z_{s4}; & Z_{m3} = Z_{m4} \\ Z_{m13} = Z_{m24} \\ Z_{m14} = Z_{m23} \end{cases} \quad (5)$$

考虑阻抗矩阵的以上特点, 我们可以对零序阻

抗矩阵进行解耦如式 (6)。

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{sc0} &= \mathbf{S}_0^{-1} \mathbf{Z}_{p0} \mathbf{S}_0 = \\ &diag(0.5 \times (Z_{IT0} + Z_{IT0} + \sqrt{(Z_{IT0} - Z_{IT0})^2 + 4Z_{IT0}^2}); \\ &0.5 \times (Z_{IT0} + Z_{IT0} - \sqrt{(Z_{IT0} - Z_{IT0})^2 + 4Z_{IT0}^2}); \\ &0.5 \times (Z_{IF0} + Z_{IF0} + \sqrt{(Z_{IF0} - Z_{IF0})^2 + 4Z_{IF0}^2}); \\ &0.5 \times (Z_{IF0} + Z_{IF0} - \sqrt{(Z_{IF0} - Z_{IF0})^2 + 4Z_{IF0}^2})) \end{aligned} \quad (6)$$

\mathbf{Z}_{sc0} 为解耦后的同塔四回线零序阻抗矩阵, 是一个对角阵。其中:

$$\begin{cases} Z_{IT0} = Z_{s1} + 2Z_{m1} + 3Z_{m12} \\ Z_{IT0} = Z_{s3} + 2Z_{m3} + 3Z_{m34} \\ Z_{IF0} = Z_{s1} + 2Z_{m1} - 3Z_{m12} \\ Z_{IF0} = Z_{s3} + 2Z_{m3} - 3Z_{m34} \\ Z_{IT0} = 3Z_{m13} + 3Z_{m14} \\ Z_{IF0} = 3Z_{m13} - 3Z_{m14} \end{cases} \quad (7)$$

其解耦矩阵 \mathbf{S}_0 更为复杂, 且随零序阻抗矩阵参数变化而变化, 在此不再给出。由此可以看出, 如果考虑四回线因架设高度不同的原因导致上层两回线与下层两回线的自阻抗及相间互阻抗不同时, 其线路阻抗的解耦是很复杂的, 实用意义不大。

实际同塔四回线中, 上层线路与下层线路的高度差与其到等效大地回线间距离相比是很小的, 根据 Carson 公式计算所得的上层两回线的自阻抗与下层两回线的自阻抗, 上层两回线的相间互阻抗与

$$\mathbf{M} = \frac{1}{12} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 & 1 & \alpha & \alpha^2 & 1 & \alpha & \alpha^2 & 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha & 1 & \alpha^2 & \alpha & 1 & \alpha^2 & \alpha & 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 & 1 & \alpha & \alpha^2 & -1 & -\alpha & -\alpha^2 & -1 & -\alpha & -\alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha & 1 & \alpha^2 & \alpha & -1 & -\alpha^2 & -\alpha & -1 & -\alpha^2 & -\alpha \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 & -1 & -\alpha & -\alpha^2 & 1 & \alpha & \alpha^2 & -1 & -\alpha & -\alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha & -1 & -\alpha^2 & -\alpha & 1 & \alpha^2 & \alpha & -1 & -\alpha^2 & -\alpha \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 & -1 & -\alpha & -\alpha^2 & -1 & -\alpha & -\alpha^2 & 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha & -1 & -\alpha^2 & -\alpha & -1 & -\alpha^2 & -\alpha & 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

根据实际线路架设情况, 考虑同塔四回线线路阻抗矩阵的特点并进行了合理近似, 可以得到计算简单、物理意义明确的解耦矩阵 \mathbf{M} 和序量阻抗矩阵 \mathbf{Z}_{sc} 。

下层两回线的相间互阻抗, 上层两回线的线间互阻抗与下层两回线的线间互阻抗差别很小, 因此式(8)条件近似成立^[9]:

$$\begin{cases} Z_{s1} = Z_{s2} = Z_{s3} = Z_{s4} = Z_s \\ Z_{m1} = Z_{m2} = Z_{m3} = Z_{m4} = Z_m \\ Z_{m12} = Z_{m34} \end{cases} \quad (8)$$

在上述前提下, 对零序阻抗矩阵解耦如式(9):

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{sc0} &= \mathbf{S}_0^{-1} \mathbf{Z}_{p0} \mathbf{S}_0 = \\ &diag(Z_s + 2Z_m + 3Z_{m12} + 3Z_{m13} + 3Z_{m14}; \\ &Z_s + 2Z_m + 3Z_{m12} - 3Z_{m13} - 3Z_{m14}; \\ &Z_s + 2Z_m - 3Z_{m12} + 3Z_{m13} - 3Z_{m14}; \\ &Z_s + 2Z_m - 3Z_{m12} - 3Z_{m13} + 3Z_{m14}) \end{aligned} \quad (9)$$

解耦矩阵 \mathbf{S}_0 为:

$$\mathbf{S}_0 = \frac{1}{4} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

综上, 可以对同塔四回线的阻抗矩阵解耦为:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{sc} &= \mathbf{M}^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{M} = \\ &diag(Z_s - Z_m; Z_s - Z_m; Z_s + 2Z_m + 3Z_{m12} + 3Z_{m13} + 3Z_{m14}; \\ &Z_s - Z_m; Z_s - Z_m; Z_s + 2Z_m + 3Z_{m12} - 3Z_{m13} - 3Z_{m14}; \\ &Z_s - Z_m; Z_s - Z_m; Z_s + 2Z_m - 3Z_{m12} + 3Z_{m13} - 3Z_{m14}; \\ &Z_s - Z_m; Z_s - Z_m; Z_s + 2Z_m - 3Z_{m12} - 3Z_{m13} + 3Z_{m14}) \end{aligned} \quad (11)$$

解耦矩阵如式(12):

2 同塔四回线导纳矩阵解耦算法

下面用矩阵 \mathbf{M} 对线路导纳矩阵进行解耦。

每回线内均匀换位的同塔四回线的线路导纳参

数如式 (13):

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_{s1} & Y_{m1} & Y_{m1} & Y_{m12} & Y_{m12} & Y_{m12} & Y_{m13} & Y_{m13} & Y_{m13} & Y_{m14} & Y_{m14} & Y_{m14} \\ Y_{m1} & Y_{s1} & Y_{m1} & Y_{m12} & Y_{m12} & Y_{m12} & Y_{m13} & Y_{m13} & Y_{m13} & Y_{m14} & Y_{m14} & Y_{m14} \\ Y_{m1} & Y_{m1} & Y_{s1} & Y_{m12} & Y_{m12} & Y_{m12} & Y_{m13} & Y_{m13} & Y_{m13} & Y_{m14} & Y_{m14} & Y_{m14} \\ Y_{m21} & Y_{m21} & Y_{m21} & Y_{s2} & Y_{m2} & Y_{m2} & Y_{m23} & Y_{m23} & Y_{m23} & Y_{m24} & Y_{m24} & Y_{m24} \\ Y_{m21} & Y_{m21} & Y_{m21} & Y_{m2} & Y_{s2} & Y_{m2} & Y_{m23} & Y_{m23} & Y_{m23} & Y_{m24} & Y_{m24} & Y_{m24} \\ Y_{m21} & Y_{m21} & Y_{m21} & Y_{m2} & Y_{m2} & Y_{s2} & Y_{m23} & Y_{m23} & Y_{m23} & Y_{m24} & Y_{m24} & Y_{m24} \\ Y_{m31} & Y_{m31} & Y_{m31} & Y_{s2} & Y_{s2} & Y_{s2} & Y_{s3} & Y_{m3} & Y_{m3} & Y_{m34} & Y_{m34} & Y_{m34} \\ Y_{m31} & Y_{m31} & Y_{m31} & Y_{s2} & Y_{s2} & Y_{s2} & Y_{m3} & Y_{s3} & Y_{m3} & Y_{m34} & Y_{m34} & Y_{m34} \\ Y_{m31} & Y_{m31} & Y_{m31} & Y_{s2} & Y_{s2} & Y_{s2} & Y_{m3} & Y_{m3} & Y_{s3} & Y_{m34} & Y_{m34} & Y_{m34} \\ Y_{m41} & Y_{m41} & Y_{m41} & Y_{s2} & Y_{s2} & Y_{s2} & Y_{m34} & Y_{m43} & Y_{m43} & Y_{s4} & Y_{m4} & Y_{m4} \\ Y_{m41} & Y_{m41} & Y_{m41} & Y_{s2} & Y_{s2} & Y_{s2} & Y_{m34} & Y_{m43} & Y_{m43} & Y_{m4} & Y_{s4} & Y_{m4} \\ Y_{m41} & Y_{m41} & Y_{m41} & Y_{s2} & Y_{s2} & Y_{s2} & Y_{m34} & Y_{m43} & Y_{m43} & Y_{m4} & Y_{s4} & Y_{m4} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中: 对角线元素相等。\$Y_{si}\$ 为线路自导纳; \$Y_{mi}\$ 为相间互导纳; \$Y_{mij}\$ 为每两回线间互导纳。其中线路自导纳为:

$$Y_{si} = Y_{gi} + 2Y_{mi} + 3(Y_{mij} + Y_{mik} + Y_{mih}) \quad (14)$$

式中: \$Y_{gi}\$ 为每相对地导纳; \$i, j, k, h\$ 为 1, 2, 3, 4, 且各不相同, 分别代表四回线路。

与阻抗矩阵一样, 考虑一般杆塔两侧的导线架设的对称性, 在四回线线型一样的情况下, 由 Carson 公式可知线路的导纳参数具有以下特征: 由于上层两回线与下层两回线到大地等效导线之间的距离相差很小, 可以认为四回线的自导纳及相间互导纳相等, 上层两回线的线间互导纳与下层两回线线间互导纳相等; 杆塔左侧两回线间互导纳与杆塔右侧两回线间互导纳相等, 位于对角线位置的两对线间互导纳相等^[9]。表述为:

$$\begin{cases} Y_{s1} = Y_{s2} = Y_{s3} = Y_{s4} = Y_S \\ Y_{m1} = Y_{m2} = Y_{m3} = Y_{m4} = Y_m \\ Y_{m13} = Y_{m24} \\ Y_{m14} = Y_{m23} \\ Y_{m12} = Y_{m34} \end{cases} \quad (15)$$

用 \$\mathbf{M}\$ 对线路导纳矩阵进行解耦如式 (16):

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_{sc} &= \mathbf{M}\mathbf{Y}\mathbf{M}^{-1} = \\ \text{diag}(Y_S - 2Y_m; Y_S - 2Y_m; Y_S + 2Y_m + 3Y_{m12} + 3Y_{m13} + 3Y_{m14}; \\ &Y_S - 2Y_m; Y_S - 2Y_m; Y_S + 2Y_m + 3Y_{m12} - 3Y_{m13} - 3Y_{m14}; \\ &Y_S - 2Y_m; Y_S - 2Y_m; Y_S + 2Y_m - 3Y_{m12} + 3Y_{m13} - 3Y_{m14}; \\ &Y_S - 2Y_m; Y_S - 2Y_m; Y_S + 2Y_m - 3Y_{m12} - 3Y_{m13} + 3Y_{m14}) \end{aligned} \quad (16)$$

根据实际线路架设情况, 考虑同塔四回线线路阻抗矩阵的特点并进行了合理近似, 可以得到计算简单、物理意义明确的序量导纳矩阵 \$\mathbf{Y}_{sc}\$。

3 各序量特征及物理意义

利用矩阵 \$\mathbf{M}\$ 可将四回线的相电压电流解耦为正负零三组序量, 其中每组序量又包含一个双回同向序量和三个双回反向序量, 其与每回线的正负零序量关系如下:

$$\begin{cases} \dot{U}_{Ti} = (\dot{U}_{li} + \dot{U}_{\Pi i} + \dot{U}_{\text{III}i} + \dot{U}_{\text{IV}i})/4 \\ \dot{U}_{Fi} = (\dot{U}_{li} + \dot{U}_{\Pi i} - \dot{U}_{\text{III}i} - \dot{U}_{\text{IV}i})/4 \\ \dot{U}'_{Fi} = (\dot{U}_{li} - \dot{U}_{\Pi i} + \dot{U}_{\text{III}i} - \dot{U}_{\text{IV}i})/4 \\ \dot{U}''_{Fi} = (\dot{U}_{li} - \dot{U}_{\Pi i} - \dot{U}_{\text{III}i} + \dot{U}_{\text{IV}i})/4 \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \dot{I}_{Ti} = (\dot{I}_{li} + \dot{I}_{\Pi i} + \dot{I}_{\text{III}i} + \dot{I}_{\text{IV}i})/4 \\ \dot{I}_{Fi} = (\dot{I}_{li} + \dot{I}_{\Pi i} - \dot{I}_{\text{III}i} - \dot{I}_{\text{IV}i})/4 \\ \dot{I}'_{Fi} = (\dot{I}_{li} - \dot{I}_{\Pi i} + \dot{I}_{\text{III}i} - \dot{I}_{\text{IV}i})/4 \\ \dot{I}''_{Fi} = (\dot{I}_{li} - \dot{I}_{\Pi i} - \dot{I}_{\text{III}i} + \dot{I}_{\text{IV}i})/4 \end{cases} \quad (18)$$

式中: \$i=1, 2, 0\$, 分别代表正负零序; \$\dot{U}_{Ti}\$ 为双回同向正负零序电压; \$\dot{U}_{Fi}\$、\$\dot{U}'_{Fi}\$ 和 \$\dot{U}''_{Fi}\$ 为三个双回反向正负零序电压; \$\dot{I}_{Ti}\$ 为双回同向正负零序电流; \$\dot{I}_{Fi}\$、\$\dot{I}'_{Fi}\$ 及 \$\dot{I}''_{Fi}\$ 为三个双回反向正负零序电流。从式 (17)、(18) 可以看出, 四回线的双回同向序量由每回线的该序电气量之和组成, 而其三个不同的双回反向序量则由两回同向, 两回反向的该序电气量之和组成。

解耦后的双回同向及三个双回反向正负零序阻抗和导纳如表 1 和表 2 所示。

表 1 解耦后各回线序阻抗

Tab.1 Sequence impedances after decoupling

	正序阻抗	负序阻抗	零序阻抗
双回同向	$Z_{T1} = Z_s - Z_m$	$Z_{T2} = Z_s - Z_m$	$Z_{T0} = Z_s + 2Z_m + 3Z_{m12} + 3Z_{m13} + 3Z_{m14}$
双回反向 1	$Z_{F1} = Z_s - Z_m$	$Z_{F2} = Z_s - Z_m$	$Z_{F0} = Z_s + 2Z_m + 3Z_{m12} - 3Z_{m13} - 3Z_{m14}$
双回反向 2	$Z'_{F1} = Z_s - Z_m$	$Z'_{F2} = Z_s - Z_m$	$Z'_{F0} = Z_s + 2Z_m - 3Z_{m12} + 3Z_{m13} - 3Z_{m14}$
双回反向 3	$Z''_{F1} = Z_s - Z_m$	$Z''_{F2} = Z_s - Z_m$	$Z''_{F0} = Z_s + 2Z_m - 3Z_{m12} - 3Z_{m13} + 3Z_{m14}$

表 2 解耦后各回线序导纳

Tab.2 Sequence admittances after decoupling

	正序导纳	负序导纳	零序导纳
双回同向	$Y_{T1} = Y_s - Y_m$	$Y_{T2} = Y_s - Y_m$	$Y_{T0} = Y_s + 2Y_m + 3Y_{m12} + 3Y_{m13} + 3Y_{m14}$
双回反向 1	$Y_{F1} = Y_s - Y_m$	$Y_{F2} = Y_s - Y_m$	$Y_{F0} = Y_s + 2Y_m + 3Y_{m12} - 3Y_{m13} - 3Y_{m14}$
双回反向 2	$Y'_{F1} = Y_s - Y_m$	$Y'_{F2} = Y_s - Y_m$	$Y'_{F0} = Y_s + 2Y_m - 3Y_{m12} + 3Y_{m13} - 3Y_{m14}$
双回反向 3	$Y''_{F1} = Y_s - Y_m$	$Y''_{F2} = Y_s - Y_m$	$Y''_{F0} = Y_s + 2Y_m - 3Y_{m12} - 3Y_{m13} + 3Y_{m14}$

可以看出，双回同向正负序阻抗与三个双回反向正负序阻抗相同，且与线间互阻抗无关；双回同向正负序导纳与三个双回反向正负序导纳相同，由于每相的自导纳与线间的互导纳是有关的，因此实际上上述导纳值与线间互导纳有关。

4 同塔四回线双回同反序网故障分析方法

参考当前国内实际运行的同塔四回输电线路运行方式，本文所研究的典型系统模型如图 2 所示。

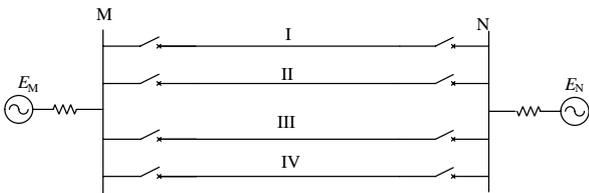


图 2 同塔四回输电系统模型

Fig.2 Model of four-circuit transmission system with fault

作为一种有效的分析方法，对称分量法已普遍应用于单回线的故障计算及保护行为研究中。同塔四回线的线间距离很近，除一回线内部故障外，还会发生各种形式的跨线故障，其故障类型比单回线要复杂得多；即使是一回线内部故障，由于线间互感的存在，其故障电流与单回线时也会有较大差别，因此，已有的单回线故障分析方法在同塔四回线中

不再适用。基于第 3 节中提出的解耦算法及由此得到的各序分量，对同塔四回线的序网结构进行分析，并提出同塔四回线的序网故障分析法。

同塔四回线故障可等效为在各故障相与地之间接入一组不对称电势源，按第 3 节解耦方法可以将相量关系变换为双回同向及双回反向正负零序等值电路。

双回同向正序等值电路中要考虑两侧系统的等效正序电势，两侧系统的双回同向序阻抗为系统该序阻抗的 4 倍。双回同向正负零序等值电路如图 3。

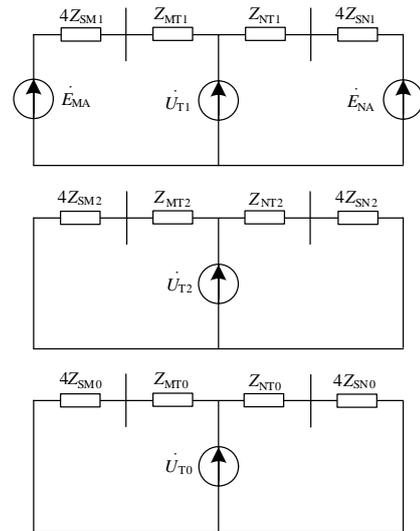


图 3 同塔四回输电系统故障后双回同向正负零序等值电路

Fig.3 Double same directional sequence equivalent circuit of four-circuit transmission system with fault

由于双回反向电流是由其中两回线流入另外两回线，与两侧系统无关，因此两侧系统的等值双回反向序阻抗都为零，图 4~6 为三组双回反向正负零序等值电路。

通过以上分析，可以把故障后的同塔四回输电系统等效为图 3~6 的 12 个独立等效电路。

同塔双回线发生不同类型故障时，故障点处各相电气量都存在一定的关系，称为故障边界条件，由此可得到故障点处电压电流量之间的关系。应用对称分量法分析各种类型故障时，把双回输电系统的正序、负序和四个零序网络在故障点处等效为二端口网络，根据故障点处电压电流量之间的关系并进行序网连接，即可得到各种故障类型下的复合序网，并进行各种类型故障分析。下面以 I 回线 A 相接地故障为例进行分析。

对于 IAG 故障，I 回线边界条件如式 (19)。

$$\begin{cases} \dot{I}_{IB} = 0 \\ \dot{I}_{IC} = 0 \\ \dot{U}_{IA} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中: \dot{I}_{IB} 、 \dot{I}_{IC} 表示 I 回线 B、C 相故障电流; \dot{U}_{IA} 表示 I 回线故障点电压。

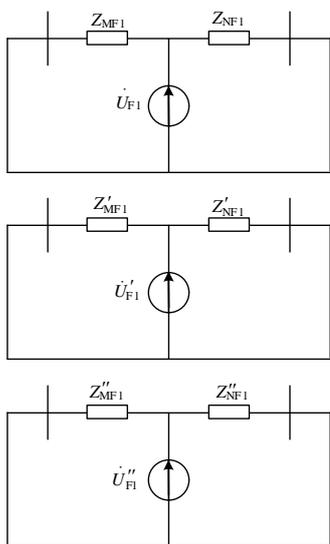


图 4 同塔四回输电系统故障后双回反向正序等值电路
Fig.4 Double inverse directional positive sequence equivalent circuit of four-circuit transmission system with fault

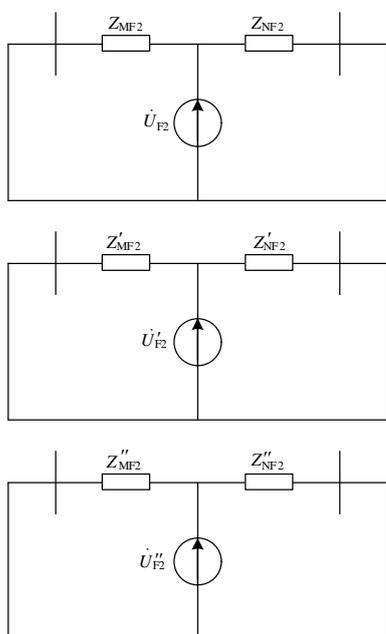


图 5 同塔四回输电系统故障后双回反向负序等值电路
Fig.5 Double inverse directional negative sequence equivalent circuit of four-circuit transmission system with fault

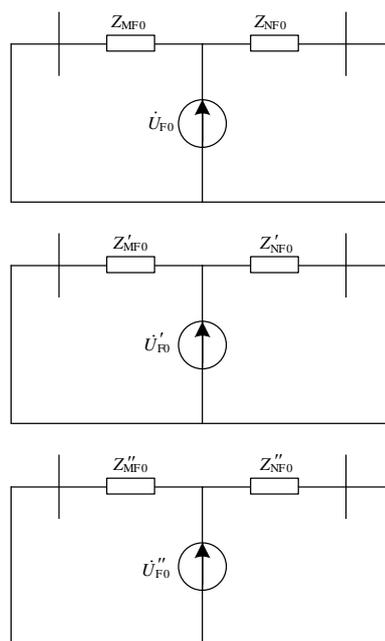


图 6 同塔四回输电系统故障后双回反向零序等值电路
Fig.6 Double inverse directional zero sequence equivalent circuit of four-circuit transmission system with fault

II、III、IV 回线各相故障电流都为零, 边界条件表述为:

$$\begin{cases} \dot{I}_{iA} = 0 \\ \dot{I}_{iB} = 0 \\ \dot{I}_{iC} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

其中, $i=2, 3, 4$ 。

用第二节提出的解耦方法表述为序量关系为:

$$\dot{U}_{T1} + \dot{U}_{T2} + \dot{U}_{T0} + \dot{U}_{F0} + \dot{U}_{F2} + \dot{U}_{F0} + \dot{U}_{F1} + \dot{U}'_{F2} + \dot{U}'_{F0} + \dot{U}''_{F1} + \dot{U}''_{F2} + \dot{U}''_{F0} = 0 \quad (21)$$

$$\dot{I}_{T1} = \dot{I}_{T2} = \dot{I}_{T0} = \dot{I}_{F1} = \dot{I}_{F2} = \dot{I}_{F0} = \dot{I}'_{F1} = \dot{I}'_{F2} = \dot{I}'_{F0} = \dot{I}''_{F1} = \dot{I}''_{F2} = \dot{I}''_{F0} \quad (22)$$

对应 12 个序网端口串联, 复合序网接线图如图 7。

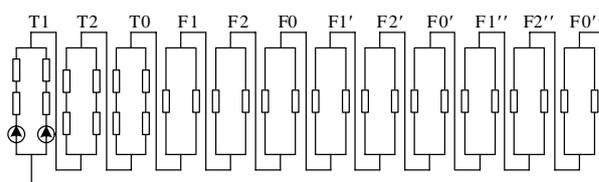


图 7 同塔四回输电系统 IA 接地故障后复合序网图
Fig.7 Interconnection of sequence network with IA grounding fault on four-circuit lines

同理，根据 IBC 相间故障、IBCG 接地故障和 IABC 三相故障的边界条件，可得其复合序网如图 8~10。

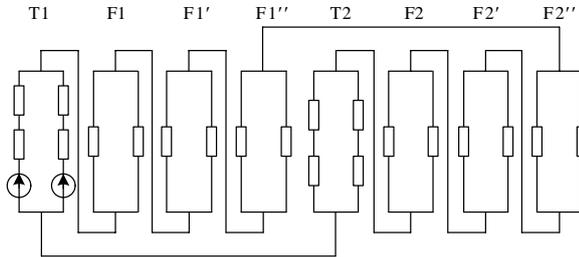


图 8 同塔四回输电系统 IBC 相间故障后复合序网图

Fig.8 Interconnection of sequence network with IBC interphase fault on four-circuit lines

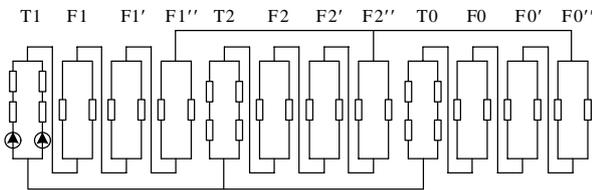


图 9 同塔四回输电系统 IBC 接地故障后复合序网图

Fig.9 Interconnection of sequence network with IBC grounding fault on four-circuit lines

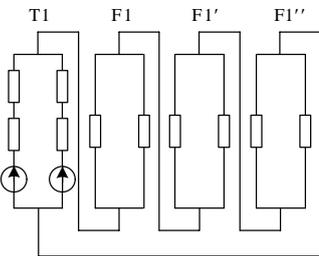


图 10 同塔四回输电系统 IABC 故障后复合序网图

Fig.10 Interconnection of sequence network with IABC interphase fault on four-circuit lines

篇幅所限，跨线故障的复合序网不再给出，应用上述复合序网即可进行相关故障分析。

5 仿真验证

本文对上海实际同塔四回输电系统应用上述解耦方法在 EMTDC 仿真软件中进行仿真验证。其系统结构如图 2。

四回线的模拟采用依频模型 (Frequency Dependent (Phase) Model)，并用几何参数设置，线路排布方式见图 1 (A)，每回线内均匀换位，线路长度 80 km。其中 I、II 回线采用导线 LGJ-400/35，外径 26.82 mm，钢芯直径 7.5 mm，直流电阻 0.073 8

Ω/km ；III、IV 回线采用导线 LGJ-630/45，外径 33.5 mm，钢芯直径 8.4 mm，直流电阻 0.046 33 Ω/km 。每相导线分裂数为 4 分裂，子导线分裂间距均为 450 mm。导线弧垂为 12 m。由阻抗矩阵和导纳矩阵由 EMTDC 通过几何参数输入生成。从生成的参数矩阵可以看出，四回线路中每两回线之间都存在线间阻抗和导纳，且其数值大小满足本文的假设条件。

采用本文提出的解耦方法对阻抗矩阵和导纳矩阵进行解耦，从解耦后的序阻抗矩阵和序导纳矩阵可以看出，仅在双回同向序量和双回反向序量 1 之间、双回反向序量 2 和双回反向序量 3 之间存在互阻抗和互导纳的耦合，但其数值与序参数数值相比非常小，可以忽略不计。因此采用本文所提出的解耦矩阵，可以很好的对实际同塔四回线线路参数进行解耦。

除此之外，本文还对四层塔及六层塔结构的同塔四回线线路参数进行了仿真验证，其解耦效果与上述三层塔结构下基本相同。

基于以上线路参数和系统参数，本文采用二端口理论，对几种常见故障下的线路短路电流进行了计算，并与仿真结果进行了对比，具体数值见表 3。两侧系统参数如下。

M 侧系统参数：

$$E_M = 500 \angle 0^\circ$$

$$Z_{M1} = 3.93 + i49.34 \ \Omega$$

$$Z_{M0} = 2.52 + i46.03 \ \Omega$$

N 侧系统参数：

$$E_N = 500 \angle 0^\circ$$

$$Z_{N1} = 2.76 + i41.34 \ \Omega$$

$$Z_{N0} = 1.57 + i134.09 \ \Omega$$

故障点位置在线路中点。可以看出，序网计算过程中忽略了线路电容的影响，但由于线路长度较短，因此计算结果与仿真结果基本相同。

表 3 不同故障类型下的故障电流幅值

Tab.3 Magnitude of fault point current in different fault types

故障类型	故障电流	复合序网计算结果	仿真结果
IAG	I_{fa}	$12.84 \angle -85.34^\circ$	$12.98 \angle -85.83^\circ$
IBC	I_{fb}	$12.76 \angle -175.98^\circ$	$12.79 \angle -177.69^\circ$
	I_{fc}	$12.76 \angle 4.02^\circ$	$12.79 \angle 4.15^\circ$
IBCG	I_{fb}	$14.07 \angle 160.20^\circ$	$14.07 \angle 160.20^\circ$
	I_{fc}	$13.86 \angle 28.24^\circ$	$14.04 \angle 28.50^\circ$
IABC	I_{fa}	$14.73 \angle -85.98^\circ$	$14.77 \angle -85.85^\circ$
	I_{fb}	$14.73 \angle 154.02^\circ$	$14.77 \angle 154.15^\circ$
	I_{fc}	$14.73 \angle 34.02^\circ$	$14.77 \angle 34.15^\circ$

6 结论

本文对同塔四回输电线路参数进行了研究, 并根据当前普遍采用的杆塔结构及线路架设方案总结了同塔四回输电线路的参数特征。在此基础上, 从矩阵论的角度提出了同塔四回线线路参数及电气量的解耦方法, 分析了解耦后的各序量特征及物理意义。提出的解耦矩阵具有以下特点:

1) 考虑了同塔四回线的一般特征, 即不同杆塔结构线路排列方式造成的线间互感及线间电容差异, 具有普遍的实用价值。

2) 计算简单, 物理意义明确。

基于上述解耦算法, 本文给出了同塔四回输电线路复合序网故障分析方法, 本方法考虑了同塔四回线的序量特点, 计算简单, 物理意义明确, 为同塔四回线新型保护原理的开发和整定计算奠定了理论基础。

参考文献

- [1] 徐建国. 对国外超高压同塔多回送电线路技术的调研分析[J]. 电力建设, 2001, 22 (7): 15-18.
XU Jian-guo. Investigation and analysis on transmission line technique of EHV multiple-circuit on the same tower abroad[J]. Electric Power Construction, 2001, 22 (7): 15-18.
- [2] 韦钢, 薛敏. 同杆并架4回输电线路的探讨[J]. 电力建设, 1999 (3): 4-11.
WEI Gang, XUE Min. Investigating the four-circuit transmission lines erected on the same pole[J]. Electric Power Construction, 1999 (3): 4-11.
- [3] 张嘉, 葛荣良. 同塔多回输电技术特点及其应用分析[J]. 华东电力, 2005, 33 (7): 23-26.
ZHANG Jia, GE Rong-liang. Features and application of power transmission technology of multi-circuit lines on the same tower[J]. East China Electric Power, 2005, 33 (7): 23-26.
- [4] ZUO X F, KURIBYASHI H, TSUJI K, et al. Protection of parallel multi-circuit transmission lines[C]. //Sixth International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management- Proceedings. Hong Kong(China): 2003: 760-765.
- [5] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
- [6] 何奔腾, 胡为进. 同杆并架双回线路模变换分析[J]. 电网技术, 1998, 22 (1): 25-30.
HE Ben-teng, HU Wei-jin. Mode transformation of double-circuit line tower[J]. Power System Technology, 1998, 22 (1): 25-30.
- [7] 田羽, 范春菊, 龚震东. 同杆4回线12序分量法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (21): 35-39.
TIAN Yu, FANG Chun-ju, GONG Zhen-dong. Twelve-sequence component method of four-parallel lines on same towers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (21): 35-39.
- [8] 邓孟华, 范春菊, 舒巧俊, 等. 同杆4回线故障选线方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (15): 57-60.
DENG Meng-hua, FANG Chun-ju, SHU Qiao-jun, et al. Method for fault line selection of four jointed parallel lines on same tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (15): 57-60.
- [9] 関根泰次. 电力系统暂态解析[M]. 蒋健民, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [10] 潘震东, 张嘉, 顾承显. 500 kV同塔四回线路工频过电压研究[J]. 华东电力, 2007, 35 (3): 24-27.
PAN Zhen-dong, ZHANG Jia, GU Cheng-yu. Power frequency over-voltage of 500 kV four-circuit lines on the same tower[J]. East China Electric Power, 2007, 35 (3): 24-27.
- [11] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析(上册)[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.

收稿日期: 2009-10-21; 修回日期: 2010-01-13

作者简介:

李博通(1981-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统超高压继电保护与控制; E-mail: libotong2006@gmail.com

李永丽(1963-), 女, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统故障分析与微机保护; E-mail: lytju@163.com

陈莉(1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统多回线的继电保护与控制。E-mail: chen_1014@126.com