

# 基于暂态量的同塔双回线路故障选相研究

田书, 刘芳芳, 任晓明

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003)

**摘要:** 提出了一种基于暂态量的同塔双回线路故障选相方案。该方案利用小波变换工具提取各相故障电流分量的暂态能量, 以暂态能量构成选相判据。根据同塔单、双回线故障选相等价原则进行故障相初步判别, 在此基础上根据暂态能量大小进行同名相选线, 进一步精确识别故障相, 从而形成一套完整的基于双回线单端暂态量的故障选相方案。通过 PSCAD/EMTDC 软件对不同故障类型、故障位置、故障时刻以及不同过渡电阻情况的仿真, 验证了该选相方法的可行性。

**关键词:** 双回线; 暂态能量; 小波变换; 同名相识别; 故障选相

## Research on transient-based faulty phase selection for double-circuit lines on the same tower

TIAN Shu, LIU Fangfang, REN Xiaoming

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

**Abstract:** This paper proposes a novel approach of transient-based faulty phase selection for double circuit lines on the same tower. This phase-selection algorithm uses the wavelet transform to extract the transient energy of current faulty component in each phase and takes the transient energy as phase selection criterion. First, according to the fault equivalence principle of the single line and double circuit lines on the same tower, this approach identifies the fault phase preliminarily. Then the transient energy magnitudes are compared to select the same-name-phase fault lines and further identify the fault phase precisely. At last, this paper presents a complete faulty phase selection based on the single terminal quantities of double circuit lines. The effectiveness of the approach has been verified by simulating different fault types, fault location, fault time and different transition resistance with PSCAD/EMTDC.

**Key words:** double circuits lines; transient energy; wavelet transform; identification of the same name phases; selection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)01-0050-05

## 0 引言

国内外研究与运行经验表明: 同塔双回输电是解决输电走廊紧张、节省土地资源、提高输送容量的有效手段<sup>[1]</sup>。同塔双回线路保护需要选相跳闸, 这对保护的选相元件提出了极高的要求。由于双回线之间距离较近, 耦合情况复杂, 传统基于单回线的选相元件应用于双回线尤其是跨线故障时会误动作。因此近年来有大量学者致力于同塔双回线路的故障选相研究。

目前同塔双回线路的选相研究多是基于工频量<sup>[2-5]</sup>, 然而传统基于工频量的故障选相无法克服自身的选相不足, 且在速度上不能满足超高速保护的要求。文献[2]提出了基于电流突变量的单端单回线综合选相方案, 针对电流突变量选相元件在同塔双回线故障下的动作特性, 以测量阻抗、方向元件为

辅助判据构成综合的选相方案, 但选相快速性不够理想。文献[3]基于信息共享技术和智能电网的发展提出了利用电压辅助电流的单端双回线选相原理, 然而在线路远端发生故障时无法正确选相; 文献[4]将相关分析引入到同塔双回线序分量选相中, 但算法计算量大, 且在线路远端故障时选相性能下降, 无法避免序分量选相的缺陷。

近年来为满足超高速保护的要求, 以初始行波或暂态量为基础的单回线快速选相方法成为研究热点<sup>[6-13]</sup>。然而同塔双回线路在该方面的研究却鲜有成果。本文基于暂态量选相的优势, 同时结合双回线故障选相的特点, 利用小波变换表征相电流故障分量的暂态能量, 以暂态能量构成选相判据, 提出基于暂态量的双回线单端故障选相方案。通过 PSCAD/EMTDC 软件对不同故障类型、故障位置、故障时刻以及过渡电阻情况进行大量仿真, 验证了

该选相方法的可行性。

## 1 同塔双回线路故障选相的特征分析

同塔双回输电线各线间存在互感并且线路参数复杂。其线路除了发生单回线路上的各种不对称故障以外,还会发生跨线故障,给故障选相带来了困难,增加了输电线路故障的分析难度。因此,深入研究同塔双回线故障的特征,对提高保护装置的选相能力具有重要意义。图1为同塔并架双回线路的简化模型。

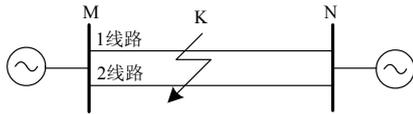


图1 同塔并架双回线路简化系统图

Fig. 1 Simplified system of double-circuit lines on the same tower

设 $\alpha_{T1}$ 、 $\alpha_{F1}$ 、 $\alpha_{T2}$ 、 $\alpha_{F2}$ 、 $\alpha_{T0}$ 、 $\alpha_{F0}$ 为同、反序网的正、负、零序分量的电流分布系数,根据序分量与相分量以及故障分量与全量的相互换算关系<sup>[14]</sup>,可得保护安装处的故障电流分量为

$$\begin{bmatrix} I'_A & I'_B & I'_C & I''_A & I''_B & I''_C \end{bmatrix}^T = [S] \begin{bmatrix} I'_{KA} & I'_{KB} & I'_{KC} & I''_{KA} & I''_{KB} & I''_{KC} \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

式中: $I'$ 、 $I''$ 为线路1和2的故障分量电流; $I'_k$ 、 $I''_k$ 为两回线路故障点的故障电流; $[S]$ 为 $[M] \cdot \text{diag} [\alpha_{T0} \ \alpha_{F0} \ \alpha_{T1} \ \alpha_{F1} \ \alpha_{T2} \ \alpha_{F2}] \cdot [M]^{-1}$ ,该式中

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & a^2 & a^2 & a & a \\ 1 & 1 & a & a & a^2 & a^2 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & a^2 & -a^2 & a & -a \\ 1 & -1 & a & -a & a^2 & -a^2 \end{bmatrix}$$

计及 $\alpha_{T1} = \alpha_{T2}$ ,  $\alpha_{F1} = \alpha_{F2} = \alpha_{F0} = \beta$ ,由式(1)可得并架线路1、2的故障电流分量( $X$ 表示A、B、C相)为

$$I'_X = \frac{1}{2}(\alpha_{T0} - \alpha_{T1})I_{K0} + \frac{1}{2}\alpha_{T1}I_{KX} + \frac{\beta}{2}(I'_{KX} - I''_{KX}) \quad (2)$$

$$I''_X = \frac{1}{2}(\alpha_{T0} - \alpha_{T1})I_{K0} + \frac{1}{2}\alpha_{T1}I_{KX} - \frac{\beta}{2}(I'_{KX} - I''_{KX}) \quad (3)$$

式中: $I_{KX} = I'_{KX} + I''_{KX}$ ;  $I_{K0} = \frac{1}{3}(I_{KA} + I_{KB} + I_{KC})$ 。

则两回线同名相故障电流分量之和为

$$I_X = I'_X + I''_X = (\alpha_{T0} - \alpha_{T1})I_{K0} + \alpha_{T1}I_{KX} \quad (4)$$

单回线路故障流经保护安装处的各相故障电流

分量为

$$I_X = (C_0 - C_1)I_{K0} + C_1I_{KX} \quad (5)$$

对比式(4)和式(5)可以看到,它们具有相同的结构,因此在对同塔双回线路同名相做综合考虑时,双回线的故障性质与单回线情况等价。由此可以首先将双回线的同名相综合考虑,采用单回线的故障选相方法识别故障相,再对已判明故障相的两同名相进行选线,最终实现同塔双回线路的正确选相。

## 2 基于暂态量的故障选相原理

同塔双回线路发生故障后,不同的故障类型之间以及故障相与非故障相之间会存在差异,而选择适合的工具对这些差异进行合理提取并表征,便可以构成判别故障相的特征量。小波变换对分析故障突变产生的频率波动很大的非平稳信号具有显著优势<sup>[8]</sup>,因此本文利用小波分析工具提取暂态信号的能量,以暂态能量为判据,根据同塔单、双回线选相的等价原则,形成一套基于暂态量的同塔双回线路故障选相方案。

### 2.1 暂态信号能量的小波表示

根据 Mallat 算法,将信号  $y(t)$  通过一组高通滤波器和低通滤波器分解为高频部分和低频部分。经小波变换得到的第  $j$  尺度上的逼近系数  $c_j(n)$  与小波系数  $d_j(k)$  为

$$c_j(n) = \sum_k h(k-2n)c_{j-1}(k) \quad (6)$$

$$d_j(n) = \sum_k g(k-2n)c_{j-1}(k) \quad (7)$$

式中, $h(n)$ 和 $g(n)$ 分别代表低通滤波器和高通滤波器,由所选母小波 $\psi(t)$ 决定。

由 Parseval 定理可知:在正交小波变换下,信号  $y(t)$  的能量可以用小波变换的系数来表示。

$$\int |y(t)|^2 dt = \sum_k |c_j(k)|^2 + \sum_{j=1}^J \sum_k |d_j(k)|^2 \quad (8)$$

式中, $E_j = \sum_k |c_j(k)|^2$ 所表征的即为第  $j$  尺度低频带上信号分量的能量。

为满足暂态信号的快速表征,并使式(8)成立,经对比本文选取 Daubechies 族 db3 小波进行故障暂态信号的分析。

### 2.2 以暂态能量为判据的同塔双回线路故障选相原理

#### 2.2.1 故障相初步识别

对同塔双回线路同名相综合考虑,将其等效为一个三相线路,则故障类型和单回线路故障类型等

价, 可以分为单相接地、两相短路接地、两相短路以及三相短路故障四种类型。根据 Clark 变换对等效三相线路解耦, 并结合故障边界条件和等效线路间耦合关系可得出典型故障附加网络的故障特征, 如表 1 所示。

表 1 等价三相线路故障特征表

Table 1 Fault analysis of the equivalent three-phase line

故障类型	零序分量	$I_A$	$I_B$	$I_C$
Ag	零	大	小	小
Bg	零	小	大	小
Cg	零	小	小	大
BC	非零	小	大	大
AC	非零	大	小	大
AB	非零	大	大	小
BCg	零	小	大	大
ACg	零	大	小	大
ABg	零	大	大	小
ABC	非零	大	大	大

由表 1 可见, 根据各种故障下故障信号量的差异, 可以对故障相进行初步的判别。本文利用暂态信号的能量值表征不同故障类型下的差异, 通过比较各相暂态电流的能量大小识别故障相。

具体步骤:

(1) 提取等效三相线路 A、B、C 三相的故障分量  $I_X = I'_X + I''_X$  ( $X$  为 A、B、C 相), 零模故障分量为  $I_0 = I_A + I_B + I_C$ 。

(2) 利用 db3 小波提取第一尺度低频信号能量  $E_0$ 、 $E_A$ 、 $E_B$ 、 $E_C$ , 对其进行归一化处理, 记  $E_{\max} = \max(E_A, E_B, E_C)$ ,  $e_0 = E_0/E_{\max}$ ,  $e_A = E_A/E_{\max}$ ,  $e_B = E_B/E_{\max}$ ,  $e_C = E_C/E_{\max}$ 。

(3) 将  $e_A$ 、 $e_B$ 、 $e_C$  按照大小分别记为  $e_{\max}$ 、 $e_{\text{mid}}$ 、 $e_{\min}$ 。

(4) 根据故障信号能量大小, 按照一定的选择原则, 初步确定故障相。

以暂态能量为判据的选相流程如图 2, 其中  $\varepsilon_0$  为判断故障是否接地的阈值;  $\varepsilon_1$  用来区分三相故障和两相短路故障;  $\varepsilon_2$  用来区分单相接地和两相短路接地故障。

### 2.2.2 同名故障相的精确选线

假设  $I'_X \geq I''_X$ , 则由式(2)、式(3)可得同名相电流之比为

$$K_1 = \frac{|I'_X|}{|I''_X|} = \frac{\alpha_{T1}(1+\eta) + \beta m}{\alpha_{T1}(1+\eta) - \beta m} \quad (9)$$

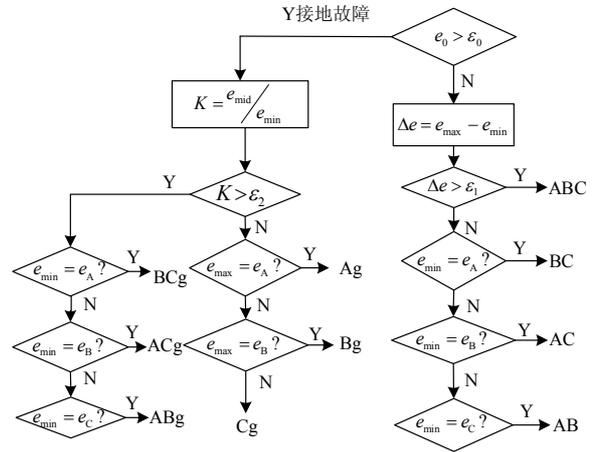


图 2 故障相初选流程图

Fig. 2 Flow chart of primary fault phase selection

式中:  $\eta = \frac{\alpha_{T0} - \alpha_{T1}}{\alpha_{T1}} \frac{I_{K0}}{I_{KX}}$ ;  $m = \frac{I'_{KX} - I''_{KX}}{I'_{KX} + I''_{KX}}$ ;  $\alpha_{T1} = \frac{Z_{RT1} + \beta Z_{LT1}}{Z_{ST1} + Z_{LT1} + Z_{RT1}} = \frac{Z_{RT1} + \beta Z_{LT1}}{Z_{T1}}$ 。

两同名相若有一相故障 ( $m=1$ ), 且故障为不接地故障 ( $I_{K0}=0$ ), 则有  $K_1 = \frac{\alpha_{T1} + \beta}{\alpha_{T1} - \beta}$ 。由该式可得同名相中一相为不接地故障的同名相电流比值情况如图 3。

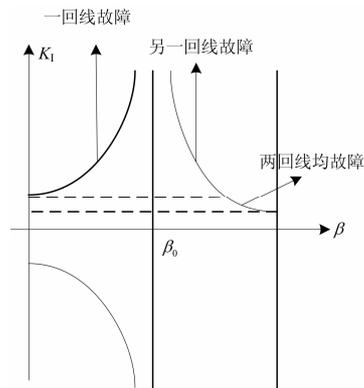


图 3 同名相电流比值关系图

Fig. 3 Figure of same-name-phase current rate

由图 3 分析可得, 若考虑电流方向, 同名相中有一相发生故障时, 两同名相电流比值随  $\beta$  值的增大而增大, 当  $\beta = \beta_0$  时,  $K_1 = \beta$ , 随着  $\beta$  值的增大, 同名非故障相线电流开始反向,  $K_1$  值反向, 而随着  $\beta$  值的继续增大,  $K_1$  值继续减小, 因此说明  $\beta_0$  点为同名相电流一回线故障和两回线相故障的临界点, 且可选择同名相都发生故障时的最大比值为判

据阈值。在实际系统中,  $\eta = \frac{\alpha_{T0} - \alpha_{T1}}{\alpha_{T1}} \cdot \frac{I_{K0}}{I_{KX}}$  值一般很小, 因此接地故障和不接地故障时  $K_1$  值相差很小, 且也有类似图 3 的关系。

基于同名相故障电流比值关系特性<sup>[15]</sup>, 利用提取的同名相电流暂态能量, 即可进行同名相故障选线。以同名相综合考虑时识别出故障类型 Ag 为例, 同名相选线流程如图 4 所示。

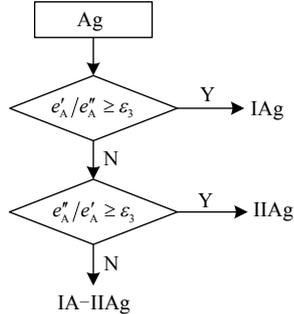


图 4 同名相选线流程图

Fig. 4 Flow chart of same-name-phase fault line selection

选线判据中  $\epsilon_3$  为当两回线同名相都发生故障时的最大比值, 同名相暂态能量比值大于  $\epsilon_3$ , 则较大者为故障相, 若小于  $\epsilon_3$ , 则两同名相都为故障相。通过对比分析得到在不对称不接地出口金属性跨线故障(如  $A'B' - A''$ )时, 同名相电流比值最大。

### 3 仿真与结果分析

利用 PSCAD/EMTDC 软件对以双端电源 500 kV 同塔双回线路系统模型(如图 1 所示)进行仿真。线路具体参数如下。

系统电源参数:  $E=500$  kV; 系统阻抗  $Z_{s1} = j40 \Omega$ ,  $Z_{s0} = j60 \Omega$ 。

输电线路参数: 长度  $l = 300$  km; 正序参数  $R_1 = 0.0226 \Omega/\text{km}$ ,  $X_1 = 0.2835 \Omega/\text{km}$ ,  $C_1 = 0.0132 \Omega/\text{km}$ , 零序参数  $R_0 = 0.1828 \Omega/\text{km}$ ,  $X_0 = 0.8675 \Omega/\text{km}$ ,  $C_0 = 0.0055 \mu\text{F}/\text{km}$ ; 线间零序互感参数  $R_{0m} = 0.1608 \Omega/\text{km}$ ,  $X_{0m} = 0.5835 \Omega/\text{km}$ ,  $C_{0m} = 0.0077 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

PSCAD/EMTDC 仿真平台线路采用分布参数模型、频率依赖(相量)计算算法。利用 100 kHz 频率采样, 四分之一周波数据窗提取信号能量, 分别对距离母线 M 分别为 50 km、150 km、260 km 不同故障位置时进行仿真, 结果均验证了选相方案的有效性。表 2 列出了典型故障的选相结果。根据实际线路对  $\epsilon_0$ 、 $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ 、 $\epsilon_3$  分别整定为: 0.05、0.2、0.005、1.5。

表 2 同塔双回线路故障选相结果

Table 2 Faulty phase selection results of double-circuit lines on the same tower

故障类型	故障相识别	选相结果	
		I回线	II回线
IAg	A相(接地)	A	无
IBC	BC相	BC	无
IABC	ABC相	ABC	无
IBIIC	BC相	B	C
IBCIB	BC相	BC	B
IBCIC	BC相	BC	C
IAIIBC	ABC相	A	BC
IABIIBC	ABC相	AB	BC
IABCIIBC	ABC相	ABC	BC
IABCIIA	ABC相	ABC	A
IAIIAG	A相(接地)	A	A
IBCIIBC	BC相	BC	BC
IABCIIBC	ABC相	ABC	ABC

仿真表明, 基于暂态量的同塔双回线路故障选相方案在单回线故障以及跨线故障时都能可靠快速选相, 且在线路末端时也能保持较高的选相灵敏度。同时改变系统故障时电压初始相角以及过渡电阻, 对 IAIIBC 类型故障进行仿真, 该选相方案均能实现正确选相。

### 4 结论

(1) 基于暂态量的同塔双回线路故障选相方案, 以暂态能量为选相判据, 利用同塔单、双回线故障选相等价原则, 将同塔双回线路同名相综合考虑等效为单回三相线路进行初步故障相识别, 在此基础上根据同名相暂态能量进行同名相选线, 该方案原理简单, 易于编程, 选相动作快速可靠, 能够很好地满足超高速保护和自动重合闸的要求。

(2) 理论分析及仿真实验表明: 该方案在不同故障类型、故障位置下均能可靠动作, 解决了同塔双回线路跨线故障容易误动作的问题。同时选相方案采用暂态量而非初始行波, 且选相结果完全不受故障时刻、过渡电阻、系统振荡以及运行方式等各种工频现象的影响, 有效弥补了工频量故障选相方案以及行波选相的不足。

### 参考文献

- [1] 张嘉旻, 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 Jiamin, GE Rongliang. 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.
- [2] 刘千宽, 黄少锋, 王兴国. 同杆并架双回线基于电流突变量的综合选相[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 53-57.  
LIU Qiankuan, HUANG Shaofeng, WANG Xingguo. Phase selector based on fault component current for double circuit transmission lines on single tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 53-57.
- [3] 张海, 黄少锋. 利用电压辅助电流选相的同杆双回线单端电气量选相原理[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 139-148.  
ZHANG Hai, HUANG Shaofeng. A fault phase selection scheme of currents with assistant voltages for common-tower double-circuit transmission lines using one-terminal electrical quantities[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 139-148.
- [4] 唐宝锋, 徐玉琴. 基于相关分析的同杆双回线故障序分量选相研究[J]. 继电器, 2005, 33(9): 39-42.  
TANG Baofeng, XU Yuqin. Research on superimposed phase selector for double circuits on the same tower[J]. Relay, 2005, 33(9): 39-42.
- [5] 吴烈, 古斌, 谭建成. 一种基于功率增量的高压线路保护选相元件[J]. 电工技术学报, 2008, 23(6): 125-129.  
WU Lie, GU Bin, TAN Jiancheng. A fault phase selector for HV transmission line protective relaying based on power increment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(6): 125-129.
- [6] 罗四倍, 段建东, 张保会. 基于暂态量的EHV/UHV输电线路超高速保护研究现状与展望[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 32-41.  
LUO Sibe, DUAN Jiandong, ZHANG Baohui. Present status and prospect of research and development of transient component based ultra-high-speed protection for EHV/UHV transmission lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 32-41.
- [7] 周健. 基于暂态能量的故障选相方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(15): 10-13.  
ZHOU Jian. Research of phase-selection based on transient energy[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(15): 10-13.
- [8] 段建东, 张宝会, 周艺, 等. 基于暂态量的超高压输电线路故障选相[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 1-6.  
DUAN Jiandong, ZHANG Baohui, ZHOU Yi, et al. Transient-based faulty phase selection in EHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 1-6.
- [9] 王爱军, 李宏, 张小桃. 一种基于小波变换的超高压线路故障选相方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 92-97.  
WANG Aijun, LI Hong, ZHANG Xiaotao. A scheme of faulted phase selection in EHV transmission line based on wavelet transforms[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 92-97.
- [10] 李勋, 龚庆武, 贾晶晶. 采用形态小波变换的超高速故障选相算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 57-63.  
LI Xun, GONG Qingwu, JIA Jingjing. Ultra-high speed fault phase selection method using morphology-wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 57-63.
- [11] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于序电流相位比较和幅值比较的广域后备保护方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 242-250.  
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Algorithm of wide-area protection on comparison of current phase and amplitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 242-250.
- [12] 季涛. 利用电磁式电压互感器实现小电流接地系统行波故障定位和选相[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 172-178.  
JI Tao. Study of the fault location and fault phase selection based on traveling waves using electromagnetic voltage transformer in neutral non-effective grounding system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 172-178.
- [13] 梁景芳, 高厚磊, 苏文博, 等. 一种适用于特高压线路的快速选相方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 95-99.  
LIANG Jingfang, GAO Houlei, SU Wenbo, et al. A method of fast faulted phase detection suitable for UHV transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 95-99.
- [14] 姚早兴, 叶一麟. 同杆并架双回线路的故障选相[J]. 中国电机工程学报, 1991, 11(增刊): 43-48.  
YAO Zaoxing, YE Yilin. The faulted phase selection for parallel transmission lines on the same towers[J]. Proceedings of the CSEE, 1991, 11(S): 43-48.
- [15] PHADKE A G, LU Jihuang. A new computer based integrated distance relay for parallel transmission lines[J]. IEEE Transactions on PAS, 1985, 104(2): 445-452.

收稿日期: 2014-03-19; 修回日期: 2014-07-26

作者简介:

田书(1963-), 女, 教授, 硕士生导师, 主要从事电力系统继电保护及同塔双回线路故障选相等方面的研究;

刘芳芳(1988-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为同塔双回线路故障选相; E-mail: tianlan1003@163.com

任晓明(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为井下电网监控及线路故障选相。