

## 基于环流量的同杆四回输电线路故障选线

徐鹏, 王钢, 李海锋, 黄俊凯, 武霁阳

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 为了消除同杆四回线导线间的耦合问题, 基于先线间解耦、再相间解耦的顺序, 利用矩阵变换的方法提出了一种新的同杆四回线相模变换分析方法。在此基础上结合各单回线故障时的边界条件, 对不同回线各种故障情况下各序环流量之间的相位关系进行全面分析。利用不同回线故障时各环流量间的相角差至少相差  $90^\circ$  的特点, 提出了一种不受系统阻抗影响的基于环流量相角差的同杆四回线故障选线方法。大量的 ATP/EMTP 仿真验证了该方法的准确性和有效性。

**关键词:** 故障选线; 同杆四回线; 环流量

### Fault line selection for four-parallel lines on same tower based on circulation currents

XU Peng, WANG Gang, LI Hai-feng, HUANG Jun-kai, WU Ji-yang

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In order to eliminate the coupling effects between four-parallel transmission lines, this paper proposes a new phase-mode transformation method for four-parallel transmission lines on same tower based on matrix transformation analysis by decoupling mutual inductances between different lines first and then decoupling mutual inductances between different phases. Based on boundary conditions of single-circuit line fault, the phase relationship between sequence circulation components are deduced for different circuit lines faults. And the characteristics that phase-angle difference between the circulation current components is  $90^\circ$  at least are used to propose a new method for fault line selection of four-parallel transmission lines on same tower. The proposed method is not affected by system impedances. A large number of simulations based on ATP/EMTP prove the proposed method's correctness and effectiveness.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50337010); The Crucial Field and Key Breakthrough Project in "Guangdong-Hongkong" (No. 2009498B3201); and The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2009ZM0080).

**Key words:** fault line selection; EHV four-parallel lines on same tower; circulation current

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)03-0078-06

## 0 引言

随着我国城市化进程加快, 城区的不断外延, 电力架空线路走廊的资源越来越少, 使得同杆多回线的应用势必越来越多。在输送相同容量的情况下, 同杆四回线与传统的同杆双回线相比, 它占用的出线走廊宽度更少, 工程造价更低, 建设周期更短, 具有显著的经济效益。因此, 目前我国已经在东北、华东和广东等地区架设了 500/220 kV 的同杆 4 回线路<sup>[1-2]</sup>。

同杆四回线路导线间存在非常复杂的互感。为了消除导线间互感的影响, 对于同杆四回线路通常

采用基于模量的保护原理。即通过相模变换将相互间耦合的相量解耦为模量而实现各种保护原理。但是基于模量的保护原理均难以判别出故障线路。而从故障类型数量看, 与同杆双回线 120 种故障类型相比, 同杆四回线共有 8 184 种类型故障, 其中单回线故障类型有 44 种, 跨线故障类型则多达 8 140 种<sup>[3]</sup>。在这些故障类型中, 单回线故障类型虽然只占 0.5%, 但是其发生故障的机率却极高。因此对同杆四回线单回线故障选线进行研究具有重要的现实意义。

目前对于同杆双回线故障选相已开展了大量的研究工作<sup>[4-5]</sup>, 但关于同杆四回线故障选线方法的研究还很少。文献[6]运用同向量 e 序分量和环流量 f、g、h 序分量之间的相位关系, 提出了一种同杆四回线的故障选线方法。但该方法由于采用了 e 序分量,

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目 (50337010); 粤港关键领域重点突破项目 (2009498B3201); 华南理工大学中央高校基本科研业务费 (2009ZM0080)

必然受系统阻抗的影响。本文在所提出的同杆四回线相模变换基础上, 利用故障边界条件得到单回线故障时各序分量之间的相位关系, 提出一种不受系统阻抗影响的基于环流量的同杆四回线故障选线方法, 并基于 ATP/EMTP 电磁暂态仿真对其正确性和有效性进行了验证。

### 1 同杆四回线模变换及其故障分量网络

同杆四回线的特点是: 不仅同一回线相间存在互感, 而且各回线间也存在互感。设每回线路内部满足对称条件, 则每回线路每相自阻抗为  $Z_S$ , 每回线路相间的互阻抗均为  $Z_M$ 。从杆塔中导线的实际排列出发, 若把每回三相线路等效为一根导体, 则其排列及线间互感阻抗如图 1 所示,  $Z_{X1}$  和  $Z_{X2}$  分别为相邻回线的线间互阻抗和非相邻回线的线间互阻抗。

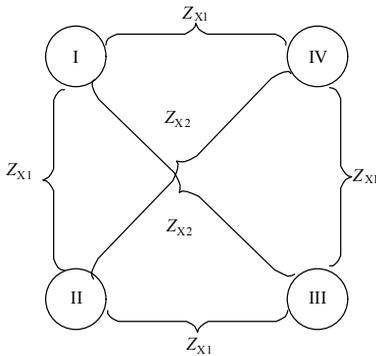


图 1 同杆四回线线间互感

Fig.1 Mutual inductance of four-parallel transmission lines

根据上述分析, 可知同杆四回线阻抗模型如图 2 所示。

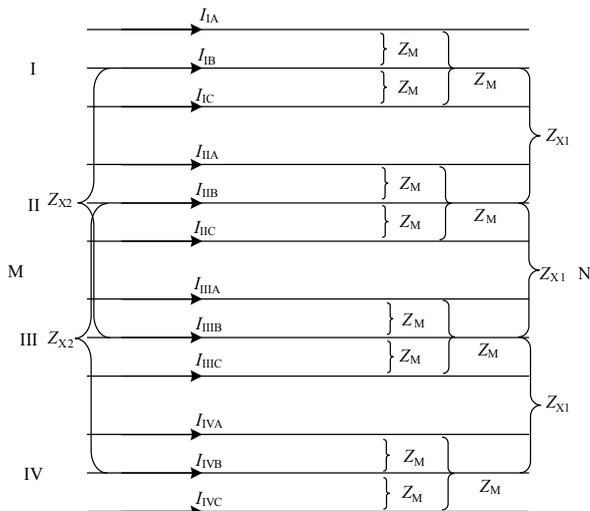


图 2 同杆四回线阻抗模型

Fig.2 The impedance model of four-parallel transmission lines

则同杆四回线电压和电流的矩阵形式如式(1)。

$$\dot{U}_p = \mathbf{Z} \dot{I}_p \quad (1)$$

式中:

$$\begin{aligned} \dot{U}_p &= [\dot{U}_{IA}, \dot{U}_{IB}, \dot{U}_{IC}, \dot{U}_{IIA}, \dot{U}_{IIB}, \dot{U}_{IIC}, \dot{U}_{IIIA}, \dot{U}_{IIBB}, \dot{U}_{IICC}, \dot{U}_{IVA}, \dot{U}_{IVB}, \dot{U}_{IVC}]^T \\ \dot{I}_p &= [\dot{I}_{IA}, \dot{I}_{IB}, \dot{I}_{IC}, \dot{I}_{IIA}, \dot{I}_{IIB}, \dot{I}_{IIC}, \dot{I}_{IIIA}, \dot{I}_{IIBB}, \dot{I}_{IICC}, \dot{I}_{IVA}, \dot{I}_{IVB}, \dot{I}_{IVC}]^T \\ \mathbf{Z} &= \begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 & Z_3 & Z_2 \\ Z_2 & Z_1 & Z_2 & Z_3 \\ Z_3 & Z_2 & Z_1 & Z_2 \\ Z_2 & Z_3 & Z_2 & Z_1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

其中:

$$\mathbf{Z}_1 = \begin{bmatrix} Z_S & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_S & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_S \end{bmatrix} \quad \mathbf{Z}_2 = \begin{bmatrix} Z_{X1} & Z_{X1} & Z_{X1} \\ Z_{X1} & Z_{X1} & Z_{X1} \\ Z_{X1} & Z_{X1} & Z_{X1} \end{bmatrix} \quad \mathbf{Z}_3 = \begin{bmatrix} Z_{X2} & Z_{X2} & Z_{X2} \\ Z_{X2} & Z_{X2} & Z_{X2} \\ Z_{X2} & Z_{X2} & Z_{X2} \end{bmatrix}$$

本文的模变换思路是先消去线间互感, 再消去相间互感使  $\mathbf{Z}$  变换为对角阵。对于存在互感的同杆四回线, 可将其电流分解为对称的 e 序分量、f 序分量、g 序分量和 h 序分量, 如图 3 所示。

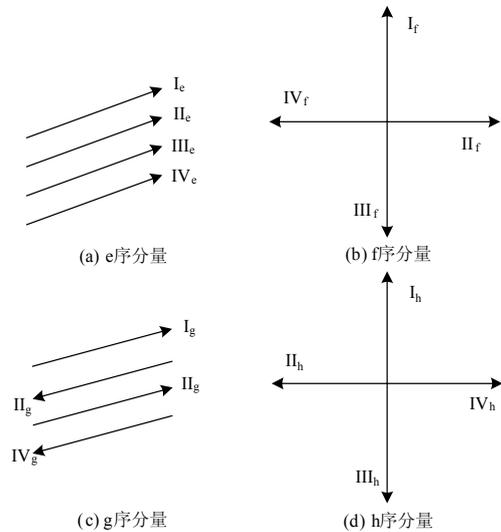


图 3 四线系统对称分量

Fig.3 Symmetrical components of four-parallel transmission lines

由于每序分量电流在其他三序分量回路中产生的感应电动势相抵消, 因此消除了各回路之间的线间互感, 其变换矩阵可为<sup>[3]</sup>:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -j & -1 & j \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & j & -1 & -j \end{bmatrix}$$

于是, 由  $\mathbf{P}$  矩阵与对称分量矩阵结合即可同时消除线间和相间互感, 得同杆四回线模变换矩阵  $\mathbf{M}$  为式 (2)。

$$M = \frac{1}{12} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & j & j & j & -1 & -1 & -1 & -j & -j & -j \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -j & -j & -j & -1 & -1 & -1 & j & j & j \\ 1 & a & a^2 & 1 & a & a^2 & 1 & a & a^2 & 1 & a & a^2 \\ 1 & a & a^2 & j & ja & ja^2 & -1 & -a & -a^2 & -j & -ja & -ja^2 \\ 1 & a & a^2 & -1 & -a & -a^2 & 1 & a & a^2 & -1 & -a & -a^2 \\ 1 & a & a^2 & -j & -ja & -ja^2 & -1 & -a & -a^2 & j & ja & ja^2 \\ 1 & a^2 & a & 1 & a^2 & a & 1 & a^2 & a & 1 & a^2 & a \\ 1 & a^2 & a & j & ja^2 & ja & -1 & -a^2 & -a & -j & -ja^2 & -ja \\ 1 & a^2 & a & -1 & -a^2 & -a & 1 & a^2 & a & -1 & -a^2 & -a \\ 1 & a^2 & a & -j & -ja^2 & -ja & -1 & -a^2 & -a & j & ja^2 & ja \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,  $a = e^{j120}$ 。

利用该矩阵, 可得同杆四回线路上任意一点的电流相分量与序分量的关系为如式 (3)。

$$I_m = M I_p \quad (3)$$

其中:  $I_m = [I_{e0}, I_{f0}, I_{g0}, I_{h0}, I_{e1}, I_{f1}, I_{g1}, I_{h1}, I_{e2}, I_{f2}, I_{g2}, I_{h2}]^T$  为同杆四回线电流序分量;  $e_0, e_1, e_2$  分别为同向量的零、正、负序分量;  $f_0, f_1, f_2, g_0, g_1, g_2, h_0, h_1, h_2$  分别为各环流模分量的零、正、负序分量。

根据叠加原理, 故障后电流可以分解为故障前负荷电流与故障分量电流之和。对于同杆四回线 12 序分量同样可以采用故障分量进行分析, 图 4 为内部故障时的 12 序故障分量电路图。如图 4 所示, 在四回线以外的系统中 e 序电流是线路电流的 4 倍, 因而在各 e 序网络中系统阻抗要增加 4 倍; 而 f、g、h 序电流在线路以外的系统中电流为 0, 因此 f、g、h 序网络与系统外阻抗无关。

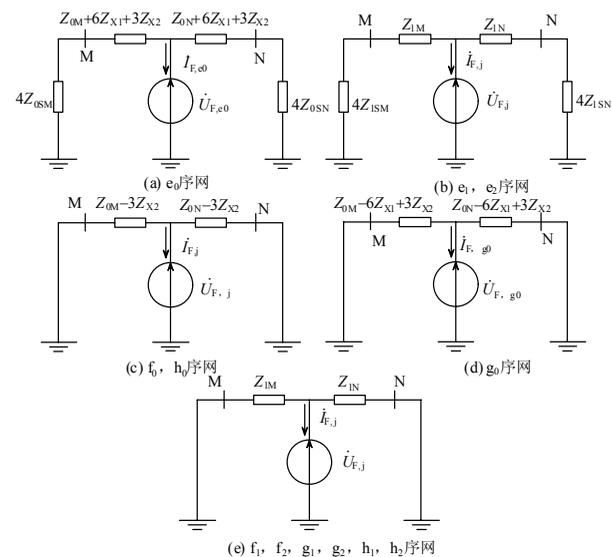


图 4 12 序故障分量网络

Fig.4 Twelve-sequence fault component networks

## 2 同杆四回线单回线故障时的序分量特征

### 2.1 I 回线故障时

本文的分析均以 I 回线 A 相为基准。

#### a) 单相接地短路

I 回线 A 相接地短路 (记为 IAG) 的电流边界条件为:

$$I_{IB} = I_{IC} = I_{IA} = I_{IB} = I_{IC} = I_{IIA} = I_{IIB} = I_{IIC} = I_{IVA} = I_{IVB} = I_{IVC} = 0 \quad (4)$$

把式 (4) 代入式 (3), 可得各序分量电流之间的关系为:

$$I_{ei} = I_{fi} = I_{gi} = I_{hi} \quad i = 0, 1, 2 \quad (5)$$

#### b) 两相接地短路

I 回线 BC 相接地短路 (记为 IBCG) 的电流边界条件为:

$$I_{IA} = I_{IIA} = I_{IIB} = I_{IIC} = I_{IIIA} = I_{IIIB} = I_{IIIC} = I_{IVA} = I_{IVB} = I_{IVC} = 0 \quad (6)$$

将式 (6) 经  $M$  矩阵变换得各序分量电流之间的关系如式 (5)。

#### c) 相间短路

I 回线 BC 相短路 (记为 IBC) 的电流边界条件为:

$$\begin{cases} I_{IB} + I_{IC} = 0 \\ I_{IA} = I_{IIA} = I_{IIB} = I_{IIC} = I_{IIIA} = I_{IIIB} = I_{IIIC} = I_{IVA} = I_{IVB} = I_{IVC} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

将式 (7) 代入式 (3), 可得各序分量电流之间的关系为:

$$\begin{cases} I_{e0} = I_{f0} = I_{g0} = I_{h0} = 0 \\ I_{ei} = I_{fi} = I_{gi} = I_{hi} \quad i = 1, 2 \end{cases} \quad (8)$$

#### d) 三相短路

当 I 回线发生三相短路时, 由其边界条件可得各序分量的关系如式 (8) 所示。如果为三相短路接地时, 则由于零序分量不为零, 其各序分量的关系如式 (5)。

对于其他相别故障, 上述结论同样满足。因此, 可得: I 回线故障时, 不管故障类型、故障相别如何, 其各序分量均存在如下关系:

$$I_{ei} = I_{fi} = I_{gi} = I_{hi} \quad i = 0, 1, 2 \quad (9)$$

### 2.2 II、III、IV 回线故障时

同理, 采用上面的方法对其他回线故障时各序分量特征进行分析, 可得式 (10) ~ (12)。

#### (A) II 回线故障特征

$$I_{ei} = jI_{fi} = -I_{gi} = -jI_{hi} \quad i = 0, 1, 2 \quad (10)$$

#### (B) III 回线故障特征

$$I_{ei} = -I_{fi} = I_{gi} = -I_{hi} \quad i = 0, 1, 2 \quad (11)$$

#### (C) IV 回线故障特征

$$I_{ei} = -jI_{fi} = -I_{gi} = jI_{hi} \quad i = 0, 1, 2 \quad (12)$$

### 3 同杆四回线单回线故障选线原理

通过上面的分析可知,不同回线发生故障时,利用 e 序、f 序、g 序和 h 序对应电流序分量间的相位关系,完全能够可靠地识别出故障线路。而为了避免在相间故障时零序分量为零无法进行相位比较,在实际应用中则只采用 1、2 序分量。另外,上述分析的是故障点处 12 序电流分量的关系,而实际获取的则是线路两侧电流值。由图 4 (e) 可知,  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $g_1$ 、 $g_2$ 、 $h_1$  和  $h_2$  序电流都是只流经同杆四回线内部的环流量,对于这 6 个分量,线路两侧电流与故障点电流的关系均为(以线路 M 侧为例):

$$i_{M,j} = \frac{Z_{IN}}{Z_{IM} + Z_{IN}} i_{F,j} = k i_{F,j} \quad (13)$$

式中,  $i_{M,j}$  为线路 M 侧的  $j$  序电流分量;  $i_{F,j}$  为故障点处的  $j$  序电流分量;  $j$  为序号,分别取  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $g_1$ 、 $g_2$ 、 $h_1$  和  $h_2$ 。

由于各环流量所对应的正、负序阻抗相等,因此式(13)中各序分量的分布系数  $k$  均相等。即对于  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $g_1$ 、 $g_2$ 、 $h_1$  和  $h_2$  这 6 序分量,故障点处各序电流分量之间的关系等同于线路两侧各序电流分量之间的关系。

而对于 e 序分量,则由图 4 (b) 可知其正、负序电流除流经同杆四回线外,还流经线路外系统。此时其线路两侧电流与故障点电流的关系为(以线路 M 侧为例)式(14)。

$$i_{M,j} = \frac{Z_{IN} + 4Z_{ISN}}{Z_{IM} + 4Z_{ISM} + Z_{IN} + 4Z_{ISN}} i_{F,j} = k' i_{F,j} \quad (14)$$

式中:  $j$  分别取  $e_1$  和  $e_2$ 。

由式(14)可知, e 序分量的分布系数  $k'$  由于受两侧系统阻抗影响,显然与 f、g、h 序分量的分布系数  $k$  不同。即此时线路两侧的  $e_1$  和  $e_2$  序电流分量与其余 6 序电流分量的关系将变得与故障点处的不同。

在纯交流电网情况下,由于线路阻抗和系统阻抗一般均以电抗为主,此时  $k'$  与  $k$  虽然大小不同,但相位是接近的,因此对于上述只是基于相位关系的故障选线原理影响不大。但是,对于交直流互联系统而言,由于直流系统的影响,使得故障分量的系统阻抗可能呈现出容性<sup>[7]</sup>,此时必然造成分布系数  $k'$  的相位发生较大变化。在这种情况下若采用 e 序分量进行相位比较则有可能不满足故障选线的要求。所以,在实际应用时只选取环流量  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $g_1$ 、 $g_2$ 、 $h_1$  和  $h_2$  进行故障选线。

同杆四回线单回线故障时环流量的故障特征如表 1 所示。

表 1 各回线故障时环流量的故障特征

Tab.1 Circulation components fault characteristics of different

lines faults		
故障线路	$\arg(\dot{I}_{fi}/\dot{I}_{gi})$	$\arg(\dot{I}_{gi}/\dot{I}_{hi})$
I 回线	$0^\circ$	$0^\circ$
II 回线	$-90^\circ$	$-90^\circ$
III 回线	$180^\circ$	$180^\circ$
IV 回线	$90^\circ$	$90^\circ$

注:  $i$  为 1, 2

从表 1 可知,不同回线故障时的故障特征差异非常大,所对应的环流量相角差至少相差  $90^\circ$ ,因此仅根据  $\dot{I}_{fi}/\dot{I}_{gi}$  或  $\dot{I}_{gi}/\dot{I}_{hi}$  的相位关系已经可以可靠地识别出故障线路。在实际应用时两者均可以进行判别以增加判据的冗余。此外,以上所述各电流都是理论值,在实际系统中会存在不平衡电流、电流互感器测量误差等影响因素,在实际判断时,还必需考虑一定的相角裕度。

图 5 为同杆四回线故障选线的流程图,图中  $\varphi$  为相角裕度。

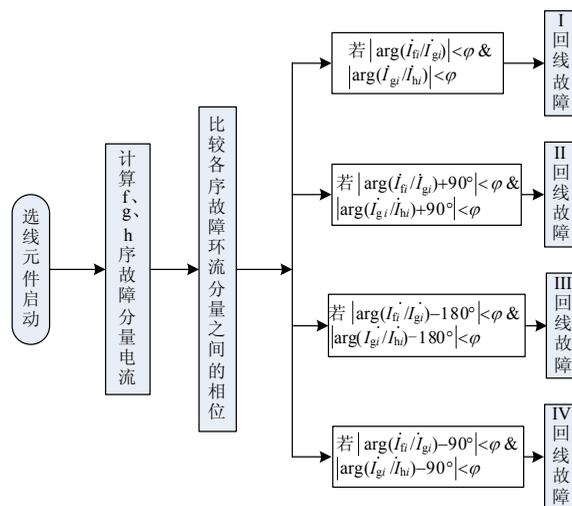


图 5 同杆四回线故障选线流程

Fig.5 Flow chart of faulted line selection for four parallel lines

### 4 仿真实验

为了验证本文所提同杆四回线故障测距算法的正确性和有效性,采用 ATP/EMTP 对同杆四回线各单回线故障进行了仿真计算,仿真系统模型如图 6 所示,其中 M 端系统参数为:电源  $E_M=288.63$  kV  $\angle -5^\circ$ ,系统自阻抗  $Z_S=j59.345 \Omega$ ,系统互阻抗  $Z_M=j4.363 \Omega$ ; N 端系统阻抗参数为:电源  $E_N=288.63$  kV  $\angle 0^\circ$ ,系统自阻抗  $Z_S=j67.256 \Omega$ ,系统互阻抗  $Z_M=j7.259 \Omega$ ;线路长 80 km,参数采

用 2006 年投产的华东电网公司梅里—利港同杆 4 回 500 kV 超高压交流输电线路的设计参数<sup>[8]</sup>, 仿真中线路采用了 J Marti 模型。

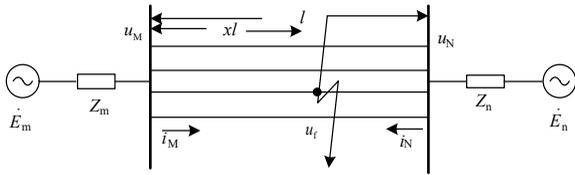


图 6 500 kV 同杆四回输电系统模型

Fig.6 The four-parallel 500 kV transmission system model

表 2 和表 3 给出了采用四回线完全换位模型时各环流量的相位关系情况, 由于正序与负序的情况完全相同, 表中均只给出了正序的结果。其中, 表 2 为金属性故障, 表 3 为含过渡电阻的情况, 其接地电阻均取 300 Ω, 相间电阻则取 10 Ω。由表 2 和表 3 可见, 对于各种单回线故障, 各环流量的相位关系与理论分析的完全一致, 即使在 300 Ω 过渡电阻的情况下偏差也非常小。

表 2 平衡线路故障仿真计算结果

Tab.2 Simulation results of symmetrical line faults (°)

故障类型	$\arg(\dot{I}_{f1}/\dot{I}_{g1})$	$\arg(\dot{I}_{g1}/\dot{I}_{h1})$
I 回线	I AG	0
	I BCG	0
	I BC	0
	I ABCG	0
II 回线	II AG	-90
	II BCG	-90
	II BC	-90
	II ABCG	-90
III 回线	III AG	180
	III BCG	180
	III BC	180
	III ABCG	180
IV 回线	IV AG	90
	IV BCG	90
	IV BC	90
	IV ABCG	90

实际运行的同杆四回输电线路是不平衡线路, 为此本文还利用上述输电线路在不换位情况下的线路模型对所提方法进行了验证, 其中 4 回线各相自阻抗和互阻抗参数如附录表 A1 所示。表 A1 中一个坐标位置上的 2 个数据分别表示电阻和电抗。表 4 给出了在这种情况下仿真结果, 仿真中考虑了过渡电阻的影响, 接地电阻取 300 Ω, 相间电阻则取

10 Ω。从表 4 可以看出, 此时各环流量间的相位关系与上面的理想状态相比出现了偏差, 但其偏差只是在较小的范围内, 最大的偏差为 19.3°, 完全可以通过设置一定的相角裕度 φ (如设为 20°) 加以解决。

表 3 含过渡电阻的平衡线路故障仿真计算结果

Tab.3 Simulation results of symmetrical line faults with transition resistance (°)

故障类型	$\arg(\dot{I}_{f1}/\dot{I}_{g1})$	$\arg(\dot{I}_{g1}/\dot{I}_{h1})$
I 回线	I AG	0.851
	I BCG	0.031
	I BC	0.034
	I ABCG	-0.042
II 回线	II AG	-90.745
	II BCG	-89.943
	II BC	-90.431
	II ABCG	-90.032
III 回线	III AG	180.964
	III BCG	179.843
	III BC	180.657
	III ABCG	179.982
IV 回线	IV AG	90.981
	IV BCG	90.029
	IV BC	90.057
	IV ABCG	90.081

表 4 不平衡线路故障仿真计算结果

Tab.4 Simulation results of unsymmetrical line faults (°)

故障类型	$\arg(\dot{I}_{f1}/\dot{I}_{g1})$	$\arg(\dot{I}_{g1}/\dot{I}_{h1})$
I 回线	I AG	6.474 7
	I BCG	3.105 8
	I BC	3.386 5
	I ABCG	1.977 2
II 回线	II AG	-100.632
	II BCG	-86.742 1
	II BC	-86.392 6
	II ABCG	-88.029 3
III 回线	III AG	167.528 5
	III BCG	183.509 9
	III BC	183.771 4
	III ABCG	181.733
IV 回线	IV AG	74.447 7
	IV BCG	87.086 7
	IV BC	86.879 5
	IV ABCG	87.758 1

## 5 结论

在同杆四回线模变换分析的基础上, 本文根据四回线发生单回线故障时的边界条件, 推导出各序分量之间的相位关系, 进而提出了一种基于环流量

的同杆 4 回线故障选线方法。该方法原理简单、可靠, 消除了两端系统阻抗对选线准确性的影响。应用 ATP/EMTP 基于实际线路参数的仿真结果表明本文所提方法准确、有效。

附表 A1

表 A1 不平衡同塔四回线阻抗参数

Tab.A1 Impedance data of unsymmetrical of four-parallel transmission lines on the same tower												$\Omega/\text{km}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	9.418E-02											
	3.218E-01											
2	6.475E-02	7.785E-02										
	1.525E-01	3.750E-01										
3	6.195E-02	5.634E-02	7.302E-02									
	1.451E-01	1.481E-01	4.015E-01									
4	5.634E-02	5.853E-02	5.467E-02	9.418E-02								
	7.737E-02	1.068E-01	9.294E-02	3.218E-01								
5	5.853E-02	5.705E-02	5.398E-02	6.475E-02	7.785E-02							
	1.068E-01	1.536E-01	1.216E-01	1.525E-01	3.750E-01							
6	5.467E-02	5.398E-02	5.135E-02	6.195E-02	5.634E-02	7.302E-02						
	9.294E-02	1.216E-01	1.181E-01	1.451E-01	1.481E-01	4.015E-01						
7	6.110E-02	5.641E-02	5.408E-02	5.657E-02	5.492E-02	5.229E-02	7.298E-02					
	1.391E-01	1.648E-01	1.997E-01	1.045E-01	1.388E-01	1.330E-01	3.990E-01					
8	5.748E-02	5.346E-02	5.161E-02	5.368E-02	5.223E-02	5.005E-02	5.164E-02	6.840E-02				
	1.219E-01	1.346E-01	1.984E-01	9.572E-02	1.207E-01	1.270E-01	1.857E-01	4.237E-01				
9	5.706E-02	5.360E-02	5.157E-02	5.505E-02	5.295E-02	5.077E-02	5.183E-02	4.972E-02	6.875E-02			
	1.182E-01	1.384E-01	1.781E-01	1.037E-01	1.297E-01	1.409E-01	1.956E-01	2.217E-01	4.208E-01			
10	5.657E-02	5.492E-02	5.229E-02	6.110E-02	5.641E-02	5.408E-02	5.308E-02	5.069E-02	5.132E-02	7.298E-02		
	1.045E-01	1.388E-01	1.330E-01	1.391E-01	1.648E-01	1.997E-01	1.554E-01	1.410E-01	1.595E-01	3.990E-01		
11	5.368E-02	5.223E-02	5.005E-02	5.748E-02	5.346E-02	5.161E-02	5.069E-02	4.873E-02	4.925E-02	5.164E-02	6.842E-02	
	9.572E-02	1.207E-01	1.270E-01	1.219E-01	1.346E-01	1.984E-01	1.410E-01	1.419E-01	1.595E-01	1.857E-01	4.237E-01	
12	5.483E-02	5.286E-02	5.067E-02	5.718E-02	5.361E-02	5.160E-02	5.124E-02	4.919E-02	4.969E-02	5.184E-02	4.973E-02	6.875E-02
	1.023E-01	1.283E-01	1.384E-01	1.191E-01	1.382E-01	1.821E-01	1.561E-01	1.561E-01	1.809E-01	1.962E-01	2.326E-01	4.211E-01

## 参考文献

- [1] 韦钢, 薛敏. 同杆并架4回输电电路的探讨[J]. 电力建设, 1999(3): 4-8.  
WEI Gang, XUE Min. Investigation on the four-circuit transmission lines erected on the same pole[J]. Electric Power Construction, 1999(3):4-8.
- [2] 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 Jia-min, GE Rong-liang. Features and application of power transmission technology of
- [3] XU Peng, WANG Gang, LI Hai-feng, et al. A new phase-mode transformation method for fault analysis of four-parallel transmission lines[J]. Asia PES, 2009.
- [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 Bao-feng, XU Yu-qin. Research on superimposed phase selector for double circuit lines on the same tower[J]. Relay, 2005, 33 (9) : 39-42.

(下转第 118 页 continued on page 118)

- SHI Xue-mei, WANG Zhi-hong, GUI Guo-liang, et al. Research on the influence of generators based on detailed excitation system models and parameters to power grid dynamic stability[J]. Relay, 2006, 35(21).
- [4] 朱方, 刘增煌, 高光华. 电力系统稳定器对三峡输电系统动态稳定的影响[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 44-47.  
ZHU Fang, LIU Zeng-huang, GAO Guang-hua. Influence of power system stabilizer on dynamic stability of Three Gorges power system[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 44-47.
- [5] 陶向宇, 刘增煌, 赵红光. 多机电力系统广泛配置PSS的可行性分析[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 29-34.  
TAO Xiang-yu, LIU Zeng-huang, ZHAO Hong-guang. Study on the feasibility of wide usage of PSS in multi-machine power system[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 29-34.
- [6] 王青, 闵勇, 张毅威. 超低频区间振荡现象的机理分析[J]. 继电器, 2006, 34(12):63-68.  
WANG Qing, MIN Yong, ZHANG Yi-wei. Mechanism analysis of ultra low frequency inter-area oscillation[J]. Relay, 2006, 34(12):63-68.
- [7] 王官宏, 陶向宇, 李文峰, 等. 原动机调节系统对电力系统动态稳定的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 80-86.  
WANG Guan-hong, TAO Xiang-yu, LI Wen-feng, et al. Influence of turbine governor on power system dynamic stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 80-86.
- [8] 朱方, 赵红光, 刘增煌, 等. 大区电网互联对电力系统动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 1-7.  
ZHU Fang, ZHAO Hong-guang, LIU Zeng-huang, et al. The influence of large power grid interconnected on power system dynamic stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 1-7.
- [9] 易于. 复杂电力系统阻尼特性分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2004.
- [10] Kunder P. Power system stability and control[M]. United States of America: McGraw-Hill, Inc. 1994: 699-822.
- [11] 刘取. 励磁控制与电力系统稳定[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 111-163.
- [12] 李芳, 等. PSASP综合稳定程序小干扰稳定性分析程序(7.0版) [M]. 北京: 中国电力科学分析院, 2009: 1-13.
- [13] 李芳, 等. PSASP综合稳定程序用户手册(7.0版)[M]. 北京: 中国电力科学分析院, 2009.

收稿日期: 2010-02-20; 修回日期: 2010-04-27

作者简介:

智勇(1972-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析、运行与控制;

王官宏(1982-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统分析与建模技术; E-mail: wanggh@epri.sgcc.com.cn

肖洋(1977-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统分析与建模技术。

(上接第 83 页 continued from page 83)

- [5] 文明浩, 李瑞生. 基于阻抗比较的同杆并架选相新方法[J]. 继电器, 2007, 34(17): 1-3.  
WEN Ming-hao, LI Rui-sheng. A new fault phase selector for double circuit lines on the same tower based on impedance comparison[J]. Relay, 2007, 34(17): 1-3.
- [6] 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): 57-59.  
DENG Meng-hua, FAN Chun-ju, SHU Qiao-jun, et al. Method for fault line selection of four joints parallel lines on same tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(15): 57-59.
- [7] 李海锋, 张璞, 王钢, 等. 直流馈入下的工频变化量方向纵联保护动作特性分析(一) 直流系统等值工频变化量阻抗模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 41-46.  
LI Hai-feng, ZHANG Pu, WANG Gang, et al. Performance of directional protection based on variation of power-frequency components in HVDC/AC interconnected system(I)- DC-system impedance of power-frequency component variation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 41-46.
- [8] 黄爱华, 郑旭, 钱广忠. 同杆并架多回路技术的应用[J]. 华东电力, 2006, 34(8): 60-63.  
HUANG Ai-hua, ZHENG Xu, QIAN Guang-zhong. Application of technology of constructing multiple circuits on the same tower[J]. East China Electric Power, 2006, 34(8): 60-63.

收稿日期: 2010-02-08; 修回日期: 2010-03-16

作者简介:

徐鹏(1983-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统同杆多回线故障分析与故障测距;

王钢(1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统保护控制、自动化及可靠性; E-mail: wg\_scut@263.net

李海锋(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统故障分析、保护控制及自动化。E-mail: lihf@scut.edu.cn