

DOI: 10.7667/PSPC161075

不对称参数同杆双回线选相方法研究

朱忆洋¹, 都洪基¹, 赵青春²

(1. 南京理工大学, 江苏 南京 210094; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 线路参数不对称的同杆双回线无法使用传统的六序分量法进行解耦。针对这个问题, 提出一种新的解耦方法。首先, 三相分解成正序、负序、零序分量; 然后, 耦合的零序分量进行解耦, 分解为同向和反向分量。该方法解决了不对称参数同杆双回线的零序互感问题。当线路发生故障时, 可以根据故障边界条件得到序分量之间的幅值和相位关系。不同线路发生故障时, 两回线正序分量的电流幅值不同。同一回线发生不同类型的故障时, 六序电流分量的幅值有对应的关系。同一类型的不同相发生故障时, 六序分量的相位不同。根据上述关系提出了相应的选相判据, 并给出了选相流程和方法。PSCAD 仿真结果表明, 该方法具有良好的选择性, 且不受故障类型, 故障位置以及过渡电阻的影响。

关键词: 不对称参数; 同杆双回线; 序分量; 选线; 选相

Research on phase selection for double-circuit lines on the same tower with asymmetrical parameters

ZHU Yiyang¹, DU Hongji¹, ZHAO Qingchun²

(1. Nanjing University of Technology and Engineering, Nanjing 210094, China;

2. Nari-relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Double-circuit lines on the same tower with asymmetrical parameters can not be decoupling with traditional six-sequence components. To solve this problem, a new decoupling method is proposed. Three phases are decomposed to positive, negative and zero sequence component first, but there are mutual inductance between zero sequence component. Then the zero sequence is divided into the same direction component and the reverse component. The method solves the problem of zero sequence mutual inductance of double circuit lines on the same tower with asymmetric parameters. When a line fault occurs, the relationship between the current components can be found out by the boundary conditions. If a fault occurs on different lines, the amplitudes of positive sequence components of two lines are different. If different kinds of fault occur on the same line, the amplitudes of six-sequence component have corresponding relation. If a fault occurs on different phases with the same types, the six-sequence component' phase is different. This paper proposes relevant phase selection criterion according to the above relations, and also gives its procedure and method. PSCAD simulation results show that the method can accurately measure the phase of fault and is not affected by the type of fault, fault location, fault resistance.

Key words: asymmetrical parameter; double-circuit lines on the same tower; sequence component; line selection; phase selection

0 引言

目前土地资源紧缺, 架设输电线路的成本也越来越高, 输电的容量日益增大, 同杆双回线可以提高单位输电走廊宽度的输电能力, 得到日益广泛的

应用。在线路发生故障时, 正确地选出故障线路和故障相位, 并立即切除, 对于减小故障损失, 迅速恢复正常供电有重要的意义^[1]。由于同杆双回线故障情况很多, 线路之间又相互影响, 因此对其进行故障选相就更为复杂。

选相方法主要分为两类, 突变量选相^[2-4]以及稳态量选相^[5-7]。目前国内高压双回线路保护装置大多采用突变量选相原理和稳态量选相原理相结合的方法

基金项目: 国家电网公司科技项目“特高压交流输电工程应用技术深化研究”

法。文献[8]提出了基于故障分量方向元件的选相方案。文献[9]提出了一种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。文献[10]提出了一种基于暂态量的同塔双回线路故障选相方案。

由于双回线间的耦合比较复杂,大多用六序分量法^[11-13]来进行解耦。文献[14]提出了基于六序分量进行故障选相的方法,并能准确地选出故障相。但是六序分量法只适用于参数完全对称的同杆双回线。实际上很多双回线是在单回线的基础上进行改造的,两回线架设的时间不同,导致线路的型号可能不一样,加上导线换位的影响,两回线的参数极大可能会不相同,这时六序分量法就不再适用,需要寻找一种新的解耦方法。文献[15]提出了适用于线路参数不对称的同杆双回线的序分量法。利用这种解耦方法对线路电流进行解耦,可以得到相互独立的六序电流分量。

通过对双回线发生各种故障情况下序分量的特征进行分析,可以发现:1)若线路发生单回线故障,在不同回线上发生故障时,序分量电流之间存在固定的关系;2)同一回线发生不同类型故障以及不同相发生同种类型故障时,序分量电流之间存在固定的幅值和相位关系。结合上述序分量之间的关系,本文提出一种双回线发生单回线故障时完整的选线和选相方法。这种方法消除了双回线互感的影响,能够准确地进行故障选线和选相。

1 不同参数双回线的解耦方法

假设同杆双回线输电线路不对称,两回线的参数不同,但是线路内部的参数对称。其中MN部分的线路参数如图1所示。其中,I回线的线路自阻抗为 Z_{I1} ,线路互阻抗为 Z_{m1} ,II回线的自感为 Z_{I2} ,互感为 Z_{m2} ,线间互感为 Z_p 。

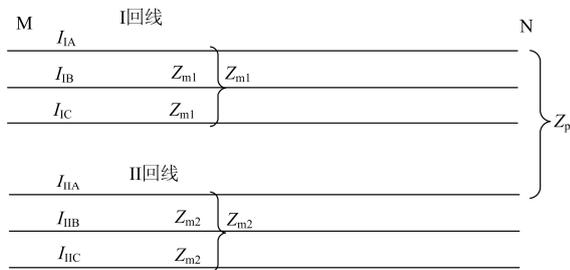


图1 同杆双回线路参数

Fig. 1 Parameters of double circuit lines on the same tower

同杆双回线电压和电流之间的关系为

$$U_{ABC} = Z \times I_{ABC} \quad (1)$$

式中: $U_{ABC} = [U_{IA}, U_{IB}, U_{IC}, U_{IIA}, U_{IIB}, U_{IIC}]^T$ 为同杆双回线上每一相的电压; $I_{ABC} = [I_{IA}, I_{IB}, I_{IC}, I_{IIA}, I_{IIB}, I_{IIC}]^T$ 为对应的每一相的电流; Z 表达式如式(2)。

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{I1} & Z_{m1} & Z_{m1} & Z_p & Z_p & Z_p \\ Z_{m1} & Z_{I1} & Z_{m1} & Z_p & Z_p & Z_p \\ Z_{m1} & Z_{m1} & Z_{I1} & Z_p & Z_p & Z_p \\ Z_p & Z_p & Z_p & Z_{I2} & Z_{m2} & Z_{m2} \\ Z_p & Z_p & Z_p & Z_{m2} & Z_{I2} & Z_{m2} \\ Z_p & Z_p & Z_p & Z_{m2} & Z_{m2} & Z_{I2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

在不对称参数同杆双回线中,两回线的自阻抗和互阻抗均不相等。如果使用传统的解耦方法,如六序分量法,将无法进行完全的解耦。可以根据文献[15]的解耦方法先进行相间解耦,利用对称分量法的 Q 矩阵将双回线分解为正序负序零序分量。

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & & & \\ & 1 & a^2 & a & & \\ & 1 & a & a^2 & & \\ & & & & 1 & 1 & 1 \\ & & & & 1 & a^2 & a \\ & & & & 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

解耦后可得

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{I0} \\ \Delta U_{I1} \\ \Delta U_{I2} \\ \Delta U_{II0} \\ \Delta U_{II1} \\ \Delta U_{II2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{I0} & & & & & \\ & Z_{I1} & & & & \\ & & Z_{I2} & & & \\ 3Z_p & & & Z_{II0} & & \\ & & & & Z_{II1} & \\ & & & & & Z_{II2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{I0} \\ I_{I1} \\ I_{I2} \\ I_{II0} \\ I_{II1} \\ I_{II2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: ΔU_{I0} 、 ΔU_{I1} 、 ΔU_{I2} 为I回线零序、正序负序电压降; ΔU_{II0} 、 ΔU_{II1} 、 ΔU_{II2} 为II回线零序、正序负序电压降; I_{I0} 、 I_{I1} 、 I_{I2} 为I回线零序、正序、负序电流; I_{II0} 、 I_{II1} 、 I_{II2} 为II回线零序、正序、负序电流。I回线零序阻抗 $Z_{I0} = Z_{I1} + 2Z_{m1}$,II回线零序阻抗 $Z_{II0} = Z_{I2} + 2Z_{m2}$,I回线正序负序阻抗 $Z_{I1} = Z_{I2} = Z_{I1} - Z_{m1}$,II回线正序负序阻抗 $Z_{II1} = Z_{II2} = Z_{I2} - Z_{m2}$ 。

由式(4)可以看出,正序负序分量相互独立,零序分量之间仍有互感,需要对零序分量进行解耦。需要将阻抗矩阵对角化处理,相对应的特征值为对角线上的阻抗值,对应的特征向量能组成解耦矩阵 M 。

$$M = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ k_1 & & & k_2 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$k_1 = \frac{Z_{II0} - Z_{I0} + \sqrt{(Z_{II0} - Z_{I0})^2 + 36 \times Z_p^2}}{6Z_p} \quad (6)$$

$$k_2 = \frac{Z_{II0} - Z_{I0} - \sqrt{(Z_{II0} - Z_{I0})^2 + 36 \times Z_p^2}}{6Z_p} \quad (7)$$

经过 M 进一步对零序分量解耦后可得

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{01} \\ \Delta U_{I1} \\ \Delta U_{I2} \\ \Delta U_{02} \\ \Delta U_{II1} \\ \Delta U_{II2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{01} & & & & & \\ & Z_{I1} & & & & \\ & & Z_{I2} & & & \\ & & & Z_{02} & & \\ & & & & Z_{II1} & \\ & & & & & Z_{II2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{01} \\ I_{I1} \\ I_{I2} \\ I_{02} \\ I_{II1} \\ I_{II2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $\Delta U_{01}, \Delta U_{02}, I_{01}, I_{02}$ 为电压和电流解耦后的零序 1, 2 分量; Z_{01}, Z_{02} 为解耦后的零序 1, 2 分量电阻。

$$Z_{01} = \left(Z_{II0} + Z_{I0} + \sqrt{(Z_{II0} - Z_{I0})^2 + 36 \times Z_p^2} \right) / 2 \quad (9)$$

$$Z_{02} = \left(Z_{II0} + Z_{I0} - \sqrt{(Z_{II0} - Z_{I0})^2 + 36 \times Z_p^2} \right) / 2 \quad (10)$$

总的解耦矩阵为

$$N = QM = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & & \\ 1 & a^2 & a & 1 & & \\ 1 & a & a^2 & 1 & & \\ k_1 & & & k_2 & 1 & 1 \\ k_1 & & & k_2 & a^2 & a \\ k_1 & & & k_2 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

经过 N 矩阵解耦后, 得到 01, 02, I1, I2, II1, II2 这 6 个独立的序分量, 完成了不对称参数双回线的解耦。

2 故障选线原理及方法

当输电线路发生不同类型的故障时, 各相电流都会有不同的特征。由于序电流是各相电流的线性组合, 所以序电流也会因故障类型的不同而呈现相

应的规律。通过对不同故障类型下的序电流进行识别, 就可以判断出故障线路和故障相。

2.1 单回线故障时序分量特征

当双回线路发生单回线故障时, 如 I 回线发生各种故障, 如 I 回线单相接地, II 回线正常运行, 可以列出 II 回线的故障边界条件为

$$I_{IIA} = I_{IIB} = I_{IIC} = 0 \quad (12)$$

将式(12)转换成序分量之间的关系为

$$\begin{cases} k_1 I_{01} + k_2 I_{02} + I_{II1} + I_{II2} = 0 \\ k_1 I_{01} + k_2 I_{02} + a^2 I_{II1} + a I_{II2} = 0 \\ k_1 I_{01} + k_2 I_{02} + a I_{II1} + a^2 I_{II2} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

解得: $I_{II1} = I_{II2} = 0$ 。

同理, 在 II 回线发生故障时, 可以得到 $I_{I1} = I_{I2} = 0$ 。

可以看出, 在发生单回线故障时, 序分量能够反映出故障特征, 根据该特征判断故障线路。

2.2 故障选线方法

发生单回线故障时, 采用上述的序分量进行故障选线。流程如图 2 所示, 其中 ΔI_F 为判定电流分量是否存在的阈值, 用来回避正常运行时线路的不平衡电流对故障判断的影响。一般 ΔI_F 取正常运行时的最大不平衡电流。

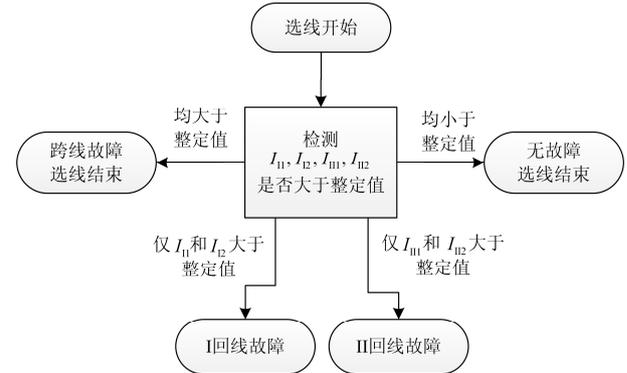


图 2 故障选线流程

Fig. 2 Flow chart of faulted line selection

当检测到故障序分量后, 判断是 I1、I2 还是 II1、II2, 序分量电流大于阈值电流, 若前者大于阈值电流, 则为 I 回线发生故障, 若后者大于阈值电流, 则为 II 回线发生故障。

3 故障选相原理及方法

3.1 序分量的故障类型特征

单回线故障时, 以 I 回线 A 相接地短路为例, 故障边界条件为

$$\begin{cases} U_{01} + U_{02} + U_{11} + U_{12} = 0 \\ I_{01} + I_{02} + a^2 I_{11} + a I_{12} = 0 \\ I_{01} + I_{02} + a I_{11} + a^2 I_{12} = 0 \\ k_1 I_{01} + k_2 I_{02} + I_{111} + I_{112} = 0 \\ k_1 I_{01} + k_2 I_{02} + a^2 I_{111} + a I_{112} = 0 \\ k_1 I_{01} + k_2 I_{02} + a I_{111} + a^2 I_{112} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

得到： $|I_{11}| = |I_{12}| = |I_{01} + I_{02}|$ 。

同理根据不同故障情况下的边界条件得到序电流分量的关系。

当 I 回线发生单相接地故障时，由故障的边界条件可以得到 $|I_{11}| = |I_{12}| = |I_{01} + I_{02}|$ ；发生两相相间故障时，可得 $|I_{11}| = |I_{12}|$ 且 $I_{01} + I_{02} = 0$ ；发生两相接地故障时，可得 $|I_{11}| - |I_{12}| = |I_{01} + I_{02}|$ ；发生三相短路时，可得 $I_{12} = I_{01} + I_{02} = 0$ 。当不同相发生同种类型的故障，序分量电流的幅值不会改变，仅相位会发生变化，所以利用序电流分量的幅值关系来判断单回线发生的故障类型，再利用相位关系来确定故障相。

3.2 基于电流幅值的故障识别方法

根据之前得到的序电流分量的幅值关系，再考虑正常运行时存在不平衡电流 ΔI_f ，提出了表 1 的故障判别方法，表中的所有数据均为幅值。其中 $\Delta I_f = |I_{01} + I_{02} - I_{11} + I_{12}|$ 。

表 1 不同类型的序分量特征

故障类型	单相接地	两相短路	两相接地	三相对称故障
序分量特征	$I_{12} > \Delta I_f$ $I_{01} > \Delta I_f$ $I_{11} = I_{12}$	$I_{12} > \Delta I_f$ $I_{01} < \Delta I_f$ $I_{11} = I_{12}$	$I_{12} > \Delta I_f$ $I_{01} > \Delta I_f$ $I_{11} \neq I_{12}$ $\Delta I_f < \Delta I_f$	$I_{11} > \Delta I_f$ $\Delta I_f > \Delta I_f$

除了三相对称故障以外的其他故障， I_{12} 分量都存在并且数值较大，可以根据该分量来判别三相对称故障。根据零序分量 I_{01} 来判别是否为接地故障，如果存在零序分量，则为接地故障，否则为相间故障。然后再通过 I_{11} 和 I_{12} 的幅值来判断是单相还是两相接地。故障识别流程如图 3 所示。

3.3 基于电流相位的选相方法

由上文可知，在发生单回线故障时，可采用各序分量的幅值来判断故障类型，由于当不同相发生同种类型的故障，序分量电流的幅值不会改变，仅相位会发生变化，所以利用相位关系来确定故障相。如 I 回线发生故障时，可以根据 I_{11} 和 I_{12} 的相位关系来判断发生故障的相位。当 I 回线发生故障时， I_{11} 和 I_{12} 的相位关系如表 2 所示。

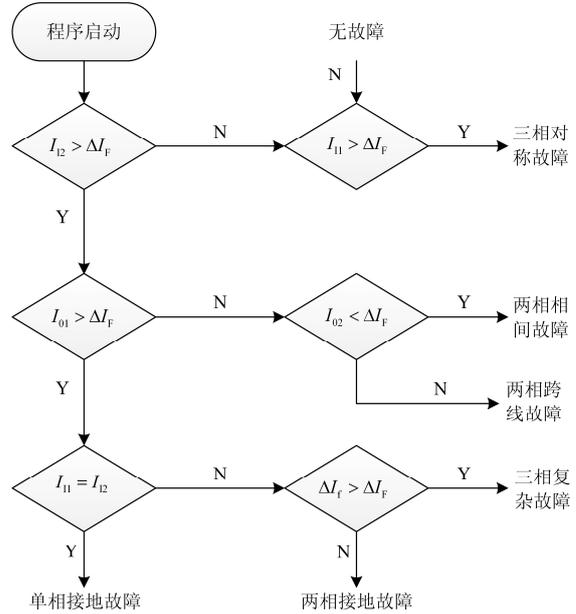


图 3 故障类型识别流程

Fig. 3 Flow chart of faulted type identification

表 2 不同故障相的序电流相位关系

Table 2 Angle characteristics of faulted sequence current in different faults

故障类型	单相接地			两相相间			两相接地		
	AG	BG	CG	AB	BC	AC	ABG	BCG	ACG
$\text{Arg}(I_{12} / I_{11})$	0	120	-120	60	180	-60	60	180	-60

当 II 回线发生故障时， I_{111} 和 I_{112} 的相位关系也相同。所以发生单回线故障时，故障选相流程如图 4 所示，其中 n 为整数。

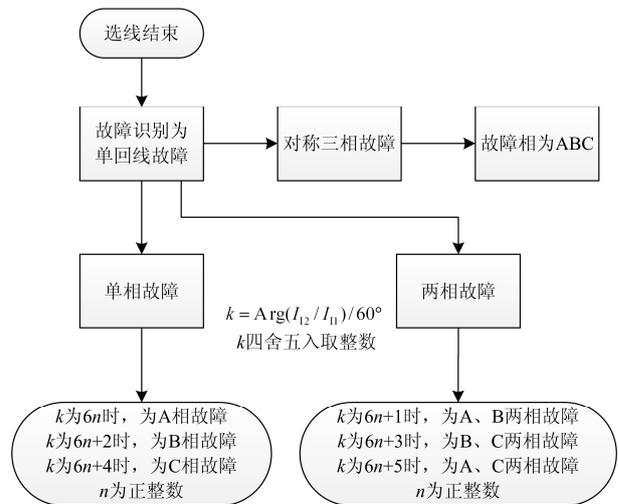


图 4 故障选相流程

Fig. 4 Flow chart of faulted phase selection

以 I 回线发生 A 相接地故障为例，故障发生时，先利用上面的选线方法判定为 I 回线故障，再利用

故障类型识别方法判定为单相接地故障, 最后利用 $\text{Arg}(I_{12}/I_{11})$ 的值为 0 得到是 A 相发生故障, 能正确地选择出故障相。

3.4 故障处电流测量方法

由于故障电压电流测量装置安装在线路的两端, 而上文的故障选线选相方法则是根据故障处的电流幅值和相位来判断的, 所以必须把线路两端的电流幅值和相位关系转化为故障处的电流幅值和相位关系, 才能有效地进行分析。

根据线路的结构可知, 故障处的电流会流向线路两端, 分为左右两个分量。由故障序网的结构可知, 线路两端的故障电流与故障处的故障电流之间的相位关系和线路的分布系数有关。测量到线路两端的电流时, 可以根据分布系数得到故障处的电流值。

由文献[16]可知, 环流序分量仅幅值会受到分布系数的影响, 穿越序分量不仅受到故障点位置的影响, 还与两端系统电源阻抗有关。当线路与系统阻抗相位差不大时, 穿越分布系数的相位在不同故障位置时变化不大; 当线路与系统阻抗角相差较大时, 在临近线路首末端发生故障时, 穿越分布系数相位发生明显的偏移, 但最大偏移角度小于 12° 。所以在通过线路两端的电流幅值和相位来进行故障线路和相位的判别时, 为了保证保护装置运行的准确性, 保护动作的相位应该设置一定的阈值, 可以取 30° 。

4 仿真验证

4.1 线路模型及参数

仿真系统图如图 5 所示。

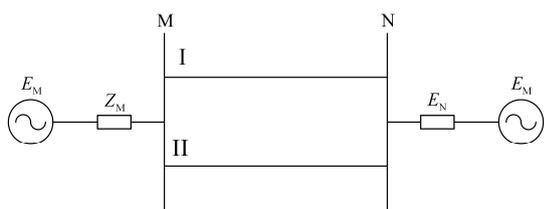


图 5 仿真系统图

Fig. 5 System structure

双回线线路长 100 km, MN 两侧系统电压均为 220 kV, 正序阻抗均为 $j60 \Omega$, 零序阻抗均为 $j90 \Omega$, I 回线的自感为 $Z_{11}=(25.76+j132.55) \Omega$, 相间互感为 $Z_{m1}=(18.25+j47.86) \Omega$, II 回线的自感为 $Z_{12}=(22.56+j112.37) \Omega$, 相间互感为 $Z_{m2}=(15.34+j40.33) \Omega$, 线间互感为 $Z_p=(25.68+j142.93) \Omega$ 。

4.2 仿真结果分析

为了验证故障选相方法的准确性, 选取不同的故障位置来进行仿真, 分别在 30 km 和 50 km 处发

生不同类型的单回线故障, 其中接地故障均为金属性接地故障。仿真和选相结果如表 3 所示。由表 3 可以看出, 故障点的位置对于故障选线和选相方法的影响非常小, 除了两相接地故障外, 误差不超过 1° , 在发生两相接地故障时, 最大误差角度也不超过 3° , 依旧可以准确地选出故障相。

表 3 不同故障位置的故障选相结果

Table 3 Fault phase selection of different fault location

故障类型	故障位置/km	故障		Arg		Arg		判断结果			
		I_{11}	I_{12}	I_{111}	I_{112}	(I_{12}/I_{11})	(I_{112}/I_{111})				
IAG	30	1.05	1.05	0	0	0.55	0.51	0.23	0	0	IAG
	50	1.09	1.09	0	0	0.57	0.52	0.27	0	0	IAG
IIBG	30	0	0	1.59	1.59	0.79	0.79	0	120.1	2	IIBG
	50	0	0	1.48	1.48	0.74	0.74	0	120.2	2	IIBG
ICG	30	1.05	1.05	0	0	0.55	0.51	240.2	0	4	ICG
	50	1.09	1.09	0	0	0.57	0.52	240.3	0	4	ICG
IBC	30	2.27	2.27	0	0	0	0	179.8	0	3	IBC
	50	2.22	2.22	0	0	0	0	180.1	0	3	IBC
IIABG	30	0	0	3.05	1.46	0.80	0.80	0	57.9	1	IIABG
	50	0	0	2.90	1.49	0.72	0.72	0	57.8	1	IIABG
IABC	30	4.42	0	0	0	0	0	88	0	1	IABC
	50	4.30	0	0	0	0	0	88	0	1	IABC

注: IAG 表示 I 回线 A 相接地短路; IIBG 表示 I 回线 B 相接地短路; IBC 表示 I 回线 B 相和 C 相接地短路; IIABG 表示 II 回线 A 相和 B 相接地短路; IABC 表示 I 回线 ABC 三相短路, 下同。

在线路 30 km 处发生各种接地故障, 并设置不同的过渡电阻, 进行仿真, 利用上文所述的方法进行故障选线和选相, 仿真和选相结果见表 4。由表 4

表 4 不同过渡电阻的故障选相结果

Table 4 Fault phase selection of different transition resistance

故障类型	接地电阻/ Ω	故障		Arg		Arg		判断结果			
		I_{11}	I_{12}	I_{111}	I_{112}	(I_{12}/I_{11})	(I_{112}/I_{111})				
IAG	0	1.05	1.05	0	0	0.55	0.51	0.23	0	0	IAG
	10	1.03	1.03	0	0	0.54	0.50	0.21	0	0	IAG
	50	0.84	0.84	0	0	0.44	0.40	0.19	0	0	IAG
IIBG	0	0	0	1.59	1.59	0.79	0.79	0	120.1	2	IIBG
	10	0	0	1.52	1.52	0.76	0.76	0	120.3	2	IIBG
	50	0	0	1.02	1.02	0.51	0.51	0	120.5	2	IIBG
ICG	0	1.05	1.05	0	0	0.55	0.51	240.2	0	4	ICG
	10	1.03	1.03	0	0	0.54	0.50	240.4	0	4	ICG
	50	0.84	0.84	0	0	0.44	0.40	239.7	0	4	ICG
IIABG	0	0	0	3.05	1.46	0.80	0.80	0	57.9	1	IIABG
	10	0	0	2.94	1.45	0.75	0.75	0	58.0	1	IIABG
	50	0	0	2.04	1.05	0.50	0.50	0	57.8	1	IIABG

可以看出本文提出的选相方法不受过渡电阻的影响。在发生单回线经过度电阻接地故障时，除了两相接地故障外，误差不超过 1°，在发生两相接地故障时，最大误差角度也不超过 3°，依旧可以准确地选出故障相。

由上面的仿真和故障选相结果可以看出，发生单回线故障时，故障发生的位置和接地故障的过渡电阻，对于本文提出的选相方法不会产生影响，该方法有良好的抗过渡电阻能力和全区间选相能力。

5 结论

本文利用新的解耦方法，对参数不对称的同杆双回线进行解耦，先利用对称分量法进行相间解耦，将线电流分解为正序、负序和零序分量，发现正序、负序分量相互独立，只有零序分量间存在耦合互感，然后再消除量序分量之间的互感，将相电流分解为 6 个相互独立的序电流分量。由于发生不同类型的单回线故障时，各序电流分量的幅值和相位都不一样，先利用 I₁、I₂ 分量的电流幅值判断出故障线路，再利用六序分量的幅值关系判断出该线路的故障类型，最后利用六序分量的相位关系得到具体的故障相。

通过 PSCAD 仿真验证，单回线发生故障时，本文提出的故障选相方法能准确地选择故障相，而且不受故障位置和接地电阻的影响。本文根据故障边界条件推导得到序电流的幅值和相位关系来进行故障选线和故障选相，在发生跨线故障时也可以利用序电流的幅值和相位关系来进行故障选线和故障选相，研究不对称参数同杆双回线跨线故障时的选线和选相方法是下一步需要进行的工作。

参考文献

[1] BO Z Q, LIN X N, WANG Q P, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0012-2

[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 signal tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 53-57.

[3] 李伟, 毕天姝, 杨奇逊. 基于相关分析的同杆双回线突变量选相新方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 58-62.
LI Wei, BI Tianshu, YANG Qixun. Fault phase selection

with fault component in same-tower double-circuit lines based on correlation analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 58-62.

[4] 陈亚, 李梦诗. 基于瞬时能量比的输电线路故障选相方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 56-64.
CHEN Ya, LI Mengshi. A faulted phase selection scheme for transmission lines based on instantaneous energy ratio[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 56-64.

[5] 陈福锋, 钱国明. 基于同杆双回线跨线故障识别的选相方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 66-70.
CHEN Fufeng, QIAN Guoming. Research on fault phase selector of protective relay for double circuit lines based on crossing-line fault identifying[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 66-70.

[6] 陈朝晖. 同杆并架双回线阻抗选相方法研究[J]. 广东电力, 2009, 22(11): 24-28.
CHEN Chaohui. Research on phase selection method based on impedance measurement for double-circuit line[J]. Guangdong Electric Power, 2009, 22(11): 24-28.

[7] 赵军, 袁雪琼, 阮琦, 等. 基于对地参数跟踪测量的不接地系统单相接地故障选相研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 81-85.
ZHAO Jun, YUAN Xueqiong, RUAN Qi, et al. Research on single phase grounding fault phase selection based on ground parameter tracking and measurement[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 81-85.

[8] 杨忠礼, 宋国兵, 姚永峰, 等. 基于跨线故障判别的平行双回线路选相方案[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(2): 97-101.
YANG Zhongli, SONG Guobing, YAO Yongfeng, et al. Fault phase selector of protective relay for cross country fault on double circuit lines[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(2): 97-101.

[9] 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.

[10] 田书, 刘芳芳, 任晓明. 基于暂态量的同塔双回线路故障选相研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 50-54.
TIAN Shu, LIU Fangfang, REN Xiaoming. Research on transient-based faulty phase selection for double-circuit lines on the same tower[J]. Power System Protection and

- Control, 2015, 43(1): 50-54.
- [11] 索南加乐, 葛耀中. 利用六序分量复合序网法分析同杆双回线故障的新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1991, 3(1): 92-106.
SUONAN Jiale, GE Yaozhong. The new method of fault analysis for double circuit lines based six-sequence complex networks[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1991, 3(1): 92-106.
- [12] 张艳霞, 王艳, 伍仕, 等. 基于六序分量法的六相输电系统故障选相[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 49-53.
ZHANG Yanxia, WANG Yan, WU Shi, et al. Phase-selection for six-phase power transmission system based on six-sequence components method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(24): 49-53.
- [13] 刘玲, 范春菊. 基于六序分量法的跨电压等级的同塔四回线的故障计算[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 6-11.
LIU Ling, FAN Chunju. Fault calculation for joint four transmission lines of different voltage grades on the same tower based on six-sequence component method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 6-11.
- [14] 霍晓蕊, 张艳霞. 同杆并架双回线故障选相研究[J]. 中国电力, 2012, 45(5): 11-15.
HUO Xiaorui, ZHANG Yanxia. Fault phase selection study for double-circuit transmission lines on the same tower[J]. Electric Power, 2012, 45(5): 11-15.
- [15] 许侃, 范春菊, 许锦喜. 经过渡电阻短路接地故障的计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 44-51.
XU Kan, FAN Chunju, XU Jinxi. Study on calculation methods of ground fault through transition resistance[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 44-51.
- [16] 刘琦, 邵能灵, 范春菊, 等. 基于单端电气量的不对称参数同塔四回线选相方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(4): 178-186.
LIU Qi, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Fault phase selection scheme for quadruple-circuit transmission lines with asymmetrical parameter based on single-ended electrical quantities[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(4): 178-186.

收稿日期: 2016-07-13; 修回日期: 2016-10-10

作者简介:

朱忆洋(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 123456789@qq.com

都洪基(1960—), 男, 通信作者, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护及安全自动装置; E-mail: duhongji807@163.com

赵青春(1980—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: zhaoqc@nrec.com

(编辑 姜新丽)