

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190666

# 混压同塔四回线路跨电压故障选相元件动作分析与对策研究

郑涛<sup>1</sup>, 吴琼<sup>1</sup>, 于溯<sup>1</sup>, 吴建云<sup>2</sup>, 王小立<sup>2</sup>, 罗美玲<sup>2</sup>, 赫嘉楠<sup>2</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 国网宁夏电力公司, 宁夏 银川 750001)

**摘要:** 混压同塔四回线发生跨电压故障时, 零序互感的存在会对各相故障电流产生较大的影响。针对混压同塔四回线路中发生跨电压不接地故障的情况, 主要分析了故障相电流的特征及电流选相元件的动作情况, 采用改进复合序网的方法求解故障电流。利用相量图详细讨论了跨电压故障的电流特征及其对相电流差突变量选相元件的影响。针对混压同塔线路跨电压故障可能存在的误选相问题, 提出一种基于相电流差突变量与相电流突变量相结合的综合选相方案, 以实现正确选相。基于 PSCAD/EMTDC 对混压同塔四回线的各类跨电压故障进行大量仿真实验, 验证了理论分析的准确性。

**关键词:** 混压同塔四回线; 跨电压故障; 改进复合序网法; 选相元件; 相电流突变量

## Analysis of the performance of a phase selector for a cross-voltage fault in mixed-voltage four-circuit transmission lines and countermeasures

ZHENG Tao<sup>1</sup>, WU Qiong<sup>1</sup>, YU Su<sup>1</sup>, WU Jianyun<sup>2</sup>, WANG Xiaoli<sup>2</sup>, LUO Meiling<sup>2</sup>, HE Jianan<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of New Energy Power System (North China Electric Power University), Beijing 102206, China;

2. State Grid Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750001, China)

**Abstract:** When a cross-voltage fault occurs in the four-circuit lines of the same tower, the existence of zero-sequence mutual inductance will have a great influence on the fault current. When the cross-voltage unground-fault occurs in the mixed-voltage four-circuit lines of the same tower, the characteristics of current of the fault phase and the performance of the phase selector are analyzed, using the method of an improved composite sequence network to calculate the fault current. This paper uses a phasor diagram to examine the characteristics of the cross-voltage fault current and its effect on the phase selector based on the sudden-change of phase-to-phase current. Looking at the possible mis-selection of phase selector based on the sudden-change of phase-to-phase current, a comprehensive phase selection method based on the combination of sudden change of phase-to-phase current and sudden change of phase-current is proposed to achieve a correct selection. Based on PSCAD/EMTDC, a large number of simulation experiments are carried out in the mixed-voltage four-circuit lines of the same tower. The simulation results verify the accuracy of the theoretical analysis.

This work is supported by Key Project of Smart Grid Technology and Equipment of National Key Research and Development Plan of China (No. 2016YFB0900600) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52094017000W).

**Key words:** mixed-voltage four-circuit lines on the same tower; cross-voltage short-circuit; improved compound-sequence network method; phase selector; sudden change of phase current

## 0 引言

随着土地资源日趋紧张、输电容量增大, 混压

同塔多回线输电技术迅速发展<sup>[1-2]</sup>, 而跨电压故障也成为其特有故障类型, 线路间的强磁联系通过影响故障电流进而影响保护动作<sup>[3-4]</sup>。正确选择故障相是保障距离保护可靠动作的重要前提, 因此, 探究强磁场耦合下的混压同塔四回线跨电压故障时选相元件的动作性能具有重要意义。

混压同塔四回线的故障分析方法主要可分为

基金项目: 国家重点研发计划智能电网技术与装备重点专项(2016YFB0900600); 国家电网公司科技项目资助(52094017000W)

两大类：一类是以数学推导为基础对线路阻抗矩阵进行解耦的方法，包括 12 序分量法<sup>[5-6]</sup>、适用于线路参数不对称的改进 12 序分量法等<sup>[7]</sup>；另一类是在经典序网图的基础上，针对四回线故障时的互感影响以及其他特性进行改进得到的，包括改进复合序网法<sup>[8-9]</sup>、多端口网络法<sup>[10]</sup>等。文献[11-13]皆是在第一类分析方法的基础上对四回线系统的选相情况进行研究，由于此类方法需对 12 阶矩阵进行求解，计算相对复杂。文献[14]基于第二类分析方法，利用改进复合序网法，主要分析混压同塔线路在计及互感和工程应用上不计互感时，相电流差突变量选相方案在混压同塔线路中的适应性。但在考虑互感的前提下，由于跨电压故障时的强电磁联系，相电流差突变量选相能否正确动作，文献[14]并未对此进行研究。

针对强磁弱电联系下的混压同塔四回线系统，考虑到不接地故障时零序互感对故障相电流的影响大于接地故障，故本文以跨电压不接地故障为例，采用改进复合序网法，实现对跨电压故障线路的解耦，通过求解序电流，分析得出各类跨电压不接地故障情况下的电流特征，在此基础上通过相量图进一步分析故障相电流特性以及相电流差突变量选相元件的动作情况，发现当发生跨电压不接地故障时，某电压等级的两相故障可能被相电流差突变量选相元件错误选为单相故障。针对可能出现的误选相问题，本文提出一种基于相电流差突变量和相电流突变量的综合选相方案，以实现各种跨电压故障情况下的正确选相。

## 1 跨电压不接地故障时故障相电流特性分析

混压同塔线路中的跨电压故障可以分为跨电压接地故障和跨电压不接地故障。跨电压接地故障相当于每个系统在短路点处分别发生接地故障，此时接地电流较大，线路由于零序互感影响产生的零序电流相对较小<sup>[15-17]</sup>，对选相元件影响不大。故本文以跨电压不接地故障为例，详细分析了发生单相跨单相、单相跨两相以及单相跨三相不接地故障时的故障电流特征，分别选取 C-a、C-bc、C-abc 作为上述每种故障类型的代表。其中，C-a 表示 I 系统的 C 相与 II 系统的 a 相发生跨电压不接地故障，其余以此类推。

篇幅所限，本文仅以 II 系统为例进行分析，I 系统的分析过程与 II 系统类似。

### 1.1 C-a 故障时故障相电流特性

首先建立 C-a 故障时的改进复合序网<sup>[2]</sup>，如图 1。

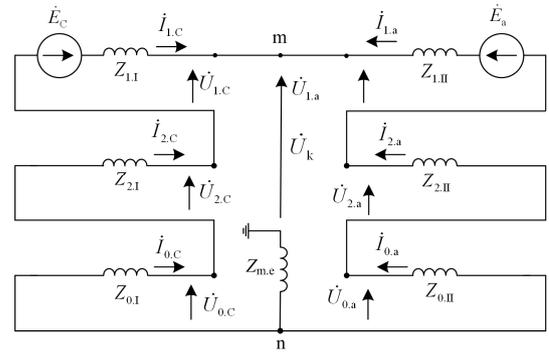


图 1 C-a 不接地故障的改进复合序网图

Fig. 1 Improved composite sequence network of C-a non-ground fault

图 1 中， $Z_{m,e}$  为考虑线间互感等效出的零序互感阻抗， $\dot{E}_c$  和  $\dot{E}_a$  分别为故障前两系统的特殊相电源电势。特殊相电流序分量计算方法如式(1)所示。

$$\begin{cases} \dot{i}_{0,c} = (\dot{E}_c - \dot{E}_a) / (Z_{\Sigma I} + Z_{\Sigma II}) \\ \dot{i}_{1,c} = \dot{i}_{2,c} = \dot{i}_{0,c} \\ \dot{i}_{1,c} = -\dot{i}_{1,a} = -\dot{i}_{2,a} = -\dot{i}_{0,a} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{式中, } \begin{cases} Z_{\Sigma I} = Z_{1,I} + Z_{2,I} + Z_{0,I} \\ Z_{\Sigma II} = Z_{1,II} + Z_{2,II} + Z_{0,II} \end{cases} \circ$$

由式(1)可知，发生 C-a 跨电压故障时，两系统特殊相电源会对 II 系故障相电流大小产生影响，但其各序电流大小相等、方向相同，故障相电流较大，而非故障相电流较小，近似为负荷电流。可见零序互感及不同电压等级电源间的差别对跨电压单相故障时的故障电流影响不大。

### 1.2 C-bc 故障时故障相电流特性

首先建立 C-bc 故障时的改进复合序网<sup>[2]</sup>，如图 2 所示。

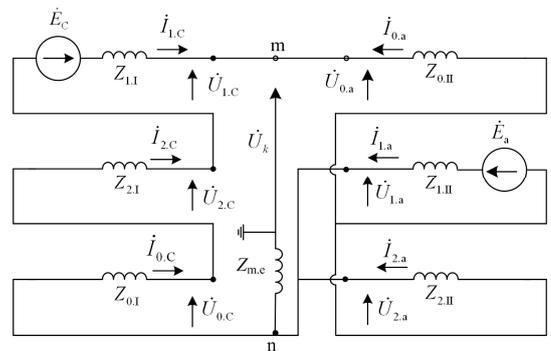


图 2 C-bc 不接地故障的改进复合序网图

Fig. 2 Improved composite sequence network of C-bc non-ground fault

图 2 中,  $Z_{m,e}$  为考虑线间互感等效出的零序互感阻抗,  $\dot{E}_C$ 、 $\dot{E}_a$  分别为故障前两系统的特殊相电源电势。特殊相电流序分量计算如式(2)所示。

$$\begin{cases} \dot{I}_{1,C} = (\dot{E}_C + \dot{E}_a/2)/(Z_{\Sigma,I} + Z_{\Sigma,II}) \\ \dot{I}_{1,C} = \dot{I}_{2,C} = \dot{I}_{0,C} \\ \dot{I}_{1,C} = \dot{I}_{1,a} + \dot{I}_{2,a} = -\dot{I}_{0,a} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{I}_{1,a} = \left( \frac{\dot{E}_a}{Z_{1,II}} - \dot{I}_{0,a} \right) / 2 \\ \dot{I}_{2,a} = \left( -\frac{\dot{E}_a}{Z_{1,II}} - \dot{I}_{0,a} \right) / 2 \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\begin{cases} Z_{\Sigma,I} = Z_{1,I} + Z_{2,I} + Z_{0,I,e} \\ Z_{\Sigma,II} = Z_{1,II}/2 + Z_{0,II,e} \end{cases}$ 。

令  $\dot{E}_C = k\dot{E}_a e^{j\delta}$ , 则

$$\dot{I}_{0,a} = \frac{-\dot{E}_a(1+2ke^{j\delta})}{2Z_{\Sigma,I} + 2Z_{\Sigma,II}} \quad (4)$$

式中,  $\delta$  表示 I 系统特殊相(C 相)电源电势超前 II 系统特殊相(a 相)电源电势的相角差。

由式(3)可知, II 系统的正序和负序电流分量仅由本系统的特殊相电源提供, 而式(4)表明 II 系统的零序电流分量由两系统特殊相电源共同提供, 当其相角差  $\delta$  在  $0^\circ \sim 360^\circ$  变化时,  $\dot{E}_a$  与  $\dot{I}_{0,a}$  之间的相角差也在  $0^\circ \sim 360^\circ$  变化, II 系统中各序短路电流分量间的大小关系也随之变化, 会引起故障电流的大小随  $\delta$  的变化而变化。

### 1.3 C-abc 故障时故障相电流特性

首先建立 C-abc 跨电压不接地故障的改进复合序网<sup>[2]</sup>, 如图 3 所示。

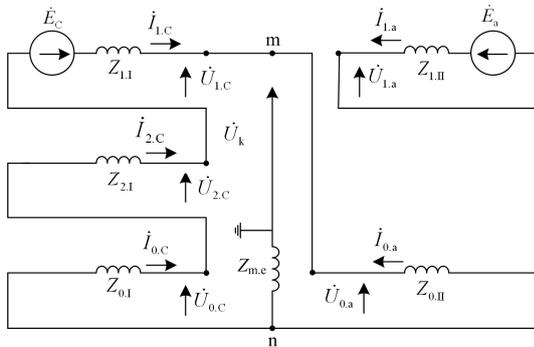


图 3 C-abc 不接地故障的改进复合序网图

Fig. 3 Improved composite sequence network of C-abc non-ground fault

图 3 中,  $Z_{m,e}$  为考虑线间互感等效出的零序互感阻抗,  $\dot{E}_A$  为故障点故障前 I 系统的特殊相电势,

$\dot{E}_a$  为提供 a 相故障电流的 II 系统电势, 求取其他相故障电流分别采用其对应相电源即可。a 相电流序分量计算方法如式(5)所示。

$$\begin{cases} \dot{I}_{1,C} = \dot{E}_C / [(Z_{1,I} + Z_{2,I} + Z_{0,I}) + Z_{0,II}] \\ \dot{I}_{1,C} = \dot{I}_{2,C} = \dot{I}_{0,C} = -\dot{I}_{0,a} \\ \dot{I}_{1,a} = \dot{E}_a / Z_{1,II} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知, II 系统发生跨电压三相故障时正序电流仅由本侧对应相电源和阻抗决定, 其值较大。与传统三相故障不同<sup>[18-21]</sup>, 此时 II 系统内存在零序电流, 零序电流完全取决于另一系统的特殊相电源。值得注意的是, 当发生 I 系统三相跨 II 系统三相故障时, 两系统内只有正序电流, 各相故障电流仍很大<sup>[2]</sup>。

## 2 相电流差突变量选相元件动作情况分析

由第 1 节分析可知, 混压同塔四回线系统发生跨电压不接地故障时, 故障相的电流大小受到线间互感以及两系统特殊相电源的影响, 可能会对故障选相元件的动作情况造成影响。以下主要针对三种故障情况下 II 系统电流选相元件的动作情况进行分析。

### 2.1 C-a 故障时电流选相元件动作情况

I 系统 C 相跨 II 系统 a 相接地短路故障时, 对于 II 系统, 基于相电流突变量和相电流差突变量选相方法, 选出 a 相故障的条件分别如式(6)、式(7)所示。

$$\left( |\Delta I_a| \geq m \left( |\Delta I_b| \right) \right) \cap \left( |\Delta I_a| \geq m \left( |\Delta I_c| \right) \right) \quad (6)$$

$$\left( |\Delta I_{ca}| \geq m \left( |\Delta I_{bc}| \right) \right) \cap \left( |\Delta I_{ab}| \geq m \left( |\Delta I_{bc}| \right) \right) \quad (7)$$

式中,  $m$  为整定系数, 一般取为 3~5。

由式(1)可知, 故障相的正、负、零序电流大小相等, 方向相同, 具体数值取决于两系统特殊相电源电势的差值。对于 500 kV/220 kV 同塔四回线路, 由于两系统中的特殊相电源差异较大, 因此, 故障相电流的各序分量较大, 故障相电流远大于非故障相电流, 两种选相元件均可以正确选相。

### 2.2 C-bc 故障时相电流差突变量选相元件动作情况

I 系统 C 相跨 II 系统 b 相、c 相接地短路故障时, 对于 II 系统, 正确选出 b、c 两相的相电流差突变量条件如式(8)所示。

$$\left( |\Delta I_{bc}| \geq m \left( |\Delta I_{ab}| \right) \right) \cap \left( |\Delta I_{bc}| \geq m \left( |\Delta I_{ca}| \right) \right) \quad (8)$$

式中,  $m$  为整定系数, 一般取为 1.2~1.8。

由式(4)可知, 零序电流与两特殊相电源电势皆相关, 而正序和负序电流仅由本系统故障相电源提供, 当两电源相角差  $\delta$  改变时, 故障相电流会因零序电流的改变而变化。为探究  $\delta$  变化对选相元件造成的影响, 利用相量图, 分别选取  $\delta$  为  $120^\circ$ 、 $-120^\circ$  和  $0^\circ$  三种情况时 II 系统故障电流的大小及相电流差突变量选相元件的动作情况进行讨论。

(1)  $\delta = 120^\circ$  时 II 系统的故障电流特性及相电流差突变量选相元件动作情况

以  $\dot{E}_C$  为参考, 设其所在方向为  $0^\circ$ , 取  $\dot{E}_C$  超前  $\dot{E}_a$  的  $\delta$  为  $120^\circ$ , 作出相量图。由式(2)可知,  $-\dot{I}_{0.a} = (\dot{E}_C + \dot{E}_a/2)/(Z_{\Sigma I} + Z_{\Sigma II})$ , 系统电抗远大于电阻值, 因此将电阻值忽略不计。用相量图表示  $\dot{I}_{0.a}$ , 再由式(3)分别在相量图中表示出正序和负序电流  $\dot{I}_{1.a}$  和  $\dot{I}_{2.a}$ , 如图 4(a)所示, 由 a 相各序电流推出 b 相、c 相各序电流, 从而合成相应的 b、c 相电流, 如图 4(b)所示。

当单回输电线路中发生 b 相、c 相间短路, 两故障相电流幅值相等。但由图 4 可知, 当  $\delta = 120^\circ$  时发生 C-bc 故障, 虽然 b、c 两相均为故障相, 但 b 相故障电流明显大于 c 相故障电流, 当其无法满足传统两相故障判据(7)时, 相电流差突变量选相元件会将 II 系统故障仅选为 b 相单相故障, 本文称此种情况为误选相。

(2)  $\delta = -120^\circ$  时 II 系统的故障电流特性及相电流差突变量选相元件动作情况

$\dot{E}_a$  超前  $\dot{E}_C$  的  $\delta$  为  $120^\circ$  时作出相量图。按上文中的方法, 由式(2)可知  $\dot{I}_{0.a}$ , 再用相量图表示出正序和负序电流  $\dot{I}_{1.a}$  和  $\dot{I}_{2.a}$ , 如图 5(a)所示, 由 a 相各序电流推出 b 相、c 相各序电流, 从而合成相应的 b、c 相电流, 如图 5(b)所示。

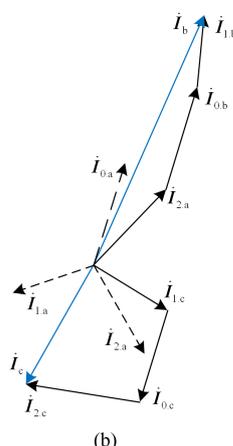


图 4 c 相电流小于 b 相电流时的相量图  
Fig. 4 Phasor diagram when the current of c phase is less than the b

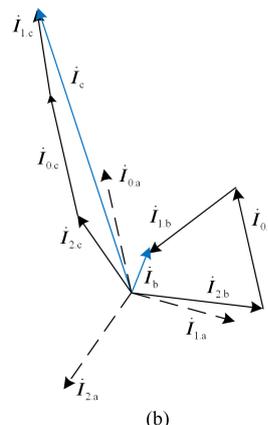
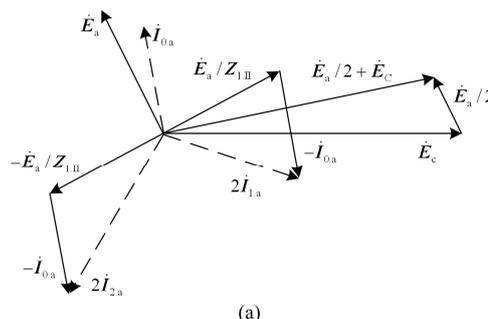
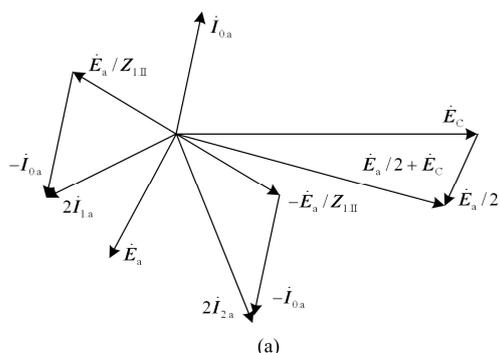


图 5 b 相电流小于 c 相电流时的相量图  
Fig. 5 Phasor diagram when the current of b phase is less than the c

由图 5 可知, 当  $\delta = -120^\circ$  时发生 C-bc 故障, 虽然 b、c 两相均为故障相, 但 c 相故障电流明显大于 b 相故障电流, 当其无法满足传统两相故障判据(7)时, 相电流差突变量选相元件会将 II 系统误选为 c 相单相故障。



(3)  $\delta = 0^\circ$  时 II 系统的故障电流特性及相电流差突变量选相元件动作情况

作出 a 相各序电流及相电流的相量图如图 6(a) 所示, 同样可以得出 b 相和 c 相的序电流及相电流, 如图 6(b) 所示。

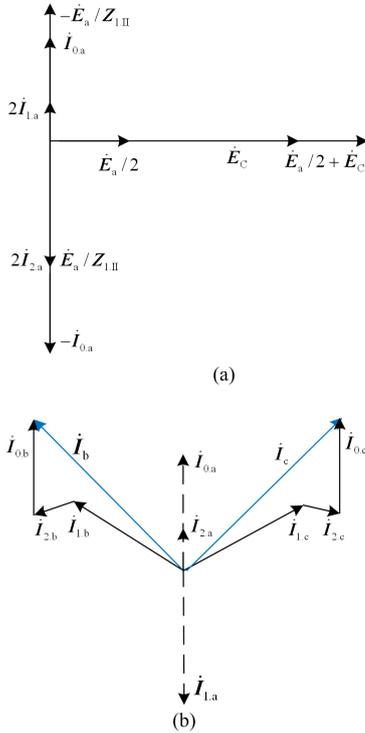


图 6 b 相电流等于 c 相电流时的相量图  
Fig. 6 Phasor diagram when the current of b phase is equal to the current of c phase

由图 6 可知, I 系统 C 相的电源电动势与 II 系统 a 相的电源电动势同相位, b、c 相故障电流较大且近似相等, 可以满足式(7)中故障选相的判别条件, II 系统的相电流差突变量选相元件可以正确选出 b、c 两故障相。

综合上述分析, 发生 C-bc 故障时, II 系统相电流差突变量选相元件可能存在三种选相结果。

误选为 c 相故障、误选为 b 相故障、正确选出 b 相、c 相故障, 选相结果与故障前两系统特殊相电源电动势的相角差有关。其他类型的两相跨电压故障也会发生误选相情况, 分析过程同上。

### 2.3 C-abc 故障时电流选相元件动作情况

由式(5)及相关分析可知, 发生 C-abc 故障时 II 系统存在零序电流分量, 常规的利用无零序电流分量判别未发生三相故障的选相元件可能会受到影响。但三相故障时相电流突变量均较大。

## 3 跨电压不接地故障的综合选相方案

根据第 2 节分析, 混压同塔四回线系统发生跨电压不接地故障时, 基于相电流差突变量的选相元件可能无法正确动作。针对该问题, 本文提出一种综合选相方案, 实现对跨电压不接地故障的正确选相, 以 II 系统为例, 综合选相方案流程如图 7 所示, 具体说明如下:

(1) 当保护启动元件动作后, 基于相电流差突变量选相判据进行判别, 若满足两相故障判据(式(8)所示为 b、c 两相故障判据, 其他两相故障判据以此类推<sup>[22]</sup>), 则判定为两相故障且完成判别, 否则进入下一步判定;

(2) 基于相电流突变量选相判据, 对疑似非故障相((1)中判定的非故障相)进行判别, 若满足单相故障判据(式(6)所示为 a 相故障判据, 其他单相故障判据以此类推<sup>[22]</sup>), 则判定为故障相, 否则进入下一步判定;

(3) 判断 II 系统中三相的相电流突变量是否均较大, 若是则判定为三相故障, 否则判定为未故障。

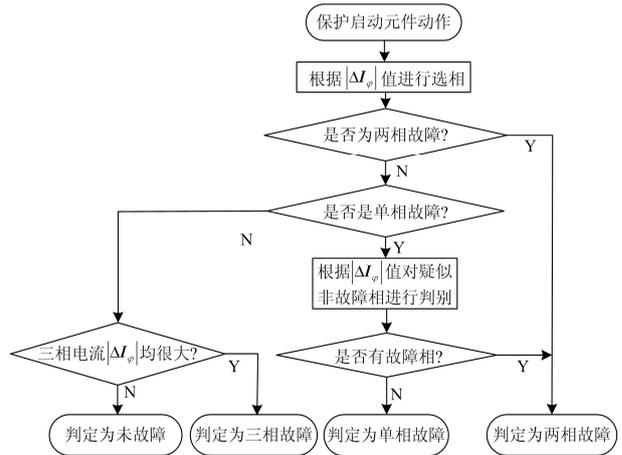


图 7 综合选相方案流程图

Fig. 7 Flow chart of comprehensive phase selection

## 4 仿真实验

在 PSCAD 仿真软件中搭建混压同塔四回线跨电压故障模型, 设置线路长度为 300 km, 其中 I 系统电压等级为 500 kV, 输电线单位长度正序阻抗为  $0.009+j0.260 \Omega/\text{km}$ , 零序阻抗为  $0.268+j1.023 \Omega/\text{km}$ , 同一电压等级线间互感为  $0.259+j0.763 \Omega/\text{km}$ , 两端电源正序阻抗为  $j18 \Omega$ , 零序阻抗为  $j54 \Omega$ ; II 系统电压等级为 220 kV, 输电线单位长度正序阻抗为  $0.042+j0.283 \Omega/\text{km}$ , 零序阻抗为  $0.269+j1.162 \Omega/\text{km}$ . 两端电源正序阻抗为  $j70 \Omega$ , 零序阻抗为  $j93 \Omega$ ; 同

一电压等级线间互感为  $0.227+j0.880 \Omega/\text{km}$ , 不同电压等级线间互感为  $0.243+j0.678 \Omega/\text{km}$ 。

图 8 以 II 系统为例, 给出了在 PSCAD 仿真中线路的 50% 处发生 C-bc 故障时,  $\delta$  分别在  $120^\circ$ 、 $-120^\circ$ 、 $0^\circ$  时电流仿真结果。

由图 8 可知, 发生 C-bc 故障时,  $\delta = 120^\circ$  时 II 系统的 b 相、c 相电流呈现出故障电流特征, 且 c 相故障电流幅值明显小于 b 相, 导致相电流差突变量选相元件将突变量较大的 b 相误选为单相故障, 但与非故障相 a 相相比, c 相的相电流突变量仍较明显, 具体数值如表 1 所示, 因此利用相电流突变量作为辅助判据可进一步选出 c 相亦为故障相, 从而正确判为 b、c 两相故障;  $\delta = -120^\circ$  时, b 相、c 相电流呈现出故障电流特征, 但 c 相故障电流明显大于 b 相, 与  $\delta = 120^\circ$  时分析方法相似, 相电流差突变量选相会将突变量较大的 c 相误选为单相故障, 此时可利用相电流突变量作为辅助判据, 进一步选出 b 相亦为故障相, 从而正确判为 b、c 两相故障;  $\delta = 0^\circ$ , b 相和 c 相电流突变量均较大且幅值接近, 利用相电流差突变量可以实现正确选相。

表 1 中的主判据为相电流差突变量选相判据,

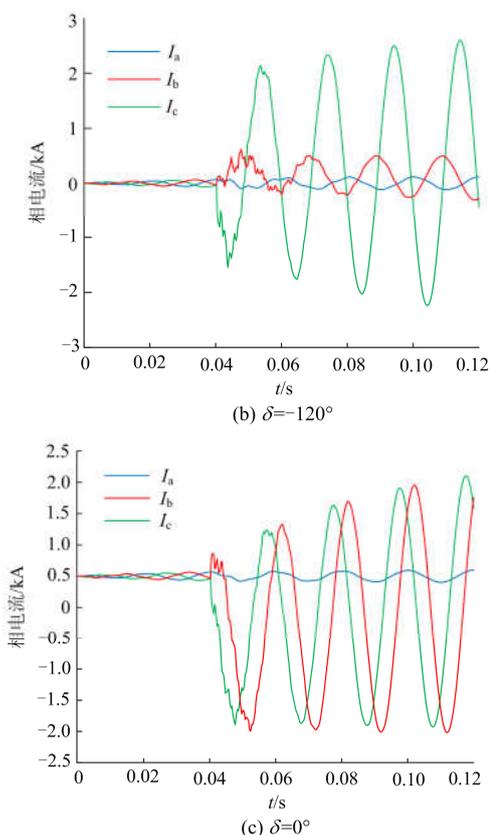
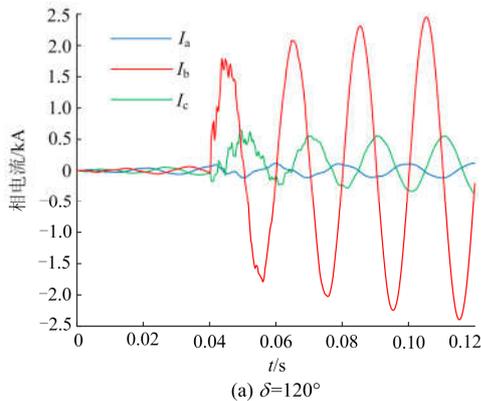


图 8 不同  $\delta$  值时的 II 系统相电流差波形图  
Fig. 8 Phase-current-difference of system II when the value of  $\delta$  are different

当其判为单相故障后, 采用相电流突变量作为辅助判据, 对疑似非故障相进行进一步的判别, 明确是否为故障相; 对于主判据判定为两相故障的情况无需进行辅助判断, 表中用“—”表示。根据表 1 结果可以得到, 通过相电流差突变量与相电流突变量相结合的方法可以正确选出故障相, 验证了综合选相方案的有效性。

表 1 跨电压不接地故障时 II 系统综合选相方案的选相结果

Table 1 Comprehensive phase selection results of system II when cross-voltage ungrounded-fault occurs

$\delta$	故障类型	主判据			选相结果	辅助判据			综合选相结果
		$ \Delta I_{ab} $	$ \Delta I_{bc} $	$ \Delta I_{ca} $		$ \Delta I_a $	$ \Delta I_b $	$ \Delta I_c $	
$120^\circ$	C-a	2.41	0	2.35	正确选为 a 相	—	0.003	0.004	正确选为 a 相
	C-bc	2.52	2.61	0.24	误选为 b 相	0.003	—	0.43	正确选为 bc 两相
	C-abc	3.72	2.60	3.69	无法选出故障相	2.58	1.81	0.8	正确选为 abc 三相
$-120^\circ$	C-a	1.08	0	1.13	正确选为 a 相	—	0.004	0.004	正确选为 a 相
	C-bc	0.53	2.58	2.54	误选为 c 相	0.003	0.49	—	正确选为 bc 两相
	C-abc	3.62	2.6	3.7	无法选出故障相	0.96	1.5	2.01	正确选为 abc 三相
$0^\circ$	C-a	2.34	0	2.45	正确选为 a 相	—	0.003	0.004	正确选为 a 相
	C-bc	1.78	2.53	1.98	正确选为 b 相、c 相	—	—	—	正确选为 bc 两相
	C-abc	3.73	2.59	3.7	无法选出故障相	0.94	1.86	2.31	正确选为 abc 三相

## 5 结论

本文针对混压同塔四回线路中发生跨电压不接地故障时,相电流差突变量选相元件存在的误选相问题,重点分析了故障相电流的特征和规律,并给出相应对策,取得主要结论如下:

(1)当发生单相跨两相跨电压不接地故障时,根据故障前两系统特殊相电源电动势的相角差不同,会出现相电流差突变量选相元件将两相故障误选为单相故障的情况;

(2)基于相电流差突变量与相电流突变量相结合的综合故障选相方案可以解决两相跨电压故障时选相元件误选相问题,能够实现混压同塔四回线系统的各类跨电压不接地故障的正确选相。

## 参考文献

- [1] 蔡乾, 吴建云, 罗美玲, 等. 混压同塔四回线跨电压不接地故障下的距离保护适应性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 25-32.  
CAI Qian, WU Jianyun, LUO Meiling, et al. Analysis of the adaption of distance relay in the case of cross-voltage phase to phase fault occurring on mixed-voltage quadruple-circuit transmission lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 25-32.
- [2] 黄少锋, 刘欣, 王洪敏, 等. 混压同塔四回线跨电压故障的短路电流计算[J]. 电工技术学报, 2016, 36(4): 993-1001.  
HUANG Shaofeng, LIU Xin, WANG Hongmin, et al. Cross-voltage short-circuit calculation on mixed-voltage four-circuit lines system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 36(4): 993-1001.
- [3] 郑涛, 吴丹, 张嘉琴, 等. 混压同塔四回线强电弱磁系统跨电压不接地故障短路计算[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 155-161.  
ZHENG Tao, WU Dan, ZHANG Jiaqin, et al. Short-circuit calculation of cross-voltage unearthed fault in strong-electric and weak-magnetic system of mixed-voltage four-circuit lines on the same tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 155-161.
- [4] AHMED S. A new fault location method for partial coupling double-circuit untransposed transmission line with shared tower and different voltages[J]. Electric Power Components and Systems, 2018, 46(10): 1210-1221.
- [5] 邓孟华, 范春菊, 刘玲, 等. 基于12序分量的同杆4回线短路故障计算[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(14): 64-67.  
DENG Menghua, FAN Chunju, LIU Ling, et al. Calculation of short circuit fault of four jointed parallel lines on the same tower based on twelve sequence components[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(14): 64-67.
- [6] 夏溢, 邵能灵, 范春菊. 基于改进的12序分量法的参数不对称同塔四回线故障计算方法[J]. 水电能源科学, 2013, 31(7): 206-210.  
XIA Yi, TAI Nengling, FAN Chunju. Calculation method for inter-line faults occurred in asymmetry-parameter four-parallel lines on same tower water resources and power[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2013, 31(7): 206-210.
- [7] 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.
- [8] 高洋. 混压同塔系统跨线故障对零序及电流保护影响的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [9] ZHENG Tao, ZHANG Jiaqin, WU Dan, et al. Cross-voltage short circuit calculation for mixed-voltage quadruple-circuit lines on the same tower[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(9): 2342-2350.
- [10] 郑涛, 张嘉琴, 吴丹, 等. 混压部分同塔双回线跨电压故障短路计算[J]. 电工技术学报, 2018, 33(11): 2496-2507.  
ZHENG Tao, ZHANG Jiaqin, WU Dan, et al. Cross-voltage short-circuit calculation of mixed-voltage double-circuit lines partly on the same tower[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(11): 2496-2507.
- [11] 郭培育, 邵能灵, 于仲安, 等. 基于环流分量的同塔四回输电线路单回线故障选线新方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 206-214.  
GUO Peiyu, TAI Nengling, YU Zhong'an, et al. New single-line faulted selecting method for four-parallel transmission lines on the same tower based on loop flow component[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 206-214.
- [12] FAN Chunju, LIU Ling, TIAN Yu. A fault-location method for 12-phase transmission lines based on twelve-sequence-

- component method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 135-142.
- [13] 郭培育, 邵能灵, 于仲安, 等. T型同杆四回线路故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 49-55.  
GUO Peiyu, TAI Nengling, YU Zhong'an, et al. A new method of fault line selection for teed circuits with four-parallel transmission lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 49-55.
- [14] 刘欣, 黄少锋, 张鹏. 相电流差突变量选相在混压同塔输电线路跨电压故障中的适应性分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 118-126.  
LIU Xin, HUANG Shaofeng, ZHANG Peng. Adaptability analysis of phase-selector based on sudden-change of phase-current-difference in cross-voltage fault occurred in mixed-voltage transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 118-126.
- [15] 王艳, 刘美岑, 陈旭, 等. 中性点不同接地方式下混压部分同塔双回线路故障分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 159-165.  
WANG Yan, LIU Meicen, CHEN Xu, et al. Fault analysis of mixed-voltage double-circuit lines partly on same tower under different grounding modes of neutral point[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 159-165.
- [16] 舒巧俊, 陈松石, 范春菊, 等. 非全程同杆四回线路故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 130-136.  
SHU Qiaojun, CHEN Songshi, FAN Chunju, et al. A new method of fault line selection for incomplete-journey four-jointed parallel line on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 130-136.
- [17] 梁振锋, 吴思奇, 张惠智, 等. 基于同向量电流选相的电流平衡保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 125-132.  
LIANG Zhenfeng, WU Siqi, ZHANG Huizhi, et al. Research on current balance protection based on same directional component current phase selection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 125-132.
- [18] ZHANG Jiaqin, ZHENG Tao, WU Qiong. Adaptability of phase selectors based on phase-to-phase superimposed currents when confronting cross-voltage faults in mixed-voltage quadruple-circuit line system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(13): 3242-3247.
- [19] DAS S, ANANTHAN S N, Santoso, S. Estimating zero-sequence impedance of three-terminal transmission line and Thevenin impedance using relay measurement data[J]. Protection Control Modern Power Systems, 2018, 3(3): 373-382. DOI: 10.1186/s41601-018-0108-y.
- [20] DA S, FILIPE F B, CLAUS L. Distance protection of multiple-circuit shared tower transmission lines with different voltages - part II: fault loop impedance[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(10): 2626-2632.
- [21] 李月乔, 王君. 不同电压等级四回线双端故障测距原理研究[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 77-83.  
LI Yueqiao, WANG Jun. Two-terminal fault location for four-circuit transmission system composed of two double-circuit transmission lines on same towers respectively belonging to different voltage grades[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 77-83.
- [22] 王守鹏, 赵冬梅, 商立群, 等. 基于线路分段参数的非全程同塔双回线路故障定位算法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(20): 261-270.  
WANG Shoupeng, ZHAO Dongmei, SHANG Liqun, et al. Fault location algorithm for incomplete double-circuit transmission lines based on line segment parameters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(20): 261-270.
- [23] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

收稿日期: 2019-06-10; 修回日期: 2019-08-27

作者简介:

郑涛(1975—), 男, 通信作者, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: zhengtao\_sf@126.com

吴琼(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: ncepuwuqiong@163.com

于溯(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: ncepuyusu@163.com

(编辑 姜新丽)