

DOI: 10.7667/PSPC180869

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

蔡乾¹, 吴建云¹, 罗美玲¹, 王小立¹, 郑涛², 张嘉琴²

(1. 国网宁夏电力有限公司, 宁夏 银川 750001;

2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 混压同塔多回线输电方式因其具有传输容量大、占用土地资源少等优势, 在国内外得以较多应用。两个不同电压等级线路间的跨电压故障是混压同塔输电方式下的一种常见故障形式, 已有文献开展了跨电压接地故障对距离保护的影响研究。但对于跨电压不接地故障, 因其分析更为复杂, 尚未见相关研究。以跨电压不接地故障为研究对象, 分析了其对接地距离保护和相间距离保护的影响。基于复合序网的混压同塔多回线跨电压故障分析方法, 计算分析了跨电压不接地故障时测量阻抗的变化规律, 得出其大小与故障点位置和两不同电压系统特殊相电源相角差有关的结论, 并进一步指出其与接地故障下的测量阻抗区别及其原因。同时对非完全故障相的相间距离保护的動作情况进行了讨论, 指出其存在误动的可能性。最后, 在 PSCAD 中构建了 500 kV/220 kV 混压同塔四回输电线路模型, 通过大量仿真实验, 验证了理论分析的正确性。

关键词: 混压同塔多回线; 跨电压不接地故障; 距离保护; 短路电流; 零序互感

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

CAI Qian¹, WU Jianyun¹, LUO Meiling¹, WANG Xiaoli¹, ZHENG Tao², ZHANG Jiaqin²

(1. State Grid Ningxia Electric Power Limited Company, Yinchuan 750001, China; 2. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The mixed-voltage multi-circuit transmission lines are widely used at home and abroad because of its advantages of large transmission capacity and small land resources. The cross-voltage fault between two different voltage-level lines is a common fault form under the mixed-line transmission mode. The literature has studied the influence of the grounding condition of the fault on the distance protection. No literature about non-grounding cross-voltage short-circuit is found, and it is more difficult to analyze. In this paper, the cross-voltage phase-to-phase fault is taken as the object, and its influence on ground and phase-to-phase distance protection is analyzed separately. Based on the method of calculating the fault current of mixed-voltage lines on the same tower in the composite sequence network, this paper calculates the variation law of the measured impedance when the non-grounding cross-voltage short-circuit occurs, draws the conclusion that the amount is related to the position of the fault point and the phase angle of the special phase of the two systems, and points out the difference between them and its cause. The performance of the phase-to-phase distance protection of the non-complete fault phase is discussed, and the possibility of maloperation is pointed out. Finally, a model of 500 kV/220 kV four-circuit transmission line on the same tower is built in PSCAD to verify the proposed analysis.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China: Key Projects of Smart Grid Technology and Equipment (No. 2016YFB0900600).

Key words: mixed-voltage multi-circuit lines on the same tower; non-grounding cross-voltage short-circuit; distance relay protection; short-circuit current; zero sequence mutual inductance

0 引言

经济社会不断发展, 为解决电能需求量不断增

多、土地资源日益紧张的问题, 混压同塔多回输电线路因其输送电能容量大、占用土地资源少的优势, 被广泛应用^[1-2]。对于混压同塔多回线路, 当发生不同电压等级间的跨电压故障, 使得故障线路的零序互感不仅来自同电压等级线路, 还来自另一电压等级的故障相^[3-4]。这对距离保护提出了更高的新要

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)

求, 保证其正确动作具有重要意义^[5]。

现有文献中, 对混压同塔四回线路中不接地距离保护的分析较少。文献[6-8]主要对跨电压接地故障对距离保护 I 段的影响进行讨论分析, 不接地故障与接地故障存在较大差异, 但其并未对此进行研究。文献[9-10]均是对同一电压等级线路的距离保护进行分析, 文献[11-14]研究的仅是双回线跨电压接地故障, 没有对同塔四回线路跨电压故障进行进一步的分析, 其所得结论均不适用于实际中应用较多的混压同塔四回线路。综上, 现有文献均只针对接地故障对距离保护的影响进行分析, 而跨电压不接地故障, 由于故障点处电压不为零, 其对距离保护的影响情况将更为复杂。提出一种混压同塔跨电压不接地故障对距离保护影响的分析方法对距离保护的改进具有重要意义。

本文针对跨电压不接地故障对混压同塔四回线距离保护的影响进行研究, 以不同电压等级单相跨单相不接地故障为例, 分别对故障相的接地距离保护和非完全故障相(一相为故障相, 另一相为非故障相)的相间距离保护的動作情况进行讨论。本文采用了较六序分理解耦法^[15-16]更简便的复合序网法^[17]求解混压同塔跨电压故障时的故障电流, 进而求出跨电压不接地故障时测量阻抗的数学表达式, 通过分析得出测量阻抗变化规律及影响因素, 并进一步指出了不接地故障与接地故障的测量阻抗差别及其产生原因。最后通过 PSCAD 仿真验证了理论分析的正确性。

1 跨电压不接地故障距离保护适应性分析

1.1 接地距离保护的适应性分析

由于除三相跨三相故障以外, 其他形式的混压同塔线路跨电压不接地故障皆存在零序分量^[18], 故发生不接地故障时有必要对接地距离保护的适应性进行分析。

1.1.1 测量阻抗的求取

图 1 所示为混压同塔四回线跨电压故障模型。本文基于文献[17]提出的复合序网法求取跨电压不

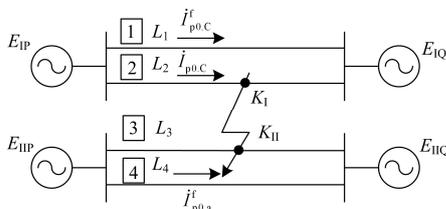


图 1 混压同塔四回线路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mixed-voltage quadruple-circuit transmission lines

接地故障短路电流的方法并展开分析。图 1 下标中的 P 代表电源送端, Q 代表电源受端, 方框表示保护所在位置。

以 I 系统 C 相跨 II 系统 a 相的不接地故障为例(后文用 C-a 表示), 分析 II 系统 a 相保护 3 处的接地距离保护。保护 3 处的测量电压为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ma} = & \dot{U}_{ka} + \dot{I}_{1.a} Z_{k1} + \dot{I}_{2.a} Z_{k2} + \dot{I}_{0.a} Z_{k0} + \\ & \dot{I}_{p0.a}^f Z_{mII-II} + (\dot{I}_{p0.C} + \dot{I}_{p0.C}^f) Z_{mI-II} = \\ & \dot{U}_{ka} + (\dot{I}_a + K \cdot 3\dot{I}_{0.a}) Z_{k1} + \dot{I}_{p0.a}^f Z_{mII-II} + \\ & (\dot{I}_{p0.C} + \dot{I}_{p0.C}^f) Z_{mI-II} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $K = \frac{Z_{k0} - Z_{k1}}{3Z_{k1}}$; Z_{k1} 、 Z_{k2} 、 Z_{k3} 分别为短路点到保护 3 处之间的正、负、零序线路阻抗; Z_{mI-II} 为两不同电压等级系统间 Z_{k1} 从保护安装处到短路点处的线路互感; Z_{mII-II} 为系统 II 内从保护安装处到短路点处两条线路间的互感; \dot{I}_a 为保护 3 处的 a 相测量电流, $\dot{I}_{1.a}$ 、 $\dot{I}_{2.a}$ 、 $\dot{I}_{0.a}$ 为其正、负、零序分量; $\dot{I}_{p0.C}^f$ 为流过保护 1 处的零序电流, 即流过 I 系统非故障线路的零序电流; $\dot{I}_{p0.C}$ 为流过保护 2 处的零序电流, 即流过 I 系统故障线路的零序电流; $\dot{I}_{p0.a}^f$ 为流过保护 4 处的零序电流, 即流过 II 系统非故障线路的零序电流; \dot{U}_{ka} 为故障点 a 相电压。

发生跨电压不接地故障时, 保护 3 的测量阻抗如式(2)所示。

$$Z_m = \frac{\dot{U}_{ma}}{\dot{I}_a + K \cdot 3\dot{I}_{0.a}} = Z_{k1} + \Delta Z_{m1} + \Delta Z_{m2} + \Delta Z_{m3} \quad (2)$$

ΔZ_{m1} 、 ΔZ_{m2} 、 ΔZ_{m3} 为测量阻抗的附加阻抗, 测量阻抗 Z_m 的变化由附加阻抗的变化引起, Z_{k1} 为正常情况下的测量阻抗。

其中,

$$\Delta Z_{m1} = \frac{\dot{I}_{p0.a}^f}{\dot{I}_a + K \cdot 3\dot{I}_{0.a}} Z_{mII-II} \quad (3)$$

$$\Delta Z_{m2} = \frac{\dot{I}_{p0.C}^f + \dot{I}_{p0.C}}{\dot{I}_a + K \cdot 3\dot{I}_{0.a}} Z_{mI-II} \quad (4)$$

$$\Delta Z_{m3} = \frac{\dot{U}_{ka}}{\dot{I}_a + K \cdot 3\dot{I}_{0.a}} \quad (5)$$

值得注意的是, 与跨电压接地故障不同, ΔZ_{m3} 值与故障点电压大小成正比, 只有当发生不接地故障时, ΔZ_{m3} 的值不为零。

1.1.2 零序电流的求解

与单回线不同, 跨电压故障中多回线的零序网

络存在互感耦合, 网络中任一点的零序电流包含两个电压等级的零序分量。文献[18]提出解耦后的混压同塔四回线的零序网络图, 如图 2 所示。

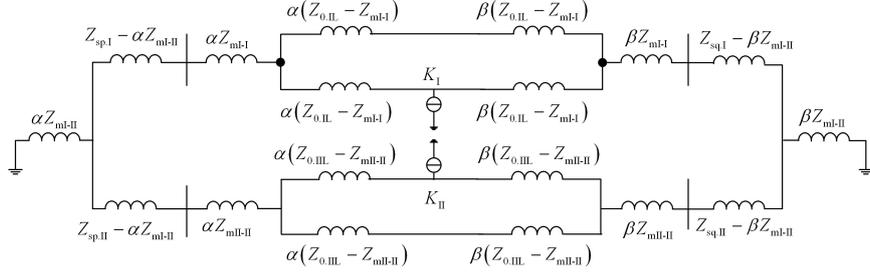


图 2 混压同塔四回线路零序网络图

Fig. 2 Zero sequence diagram of mixed-voltage quadruple-circuit transmission lines

图 2 中 K_I 、 K_{II} 处电流源分别为 I、II 系统等效零序电流源, α 为保护 2 到故障点距离占线路全长的百分比, β 为剩余线路占线路全长的百分比。由图 2 可知, 保护安装处零序电流的来源有两部分: 一部分是本线路故障点提供的零序电流; 另一部分是另一条线路的互感零序电流。因此, 式(3)~式(5)中各电流量可以表示如下。

$$\dot{I}_{p0.C}^f = C_1 \dot{I}_{k0.C} + C_2 \dot{I}_{k0.a} \quad (6)$$

$$\dot{I}_{p0.C} = C_3 \dot{I}_{k0.C} + C_4 \dot{I}_{k0.a} \quad (7)$$

$$\dot{I}_{0.a} = C_5 \cdot \dot{I}_{k0.C} + C_6 \cdot \dot{I}_{k0.a} \quad (8)$$

$$\dot{I}_{p0.a}^f = C_7 \dot{I}_{k0.C} + C_8 \dot{I}_{k0.a} \quad (9)$$

$$\dot{I}_a = C_9 \cdot \dot{I}_{k1.a} + C_{10} \cdot \dot{I}_{k2.a} + \dot{I}_{0.a} \quad (10)$$

$\dot{I}_{k\gamma,\varphi}$ 代表短路点处 φ 相的 γ 序电流, $C_1 \sim C_{10}$ 为电流分布系数。认为系统中正、负序阻抗相等, 则 $C_9 = C_{10}$ 。 C_1 为 K_I 处电流源单独作用时, 保护 1 处的零序电流分布系数; C_2 为 K_{II} 处电流源单独作用时, 保护 1 处的零序电流分布系数; $C_5 \sim C_8$ 物理含义以此类推。由于 I 系统故障点等效电流源对本系统零序电流大小影响较大, 对 II 系统影响较小, 故

$$C_1 > C_2 \quad (11)$$

$$C_3 > C_4 \quad (12)$$

$C_5 \sim C_8$ 大小关系以此类推。

1.1.3 适应性分析

分别对前述三个附加阻抗进行分析, 利用叠加原理得出测量阻抗的变化规律, 进而分析跨电压不接地故障下的接地距离保护适应性。

1) ΔZ_{m1} 性质分析

$$\Delta Z_{m1} = \frac{\dot{I}_{p0.a}^f}{\dot{I}_a + K \cdot 3\dot{I}_{0.a}} Z_{m1-II} \quad (13)$$

已知 $\dot{I}_{k1.a} = \dot{I}_{k2.a} = \dot{I}_{k0.a} = -\dot{I}_{k0.C}$ [18], 将式(8)、式(9)代入式(3)中化简可得

$$\Delta Z_{m1} = \frac{C_8 - C_7}{2C_9 + (3K + 1)(C_6 - C_5)} Z_{m1-II} \quad (14)$$

考虑系统整体阻抗角一致, 则各电流分布系数为实数, 在后续分析中仍基于该假设。由上述分析可知, $C_8 > C_7$ 、 $C_6 > C_5$, 故

$$\Delta Z_{m1} = m \cdot Z_{m12} \quad (15)$$

式中, m 为正实数, 即 ΔZ_{m1} 为正向附加阻抗。

2) ΔZ_{m2} 性质分析

对附加阻抗 ΔZ_{m2} 的分析过程与对 ΔZ_{m1} 的分析相类似。

$$\Delta Z_{m2} = \frac{\dot{I}_{p0.C}^f + \dot{I}_{p0.C}}{\dot{I}_a + K \cdot 3\dot{I}_{0.a}} Z_{m1-II} \quad (16)$$

代入分布系数, 化简可得

$$\Delta Z_{m2} = \frac{(C_2 - C_1) + (C_4 - C_3)}{2C_9 + (3K + 1)(C_6 - C_5)} Z_{m1-II} \quad (17)$$

由式(11)、式(12)及分析可知, 分布系数的关系有 $C_1 > C_2$ 、 $C_3 > C_4$ 、 $C_6 > C_5$, 故

$$\Delta Z_{m2} = n \cdot Z_{m1-II} \quad (18)$$

式中, n 为负实数, 即 ΔZ_{m2} 为反向附加阻抗。

3) ΔZ_{m3} 性质分析

基于文献[18]中 C-a 不接地短路的故障分析可知

$$\begin{cases} \dot{U}_{ka} = \dot{E}_a - \dot{I}_{0.a} Z_{\Sigma II} \\ Z_{\Sigma II} = Z_{1,II} + Z_{2,II} + Z_{0,II.e} \end{cases} \quad (19)$$

将故障电流计算结果代入式(5), 得

$$\Delta Z_{m3} = \frac{-Z_{\Sigma II}}{2C_9 + (3K + 1)(C_6 - C_5)} + \frac{\dot{E}_a}{\dot{E}_a - \dot{E}_C} \cdot \frac{Z_{\Sigma I} + Z_{\Sigma II}}{2C_9 + (3K + 1)(C_6 - C_5)} = \Delta Z_{m21} + \Delta Z_{m22} \quad (20)$$

由于 $C_6 > C_5$, 得

$$\Delta Z_{m21} = p Z_{\Sigma II} \quad (21)$$

式中, p 为负实数, 即 ΔZ_{m21} 为反向附加阻抗。

令 $\dot{E}_C = k\dot{E}_a e^{j\delta}$, k 为 I 系统故障相 C 相与 II 系统故障相 a 相故障点电压的幅值比; δ 是上述两电压的相角差, 则有

$$\Delta Z_{m22} = \frac{1}{1 - ke^{j\delta}} \cdot \frac{Z_{\Sigma I} + Z_{\Sigma II}}{2C_9 + (3K + 1)(C_6 - C_5)} = \frac{Me^{j90^\circ}}{1 - ke^{j\delta}} \quad (22)$$

M 为正实数, 随着 δ 在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 变化, ΔZ_{m22} 的末端轨迹为圆滑曲线。由叠加原理可知, ΔZ_{m3} 具有反向附加阻抗性质且末端轨迹为圆滑曲线。

4) 适应性分析

附加阻抗

$$\Delta Z_m = \Delta Z_{m1} + \Delta Z_{m2} + \Delta Z_{m3} \quad (23)$$

根据叠加原理, 由上述分析不难得出, 由于附加阻抗的存在, 存在以下可能性: 区外故障时误动, 区内故障时拒动, 如图 3 所示(实线圆内为保护动作区, 虚线圆为测量阻抗末端轨迹)。

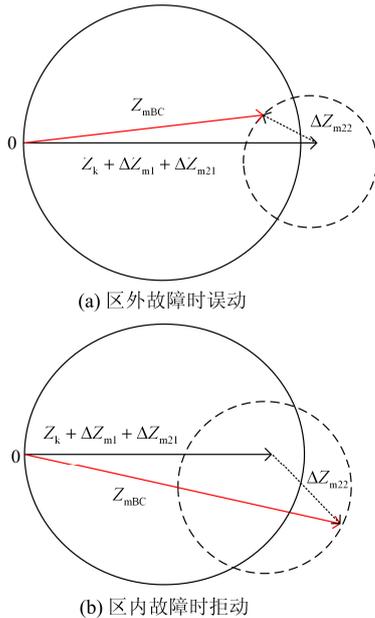


图 3 接地距离保护动作情况

Fig. 3 Action situation of distance protection

1.2 相间距离保护的适应性分析

混压同塔四回线的跨电压不接地故障会对相电流差突变选相造成影响^[19], 可能无法正确选相。因此, 需要对非完全故障相(一相为故障相, 另一相为非故障相)的相间距离保护性能进行分析, 研究跨电压不接地故障对其产生的影响。本文以 C-a 故障为例, 以 I 系统保护 2 为研究对象, 分析该故障对 I 系统 BC 相间距离保护的影响。

1.2.1 测量阻抗的求取

BC 相间测量阻抗如式(24)。

$$Z_{mBC} = \frac{\dot{U}_{mBC}}{\dot{I}_{mBC}} = \frac{(\dot{U}_{m1.B} - \dot{U}_{m1.C}) + (\dot{U}_{m2.B} - \dot{U}_{m2.C})}{(\dot{I}_{m1.B} - \dot{I}_{m1.C}) + (\dot{I}_{m2.B} - \dot{I}_{m2.C})} = \frac{\dot{U}_{m1.C}(e^{j120^\circ} - 1) + \dot{U}_{m2.C}(e^{-j120^\circ} - 1)}{\dot{I}_{m1.C}(e^{j120^\circ} - 1) + \dot{I}_{m2.C}(e^{-j120^\circ} - 1)} \quad (24)$$

式中: m 代表在保护安装处测量的电气量; $\varphi = A, B, C$; $\dot{U}_{m1,\varphi}$ 为保护安装处 φ 相正序电压; $\dot{U}_{m2,\varphi}$ 为保护安装处 φ 相负序电压; $\dot{I}_{m1,\varphi}$ 为保护安装处 φ 相正序电流; $\dot{I}_{m2,\varphi}$ 为保护安装处 φ 相负序电流。

假设系统正、负序阻抗相等, 则正、负序电流分布系数相等, 发生 C-a 故障时, 故障点处 $\dot{I}_{1.C} = \dot{I}_{2.C} = \dot{I}_{0.C}$ ^[20], 即 $\dot{I}_{m1.C} = \dot{I}_{m2.C}$ 。将上式进一步化简得到

$$Z_{mBC} = \frac{\dot{U}_{m1.C}(e^{j120^\circ} - 1) + \dot{U}_{m2.C}(e^{-j120^\circ} - 1)}{-3\dot{I}_{m1.C}} \quad (25)$$

对 I 系统做等值变换, 求出其正序故障附加网络, 并进行星-角转换, 如图 4 所示, 进而求出 I 系统中保护 2 处(如图 1 所示)C 相正序测量电压 $\dot{U}_{m1.C}$ 。

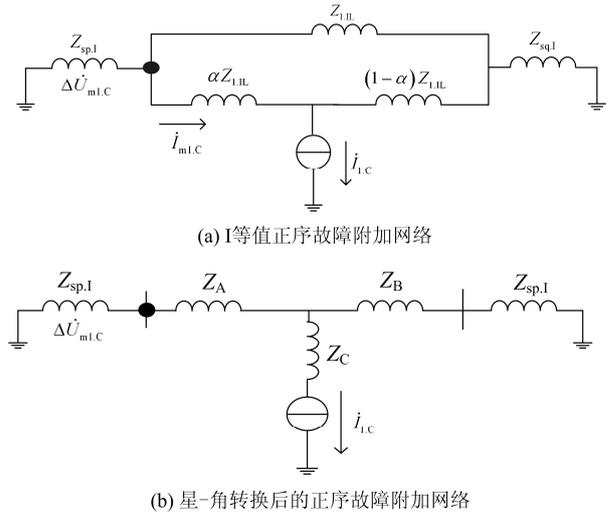


图 4 I 系统正序故障附加网络

Fig. 4 Positive sequence fault additional network in I system

$\dot{I}_{1.C}$ 为故障点 C 相正序电流; $\dot{I}_{m1,\varphi}$ 为保护 2 处流过的 C 相正序电流; $\Delta \dot{U}_{m1.C}$ 为保护 2 处 C 相正序电压故障分量。

取 $Z_{sp,1} = Z_{sq,1}$, 根据图 4 所示故障附加网络得

$$\Delta \dot{U}_{m1.C} = -\frac{(Z_B + Z_{sp,1})Z_{sp,1}}{Z_A + Z_B + 2Z_{sp,1}} \dot{I}_{1.C} \quad (26)$$

则故障后保护 2 处 C 相正序电压为

$$\dot{U}_{m1.C} = \dot{U}_{m1.C|0} + \Delta\dot{U}_{m1.C} = \dot{E}_{CP} + \Delta\dot{U}_{m1.C} \quad (27)$$

式中, $\dot{U}_{m1.C|0}$ 为正常运行时保护 2 处的 C 相电压, 由于不计负荷电流, 即短路前空载, 有 $\dot{U}_{m1.C} = \dot{E}_{CP}$, \dot{E}_{CP} 为 P 侧(如图 1 所示)电源电压, 记为 \dot{E}_C 。同理有

$$\Delta\dot{U}_{m2.C} = -\frac{(Z_B + Z_{sp1})Z_{sp1}}{Z_A + Z_B + 2Z_{sp1}} \dot{i}_{2.C} \quad (28)$$

由故障点处 $\dot{i}_{1.C} = \dot{i}_{2.C} = \dot{i}_{0.C}$, 所以有

$$\dot{U}_{m2.C} = \Delta\dot{U}_{m2.C} = \Delta\dot{U}_{m1.C}$$

保护 2 处 C 相正序电流为

$$\dot{i}_{m1.C} = \frac{-Z_{sp1}(2\alpha - 3) + (1 - \alpha)Z_{1.II}}{Z_{1.II} + 4Z_{sp1}} \dot{i}_{1.C} \quad (29)$$

由文献[18]知, C-a 故障时 $\dot{i}_{1.C} = \frac{\dot{E}_C - \dot{E}_a}{Z_{\Sigma I} + Z_{\Sigma II}}$, 令

$\dot{E}_C = k\dot{E}_a e^{j\delta}$, k 为 I 系统故障相 C 相与 II 系统故障相 a 相故障点电压的幅值比, δ 是上述两电压的相角差, 将所得电压、电流量代入式(25)得

$$Z_{mBC} = Z_1 \cdot Z_2 + Z_3 \cdot Z_4 \quad (30)$$

$$Z_1 = \frac{(Z_{1.II} + 4Z_{sp1}) \cdot (Z_{\Sigma I} + Z_{\Sigma II})}{Z_{sp1}(3 - 2\alpha) + (1 - \alpha)Z_{1.II}} \quad (31)$$

$$Z_2 = \frac{ke^{j(\delta - 30^\circ)}}{(ke^{j\delta} - 1)\sqrt{3}} \quad (32)$$

$$Z_3 = \frac{1}{[Z_{sp1}(3 - 2\alpha) - (1 - \alpha)Z_{1.II}]} \quad (33)$$

$$Z_4 = \frac{-(Z_B + 2Z_{sp1})Z_{sp1} \cdot (Z_{1.II} + 4Z_{sp1})}{Z_A + Z_B + 2Z_{sp1}} \quad (34)$$

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

式(30)中, 当系统参数确定时, Z_1 、 Z_3 是与故障点到保护安装处距离有关的变量, Z_2 是与两不同电压等级系统特殊相电源相角差有关的变量, Z_4 是定值。

1.2.2 适应性的分析

当发生 C-a 故障时, I 系统 BC 属于非完全故障相。由式(30)知, 测量阻抗大小与故障点位置 α 和两不同电压等级系统特殊相电源相角差 δ 大小有关。经数学分析可知, 当 δ 确定时, Z_{mBC} 大小与 α 成正比, 不排除在保护首端即 α 较小处, 测量阻抗较小时小于动作阻抗的情况。经仿真验证, 在距离保护 5% 的线路长度处发生 C-a 故障, δ 在较大的范

围内(162.7°~219.4°)变化时, BC 相间距离保护会误动。由于 Z_{mBC} 大小与 α 成正比, 故在保护首端 5% 范围内发生 C-a 故障, 都可能引起 BC 相间距离保护误动。

2 仿真实验

在 PSCAD 仿真软件中搭建混压同塔四回线跨电压短路模型, 线路长度设置为 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 $0.0094 + j0.26 \Omega/\text{km}$, 零序阻抗为 $0.268 + j1.0226 \Omega/\text{km}$, 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 $0.0417 + j0.283 \Omega/\text{km}$, 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 $j93 \Omega$; I 系统线间互感为 $0.259 + j0.763 \Omega/\text{km}$, II 系统线间互感为 $0.227 + j0.88 \Omega/\text{km}$, 不同电压等级线间互感为 $0.243 + j0.678 \Omega/\text{km}$ 。

在该模型中同时对不接地故障对距离保护和相间距离保护的影响进行仿真。

2.1 C-a 故障时接地距离保护动作情况

① 故障点位于线路中点处

在线路中点处设置 I 系统 C 相跨 II 系统 a 相不接地短路故障, 研究对象为 II 系统 a 相的接地距离保护 I 段。在 PSCAD 中, 设置相角差 δ 在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 内变化, 每隔 30° 做一组。将测量阻抗代入式(2), 求得动作量 Z 的大小, 其值见表 1。其中,

$$Z = \left| Z_m - \frac{1}{2} Z_{set} \right| \quad (35)$$

分析距离保护 I 段的动作情况。距离保护 I 段的动作条件如下:

$$\left| Z_m - \frac{1}{2} Z_{set} \right| \leq \left| \frac{1}{2} Z_{set} \right| \quad (36)$$

$$Z_{set} = 0.8 Z_{L1} \quad (37)$$

式中, $\left| \frac{1}{2} Z_{set} \right| \approx 34 \Omega$ 。根据表 1 中仿真所得动作量, 绘制波形图, 如图 5 所示。

表 1 C-a 故障接地距离保护动作量大小(线路中点)

Table 1 Amount of earthing-fault distance protection's action when C-a fault occurs (at the middle of the line)

相角差/(°)	0	30	60	90
Z/Ω	261.38	223.78	157.79	105.75
相角差/(°)	120	150	180	210
Z/Ω	66.74	36.16	17.56	32.63
相角差/(°)	240	270	300	330
Z/Ω	62.81	101.89	154.05	220.11

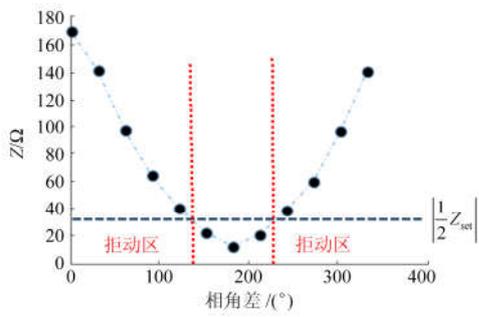


图 5 C-a 故障接地距离保护动作量波形图(线路中点)

Fig. 5 Waveform of the action in earthing-fault distance protection when C-a fault occurs (at the middle of the line)

由图 5 可知, 故障点位于线路中点时, δ 在 $0^\circ \sim 120^\circ$ 以及 $240^\circ \sim 360^\circ$ 内, 线路的接地距离保护会发生拒动。

②故障点距离保护安装处 90%线路长度

在线路中距离保护安装处 90%线路长度设置 I 系统 C 相跨 II 系统 a 相不接地短路故障, 研究对象为 II 系统 a 相的接地距离测量阻抗。同样, 在 PSCAD 中, 设置相角差 δ 在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 内变化, 每隔 30° 做一组, 求得动作量 Z 的大小见表 2。

表 2 C-a 故障接地距离保护动作量大小(线路末端)

Table 2 Amount of earthing-fault distance protection's action when C-a fault occurs (at the end of the line)

相角差/(°)	0	30	60	90
Z/Ω	168.96	140.77	97.29	64.57
相角差/(°)	120	150	180	210
Z/Ω	40.80	22.71	12.65	21.19
相角差/(°)	240	270	300	330
Z/Ω	39.13	60.09	96.31	140.44

根据表 2 中仿真所得动作量, 绘制波形图, 如图 6 所示。

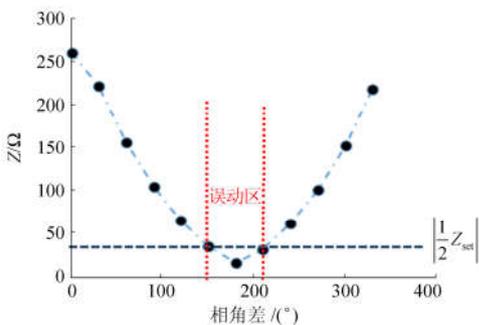


图 6 不接地故障动作量波形图(线路末端)

Fig. 6 Waveform of the action of non-earthing fault (at the end of the line)

由图 6 可知, 故障点位于距首端 90%线路长度

处时, δ 在 $140^\circ \sim 220^\circ$ 内, 线路的接地距离保护会发生误动作。

2.2 C-a 故障时相间距离保护的動作情况

在线路中距离保护安装处 5%线路长度设置 I 系统 C 相跨 II 系统 a 相不接地短路故障, 研究对象为 I 系统 BC 相的相间距离保护的测量阻抗。在 PSCAD 中, 设置相角差 δ 在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 内变化, 每隔 30° 做一组。将测量阻抗代入式(25), 求得动作量 Z 的大小, 其值见表 3。

表 3 C-a 故障相间距离保护动作量大小(线路首端 5%)

Table 3 Amount of phase-fault distance protection's action when C-a fault occurs (at the 5% of the line)

相角差/(°)	0	30	60	90
Z/Ω	146.7	110.21	76.22	52.48
相角差/(°)	120	150	180	210
Z/Ω	36.63	26.52	22.98	26.73
相角差/(°)	240	270	300	330
Z/Ω	36.94	52.78	76.43	110.26

其中, Z 同式(35), $\left| \frac{1}{2} Z_{set} \right| = 29.36$ 。

根据表 3 中仿真所得动作量, 绘制波形图, 如图 7 所示。

由图 7 可知, 故障点位于距首端 5%线路长度处时, δ 在 $162.7^\circ \sim 219.4^\circ$ 内, I 系统 BC 相的相间距离保护会发生误动作。

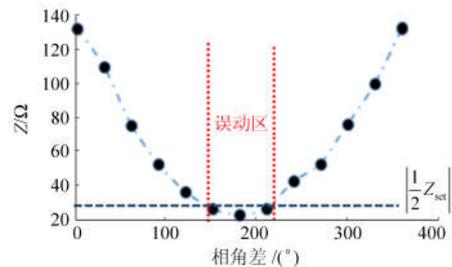


图 7 相间距离保护动作量波形图(线路首端 5%处)

Fig. 7 Waveform of the action in phase-fault distance protection (at the 5% of the line)

3 总结

本文主要针对混压同塔四回线路中发生跨电压不接地故障的情况, 对故障线路的接地距离保护和不完全故障相的相间距离保护的适应性进行分析。根据理论分析及仿真验证, 得出如下结论:

1) 两电压等级线路间发生跨电压故障时, 故障相的测量阻抗可表示为短路阻抗与附加阻抗的和的形式。而附加阻抗的大小与故障点的位置及故障时

两系统故障相电动势的相角差有关。

2) 与跨电压接地故障的测量阻抗相比, 跨电压不接地故障由于故障点的电压不为零, 其附加阻抗较大, 对距离保护影响较明显。

对于非完全故障相的相间距离保护, 其测量阻抗大小与故障点距保护安装处的距离成正比, 在保护首端发生跨电压不接地故障时, 存在保护误动的情况。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 雷霖, 赖真良, 朱家龙, 等. 工频变化量距离继电器耐受过渡电阻性能分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 26-33.
LEI Lin, LAI Zhenliang, ZHU Jialong, et al. Performance analysis of endure transition resistance of distance relay based on the power-frequency voltage and current variation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 26-33.
- [3] 张旭升, 李旭, 樊占峰, 等. 同塔四回线路纵向故障对零序方向保护的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 114-120.
ZHANG Xusheng, LI Xu, FAN Zhanfeng, et al. Influence research of longitudinal fault on zero sequence direction protection for four parallel transmission lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 114-120.
- [4] 赵凯超, 周泽昕, 杜丁香. 不同电压等级同塔四回输电线路不运行方式下零序互感对接地距离保护的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 193-197.
ZHAO Kaichao, ZHOU Zexin, DU Dingxiang. Influence of zero-sequence mutual inductance on earth-fault distance protection for four-circuit transmission lines belonging to different voltage classes on same tower under different operation modes[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 193-197.
- [5] 黄少锋. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [6] 黄少锋, 刘欣, 张鹏, 等. 混压同塔线路跨电压接地故障对距离保护的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 96-101.
HUANG Shaofeng, LIU Xin, ZHANG Peng, et al. Influence on distance protection caused by earthed cross-voltage fault in multi-circuit transmission lines system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 96-101.
- [7] 张旭, 徐振宇, 贺健, 等. 同塔四回线路单相接地故障距离保护[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 30-36, 42.
ZHANG Xu, XU Zhenyu, HE Jian, et al. Distance protection for single-phase grounding fault of four-loop transmission lines on same tower[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 30-36, 42.
- [8] 张颖, 邵能灵. 同塔四回线接地距离保护的分析和[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 1-6.
ZHANG Ying, TAI Nengling. Analysis of ground distance protection for quadruple-circuit transmission lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 1-6.
- [9] 张健康, 栗小华, 胡勇. 750 kV 同塔双回线接地距离保护整定计算[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(22): 102-105.
ZHANG Jiankang, LI Xiaohua, HU Yong. Setting calculation of ground distance protection for 750 kV double circuit lines on the same tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 102-105.
- [10] 张保会. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [11] 李斌, 廖惠琴, 戴冬康, 等. 局部同塔输电线路的接地距离保护影响及对策[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(12): 1-7, 13.
LI Bin, LIAO Huiqin, DAI Dongkang, et al. Effect on ground distance protection and measures for transmission lines partially on the same tower[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2017, 29(12): 1-7, 13.
- [12] 徐海洋, 黄兴华, 王婷, 等. 同塔双回线零序电压补偿分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 86-92.
XU Haiyang, HUANG Xinghua, WANG Ting, et al. Analysis of zero-sequence voltage compensation in double-circuit transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 86-92.
- [13] 姜宪国, 刘宇, 周泽昕, 等. 同塔双回线接地距离保护零序电流补偿系数分析及整定方法改进[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 9-14, 30.
JIANG Xianguo, LIU Yu, ZHOU Zexin, et al. Analysis of zero-sequence current compensation coefficient and improvement of setting method for grounding distance protection of dual-loop lines on the same tower[J]. Electric

- Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 9-14, 30.
- [14] 徐海洋, 黄兴华, 王婷, 等. 同塔双回线零序电压补偿分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 86-92.
XU Haiyang, HUANG Xinghua, WANG Ting, et al. Analysis of zero-sequence voltage compensation in double-circuit transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 86-92.
- [15] 李博通, 李永丽, 陈莉, 等. 同塔四回线参数解耦及故障分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 1-9.
LI Botong, LI Yongli, CHEN Li, et al. Method for parameter decoupling and fault analysis of four-circuit transmission lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 1-9.
- [16] 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.
- [17] 黄少锋, 刘欣, 王洪敏, 等. 混压同塔四回线跨电压故障的短路计算[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 993-1001.
HUANG Shaofeng, LIU Xin, WANG Hongmin, et al. Cross-voltage short-calculation on mixed-voltage four-circuit lines system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 993-1001.
- [18] 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.
- [19] 刘欣, 黄少锋, 张鹏. 相电流差突变量选相在混压同塔输电线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.
- [20] 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.

收稿日期: 2018-07-13; 修回日期: 2018-11-07

作者简介:

蔡 乾(1973—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: dkzxbhc@163.com

吴建云(1986—), 男, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 328945289@qq.com

(编辑 魏小丽)