

不同电压等级同塔四回输电线路不同运行方式下 零序互感对接地距离保护的影响

赵凯超, 周泽昕, 杜丁香

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

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

ZHAO Kaichao, ZHOU Zexin, DU Dingxiang

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: The influences of zero-sequence mutual inductance on zero-sequence current compensating factor and measured impedance of earth-fault distance protection for four-circuit transmission lines belonging to different voltage classes on same tower under different operation modes are analyzed. Theoretical analysis results show that in all operation modes the zero-sequence current compensating factor reaches its highest value and the measured impedance reaches its lowest value under the operation mode of two-circuit transmission lines on the same tower; the zero-sequence current compensating factor is the lowest and the measured impedance is the highest under the condition that one circuit is operated and the rest of the circuits are artificially grounded for the maintenance. On this basis, a suggestion on the setting of zero-sequence current compensating factor of earth-fault distance protection is given. Simulation verification of four-circuit transmission lines respectively belonging to 500 kV and 1 000 kV power grids on the same tower is performed by real-time digital simulator (RTDS), and simulation results conform to the results of theoretical analysis.

KEY WORDS: operation modes; zero-sequence mutual induction; four-circuit transmission lines on the same tower; earth-fault distance protection; zero-sequence current compensation factor; measured impedance

摘要: 分析了不同电压等级同塔四回线路在不同运行方式下, 零序互感对接地距离保护零序电流补偿系数及测量阻抗的影响。理论分析表明: 所有运行方式中, 线路同塔双回运行时零序电流补偿系数最大, 测量阻抗最小; 1回运行, 其他3回检修接地时, 对应的零序电流补偿系数最小, 测量阻抗最大。在此基础上, 给出了接地距离保护零序电流补偿系数的整定建议。利用RTDS对1 000 kV/500 kV同塔四回线路进行了仿真验证, 仿真结果与理论分析一致。

关键词: 运行方式; 零序互感; 同塔四回输电线路; 接地距离保护; 零序电流补偿系数; 测量阻抗

0 引言

同塔多回输电可以有效利用线路走廊用地, 提高输电容量, 降低电力建设成本。目前同塔多回输电线路中以同塔双回线应用较多。近几年随着我国城市建设的发展, 为了更加节约用地, 许多新建线路都要在已有的双回线路上进行修改, 建成同塔四回线^[1-7], 这种改变也给电网的运行带来一些特殊的技术问题, 对继电保护提出了特殊的要求^[8-15]。

在同塔四回线中, 由于线路之间存在较大的零序互感, 对接地距离保护进行整定计算或进行保护区校验时, 需要确定四回线不同运行方式下的零序电流补偿系数。文献[16]分析了同一电压等级同塔四回输电线路不同运行方式下零序互感对接地距离保护零序电流补偿系数的影响。目前对于不同电压等级同塔四回输电线路的分析比较少。

同一电压等级同塔四回输电线路和不同电压等级同塔四回输电线路的运行方式有较大的区别, 零序互感对接地距离保护的影响也不尽相同。

本文分析了不同电压等级同塔四回输电线路处于不同运行方式时, 零序互感对接地距离保护零序电流补偿系数及测量阻抗的影响。在此基础上, 给出了接地距离保护零序电流补偿系数的整定原则, 并利用RTDS对1 000 kV/500 kV同塔四回输电线路进行了仿真验证, 仿真结果与理论分析结论一致。

1 零序互感对接地距离保护的影响

图 1(a)为不同电压等级同塔四回输电线路的示意图，图中 I、II 回线为同一电压等级，III、IV 回线为另一电压等级。图 1(b)为 I 回线发生单相接地故障时的零序等值网络，图中： $Z_{10}—Z_{IV0}$ 分别为 I—IV 回线的零序自阻抗； Z_{1-II0} 、 Z_{1-III0} 、 Z_{1-IV0} 分别为 I 回线与 II、III、IV 回线之间的零序互阻抗； $Z_{II-III0}$ 、 Z_{II-IV0} 分别为 II 回线与 III、IV 回线之间的零序互阻抗； $Z_{III-IV0}$ 为 III、IV 回线之间的零序互阻抗； Z_{M0} 、 Z_{N0} 、 Z_{P0} 、 Z_{Q0} 分别为电源 M、N、P 和 Q 的零序阻抗。

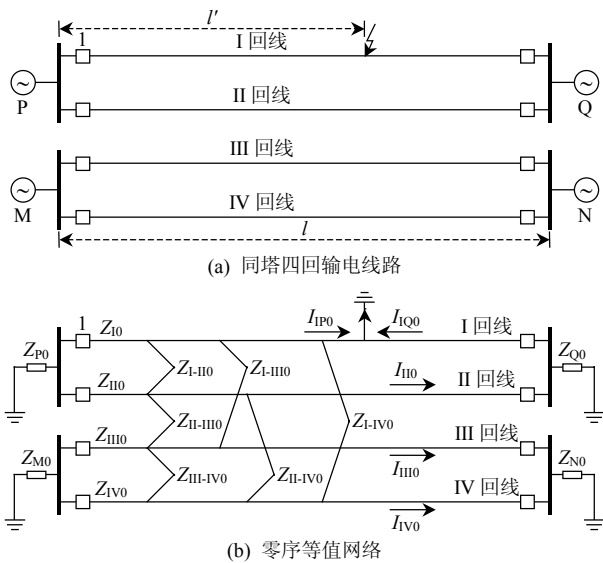


图 1 同塔四回输电线路及其零序等值网络

Fig. 1 Four-circuit transmission lines on the same tower and its zero-sequence equivalent network

这里主要分析零序互感对保护 1 处接地距离元件的影响，当四回线中 I 回线发生 A 相金属性接地时，A 相故障电压为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{IA} &= \dot{I}_{11}Z_{11}l' + \dot{I}_{12}Z_{12}l' + \dot{I}_{10}Z_{10}l' + \dot{I}_{II0}Z_{1-II0}l' + \dot{I}_{III0}Z_{1-III0}l' + \\ &\dot{I}_{IV0}Z_{1-IV0}l' = Z_{11}l'(\dot{I}_{11} + \dot{I}_{12} + \dot{I}_{10} + \frac{Z_{10} - Z_{11}}{Z_{11}}\dot{I}_{10} + \\ &\frac{Z_{1-II0}}{Z_{11}}\dot{I}_{II0} + \frac{Z_{1-III0}}{Z_{11}}\dot{I}_{III0} + \frac{Z_{1-IV0}}{Z_{11}}\dot{I}_{IV0}) = Z_{11}l'[\dot{I}_{IA} + \\ &3K_0\dot{I}_{10} + (3K_{I-II}\dot{I}_{II0} + 3K_{I-III}\dot{I}_{III0} + 3K_{I-IV}\dot{I}_{IV0})] = \\ &Z_{11}l'\{\dot{I}_{IA} + 3\dot{I}_{10}[K_0 + (K_{I-II}\frac{\dot{I}_{II0}}{\dot{I}_{10}} + K_{I-III}\frac{\dot{I}_{III0}}{\dot{I}_{10}} + \\ &K_{I-IV}\frac{\dot{I}_{IV0}}{\dot{I}_{10}})]\} = Z_{11}l'(\dot{I}_{IA} + 3K\dot{I}_{10}) \end{aligned} \quad (1)$$

式中： $K_0 = (Z_{10} - Z_{11}) / (3Z_{11})$ ， $K_{I-II} = Z_{1-II0} / (3Z_{11})$ ， $K_{I-III} = Z_{1-III0} / (3Z_{11})$ ， $K_{I-IV} = Z_{1-IV0} / (3Z_{11})$ ； \dot{I}_{11} 、 \dot{I}_{12} 、 \dot{I}_{10} 分别为 I 回线保护 1 侧正、负、零序电流； \dot{I}_{II0} 、 \dot{I}_{III0} 、 \dot{I}_{IV0} 分

别为 II、III、IV 回线零序电流； \dot{I}_{IA} 为故障相电流； Z_{11} 、 Z_{12} 分别为 I 回线正、负序阻抗； l' 为故障距离； K 为零序电流补偿系数，且有

$$K = K_0 + (K_{I-II}\frac{\dot{I}_{II0}}{\dot{I}_{10}} + K_{I-III}\frac{\dot{I}_{III0}}{\dot{I}_{10}} + K_{I-IV}\frac{\dot{I}_{IV0}}{\dot{I}_{10}}) \quad (2)$$

式中 $K_{I-II}\frac{\dot{I}_{II0}}{\dot{I}_{10}}$ 、 $K_{I-III}\frac{\dot{I}_{III0}}{\dot{I}_{10}}$ 、 $K_{I-IV}\frac{\dot{I}_{IV0}}{\dot{I}_{10}}$ 分别为 II、III、IV 回线的零序电流产生的附加零序电流补偿系数。

令 $K_1 = K_{I-II}\dot{I}_{II0} / \dot{I}_{10}$ ， $K_2 = K_{I-III}\dot{I}_{III0} / \dot{I}_{10}$ ， $K_3 = K_{I-IV}\dot{I}_{IV0} / \dot{I}_{10}$ ，式(2)可以表示为

$$K = K_0 + K_1 + K_2 + K_3 = K_0 + \Delta K \quad (3)$$

由式(1)可得，保护 1 接地距离继电器的测量阻抗可以表示为

$$\begin{aligned} Z_{1A} &= \frac{\dot{U}_{IA}}{\dot{I}_{IA} + 3K_0\dot{I}_{10}} = \\ &Z_{11}l'[1 + \frac{3(K_{I-II}\dot{I}_{II0} + K_{I-III}\dot{I}_{III0} + K_{I-IV}\dot{I}_{IV0})}{\dot{I}_{IA} + 3K_0\dot{I}_{10}}] \end{aligned} \quad (4)$$

假设 ΔZ 为附加测量阻抗，且有

$$\Delta Z = \frac{K_{I-II}\dot{I}_{II0} + K_{I-III}\dot{I}_{III0} + K_{I-IV}\dot{I}_{IV0}}{\dot{I}_{IA} + 3K_0\dot{I}_{10}} \times 3Z_{11}l' \quad (5)$$

则由式(5)可得：当 $\Delta Z > 0$ 时，保护 1 的测量阻抗将增大；当 $\Delta Z < 0$ 时，保护 1 的测量阻抗将减小。

对于同塔四回线路，在运行条件相同的情况下，故障点位于高电压等级线路时，由零序互感产生的附加测量阻抗会大于故障点位于低电压等级线路的情况。

2 不同运行方式下的零序电流补偿系数

2.1 状态 1 对零序电流补偿系数的影响

以 IV 回线为例，其运行状态可以分为 3 种：正常运行(状态 1)，线路两侧开关断开且两侧接地刀闸接地(状态 2)，线路两侧开关断开但两侧接地刀闸不接地(状态 3)，如图 2 所示。

对于单相接地，当故障点位于 I 回线末端时，保护 1 的接地距离保护受零序互感的影响最严重。

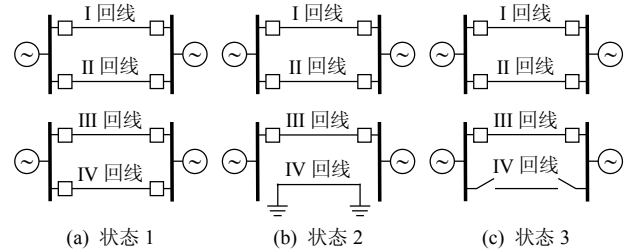


图 2 输电线路运行方式

Fig. 2 Operation modes of transmission line

在状态 1 中，流过 I、II 回线的零序电流方向相同，由于零序互感的影响，III、IV 回线中存在零序电压和零序电流，且零序电流的方向与 I、II 回线相反。由式(2)(5)可得，零序电流补偿系数和 ΔZ 会减小。

2.2 状态 2 对零序电流补偿系数的影响

在状态 2 中，零序电流补偿系数和 ΔZ 的变化与状态 1 类似，它们之间的差别在于，状态 2 中被感应线路的零序电流大于状态 1 中被感应线路的零序电流，这是因为和状态 1 相比，状态 2 的零序网中少了电源零序阻抗。

2.3 状态 3 对零序电流补偿系数的影响

在状态 3 中，断开线路接地刀闸没有接地，所以线路中只有零序电压，没有零序电流，这种情况下，断开线路对零序电流补偿系数和 ΔZ 没有影响。

2.4 运行方式对零序电流补偿系数的影响

对于不同电压等级同塔四回输电线路，表 1 给出了 I 回线正常运行，II、III、IV 回线的运行方式及由它们产生附加零序电流补偿系数。

从表 1 可以看出：当系统处于运行方式 4(即 I 回线正常运行，其他 3 回线两侧开关断开且两侧接地刀闸接地)时，附加零序电流补偿系数 ΔK 最小且小于 0，此时 $\Delta Z < 0$ ，接地距离元件的测量阻抗会

减小，接地距离保护范围会增大；当系统处于运行方式 6 时，零序电流补偿系数 K 最大且大于 0，此时 $\Delta Z > 0$ 。

2.5 零序电流补偿系数整定建议

对于保护 1 处的接地距离继电器，对其进行整定时，可以设置 2 个零序电流补偿系数。为防止接地距离 I 段发生超越，可以采用最小零序电流补偿系数(I 回线单回运行时，II、III、IV 回线 3 回检修接地)进行整定，从保证接地距离 II、III 段灵敏度考虑，需要利用所有运行方式中对应的最大零序电流补偿系数(I、II 回线双回运行时)进行整定。

3 仿真验证

利用 RTDS 对不同运行方式下，同塔四回输电线路零序互感对接地距离保护的影响进行了仿真验证。

仿真系统如图 1(a)所示，其中 I、II 回线电压等级为 1000 kV，III、IV 回线电压等级为 500 kV。线路全长 300 km，线路杆塔模型如图 3 所示。由于输电线路比较长，线路间的分布电容不能忽略，所以输电线路采用分布参数模型。表 2 给出了 1000 kV、500 kV 及地线参数。表 3 给出了 1000 kV/500 kV 导线的排列方式。故障点位于 I 回线末端，故障类型为 A 相金属性接地。

表 1 同塔四回输电线路运行方式及零序电流补偿系数
Tab. 1 Zero sequence current compensation factors and operation modes of four-circuit transmission lines on the same tower

运行方式	I 回线		II 回线		III 回线		IV 回线	
	状态	状态	K_1	状态	K_2	状态	K_3	
1	★	★	+	★	-	★	-	
2	★	★	+	★	-	●	-	
3	★	★	+	●	-	●	-	
4	★	●	-	●	-	●	-	
5	★	★	+	★	-	◆	0	
6	★	★	+	◆	0	◆	0	
7	★	◆	0	◆	0	◆	0	
8	★	★	+	●	-	◆	0	
9	★	★	+	◆	0	●	-	
10	★	◆	0	★	-	●	-	
11	★	●	-	★	-	◆	0	
12	★	◆	0	●	-	★	-	
13	★	●	-	◆	0	★	-	
14	★	●	-	●	-	◆	0	
15	★	◆	0	●	-	●	-	
16	★	●	-	◆	0	●	-	
17	★	◆	0	◆	0	●	-	
18	★	●	-	◆	0	◆	0	
19	★	◆	0	●	-	◆	0	

注：“★”表示状态 1，“●”表示状态 2，“◆”表示状态 3，“-”表示 K 值小于 0，“+”表示 K 值大于 0，“0”表示 K 值等于 0。

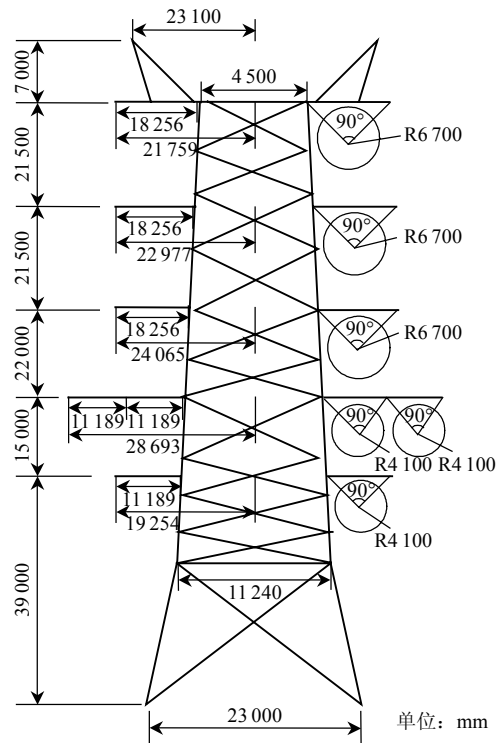


图 3 同塔四回输电线路杆塔结构示意图

Fig. 3 Tower structure of four-circuit transmission lines on the same tower

表 2 导线参数
Tab. 2 Parameters of lines

项目	1 000 kV	500 kV	地线
导线型号	LGJ-630/45	LGJ-630/45	JLB 20A-240
导线分裂数	8	4	1
导线半径/mm	16.8	16.8	10
分裂导线间距/mm	400	400	—
直阻/(Ω /km)	≤ 0.0463	≤ 0.0463	≤ 0.3601

表 3 导线排列方式
Tab. 3 The arrangement of lines

	1 000 kV		500 kV		
	A	C			
	B	B			
	C	A			
	A	B	B	A	
	C	C			

表 4 给出了几种典型运行方式下, I—IV 回线零序电流的大小及方向, 表中零序电流的方向以保护 1 处的零序电流方向为参考。

从表 4 可看出, 运行方式 1(4 回线正常运行)条件下, 流过 I、II 回线的零序电流方向相同, III、IV 回线零序电流与 I、II 回线方向相反。对于运行方式 2(I、II 回线正常运行, III、IV 回线断开且接地), III、IV 回线零序电流与 I、II 回线方向相反, 且此时 III、IV 回线零序电流大于运行方式 1 的零序电流, 这是因为和运行方式 1 相比, 运行方式 3 条件下 III、IV 零序网的零序阻抗减少了电源零序阻抗。运行方式 4(I 回线正常运行, II、III、IV 回线断开且接地)下的 II、III、IV 回线零序电流方向与 I 回线零序电流方向相反, 此时零序补偿系数最小。对于运行方式 7(I 回线正常运行, II、III、IV 回线断开不接地), 系统处于 I 回线单回运行状态, 其他 3 回线路只有零序电压, 没有零序电流, 所以保护 1 的接地距离元件测量阻抗不会发生变化。对于运行方式 6(I、II 回线正常运行, III、IV 回线断开不接地), I、II 回线双回运行, 此时流过 I、II 回线的零序电流方向相同, 零序补偿系数最大, 与理论分析一致。

通过公式(3)(5), 可以得到不同运行方式下的零

表 4 不同运行方式下零序电流的大小和方向

Tab. 4 Amplitudes and angles of zero-sequence current in different operation modes

零序电流		运行方式				
		1	3	4	6	7
I 回	I_0 /kA	7.018	7.046	8.986	6.885	7.120
	θ /($^\circ$)	0	0	0	0	0
II 回	I_0 /kA	0.931	0.994	5.146	0.663	—
	θ /($^\circ$)	-31.3	-29.5	174.3	-40.1	—
III 回	I_0 /kA	0.971	1.146	0.838	—	—
	θ /($^\circ$)	175.3	175.8	185.5	—	—
IV 回	I_0 /kA	0.706	0.88	0.144	—	—
	θ /($^\circ$)	166.7	169.1	176.0	—	—

序电流补偿系数 K 及测量阻抗的大小。表 5 给出了几种典型运行方式下测量阻抗及接地距离保护 I 段的整定值。

从表 5 可以看出: 由于故障点位于线路末端, I 回线单回运行(运行方式 7)时, 测量阻抗为故障点到保护安装处的线路阻抗; I、II 回线双回运行(运行方式 6)时, 测量阻抗占线路全长的 66.50%; 四回线运行(运行方式 1)时, 测量阻抗占线路全长的 71.64%; I 回线运行, 其他 3 回线检修接地(运行方式 4)时, 测量阻抗最大, 超线路全长 46%。

当接地距离保护 I 段可靠系数取 0.8, 运行方式 4 条件下 I 段保护范围超过线路全长 17%, 运行方式 6 条件下, I 段保护范围为线路全长的 53.2%, 运行方式 1 条件下, I 段保护范围为线路全长的 57.31%。

当接地距离保护 I 段保护范围设定为线路全长的 80%时, 运行方式 6 条件下可靠系数最大, 为 1.2031; 运行方式 4 条件下可靠系数最小, 为 0.547。

表 5 不同运行方式下的测量阻抗及整定值

Tab. 5 Measurement impedance and setting values in different operation modes

项目	运行方式				
	1	3	4	6	7
(测量阻抗/线路全阻抗)/%	71.64	76.65	146.25	66.50	100.00
$K=0.8$ 时的保护范围/%	57.31	61.32	117.0	53.20	80.00
保护范围不变时的 K 值	1.1170	1.0437	0.5470	1.2031	0.8000

4 结论

本文分析了不同电压等级同塔四回输电线路在不同运行方式下时, 零序互感对接地距离保护零序补偿系数和测量阻抗的影响, 得出以下结论:

1) 随着线路运行方式的改变, 零序互感会影响接地距离保护的保护区。

2) 不同电压等级同塔四回输电线路运行方式为同一电压等级双回运行时, 零序电流补偿系数最大(K_{\max}), 测量阻抗会减小, 保护区会伸长, 从保证接地距离 II、III 段灵敏度考虑, 零序电流补偿系数可以按照 K_{\max} 整定。

3) 不同电压等级同塔四回输电线路运行方式为 1 回运行, 另 3 回检修接地时, 同塔双回运行时, 零序电流补偿系数最小(K_{\min}), 测量阻抗会增大, 保护区会缩短, 从保证接地距离 I 段灵敏度考虑, 零序电流补偿系数可以按照 K_{\min} 整定。

参考文献

[1] 徐建国. 对国外超高压同塔多回送电线路技术的调研分析[J]. 电

- 力建设, 2001, 22(7): 15-18.
- Xu Jianguo. Investigation and analysis on transmission line technique of EHV multiple - circuit on the same tower abroad[J]. Electric Power Construction, 2001, 22(7): 15-18(in Chinese).
- [2] 班连庚, 王晓刚, 白宏坤, 等. 同塔架设的 220 kV/500 kV 输电线路感应电流与感应电压仿真分析[J]. 电网技术, 2009, 33(6): 45-49.
- Ban Liangeng, Wang Xiaogang, Bai Hongkun, et al. Simulative analysis of induced voltages and currents among multi circuit 220 kV and 500 kV transmission lines on same tower[J]. Power System Technology, 2009, 33(6): 45-49(in Chinese).
- [3] 刘杰, 赵志斌, 崔翔. 基于混合算法的不同电压等级同塔四回线路无线电干扰计算[J]. 电网技术, 2009, 33(20): 168-172.
- Liu Jie, Zhao Zhibin, Cui Xiang. Radio interference calculation of four circuits belonging to different voltage classes on same tower by hybrid method[J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 168-172(in Chinese).
- [4] 张琦兵, 郇能灵, 袁成. 同塔四回输电线的相模变换[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 57-62.
- Zhang Qibing, Tai Nengling, Yuan Cheng. Phase-mode transformation of four-parallel lines on the same tower[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 57-62(in Chinese).
- [5] 韦钢, 薛敏. 同杆并架 4 回输电线路的探讨[J]. 电力建设, 1999, 20(3): 4-7.
- Wei Gang, Xue Min. Investigating the four-circuit transmission lines erected on the same pole[J]. Electric Power Construction, 1999, 20(3): 4-7(in Chinese).
- [6] 王晓彤, 林集明, 班连庚. 广东 500 kV 同塔四回线路相序排列的选择[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 87-91.
- Wang Xiaotong, Lin Jiming, Ban Liangeng. Selection of phase sequence arrangement for Guangdong 500 kV power transmission line adopting structure of four circuits on the same tower[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 87-91(in Chinese).
- [7] 冯桂宏, 张炳义, 王晓晖, 等. 500 kV 同塔四回路生态环境影响分析[J]. 电网技术, 2007, 31(23): 52-56.
- Feng Guihong, Zhang Bingyi, Wang Xiaohui, et al. Analysis on impact of 500 kV transmission line adopting four circuit on the same tower on ecological environment[J]. Power System Technology, 2007, 31(23): 52-56(in Chinese).
- [8] 张晓, 贾振宏, 吴锁平. 500/220 kV 混压同塔四回线路电磁环境的仿真分析[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 207-211.
- Zhang Xiao, Jia Zhenhong, Wu Suoping. Simulation analysis on electromagnetic environment of quadruple-circuit transmission lines belonging to different voltage classes on the same tower[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 207-211(in Chinese).
- [9] 郭润生, 何彩虹, 郅建杰. 相邻线路零序互感对线路零序纵联方向保护的影响[J]. 继电器, 2004, 32(9): 71-73.
- Guo Runsheng, He Caihong, Zhi Jianjie. Influence of zero-sequence mutual inductance to pilot protection in parallel lines[J]. Relay, 2004, 32(9): 71-73(in Chinese).
- [10] 孔伟彬, 朱晓彤, 张俊洪, 等. 同杆双回线上零序功率方向继电器的误判问题[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(22): 45-48.
- Kong Weibin, Zhu Xiaotong, Zhang Junhong, et al. Wrong judgement of zero sequence directional relay on double-circuit line on the same pole[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(22): 45-48(in Chinese).
- [11] 刘天斌, 张月品. 同塔并架线路接地距离保护零序电流补偿系数整定[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(10): 101-103.
- Liu Tianbin, Zhang Yueping. Zero sequence current compensation factor setting of earth fault protection for double-circuit transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 101-103(in Chinese).
- [12] 康小宁, 梁振锋, 索南加乐. 相邻线路零序互感对平行双回线电流平衡保护的影响及改进措施[J]. 继电器, 2005, 33(20): 1-4.
- Kang Xiaoning, Liang Zhenfeng, Suonan Jiale. Influence of zero sequence mutual inductance to transverse differential current protection and approaches to the improved measures[J]. Relay, 2005, 33(20): 1-4(in Chinese).
- [13] 潘震东, 张嘉, 顾承昱. 500 kV 同塔四回线路工频过电压研究[J]. 华东电力, 2007, 35(3): 24-27.
- Pan Zhendong, Zhang Jia, Gu Chengyu. Power frequency over-voltage of 500 kV four-circuit lines on the same tower[J]. East China Electric Power, 2007, 35(3): 24-27(in Chinese).
- [14] 余胜, 许钢, 余琼. 不同电压等级同杆并架多回线路的故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(6): 44-47.
- Yu Sheng, Xu Gang, Yu Qiong. Fault location for multiple circuit overhead lines of different voltage grade on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(6): 44-47(in Chinese).
- [15] 韦钢, 张一尘. 多回线同杆并架产生的循环电流及其补偿[J]. 继电器, 1997, 25(5): 6-10.
- Wei Gang, Zhang Yichen. Parallel multi-loop transmission lines produce circulating current and its compensation[J]. Relay, 1997, 25(5): 6-10(in Chinese).
- [16] 任明珠. 同塔四回线继电保护若干问题研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.



赵凯超

收稿日期: 2010-07-27.

作者简介:

赵凯超(1978), 女, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护, E-mail: xigua1852@163.com;

周泽昕(1969), 女, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护;

杜丁香(1977), 女, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护。

(责任编辑 李兰欣)