

DOI: 10.7667/PSPC161788

同塔四回线路纵向故障对零序方向保护的影响研究

张旭升, 李旭, 樊占峰, 王莉, 胡叶宾

(许继集团, 河南 许昌 461000)

摘要: 结合同塔四回输电线路的结构特点, 针对同一电压等级的有电气联系和无电气联系的同塔四回线路, 研究了同塔四回线路发生单回线纵向故障时线间互感对零序方向保护的影响, 利用网络拓扑的等效变换, 计算出了各回线路上零序电压、零序电流的幅值和相角特征。分析表明同塔四回线路单回线路纵向故障时, 对于两侧均无电气联系的同塔线路, 零序方向保护存在误动的风险, 对于两侧均有电气联系的线路, 零序方向不会误动。最后通过 PSCAD 建立同塔四回线路的模型, 对单相断线纵向故障进行了仿真, 仿真结果验证了理论分析的正确性。

关键词: 零序互感; 同塔四回输电线路; 纵向故障; 零序方向元件

Influence research of longitudinal fault on zero sequence direction protection for four parallel transmission lines on the same tower

ZHANG Xusheng, LI Xu, FAN Zhanfeng, WANG Li, HU Yebin

(XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: Based on the structural characteristics of the four circuit transmission lines on the same tower and the lines with/without electrical connection on the same voltage level, this paper analyzes the influence of the mutual inductance between the lines on zero-sequence directional protection when single line longitudinal fault occurs on four circuit transmission lines on the same tower, and calculates the amplitude and phase angle characteristics of zero sequence voltage and current on each line by using the equivalent transformation of the network topology. The analysis indicates that when the single line longitudinal fault occurs on four circuits on the same tower, there is a risk of mal-operation of zero sequence directional protection for the line without electrical connection on both sides; for the line with electrical connection on both sides, the zero sequence direction will not mal trip. Finally through the PSCAD, the model of four circuits on the same tower is established and the single-phase line break is simulated. Simulation results verify the correctness of the theoretical analysis.

Key words: zero-sequence mutual induction; four-circuit transmission lines on the same tower; longitudinal fault; zero sequence power directional component

0 引言

同塔四回线路在我国电力建设中的比重越来越大, 与单回线路相比, 同塔四回线路输电容量大, 可靠性高, 但是由于其线路多, 线路间存在互感, 增加了故障的种类及复杂程度, 同时运行方式的多样性和耦合关系的复杂性, 也增加了其故障特征分析的难度, 进而影响了继电保护对故障的甄别能力。

同塔线路的一般故障分为横向故障和纵向故障,

即短路和断线。目前国内外对横向短路故障的分析较多, 但较少对同塔四回线路的纵向故障进行系统的研究。本文首先分析了同塔四回输电线路的结构特点和运行方式^[1], 针对同一电压等级的有电气联系和无电气联系的同塔四回线路, 分别研究了完全同塔四回线路发生单回线纵向故障时零序网络的特点, 利用网络拓扑的等效变换, 计算出了各回线路上零序电压、零序电流的幅值和相角特征, 分析表明了同塔四回线路单回线路断线故障时, 对于两侧均无电气联系的同塔线路, 零序方向保护一定会误动, 对于两侧均有电气联系的线路, 零序方向不会误动。利用 PSCAD 建立 500 kV 同塔四回线路的模

基金项目: 国家电网公司科技项目 (521702150007): “同塔多回输电线路纵向故障保护防误动研究”

型, 仿真验证了理论分析的正确性。

1 同塔四回线纵向故障的故障电气特征

1.1 同塔四回线结构

同塔四回输电线路按照线路两端的电气连接关系可以分为双端电气连接的同塔四回线和无电气连接的同塔四回线以及部分电气连接的同塔四回线。而按照四回线的电压等级则可以分为同一电压等级同塔四回线和不同电压等级同塔四回线^[2-5]。本文分析了同一电压等级双端电气连接和无电气连接的四回线路。具体结构如下。

1) 双端电气连接

图1为同一电压等级双端电气连接的同塔四回线结构图, 四回线两端通过母线直接相连。

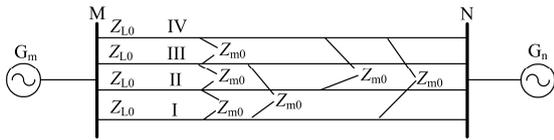


图1 双端电气连接的同塔四回线

Fig. 1 Four-circuit transmission lines with electricity connection on both sides

2) 无电气连接

图2为同一电压等级无电气连接的同塔四回线结构图, 四回线两端均没有电气连接。

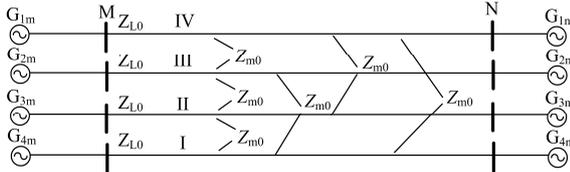


图2 无电气连接的同塔四回线

Fig. 2 Four-circuit lines on the same tower without electrical connection

1.2 纵向故障的故障电气特征

同塔四回线路的纵向故障为线路的断线故障, 同塔四回线中一回线发生不对称断线故障时, 从零序网络的角度看, 故障端口会叠加一零序电压源^[6-8], 在该电压源的激励作用下, 故障线上会产生零序电流。对于健全线(非故障线)而言, 虽然本回线没有故障, 但回线间的零序互感作用会在非故障线上产生一附加零序电源, 从而产生零序电流。因此, 同塔四回线断线故障的故障特征不仅由同塔四回线的拓扑结构、故障线端口的零序电压源决定, 还会受到回线间零序互感的影响^[7-12]。由于存在零序互感的影响, 非故障线的零序方向保护可能不正确动作。在分析同塔四回线路的一回线路断线故障时, 将其余三回

健全线路的线间互感等效为一个感应电压进行零序网络的故障分析。下面具体分析不同拓扑结构情况下完全换位同塔线路发生不对称断线故障时, 故障线和健全线的零序电压和零序电流特征。

1) 双端电气连接

对于图1所示的同一电压等级双端电气连接的同塔四回线, 当回线I上发生不对称断线故障时, 系统的零序网络如图3所示。

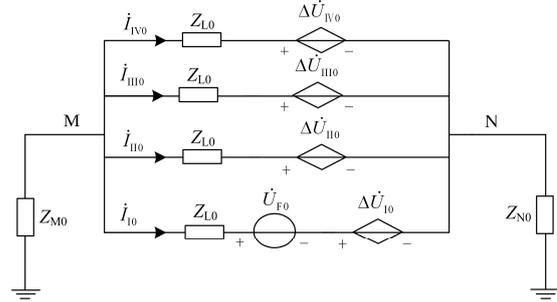


图3 同一电压等级双端电气连接的零序网络图

Fig. 3 Zero sequence equivalent system with electrical connection on two sides at same voltage level

图3中: Z_{L0} 为线路的零序等值阻抗; Z_{M0} 和 Z_{N0} 分别为两端电源的零序等值阻抗; \dot{U}_{F0} 为纵向故障时故障端口的零序电压源; \dot{i}_{I0} 、 \dot{i}_{II0} 、 \dot{i}_{III0} 、 \dot{i}_{IV0} 分别为回线I、回线II、回线III、回线IV上的零序电流; $\Delta\dot{U}_{I0}$ 为 \dot{i}_{II0} 、 \dot{i}_{III0} 、 \dot{i}_{IV0} 在回线I上产生的零序感应电压; $\Delta\dot{U}_{II0}$ 为 \dot{i}_{I0} 、 \dot{i}_{III0} 、 \dot{i}_{IV0} 在回线II上产生的零序感应电压。感应电压 $\Delta\dot{U}_{I0}$ 和 $\Delta\dot{U}_{II0}$ 、 $\Delta\dot{U}_{III0}$ 、 $\Delta\dot{U}_{IV0}$ 满足如下方程:

$$\begin{cases} \Delta\dot{U}_{I0} = Z_{m0} (\dot{i}_{II0} + \dot{i}_{III0} + \dot{i}_{IV0}) \\ \Delta\dot{U}_{II0} = Z_{m0} (\dot{i}_{I0} + \dot{i}_{III0} + \dot{i}_{IV0}) \\ \Delta\dot{U}_{III0} = Z_{m0} (\dot{i}_{I0} + \dot{i}_{II0} + \dot{i}_{IV0}) \\ \Delta\dot{U}_{IV0} = Z_{m0} (\dot{i}_{I0} + \dot{i}_{II0} + \dot{i}_{III0}) \end{cases} \quad (1)$$

利用回路电压方程, 可以列出式(2)。

$$\begin{cases} \dot{i}_{I0} Z_{L0} + \dot{U}_{F0} + \Delta\dot{U}_{I0} + (\dot{i}_{I0} + \dot{i}_{II0} + \dot{i}_{III0} + \dot{i}_{IV0})(Z_{M0} + Z_{N0}) = 0 \\ \dot{i}_{II0} Z_{L0} + \Delta\dot{U}_{II0} + (\dot{i}_{I0} + \dot{i}_{II0} + \dot{i}_{III0} + \dot{i}_{IV0})(Z_{M0} + Z_{N0}) = 0 \\ \dot{i}_{III0} Z_{L0} + \Delta\dot{U}_{III0} + (\dot{i}_{I0} + \dot{i}_{II0} + \dot{i}_{III0} + \dot{i}_{IV0})(Z_{M0} + Z_{N0}) = 0 \\ \dot{i}_{IV0} Z_{L0} + \Delta\dot{U}_{IV0} + (\dot{i}_{I0} + \dot{i}_{II0} + \dot{i}_{III0} + \dot{i}_{IV0})(Z_{M0} + Z_{N0}) = 0 \\ \dot{U}_{M0} = -(\dot{i}_{I0} + \dot{i}_{II0} + \dot{i}_{III0} + \dot{i}_{IV0}) Z_{M0} \\ \dot{U}_{N0} = (\dot{i}_{I0} + \dot{i}_{II0} + \dot{i}_{III0} + \dot{i}_{IV0}) Z_{N0} \end{cases} \quad (2)$$

考虑线路模型为完全换位同塔线路, 各回线间的零序互感都是相同的, 由式(1)、式(2)可以求出四回线上的零序电流及四回线两端的零序电压分别为

$$\begin{cases} i_{I0} = -\frac{Z_{L0} + 2Z_{m0} + 3Z_A}{(Z_{L0} + 2Z_{m0} + 3Z_A)(Z_{L0} + Z_A) - 3(Z_{m0} + Z_A)^2} \dot{U}_{F0} \\ i_{II0} = i_{III0} = i_{IV0} = \frac{Z_{m0} + Z_A}{(Z_{L0} + 2Z_{m0} + 3Z_A)(Z_{L0} + Z_A) - 3(Z_{m0} + Z_A)^2} \dot{U}_{F0} \\ \dot{U}_{M0} = \frac{(Z_{L0} - Z_{m0})Z_{M0}}{(Z_{L0} + 2Z_{m0} + 3Z_A)(Z_{L0} + Z_A) - 3(Z_{m0} + Z_A)^2} \dot{U}_{F0} \\ \dot{U}_{N0} = -\frac{(Z_{L0} - Z_{m0})Z_{N0}}{(Z_{L0} + 2Z_{m0} + 3Z_A)(Z_{L0} + Z_A) - 3(Z_{m0} + Z_A)^2} \dot{U}_{F0} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, $Z_A = Z_{M0} + Z_{N0}$ 。由式(13)可以得到故障线和健全线的零序电压和零序电流具有如下特征:

双端电气连接的故障线(回线 I)和健全线(回线 II、III、IV)上的零序电流反相;双端电气连接的同塔四回线两端的零序电压反相。

2) 双端无电气连接

对于图 2 所示的同一电压等级无电气连接的同塔四回线,当回线 I 上发生不对称断线故障时,系统的零序网络如图 4 所示。

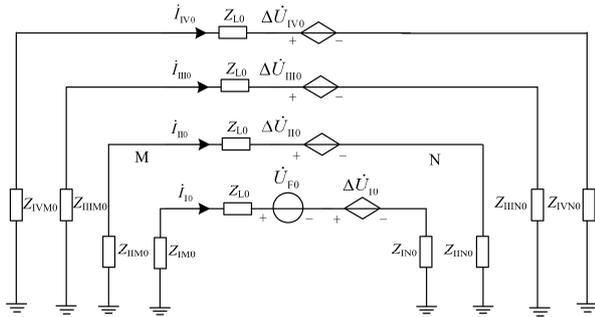


图 4 同一电压等级无电气连接的零序网络图

Fig. 4 Zero sequence network without electrical connection at same voltage level

图 4 中: Z_{IM0} 、 Z_{IIM0} 、 Z_{IIIM0} 、 Z_{IIVM0} 为回线 I、II、III、IV 的 M 端电源的零序等值阻抗,感应电压 $\Delta \dot{U}_{I0}$ 和 $\Delta \dot{U}_{II0}$ 、 $\Delta \dot{U}_{III0}$ 、 $\Delta \dot{U}_{IV0}$ 满足式(1)。

利用回路电压方程,可以得出式(4)。

$$\begin{cases} \dot{U}_{IM0} - \dot{U}_{IN0} = i_{I0} Z_{L0} + \dot{U}_{F0} + \Delta \dot{U}_{I0} \\ \dot{U}_{IIM0} - \dot{U}_{IIN0} = i_{II0} Z_{L0} + \Delta \dot{U}_{II0} \\ \dot{U}_{IIIM0} - \dot{U}_{IIIN0} = i_{III0} Z_{L0} + \Delta \dot{U}_{III0} \\ \dot{U}_{IIVM0} - \dot{U}_{IIVN0} = i_{IV0} Z_{L0} + \Delta \dot{U}_{IV0} \\ \dot{U}_{IM0} = -i_{I0} Z_{IM0} \\ \dot{U}_{IIM0} = -i_{II0} Z_{IIM0} \\ \dot{U}_{IIIM0} = -i_{III0} Z_{IIIM0} \\ \dot{U}_{IIVM0} = -i_{IV0} Z_{IIVM0} \\ \dot{U}_{IN0} = i_{I0} Z_{IN0} \\ \dot{U}_{IIN0} = i_{II0} Z_{IIN0} \\ \dot{U}_{IIIN0} = i_{III0} Z_{IIIN0} \\ \dot{U}_{IIVN0} = i_{IV0} Z_{IIVN0} \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可以求出四回线上的零序电流及四回线两端的零序电压,用式(5)表示。

$$\begin{cases} i_{I0} = \frac{Z_a Z_b}{Z_a Z_b + 3Z_{m0}^2} \dot{U}_{F0} \\ i_{II0} = i_{III0} = i_{IV0} = -\frac{Z_{m0}}{Z_a Z_b + 3Z_{m0}^2} \dot{U}_{F0} \\ \dot{U}_{IM0} = -\frac{Z_{IM0} Z_a Z_b}{Z_a Z_b + 3Z_{m0}^2} \dot{U}_{F0} \\ \dot{U}_{IIM0} = \frac{Z_{IIM0} Z_{m0}}{Z_a Z_b + 3Z_{m0}^2} \dot{U}_{F0} \\ \dot{U}_{IIIM0} = \frac{Z_{IIIM0} Z_{m0}}{Z_a Z_b + 3Z_{m0}^2} \dot{U}_{F0} \\ \dot{U}_{IIVM0} = \frac{Z_{IIVM0} Z_{m0}}{Z_a Z_b + 3Z_{m0}^2} \dot{U}_{F0} \\ \dot{U}_{IN0} = \frac{Z_{IN0} Z_a Z_b}{Z_a Z_b + 3Z_{m0}^2} \dot{U}_{F0} \\ \dot{U}_{IIN0} = -\frac{Z_{IIN0} Z_{m0}}{Z_a Z_b + 3Z_{m0}^2} \dot{U}_{F0} \\ \dot{U}_{IIIN0} = -\frac{Z_{IIIN0} Z_{m0}}{Z_a Z_b + 3Z_{m0}^2} \dot{U}_{F0} \\ \dot{U}_{IIVN0} = -\frac{Z_{IIVN0} Z_{m0}}{Z_a Z_b + 3Z_{m0}^2} \dot{U}_{F0} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中:

$$Z_a = Z_{IM0} + Z_{IN0} + Z_{L0}, Z_b = Z_{IIM0} + Z_{IIN0} + Z_{L0} + 2Z_{m0}$$

由式(5)可以得到故障线和健全线的零序电压和零序电流具有如下特征:

双端无电气连接的故障线(回线 I)和健全线(回线 II、III、IV)上的零序电流反相;

双端无电气连接的故障线两端的零序电压反相,健全线两端的零序电压反相。故障线和健全线路对应各侧的零序电压反相。

2 纵向故障对零序方向元件的影响分析

同塔四回线发生纵向故障后,故障线和健全线表现为不同的故障特征。对于纵联零序方向保护而言,当线路两端的零序电压和零序电流均满足正方向判据时,判定故障发生在区内。以许继公司 WXH-803 高压线路保护的纵联零序方向元件为例,零序正方向元件的范围如式(6)所述。

$$-190^\circ < \text{Arg}(3\dot{U}_0 / 3i_0) < -30^\circ \quad (6)$$

下面具体分析同一电压等级的同塔四回线发生不对称断线故障后零序方向保护的動作行为。定义

电流正方向为母线指向线路。

2.1 双端电气连接

由式(3)可以得到故障线(回线 I)和健全线(回线 II)两端的零序电压和零序电流的相位关系, 回线 III和回线 IV的零序电压和零序电流与回线 II 相同, 因此式(7)仅列出 I 回线路和 II 回线路的零序方向比相方程。

$$\begin{cases} \arg(\dot{U}_{M0}/\dot{I}_{I0}) = \arg\left[-\frac{Z_{M0}}{Z_{L0} + 2Z_{m0} + 3Z_A}(Z_{L0} - Z_{m0})\right] \\ \arg(-\dot{U}_{N0}/\dot{I}_{I0}) = \arg\left[-\frac{Z_{N0}}{Z_{L0} + 2Z_{m0} + 3Z_A}(Z_{L0} - Z_{m0})\right] \\ \arg(\dot{U}_{M0}/\dot{I}_{II0}) = \arg\left[\frac{Z_{M0}}{Z_{m0} + Z_A}(Z_{L0} - Z_{m0})\right] \\ \arg(-\dot{U}_{N0}/\dot{I}_{II0}) = \arg\left[\frac{Z_{N0}}{Z_{m0} + Z_A}(Z_{L0} - Z_{m0})\right] \end{cases} \quad (7)$$

线路零序阻抗角一般比正序阻抗角偏小, 500 kV 线路一般为 80° 左右, 由式(7)可以看出, 故障线两端的零序方向元件均满足正方向判据, 零序方向保护判为区内故障。健全线两端的零序方向元件均不满足正方向判据, 零序方向保护判为区外故障。因此, 同一电压等级双端电气连接的同塔四回线发生不对称断线故障后, 故障线和健全线的零序方向保护均能可靠识别区内、区外故障, 不存在保护误动的情况。

2.2 双端无电气连接

由式(5)可以得到故障线(回线 I)和健全线(回线 II、III、IV)两端的零序电压和零序电流的相位关系, 如式(8)所示。

$$\begin{cases} \arg(\dot{U}_{IM0}/\dot{I}_{I0}) = \arg(-Z_{IM0}) \\ \arg(-\dot{U}_{IN0}/\dot{I}_{I0}) = \arg(-Z_{IN0}) \\ \arg(\dot{U}_{IIM0}/\dot{I}_{II0}) = \arg(-Z_{IIM0}) \\ \arg(-\dot{U}_{IIN0}/\dot{I}_{II0}) = \arg(-Z_{IIN0}) \\ \arg(\dot{U}_{IIIM0}/\dot{I}_{III0}) = \arg(-Z_{IIIM0}) \\ \arg(-\dot{U}_{IIIN0}/\dot{I}_{III0}) = \arg(-Z_{IIIN0}) \\ \arg(\dot{U}_{IIVM0}/\dot{I}_{IV0}) = \arg(-Z_{IIVM0}) \\ \arg(-\dot{U}_{IIVN0}/\dot{I}_{IV0}) = \arg(-Z_{IIVN0}) \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可以看出, 故障线两端的零序方向元件均满足正方向判据, 零序方向保护判为区内故障。健全线两端的零序方向元件均满足正方向判据, 零序方向保护判为区外故障。引起零序方向误判正方向的主要原因是由于电气联系弱, 而健全线路的零序电压完全由零序互感引起, 会造成故障线和健全线路对应侧的零序电压反相, 因此, 同一电压等级

无电气连接的同塔四回线发生不对称断线故障后, 健全线的零序方向保护均误识别为区内故障, 存在保护误动的情况。

综合以上分析结果可知, 同塔四回线发生纵向故障时, 零序方向保护可能出现误动情况, 且误动出现在无电气连接的同塔四回线中。

3 仿真验证

建立 500 kV 同杆并架输电线路系统, 线路长度 300 km, 接线图如图 5 所示。

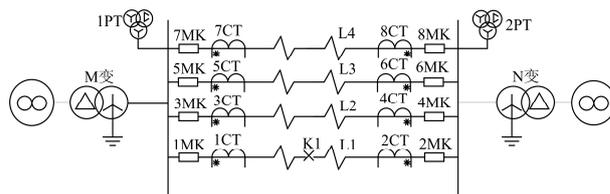


图 5 500 kV 同杆并架输电线路系统接线图

Fig. 5 System wiring diagram of 500 kV double circuits on the same tower

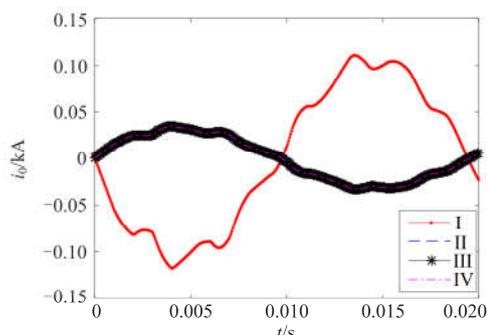
为了验证上述零序电压、电流特征及零序方向保护动作情况分析的正确性, 分别建立同一电压等级的有电气连接的同塔四回线和无电气连接的同塔四回线进行仿真验证^[13-14]。

3.1 双端电气连接

建立如图 5 所示的双端电气连接的同塔四回线输电系统, 该仿真模型中两回线 M 端、N 端的系统参数不同。

模拟同塔四回线中回线 I 在 150 km 处发生 A 相断线故障时, 四回线的零序电流关系及零序电压关系如图 6、图 7 所示。

图 6 中黑线为双端电气连接的三回线 II、III、IV 的零序电流, 红线为故障线回线 I 的零序电流。从图 6 可以看出, 故障线路各端均与健全线路方向相反, 且同一回线各端零序电流方向相反, 与理论分析一致。



(a) M端的零序电流

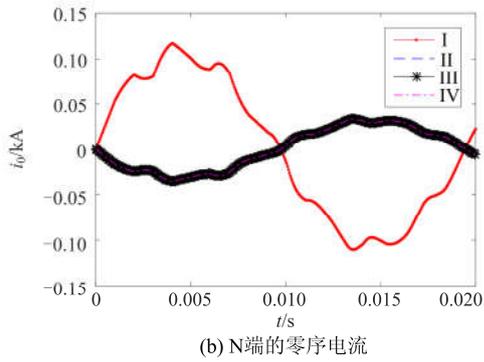
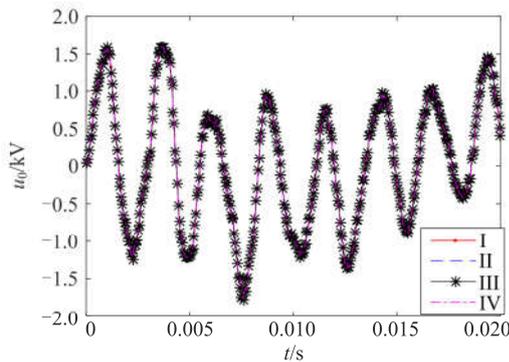
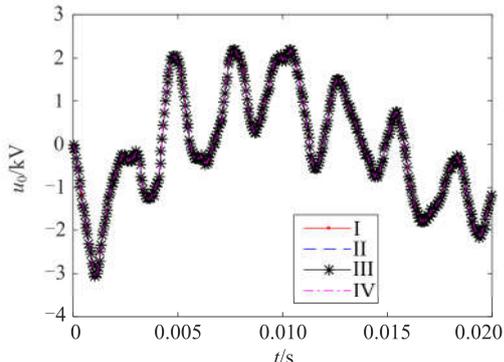


图 6 双端电气连接 A 相断线故障的零序电流
Fig. 6 Zero sequence current of A phase disconnection fault with electrical connection on both sides



(a) M端的零序电压



(b) N端的零序电压

图 7 双端电气连接 A 相断线故障的零序电压
Fig. 7 Zero sequence voltage of A phase disconnection fault with electrical connection on both sides

由于线路双端电气连接，健全线路和故障线路同端的零序电压幅值和方向均相同。从图 7 的仿真结果可以看出，故障线两端的零序电压反相，健全线两端的零序电压反相，与理论分析一致^[15]。

利用波形分析软件进行数据分析，可以得到故障线和健全线路两端的零序电压和零序电流的相位差如表 1 所示。

表 1 双端电气连接四回线的零序电压和零序电流的相位差
Table 1 Phase difference between zero-sequence voltage and zero-sequence current of four circuits with electrical connection on both sides

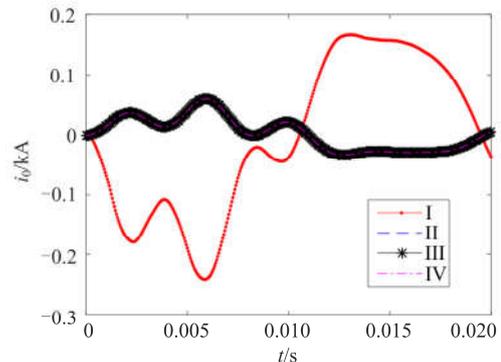
回线	M 端/(°)	N 端/(°)
I	-91.23	-90.29
II(III、IV)	84.73	86.70

由表 1 可以看出，故障线(回线 I)两端的零序电压与零序电流的相位差约为 -90° ，满足零序方向元件的正方向判据；健全线(回线 II、III、IV)M 端、N 端的零序电压与零序电流的相位差约为 90° ，不满足零序方向元件的正方向判据。

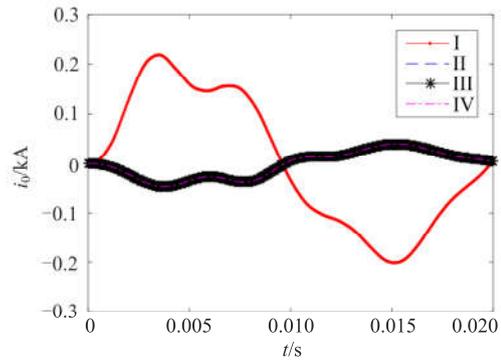
3.2 无电气连接

建立如图 2 所示的无电气连接的同塔四回线输电系统，两端电源参数及线路参数与双端电气连接的同塔四回线系统相同。

当同塔四回线中回线 I 在 150 km 处发生 A 相断线故障时，两回线的零序电流关系及零序电压关系如图 8、图 9 所示。



(a) M端的零序电流



(b) N端的零序电流

图 8 无电气连接 A 相断线故障的零序电流
Fig. 8 Zero sequence voltage of A phase disconnection fault without electrical connection

从图 8 的仿真结果可以看出, 故障线零序电流各端均与健全线路方向相反, 且同一回线各端零序电流方向相反, 与双端电气连接时结果相同。

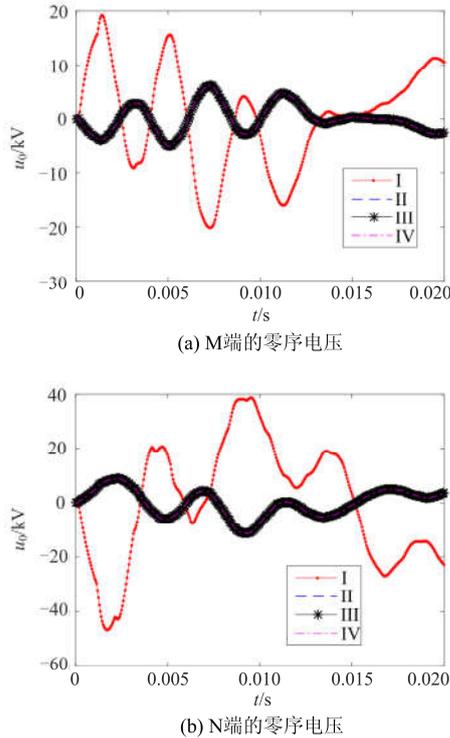


图 9 无电气连接 A 相断线故障的零序电压

Fig. 9 Zero sequence voltage of A phase disconnection fault without electrical connection

图 9 中红线为故障线路的零序电压, 黑线为三回健全线路 M 端、N 端的零序电压。从仿真结果看, 验证了理论分析的结果, 即故障线两端的零序电压反相, 健全线两端的零序电压反相, 故障线与健全线同端的零序电压反相。

通过对仿真波形的分析, 可以得到故障线和健全线路零序电压和零序电流的相位差如表 2 所示。

由表 2 可以看出, 故障线(回线 I)两端的零序电压与零序电流的相位差约为 -90° , 满足零序方向元件的正方向判据; 健全线(回线 II、III、IV)M 端、N 端的零序电压与零序电流的相位差约为 -90° , 满足零序方向元件的正方向判据, 与理论分析结果一致。

表 2 无电气连接四回线的零序电压和零序电流的相位差
Table 2 Phase difference between zero-sequence voltage and zero-sequence current of four circuits without electrical connection

回线	M 端/ $^\circ$	N 端/ $^\circ$
I	-95.33	-90.50
II(III、IV)	-88.93	-92.90

4 结论

本文针对同一电压等级的有电气联系和无电气联系的同塔四回线路, 分别研究了完全同塔四回线路发生单回线纵向故障时零序网络的特点, 推导出各回线路上零序电压、零序电流的幅值和相角特征, 并使用 PSCAD 搭建了仿真模型进行了验证。通过理论分析和仿真得到如下结论:

1) 同塔四回线路纵向故障健全线的零序方向保护误动原因主要与线路的电气连接关系有关。同一电压等级双端电气连接情况下, 同塔四回线发生单回线路纵向不对称断线故障后, 故障线和健全线的零序方向保护均能可靠识别区内、区外故障, 不存在保护误动的情况。在同塔四回线两端无电气连接的情况下, 发生单回线路纵向不对称断线故障后, 健全线路零序方向保护一定会误动。

2) 对不同电气连接下的零序保护动作情况进行分析发现, 健全线零序方向保护是否会误动主要与同塔线路之间的电磁联系强弱有关, 电气联系越强, 磁联系越弱, 保护误动的可能性越小。反之, 电气联系越弱, 磁联系越强, 保护误动的可能性越大。此外, 仿真也表明健全线两端零序电压和零序电流的大小与负荷电流大小和零序网络参数有关。避免零序方向元件误动作的方法国内较多文献均有研究, 一般采用负序方向进行把关^[16], 效果良好。

参考文献

- [1] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [2] 于仲安, 程明钊, 郭培育, 等. 一侧同杆四回线与两侧同杆双回线构成的 T 型输电线路故障测距新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 8-14.
YU Zhongan, CHENG Mingzhao, GUO Peiyu, et al. A new fault locating of T-type transmission line consisting of four parallel-line and double circuit[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 8-14.
- [3] 邵能灵, 郭培育, 于仲安, 等. Π 模型电容电流补偿的同塔四回线电流差动保护[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 34-42.
TAI Nengling, GUO Peiyu, YU Zhongan, et al. Current differential protection using capacitive current compensating algorithm on Pi-model for four-parallel lines on same towers[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 34-42.
- [4] 王海军, 周全, 梁远升, 等. 基于电压突变量的同塔双回直流输电线路故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 23-29.
WANG Haijun, ZHOU Quan, LIANG Yuansheng, et al.

- Fault line selection of double-circuit HVDC transmission line based on voltage variation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 23-29.
- [5] 朱庆钢, 刘前进, 陈海涛, 等. 同塔双回不换位线路电压不平衡度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 73-79.
ZHU Qinggang, LIU Qianjin, CHEN Haitao, et al. Study on voltage imbalance of un-transposed double-circuit lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 73-79.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 马晓明, 范春菊, 刘玲. 跨电压等级同杆四回线接地距离保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 28-34.
MA Xiaoming, FAN Chunju, LIU Ling. Ground distance protection for four joint transmission lines with different voltage grades on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 28-34.
- [9] 丁晓兵, 赵曼勇, 徐振宇. 接地故障零序方向元件拒动保护改进方案[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(9): 88-90.
DING Xiaobing, ZHAO Manyong, XU Zhenyu. Improvement on zero sequence current protection when directional element fails to operate during earth faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 88-90.
- [10] 曹国臣, 张洪波. 采用虚拟网络加网络操作法的双回线故障计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 71-77.
CAO Guochen, ZHANG Hongbo. A unified method to calculate faults in double circuit transmission lines based on fictitious network plus network operation method[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 71-77.
- [11] 张言苍, 杨洪平, 郭征. 电网故障计算中零序多重互感线路的处理[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(21): 89-91.
ZHANG Yancang, YANG Hongping, GUO Zheng.
- Influence transmission lines on the fault calculation of electric network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 89-91.
- [12] 陈青, 徐文远. 同杆双回线故障分析新方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 68-71.
CHEN Qing, XU Wenyuan. Research on fault analysis of double circuit lines on the same tower[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 68-71.
- [13] 徐建国. 对国外超高压同塔多回送送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.
- [14] 张弛, 李一泉, 曾耿晖. 基于负序分量补偿的纵联零序方向保护判据与仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(21): 18-23.
ZHANG Chi, LI Yiquan, ZENG Genghui. Principle investigation and simulation research on pilot zero sequence directional protection with compensation of negative sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(21): 18-23.
- [15] 赵凯超, 周泽昕, 杜丁香. 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[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.
- [16] 王兴国, 周泽昕, 杜丁香. 不同电压等级同塔多回输电线路零序功率方向元件动作行为分析[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 235-242.
WANG Xingguo, ZHOU Zexin, DU Dingxiang. Behavior analysis of zero-sequence power direction component for multi-circuit transmission lines in different voltage classes on same tower[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 235-242.

收稿日期: 2016-10-26; 修回日期: 2017-01-03

作者简介:

张旭升(1966-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统保护等;

李旭(1977-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统保护等; E-mail: xjtc_lixu@126.com

樊占峰(1974-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统保护与控制等。

(编辑 魏小丽)