

DOI: 10.7667/PSPC160272

同塔双回线零序电压补偿分析

徐海洋¹, 黄兴华¹, 王婷¹, 宋国兵¹, 樊占峰^{1,2}

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 零序电压补偿能够解决单回线系统中零序电压灵敏度不足的问题, 但会对同塔双回线系统中健全线的零序方向元件造成不利的影 响。通过对比分析不同连接方式下补偿前后健全线零序电压和电流的相位关系, 得出了零序电压补偿对于健全线零序方向元件的影响。即单端电气连接且弱磁强电的情况下, 原先判出反向故障的一侧零序方向元件会误判为正向故障; 其他情况下, 原先判出正向故障的一侧仍判为正向故障, 原先判出反向故障的一侧不启动。PSCAD 仿真结果验证了理论分析的正确性。

关键词: 零序方向元件; 零序电压补偿; 同塔双回线; 灵敏度; 误动作

Analysis of zero-sequence voltage compensation in double-circuit transmission system

XU Haiyang¹, HUANG Xinghua¹, WANG Ting¹, SONG Guobing¹, FAN Zhanfeng^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: Zero-sequence voltage compensation can improve sensitivity of the zero-sequence voltage in single-circuit transmission systems while it has adverse effect on the zero-sequence directional component of the healthy line in double-circuit transmission systems. The effect is analyzed in different types of double-circuit transmission systems through comparing the relation of the zero-sequence voltage and current before and after voltage compensation. It is found that in the weak magnetic and strong current double-circuit transmission system with electricity connection on one side, the zero-sequence directional component will mal-operate on the side where opposite direction is identified before compensation. In the other situations, the zero-sequence directional component still recognizes forward direction on the side where forward direction is identified before compensation, while it will not operate on the side where opposite direction is identified before compensation. PSCAD simulation results verify the correctness of the theoretical analysis.

Key words: zero-sequence directional component; zero-sequence voltage compensation; double-circuit transmission system; sensitivity; mal-operation

0 引言

纵联零序方向保护具有灵敏度高、耐过渡电阻能力强等优点, 广泛应用于超高压输电系统的线路保护中^[1]。当输电线路发生高阻接地故障, 或者远端发生接地故障且系统阻抗远小于线路阻抗时, 由于零序电压过低, 不能满足灵敏度的要求, 可能造成纵联零序方向保护误动^[2-4]。

为了解决零序电压灵敏度不足的问题, 电力科

研工作者提出了不同的改进方法^[2-9]。文献[2-3]提出了一种电压补偿的方法, 通过引入补偿阻抗提高零序电压。文献[4]提出利用负序方向元件替代零序方向元件。文献[5-6]提出了一种利用正序电压替代零序电压的零序电压补偿方法。文献[7]提出了一种基于故障类型的零序方向元件, 利用故障相的故障前电压替代零序电压, 从而保证零序电压低于于门槛值时方向元件可靠动作。文献[8-9]针对含中性点接地变压器的系统, 提出利用变压器中性点的零序电流替代保护安装处的零序电压, 解决零序电压灵敏度不足的问题。

近年来, 为了节约土地资源、提高输电走廊的

输电能力, 同塔双回线路广泛地应用于电力系统中^[10-17]。对于单回输电线路, 零序电压补偿能够解决零序电压灵敏度不足的问题。但双回线情况下零序电压补偿对于零序方向元件, 尤其是对健全线零序方向元件的影响仍有待研究。

本文通过分析不同连接方式下同塔双回线零序电压和电流的相位关系, 得到了零序电压补偿前后健全线零序方向元件的动作情况, 从而得出零序电压补偿对于健全线零序方向元件的影响。本文的研究结果对于在同塔双回线系统中合理地使用零序方向元件具有指导意义。

1 两端电气连接分析

1.1 补偿前零序方向元件动作情况分析

图 1 为两端电气连接的同塔双回线结构图。图中 G_m 和 G_n 分别为 M 和 N 端电源, 回线 I 上发生接地故障, α 为故障距离占全长的比例。

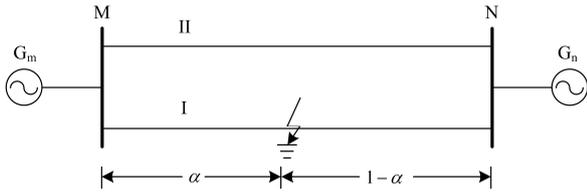


图 1 两端电气连接的同塔双回线结构图

Fig. 1 Structure of double-circuit transmission system with electricity contact on both sides

图 1 对应的零序网络图如图 2 所示。

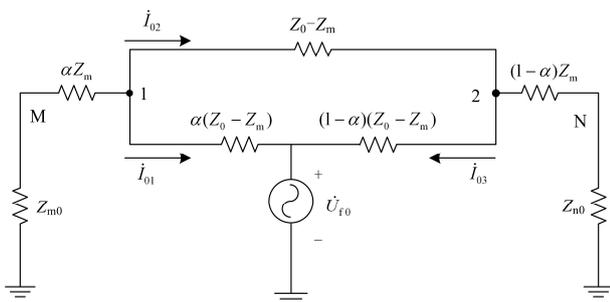


图 2 两端电气连接的同塔双回线零序网络图

Fig. 2 Zero-sequence network of double-circuit transmission system with electricity contact on both sides

图中, \dot{U}_{f0} 为故障点零序电源, i_{01} 、 i_{02} 和 i_{03} 分别为回线 I 和回线 II 的零序电流, Z_{m0} 和 Z_{n0} 分别为 M 端和 N 端电源的等值零序阻抗, Z_0 为线路的零序阻抗, Z_m 为线间零序互阻抗。

由节点电压法可以计算出两回线的零序电流为

$$\begin{cases} i_{01} = \frac{\dot{U}_{10} - \dot{U}_{f0}}{\alpha(Z_0 - Z_m)} \\ i_{02} = \frac{\dot{U}_{10} - \dot{U}_{20}}{Z_0 - Z_m} \\ i_{02} / i_{01} = \frac{\alpha Z_{n0} - (1 - \alpha)Z_{m0}}{(2 - \alpha)Z_{n0} + (1 - \alpha)(Z_{m0} + Z_0 + Z_m)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: \dot{U}_{10} 、 \dot{U}_{20} 与 \dot{U}_{f0} 同相位。

分析式(1)可知, 存在一个平衡点 α_0 , 满足 $i_{02} = 0$ 。该平衡点 α_0 为

$$\alpha_0 = \frac{Z_{m0}}{Z_{m0} + Z_{n0}} \quad (2)$$

在平衡点两侧故障时, i_{01} 和 i_{02} 的相位关系不同。 $\alpha < \alpha_0$ 时, i_{01} 和 i_{02} 反相; $\alpha > \alpha_0$ 时, i_{01} 和 i_{02} 同相。

根据以上分析结果, 可以得到电压和电流的相量图如图 3 所示。

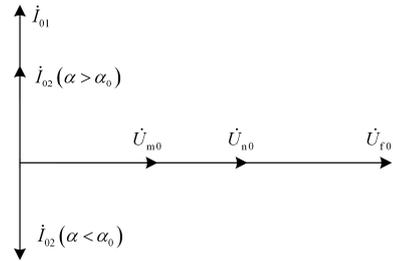


图 3 电压和电流相量图

Fig. 3 Phasor diagram of voltages and currents

由图 3 分析可知, 当零序电压满足灵敏度要求 (即满足零序方向元件启动条件) 时, 健全线 M 端和 N 端的零序方向元件判别结果为: $\alpha < \alpha_0$ 时, M 端判为反向故障, N 端判为正向故障; $\alpha > \alpha_0$ 时, M 端判为正向故障, N 端判为反向故障。下面具体分析零序电压灵敏度不足时, 零序电压补偿对于健全线零序方向元件的影响。

1.2 零序电压补偿分析

零序电压补偿公式为^[3]

$$\dot{U}_{op} = \dot{U}_0 - k\dot{I}_0 Z_0 \quad (3)$$

式中: \dot{U}_{op} 为零序补偿电压; \dot{U}_0 和 \dot{I}_0 为测量端的零序电压和电流; k 为补偿度 ($0 < k < 1$)。

对于健全线的 M 端和 N 端, 零序补偿电压分别为

$$\begin{cases} \dot{U}_{mop} = \dot{U}_{m0} - k\dot{I}_{02} Z_0 \\ \dot{U}_{nop} = \dot{U}_{n0} + k\dot{I}_{02} Z_0 \end{cases} \quad (4)$$

下面分别分析 $\alpha < \alpha_0$ 和 $\alpha > \alpha_0$ 两种情况下零序电压补偿的结果。

1.2.1 $\alpha < \alpha_0$ 情况

根据图 2 可知, M 端零序电压为

$$\dot{U}_{m0} = -(\dot{i}_{01} + \dot{i}_{02})Z_{m0} \quad (5)$$

将式(1)代入式(5)可以得到

$$\begin{cases} \dot{U}_{m0} = -\dot{I}_{02}Z_{m0}[1 - g(\alpha)] \\ g(\alpha) = \frac{(2 - \alpha)Z_{n0} + (1 - \alpha)(Z_{m0} + Z_0 + Z_m)}{(1 - \alpha)Z_{m0} - \alpha Z_{n0}} \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)分析可以得到

$$|\dot{U}_{m0}|_{\min} > |\dot{i}_{02}Z_0| \quad (7)$$

由式(4)、式(7)和图 3 分析可知, M 端零序补偿电压 \dot{U}_{mop} 与 \dot{U}_{m0} 同相位, 但幅值小于 $|\dot{U}_{m0}|$ 。即 M 端零序电压的补偿结果: 补偿电压幅值减小, 相位不变。

由式(4)和图 3 分析可知, N 端零序电压补偿的结果为: 补偿电压幅值增大, 相位不变。

1.2.2 $\alpha > \alpha_0$ 情况

与 1.2.1 节分析类似, 可以得到 $\alpha > \alpha_0$ 时 M 和 N 端零序电压补偿的结果: M 端补偿电压幅值增大, 相位不变; N 端补偿电压幅值减小, 相位不变。

表 1 给出了补偿前后零序方向元件的判别结果。

表 1 零序方向元件的判别结果

Table 1 Identification results of zero-sequence directional component

测量端	$\alpha < \alpha_0$		$\alpha > \alpha_0$	
	补偿前	补偿后	补偿前	补偿后
M 端	反向故障	不启动	正向故障	正向故障
N 端	正向故障	正向故障	反向故障	不启动

由本节分析可知, 对于两端电气连接的同塔双回路中健全线的零序方向元件, 经过零序电压补偿后, 原先判为反向故障的一端零序补偿电压幅值减小, 零序方向元件不会启动; 原先判为正向故障的一端零序补偿电压幅值增大, 零序方向元件仍判为正向故障。

2 单端电气连接分析

2.1 补偿前零序方向元件动作情况分析

图 4 为单端电气连接的同塔双回路结构图, 其中 M-N 段为双回线路。图中 Z_{10} , Z_{20} , Z_{30} 和 Z_{40} 为对应线路的零序阻抗, Z_m 为线间零序互阻抗。回线 I 的 M 端发生接地故障。

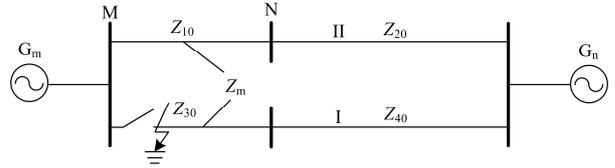


图 4 单端电气连接的同塔双回路结构图

Fig. 4 Structure of double-circuit transmission system with electricity contact on one side

图 4 对应的零序网络图如图 5 所示。

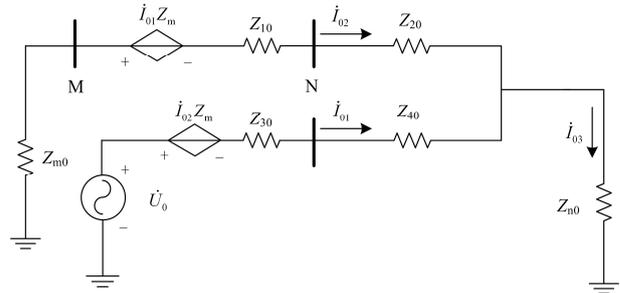


图 5 单端电气连接的同塔双回路零序网络图

Fig. 5 Zero-sequence network of double-circuit transmission system with electricity contact on one side

根据文献[18], M 端和 N 端的零序电压相位关系与回线间电磁联系的强弱有关。分析可知, 电磁联系强弱的条件为

$$Z_{n0}(Z_{10} + Z_{m0}) - Z_m(Z_{20} + Z_{n0}) < 0 \quad (8)$$

当式(8)成立时, 双回线为弱电强磁连接, \dot{U}_{m0} 与 \dot{U}_{n0} 反相; 否则, 双回线为弱磁强电连接, \dot{U}_{m0} 与 \dot{U}_{n0} 同相。

当零序电压满足灵敏度要求时, 健全线 M 和 N 端零序方向元件的判别结果为: 弱电强磁时, M 端和 N 端的零序方向元件均判为正向故障; 弱磁强电时, M 端的零序方向元件判为正向故障, N 端的零序方向元件判为反向故障。下面具体分析零序电压灵敏度不足时, 零序电压补偿对于方向判别的影响。

2.2 零序电压补偿分析

利用节点电压法, 容易求得健全线 M 端零序电压及 \dot{i}_{01} 与 \dot{i}_{02} 的关系为

$$\begin{cases} \dot{U}_{m0} = -\dot{I}_{02}Z_{m0} \\ \dot{i}_{02} / \dot{i}_{01} = -\frac{Z_m + Z_{n0}}{Z_{10} + Z_{20} + Z_{m0} + Z_{n0}} \end{cases} \quad (9)$$

根据式(4)和式(9)可知, M 端补偿电压幅值增大, 相位不变。下面分别分析弱电强磁和弱磁强电两种情况下 N 端零序电压补偿的结果。

2.2.1 弱电强磁

此时 N 端零序电压与 M 端的反相。由式(4)分析可知 N 端补偿电压幅值增大, 相位不变。

2.2.2 弱磁强电

健全线 N 端的零序电压满足为

$$\dot{U}_{n0} = -\dot{I}_{02}(Z_{10} + Z_{m0}) - \dot{I}_{01}Z_m \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)可以得到

$$\dot{U}_{n0} = -\dot{I}_{02} \frac{Z_{n0}(Z_{10} + Z_{m0}) - Z_m(Z_{20} + Z_{n0})}{Z_m + Z_{n0}} \quad (11)$$

由式(4)和式(11)分析可知, N 端补偿电压 \dot{U}_{nop} 的相位与补偿度 k 有关, 临界补偿度 k_0 为

$$k_0 = \frac{Z_{n0}(Z_{10} + Z_{m0}) - Z_m(Z_{20} + Z_{n0})}{(Z_m + Z_{n0})Z_{10}} \quad (12)$$

$k < k_0$ 时, N 端补偿电压幅值减小, 相位不变;
 $k > k_0$ 时, N 端补偿电压与补偿前电压反相。

表 2 给出了补偿前后零序方向元件的判别结果。

表 2 零序方向元件的判别结果

Table 2 Identification results of the zero-sequence directional component

测量端	弱电强磁		弱磁强电		
	补偿前	补偿后	补偿前	补偿后	
				$k < k_0$	$k > k_0$
M 端	正向	正向	正向	正向	正向
	故障	故障	故障	故障	故障
N 端	正向	正向	反向	不启动	正向
	故障	故障	故障		故障

由本节分析可知, 对于单端电气连接的同塔双回线, 零序电压补偿结果与双回线电磁联系的强弱有关。弱电强磁情况下, 健全线两端零序补偿电压幅值增大, 零序方向元件仍判为正向故障。弱磁强电情况下, 原先判为正向故障的一端零序补偿电压幅值增大, 零序方向元件仍判为正向故障; 原先判为反向故障的一端零序补偿电压与补偿度有关。当补偿度较小时, 零序补偿电压幅值减小, 零序方向元件不会启动; 当补偿度较大时, 零序补偿电压反相, 零序方向元件判为正向故障。

为了提高零序电压的灵敏度, 通常选用较大的零序电压补偿度^[2-3]。因此, 弱磁强电情况下, 零序电压补偿会引起零序方向元件误判, 导致纵联零序方向保护误动。

3 无电气连接分析

图 6 为无电气连接的同塔双回线结构图。图 6 对应的零序网络图如图 7 所示。

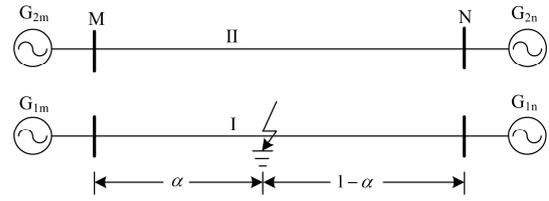


图 6 无电气连接的同塔双回线结构图

Fig. 6 Structure of double-circuit transmission system without electricity contact

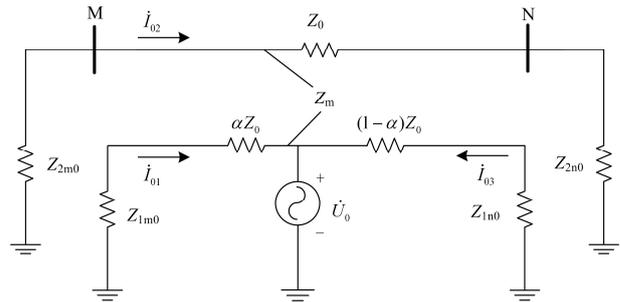


图 7 无电气连接的同塔双回线零序网络图

Fig. 7 Zero-sequence network of double-circuit transmission system without electricity contact

健全线 M 端和 N 端的零序电压为

$$\begin{cases} \dot{U}_{m0} = -\dot{I}_{02}Z_{2m0} \\ \dot{U}_{n0} = \dot{I}_{02}Z_{2n0} \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可知, 当零序电压满足灵敏度要求时, 健全线 M 端和 N 端的零序方向元件均判为正向故障。

由式(4)和式(13)可知, 当零序电压灵敏度不足时, M 端和 N 端的补偿电压均幅值增大, 相位不变。

表 3 给出了补偿前后零序方向元件的判别结果。

表 3 零序方向元件的判别结果

Table 3 Identification results of the zero-sequence directional component

测量端	补偿前	补偿后
M 端	正向故障	正向故障
N 端	正向故障	正向故障

由本节分析可知, 对于无电气连接的同塔双回线, 经过零序电压补偿后, 健全线两端的补偿电压均幅值增大, 零序方向元件仍判为正向故障。

综合以上分析可知, 对于采用零序电压补偿的同塔双回线纵联零序方向保护, 文献[19]中提出的提高零序电压动作门槛值的方式, 不能解决弱电强磁情况下(包括单端电气连接的弱电强磁情况和无电气连接情况)健全线保护误动的问题^[18-19]。同时, 单端电气连接且弱磁强电的情况下, 零序电压补偿

会引起纵联零序方向保护误动。

4 仿真验证

在 PSCAD 上建立了图 4 所示的单端电气连接的同塔双回线仿真模型，双回线路全线存在耦合。两端系统的额定电压为 220 kV，阻抗参数均为： $Z_1=Z_2=j1.3 \Omega$ ， $Z_0=j1.5 \Omega$ 。双回线的长度为 200 km，阻抗参数为： $Z_{L1}=Z_{L2}=(0.0378+j0.3033) \Omega/km$ ， $Z_{L0}=(0.1492+j0.8059) \Omega/km$ ，回线间的零序互阻抗为 $Z_m=(0.1113+j0.4320) \Omega/km$ 。回线 I 的 M 端发生 AG 故障，故障时刻为 0.7 s，过渡电阻为 150 Ω 。电压互感器变比为 $110 \times 10^3/100$ ，零序电压门槛值(二次侧)取 1 V，零序电压补偿度分别设为 0.01 和 0.1。

4.1 补偿度为 0.01 的仿真结果

图 8 为 M 端和 N 端的零序电压、零序电流及零序补偿电压(v'_{m0} 、 v'_{n0})的波形。补偿前，M 端和 N 端的零序电压均小于零序电压门槛值。

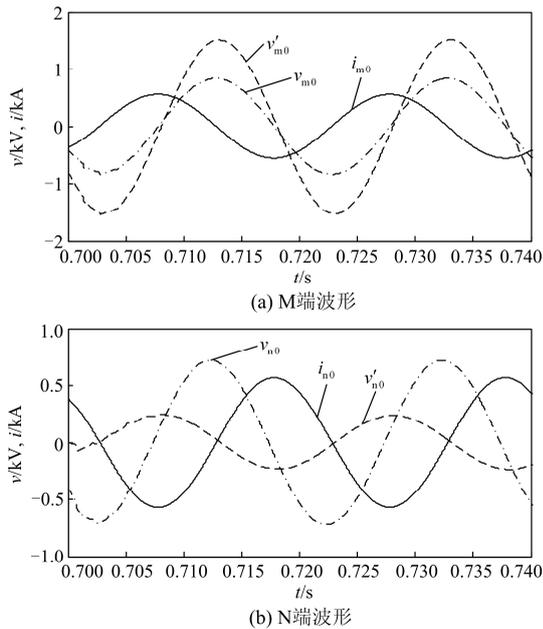


图 8 $k=0.01$ 的仿真波形

Fig. 8 Simulation waveforms when $k=0.01$

由式(8)易知，双回线处于弱磁强电情况。由 Matlab 数据分析，并结合图 8 可以得到：对于 M 端，补偿前零序电压和电流的相位差为 -90.26° ，零序方向元件判为正向故障；补偿后零序电压幅值增大，相位变化不大，零序电压和电流的相位差为 -94.87° ，零序方向元件仍判为正向故障。对于 N 端，补偿前零序电压和电流的相位差为 98.32° ，零序方向元件判为反向故障；补偿后零序电压幅值减小，零序方向元件不启动。仿真结果与第 2 节中补偿度

较小时的分析结果相同。

4.2 补偿度为 0.1 的仿真结果

图 9 为 M 端和 N 端的零序电压、零序电流及零序补偿电压的波形。

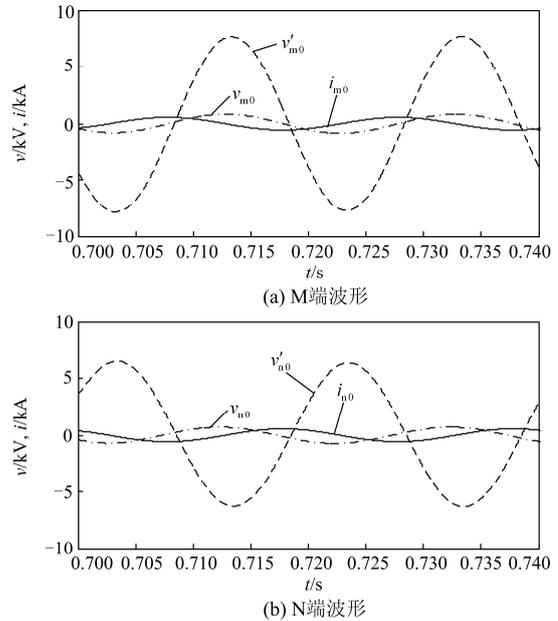


图 9 $k=0.1$ 的仿真波形

Fig. 9 Simulation waveforms when $k=0.1$

由 Matlab 数据分析，并结合图 9 可以得到：补偿后 M 端的零序电压幅值增大，相位变化不大，零序电压和电流的相位差为 -99.38° ，零序方向元件仍判为正向故障。补偿后 N 端的零序电压近似反相，零序电压和电流的相位差为 -102.59° ，判为正向故障。仿真结果与第 2 节中补偿度较大时的分析结果相同。

以上两种补偿度情况下的仿真结果验证了第 2 节理论分析的正确性。

5 结论

本文分析了零序电压补偿对于同塔双回线健全线零序方向元件的影响，得出了以下结论：

- 1) 任意连接方式下，原先判为正向故障的零序方向元件经零序电压补偿后仍判为正向故障。
 - 2) 两端电气连接方式下，原先判为反向故障的零序方向元件经零序电压补偿后不启动。
 - 3) 单端电气连接且弱磁强电的情况下，零序电压补偿的结果与补偿度有关。补偿度较小时，原先判为反向故障的零序方向元件不启动；补偿度较大时，原先判为反向故障的零序方向元件判为正向故障。
- 以上结论对于同塔双回线零序方向元件的选择

具有如下指导意义: 当采用零序电压补偿时, 不能通过提高零序电压门槛的方式解决弱电强磁情况下健全线零序方向元件误动的问题; 单端电气连接且弱电强磁情况下, 不能采用零序电压补偿解决零序电压灵敏度不足的问题。

参考文献

- [1] 曾耿晖, 黄明辉, 刘之尧, 等. 同杆线路纵联零序保护误动分析及措施[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(20): 103-107.
ZENG Genghui, HUANG Minghui, LIU Zhiyao, et al. Analysis and counter measures of misoperation of zero sequence pilot protection on circuit lines of same pole[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(20): 103-107.
- [2] 徐振宇, 杜兆强, 孟岩, 等. 零、负序方向元件的特殊问题研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(5): 21-25.
XU Zhenyu, DU Zhaoqiang, MENG Yan, et al. Special problems in zero/negative sequence directional element[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(5): 21-25.
- [3] 张承学, 丁书文. 对新型正序故障分量方向元件几个特殊问题的探讨[J]. 继电器, 1999, 27(3): 18-21.
ZHANG Chengxue, DING Shuwen. Discussion to a few particular problems to new directional relay based on positive sequence fault components[J]. Relay, 1999, 27(3): 18-21.
- [4] 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, 76.
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, 76.
- [5] 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[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 88-90.
- [6] 李一泉, 张弛, 黄志元, 等. 基于正序电压替代的零序功率方向补充比相方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 63-66, 75.
LI Yiquan, ZHANG Chi, HUANG Zhiyuan, et al. A new supplement scheme of zero sequence directional pilot relay based on positive voltage replacement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 63-66, 75.
- [7] 索南加乐, 孟祥来, 陈勇, 等. 基于故障类型的零序方向元件[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 25-30.
SUONAN Jiale, MENG Xianglai, CHEN Yong, et al. A novel zero sequence directional element based on fault type[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 25-30.
- [8] 索南加乐, 杜斌, 许立强, 等. 基于变压器中性点零序电流的方向元件[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 72-77.
SUONAN Jiale, DU Bin, XU Liqiang, et al. A novel direction element based on transformer neutral zero sequence current[J]. Automation of Electric Power System, 2009, 33(15): 72-77.
- [9] 阿里木江·卡德尔, 索南加乐, 阿米那古丽·艾尼, 等. 基于超高压自耦变压器中性点零序电流的方向比较纵联保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 24-31.
ALIMJIAN Kader, SUONAN Jiale, AMINGUL Aini, et al. A novel scheme for UHV auto-transformer protection based on zero-sequence current longitudinal comparison principle[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 24-31.
- [10] 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.
- [11] JENA P, PRADHAN A K. An integrated relaying for directional relaying of the double-circuit line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 1783-1792.
- [12] 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.
- [13] 邹浩, 于仲安, 吴彪, 等. 同塔四回输电线路双端故障测距实用算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 111-116.
ZOU Hao, YU Zhongan, WU Biao, et al. A new method of fault location with two-terminal data for four-parallel transmission lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 111-116.
- [14] 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.
- [15] 宋国兵, 徐海洋, 樊占峰, 等. 利用相电流突变防止零序方向元件误动的方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2): 114-120.
- SONG Guobing, XU Haiyang, FAN Zhanfeng, et al. A method for preventing mal-operation of zero-sequence direction component using current fault component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 114-120.
- [16] 张思寒, 董飞飞. 220 kV 同塔双回输电线路综合防雷措施效果研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(4): 66-69.
- ZHANG Sihan, DONG Feifei. Lightning protection effect research of 220 kV double-circuit transmission line[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(4): 66-69.
- [17] 张思寒. 并联间隙配置方式对 220 kV 同塔双回输电线路防雷效果的研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(1): 82-85.
- ZHANG Sihan. Lightning protection effect research of parallel gap configuration option on 220 kV double circuit transmission line on same tower[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(1): 82-85.
- [18] 宋国兵, 刘志良, 粟小华, 等. 西北 330 kV 线路弱电强磁问题的分析及采取的措施[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 121-125.
- SONG Guobing, LIU Zhiliang, SU Xiaohua, et al. Analysis on weak current and strong magnetic problem of north-west 330 kV lines and its countermeasure[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 121-125.
- [19] 李钢, 路洁, 白晶, 等. 一起平行运行线路纵联零序方向保护误动分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(14): 104-107.
- LI Gang, LU Jie, BAI Jing, et al. Mal-function analysis on pilot zero sequence direction relay applied in parallel lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(14): 104-107.
-
- 收稿日期: 2016-03-04; 修回日期: 2016-09-10
- 作者简介:
- 徐海洋(1992-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: xuhaiyang.2009@stu.xjtu.edu.cn
- 黄兴华(1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: xhhuangxjtu@qq.com
- 王 婷(1993-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 397771830@qq.com
- (编辑 姜新丽)