

DOI: 10.7667/PSPC160314

线路纵联零序方向保护误动机理分析及对策研究

谢俊¹, 李勇¹, 刘宏君², 李锋¹, 俞伟国²

(1. 国家电网华中电力调控分中心, 湖北 武汉 430074; 2. 长园深瑞继保自动化有限公司, 广东 深圳 518057)

摘要: 针对纵联零序方向保护克服零序电压死区导致过补偿的问题, 提出一种改进的零序电压的补偿方法。该方案通过补偿线路全长的三分之一来实现, 保证纵联零序方向不会两侧同时出现过补偿误动, 同时保证内部故障时, 保护具备一定的灵敏度。首先对纵联保护零序方向补偿进行分析, 提出造成零序方向补偿误动的新零点。提出一种改进型零序补偿方案, 同时以负序方向为辅助判据, 改进纵联零序方向保护的性能。仿真试验结果证明了该方案的可行性和正确性。

关键词: 线路保护; 零序方向保护; 误动作; 负序; 过补偿

Mechanism analysis and countermeasure research on the misoperation of the zero sequence directional pilot protection of line

XIE Jun¹, LI Yong¹, LIU Hongjun², LI Feng¹, YU Weiguo²

(1. Central China Electric Power Dispatching and Control Branch of State Grid Company, Wuhan 430074, China; 2. CYG SUNRUI CO., LTD., Shenzhen 518057, China)

Abstract: In order to solve the overcompensation problem caused by the zero sequence directional pilot protection which is designed to overcome the zero voltage dead zone, an improved zero sequence voltage compensation scheme is proposed, which is realized by compensating one third of the line length. In this way, the both sides simultaneous misoperation caused by overcompensation is prevented. At the same time, the sensitivity is ensured under the situation of internal fault. First of all, the analysis of compensation of the zero sequence directional protection is carried on, the new zero point is raised, and furthermore an improved zero sequence compensation scheme is put forward, whose auxiliary criterion is negative sequence, leading to an improved function of zero sequence directional pilot protection. The simulation result verifies the feasibility and correctness of the scheme.

Key words: line protection; zero sequence directional protection; misoperation; negative sequence; overcompensation

0 引言

目前, 电网线路主要配置纵联保护作主保护, 保证全线范围内发生故障时能够快速切除。纵联保护包括纵联差动保护和纵联距离(方向)保护两种。近年来, 同塔输电线路在我国超高压输电线路的建设中得到广泛的应用。国内电网汇集了多种不同架设形式的同塔线路, 因互感等原因, 已出现了多起线路纵联零序方向保护误动的事例^[1-6]。

本文在详细分析了有无互感的平行双回线在接地和断线故障时, 故障线路与非故障线路零序电流电压分布情况。发现除传统认为的弱电强磁情况平行双回线接地故障, 互感影响导致非故障线路纵联

零序方向保护误动外, 平行双回线断线故障时非故障线路上出现的零序电压过零点, 也是导致纵联零序方向保护误动的重要因素。本文研究并提出了以零序方向为主判据, 负序方向为辅助判据的改进纵联零序方向保护, 并进行了大量仿真实验, 结果表明该改进措施可以有效防止纵联零序方向保护误动。

1 现有零序方向继电器原理

零序方向继电器是一个经典的课题, 随着电网的日趋复杂, 对零序方向继电器提出了更高的要求, 具体来说就是消除零序电压死区。《线路保护及辅助装置标准化设计规范》(QGDW 1161-2013)中要求, “保护装置中的零序功率方向元件应采用自产零序电压。纵联零序方向保护不应受零序电压大小的影响, 在零序电压较低的情况下应保证方向元件的

正确性”。为消除零序电压死区，即当零序电压低到装置不可识别，零序方向继电器仍然要正确动作，现有零序方向保护采用电压补偿的方法。

现行零序方向继电器由常规零序方向元件和无死区零序方向元件组成^[7-8]。

1.1 方向元件

零序方向元件设正、反两个方向元件，反方向元件的灵敏度高于正方向元件。正方向元件的零序电流定值 I_{0ZD}^+ 与反方向元件的零序电流定值 I_{0ZD}^- 的关系为

$$I_{0ZD}^+ > I_{0ZD}^- \quad (1)$$

式中： I_{0ZD}^+ 为“纵联零序电流定值”； I_{0ZD}^- 取为“零序启动电流定值”。

1.2 常规零序方向元件

正方向判据

$$180^\circ < \text{Arg} \frac{3U_0}{3I_0} < 340^\circ \quad (2)$$

反方向判据

$$-10^\circ < \text{Arg} \frac{3U_0}{3I_0} < 150^\circ \quad (3)$$

1.3 无死区零序方向元件

在线路零序阻抗很大而背侧零序阻抗很小情况，线路末端接地故障时，保护装置感受的零序电压可能低于零序方向元件的电压门槛值，导致零序方向元件拒动，为了克服零序方向元件的电压死区，一般采用补偿零序电压的方式，克服零功方向的死区。不同的设备制造厂家的补偿判据不完全相同。有采用暂态算法补偿，有采用稳态补偿。

2 不考虑补偿时线路零序方向保护分析

规定正方向：电流由母线指向线路为正方向。

2.1 单回线路故障分析

单回线路，在区内发生接地故障时，零序电压电流分布如图 1 所示。区内故障，零序电流由母线向故障点流动，两侧零序方向均判断为正，区内故障纵联零序方向保护正确动作。

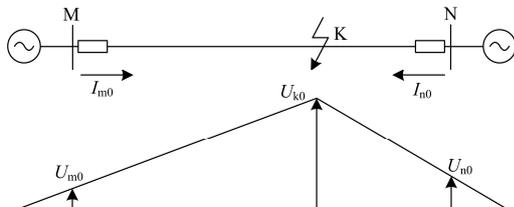


图 1 单回线路区内故障零序电压分布

Fig. 1 Zero sequence voltage distribution of internal fault in single circuit line

在区外发生接地故障时，零序电流电压分布如图 2 所示。区外故障，两侧流过同一零序电流，由于两侧正方向定义不一致，因此，一侧零序方向判断为正，一侧零序方向判断为负，区外故障纵联零序方向保护可靠不动作。

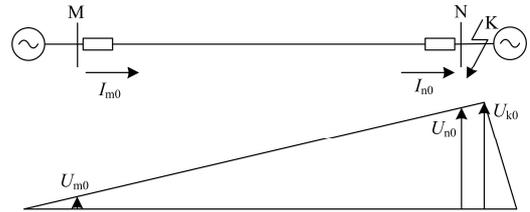


图 2 单回线路区外故障零序电压分布

Fig. 2 Zero sequence voltage distribution of external fault in single line

单回线路的断线故障可同理分析类似结论。

2.2 无互感平行双回线故障分析

无互感平行双回线在一条线路发生故障时，故障线和非故障线路零序电流电压分布如图 3 所示。

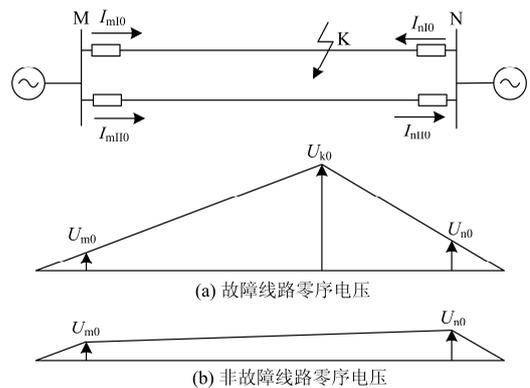


图 3 无互感平行双回线接地故障零序电压分布

Fig. 3 Zero sequence voltage distribution of ground fault in double-circuit lines without mutual inductance

故障线路两侧零序电流均由母线流向故障点，故障点零序电压最高，两侧保护安装处零序电压如图，故两侧零序方向均判断为正，故障线路纵联零序方向保护正确动作。非故障线路流过穿越性电流，零序电流一侧为正一侧为负，保护安装点零序电压均为正，故两侧零序方向判断为一正一负，非故障线路纵联零序方向保护可靠不动作。

无互感平行双回线在一条线路发生断线故障时，故障线和非故障线零序电流电压分布如图 4 所示。故障线路存在穿越性电流，两侧零序电流一正一反，两侧零序电压也一正一反，故障线路纵联零序方向保护正确动作。非故障线路流过的穿越性电

流与故障线路正好相反, 零序电压方向不变, 两侧零序方向均判断为反向, 非故障线路纵联零序方向保护可靠不动作。

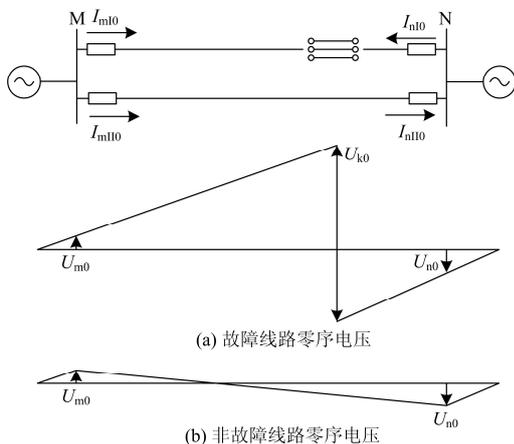


图 4 无互感平行双回线断线故障零序电压分布

Fig. 4 Zero sequence voltage distribution of wire break in double-circuit lines without mutual inductance

2.3 有互感平行双回线故障分析

有互感的平行双回线发生接地故障或断线时, 根据楞次定律, 在互感的作用下, 线路上将产生一个纵向电动势, 这个电动势完全等同内部纵向故障^[9-10]。该纵向电动势不影响故障线路纵联零序方向判别。但在非故障线路上, 相当存在雷同内部故障的纵向电动势, 和本身反映外部故障的电特征, 即存在电和磁的较量, 强电弱磁情况下, 电的因素占有主导地位, 非故障线路纵联零序方向保护不会误动, 而如图 5 所示的强磁弱电情况下, 由于互感产生的纵向电动势的影响, 可能导致纵联零序方向保护误动。

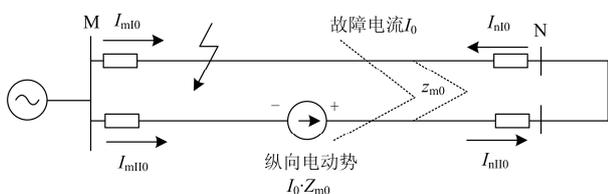


图 5 有互感平行双回线接地故障

Fig. 5 Zero sequence voltage distribution of ground fault in double-circuit lines with mutual inductance

强电强磁的情况下, 如图 6 所示, 非故障线路由于互感增强了零序电流, 减小了两侧母线的零序电压差, 达不到零序电压差反相, 两侧母线零序电压大幅降低, 可能存在零序电压死区, 需要采用电压补偿的解决零序电压死区问题。

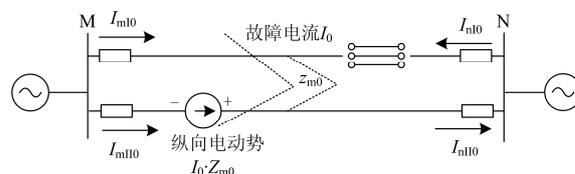


图 6 有互感平行双回线断线故障

Fig. 6 Zero sequence voltage distribution of wire break in double-circuit lines with mutual inductance

3 考虑补偿时线路零序方向保护分析

3.1 补偿电压的基本原理

零序方向是依据零序电压与零序电流的关系判别方向, 弱故障强电源会出现电压死区。现行技术标准要求纵联零序方向保护在零序电压较低的情况下应保证方向元件的正确性。现行保护常用替代电压消除电压死区, 这要求替代电压与被替代电压永远同相位。目前常用的替代电压是补偿电压。

通常我们把零序电压减去零序电流乘零序阻抗称为正向补偿零序电压, 它反映的是正向离开母线的某一处零序电压, 其远近由补偿零序阻抗决定^[11]。如图 7 所示, 正向故障零序电流与零序电压相位相反, 于是, 补偿电压越补越大。反向故障零序电流与零序电压相位相同, 于是, 补偿电压越补越小。因为反向故障是越补越小, 就存在过补偿——补偿超过零。一旦过补偿, 补偿电压相位反向, 将导致方向判别错误, 因此, 为确保补偿电压与零序电压同相位, 必须保证是欠补偿。反向故障比正向故障更容易产生过补偿! 现行保护普遍认为只要不补偿到对侧中性点, 就不会发生过补偿。

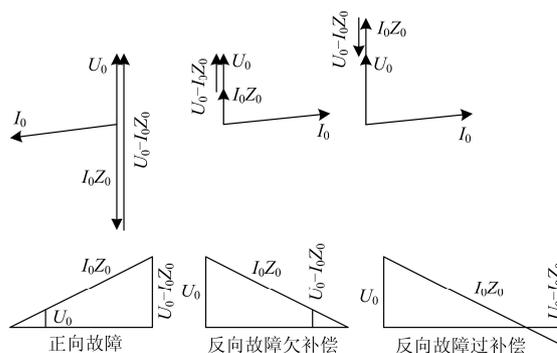


图 7 故障情况下零序电流电压相位图

Fig. 7 Zero sequence voltage and current distribution of fault

3.2 引起过补偿误动的新零点

平行双回线发生接地故障时, 电流电压分布如前图 3 所示, 无互感时按照第 1 节补偿电压双回线均不会发生过补偿。仅在有互感的强磁弱电情况下, 同 2.3 节原因可能产生过补偿和误动。

平行双回线发生断线故障时，电流电压分布如前图 4 所示，无论有无互感，故障线路不会发生过补偿和误动。而非故障线路电压电流分布如图 8 所示。

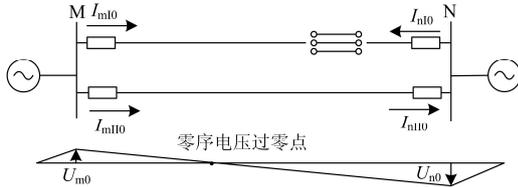


图 8 平行双回线断线故障中非故障线零序电压分布
Fig. 8 Zero sequence voltage distribution of non fault line in double-circuit lines with wire break

由图 8 可见，故障线在断线端口产生零序电压，在此电压的驱动下产生零序电流，零序电流从一端母线经变压器入地，必然从另一端地经变压器到母线。因此，两端母线的零序电压相位相反。非故障线无故障断口，且整条线路的零序电压是连续的且基本均匀分布，由于两端母线的零序电压相位相反，根据中值定理，非故障线路中必然存在一个零序电压过零点。

正是这个长期被大家忽视的过零点，导致现行继电保护装置在选择补偿度时，只考虑变压器中性点的电压过零，从而存在大量过补偿，一旦两侧零序电压均被过补偿，误动随即产生。

存在互感的平行双回线，互感增强了零序电流，减小了两侧母线的零序电压差，采取补偿电压消除电压死区时，进一步增加了两侧同时过补偿造成误动的概率。

4 改进的零序方向保护

根据前述分析，线路纵联零序方向保护误动基本原因可归结为如下两类：

1) 强磁弱电的平行双回线，在一条线路发生接地或断线故障时，由于互感的影响，可能导致纵联方向保护误动。

2) 平行双回线一条线路发生断线故障时，非故障线路上零序电压产生新过零点，现行保护补偿原理长期忽视该过零点，导致两侧零序电压过补偿误动。互感的存在则将进一步增大两侧过补偿导致误动的概率。

因此，要避免平行双回线纵联零序方向保护的误动，必须从克服双侧过补偿和零序互感影响两个方面入手。

4.1 双侧过补偿的应对策略

从图 8 的非故障线上零序电压分布可以看出，

线路上的过零点在线路正中间时最易发生双侧过补偿。因此，建议将零序电压仅正向补偿线路零序阻抗的 1/3，比较零序电压和零序补偿电压大小，取大者，当大者零序电压灵敏度满足时，参与零序方向比较；当大者零序电压灵敏度不满足时，闭锁零序方向或判为反向。

这种补偿方法，在正向故障(不论横向、纵向)时，零序补偿电压大于零序电压且同相，零序补偿电压灵敏度肯定满足，正确动作；在反向横向故障时，零序电压大于零序补偿电压且同相，零序电压灵敏度肯定满足，正确动作；在反向纵向故障时，最严酷的情况是并联线路断线健全线路零序电压：若为欠补偿，零序电压大于零序补偿电压且同相，零序电压灵敏度满足，正确动作；零序电压灵敏度不满足，闭锁零序方向或判为反向，也正确动作。若为过补偿，由于只补偿线路零序阻抗的 1/3，虽过但不多，只要零序电压大于零序补偿电压，或者两者灵敏度都不满足，也正确动作。

4.2 互感影响的应对策略

应对互感的影响，无一例外的都选择负序^[12-15]。因为负序与零序方向性质是一致的，负序无互感。但是，负序由弱电源引起的电流灵敏度问题，是一个非常棘手的问题^[15]。因此，可以将零序方向作为主判据，负序方向作为辅助判据，防止零序互感引起的误动。

4.3 改进纵联零序方向保护

1) 零序方向主判据

$$\begin{aligned} |3U_0 - 3I_0 \cdot Z_{0L}| &> \left| 3U_0 + 3I_0 \cdot \frac{Z_{0L}}{3} \right| \\ |3I_0| &> 300 \text{ A} \end{aligned} \quad (4)$$

二者为与的关系

2) 弱电强磁情况下负序辅助判据

$$\begin{aligned} |3U_2 - 3I_2 \cdot Z_{2L}| &> \left| 3U_2 + 3I_2 \cdot \frac{Z_{2L}}{3} \right| \\ |3U_2 - 3I_2 \cdot Z_{2L}| &> U_{set} \end{aligned} \quad (5)$$

3) 为防止弱电拒动，增加无负序电流和低负序电压判据

$$|3I_2| < I_{set} \quad |3U_2| < U_{set} \quad (6)$$

4) 保护判别流程如图 9 所示。

首先判负序电流，若有，进入改进的纵联零序方向保护判别；若无，进入弱电判别，再判负序电压，分两种情况：无负序电流&有负序电压，直接判定零序方向为正向；无负序电流&无负序电压直接判定零序方向为反向。因为，没有负序电流，无法做负序方向比较，只能做一定的取舍，前者取为弱电；后者取为不灵敏的区外故障。

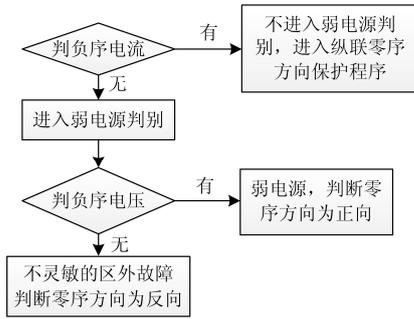


图 9 改进纵联零序方向保护流程

Fig. 9 Improved zero sequence directional protection process

此外, 负序电流电压的定值都应设置的较小, 以灵敏地开放主判据, 防止误闭锁零序方向。

5 仿真验证

利用电力系统 RTDS 搭建仿真模型, 验证方案的正确性。如图 10 为 150 km 双回部分同杆输电线路模型, 有互感, 其中 M 侧母线接有大系统, N 侧通过长线路连接。

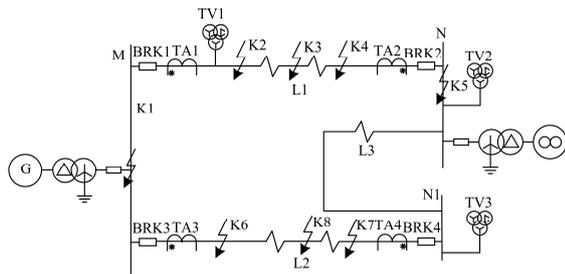


图 10 仿真模型接线图

Fig. 10 Simulation mode

分别模拟保护区内外不同故障点发生接地故障和断线故障时的, 观察保护的動作特性。图 11、图 12 分别为 K2 点金属性瞬时短路故障 A 相接地以及平行双回线 A 相断线故障时的录波图。

录波图中, 各物理量的说明如表 1 所示。

表 1 物理量说明

Table 1 Physical quantity description

U_{MA} 、 U_{MB} 、 U_{MC}	M 侧电压
U_{NA} 、 U_{NB} 、 U_{NC}	N 侧电压
U_{N1A} 、 U_{N1B} 、 U_{N1C}	N1 侧电压
I_{M1A} 、 I_{M1B} 、 I_{M1C}	线路 1 的 M 侧电流
I_{N1A} 、 I_{N1B} 、 I_{N1C}	线路 1 的 N 侧电流
I_{M2A} 、 I_{M2B} 、 I_{M2C}	线路 2 的 M 侧电流
I_{N2A} 、 I_{N2B} 、 I_{N2C}	线路 2 的 N 侧电流
FLTK1、FLTK2	故障标志
MA、MB、MC	M 侧跳闸标志
NA、NB、NC	N 侧跳闸标志

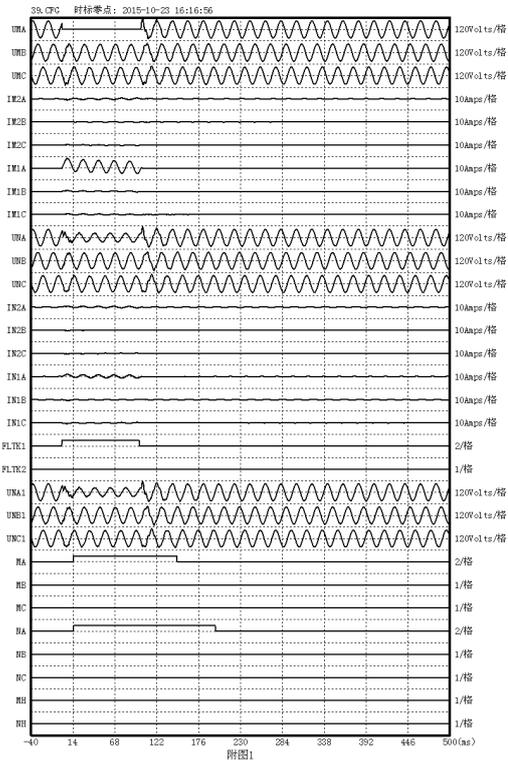


图 11 A 相接地故障

Fig. 11 Ground fault of A phase

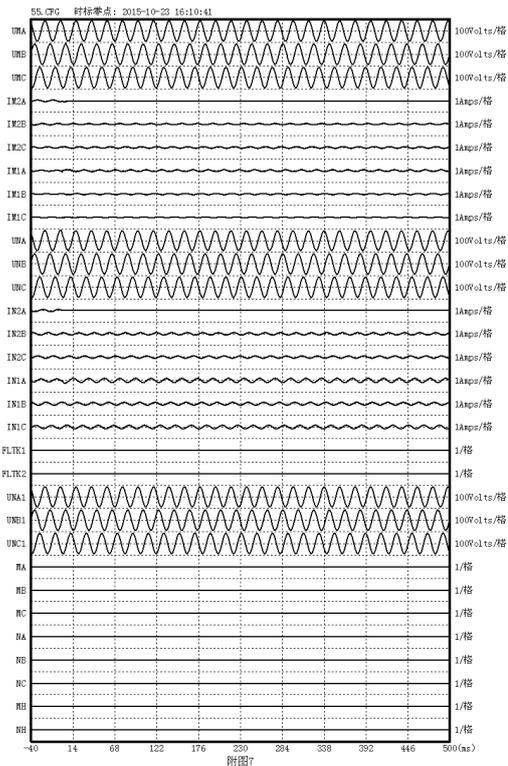


图 12 A 相断线故障

Fig. 12 Wire break of A phase

仿真结果表明,改进后的纵联零序方向保护在各个工况下均正确动作,没有误动作。

6 结语

本文在大量理论分析的基础上,发现除零序互感影响导致纵联零序方向保护误动外,平行双回线断线故障时,非故障线路上零序电压产生的过零点长期被忽视,导致零序方向保护存在双侧过补偿导致保护误动的情况,而互感的存在则将进一步增大两侧过补偿导致误动的概率。

本文提出的以零序方向为主判据,负序方向为辅助判据的改进纵联零序方向保护,可以有效的解决上述问题引起的线路纵联零序方向保护误动。

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 countermeasures 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] 汪洋, 陈久林. 纵联零序方向保护误动原因分析及其对策[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(7): 122-125.
WANG Ping, CHEN Jiulin. Analysis of longitudinal zero sequence direction protection misoperation and its countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(7): 122-125.
- [3] 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.
- [4] 李一泉, 焦邵麟, 张弛, 等. 平行线路纵联零序方向保护安全性分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 104-107.
LI Yiquan, JIAO Shaolin, ZHANG Chi, et al. Safety analysis on pilot zero sequence direction relay applied in parallel lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 104-107.
- [5] 郭润生, 何彩虹, 鄧建杰. 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.
- [6] 张苏敏, 古斌, 曹良丰, 等. 输电线路相差保护新原理[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 76-83.
ZHANG Sumin, GU Bin, CAO Liangfeng, et al. A novel phase comparison protection principle for transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 76-83.
- [7] 李瑞生. 一种基于虚拟节点网络拓扑结构适用于架空线路主动配电网的纵联保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 70-75.
LI Ruisheng. An aerial line active distribution network pilot protection scheme based on topology of virtual node[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 70-75.
- [8] 申志成, 张慧媛, 龚仁敏, 等. 反应全类型故障的改进零序方向元件[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 102-106.
SHEN Zhicheng, ZHANG Huiyuan, GONG Renmin, et al. An improved zero-sequence directional component to response all kinds of fault[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 102-106.
- [9] 樊占峰, 叶东印, 李瑞生, 等. 平行线弱电强磁模型下零序方向元件改进[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(17): 100-103.
FAN Zhanfeng, YE Dongyin, LI Ruisheng, et al. Improvement of zero-sequence directional relay for the parallel line with magnetically strong and electrically weak connection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(17): 100-103.
- [10] 田书, 刘芳芳, 任晓明, 等. 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, et al. 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.
- [11] 吴麟琳, 黄少锋. 零序互感对相邻线路纵联零序方向保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 24-28.

- WU Linlin, HUANG Shaofeng. Effects of zero-sequence mutual inductance on zero-sequence pilot protection of parallel lines[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 24-28.
- [12] 李振动, 赵青春, 董杰, 等. 串联补偿对差动保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 139-143.
- LI Zhendong, ZHAO Qingchun, DONG Jie, et al. Research on influence of series compensation on differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 139-143.
- [13] 蒋苏静, 毕天姝, 徐振宇, 等. 平行双回线路纵联零序方向误动原因分析及负序功率方向研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 21-26.
- JIANG Sujing, BI Tianshu, XU Zhenyu, et al. Analysis of the reason of pilot zero sequence directional protection mal-function and study of negative sequence directional element on parallel double-circuit lines[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 21-26.
- [14] 张弛, 李一泉, 曾耿辉. 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] 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.

收稿日期: 2016-03-10; 修回日期: 2016-05-30

作者简介:

谢俊(1980-), 男, 博士, 高级工程师, 从事继电保护整定计算与智能电网相关研究管理工作; E-mail: xjvhj@163.com

李勇(1981-), 男, 本科, 高级工程师, 从事继电保护原理研究及日常管理工作;

刘宏君(1974-), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。E-mail: liuhj@sznari.com

(编辑 张爱琴)