

· 运行分析 ·

## 一起距离保护误动事例分析以及解决方案

沈 军, 张洪喜, 王 忠, 赵青春, 张春合, 朱晓彤

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:** 作为后备保护, 距离保护广泛用于各电压等级的线路及元件保护, 为确保方向性, 距离保护一般采用正序电压作为极化电压, 但正序极化电压在系统非全相运行工况下可能无法正确反映故障前电压。本文介绍了一起单侧电源系统距离保护 I 段在反向故障时误动的事例, 分析了利用正序电压作为距离保护极化电压存在的不足, 并提出了相应的解决方案, 最终 RTDS 实验结果验证了本方案的正确性。

**关键词:** 距离保护; 误动; 正序电压; 极化电压; 工作电压; 非全相

**中图分类号:** TM73

**文献标志码:** B

**文章编号:** 2096-3203(2017)03-0100-05

### 0 引言

距离保护的优点之一是保护范围明确、不受系统运行方式影响, 作为后备保护, 广泛应用于各电压等级的线路保护。距离保护基于本端电气量构成, 为确保方向性, 距离保护一般采用正序电压作为极化电压<sup>[1,2]</sup>, 圆特性距离保护则一般由工作电压与极化电压比相构成。由于正序极化电压具备故障前与故障后电压相位不变的特性, 因此以正序电压作为参考标准的极化电压具有良好的方向性。但正序极化电压在某些特殊系统特殊运行工况下会存在不足, 不能正确反映故障前系统的电压。目前距离保护的研究主要集中在快速段保护范围方面<sup>[3-9]</sup>, 对异常工况下正序极化电压的研究较少。

本文结合现场距离保护误动事例, 介绍了正序电压作为距离保护极化电压在某些特殊运行工况下存在的缺陷, 并提出了相应的解决方案, RTDS 实验结果验证了本方案的正确性。

### 1 现场故障概述

图 1 为东南亚某国 150 kV 单端电源系统, 该系统由 PLTU-Bayah-CEMINDO 3 个变电站组成, 连接 3 个变电站的线路均为单回线, 其中 CEMINDO 站为终端站, 连接 2 台 Y-n/Δ-11 变压器, PLTU 站为电源侧, 2 条线路均配置纵联距离保护作为主保护, 三段距离保护及过流保护作为后备保护。

2015 年 11 月 12 日 15 点 41 分, PLTU-Bayah 线路发生 C 相接地故障, 故障点在 Bayah 站出口, PLTU-Bayah 线路 Bayah 侧保护装置一距离 I 段正确动作, 发 C 相跳闸命令, 但由于现场接线错误, 导

收稿日期: 2017-01-08; 修回日期: 2017-03-02

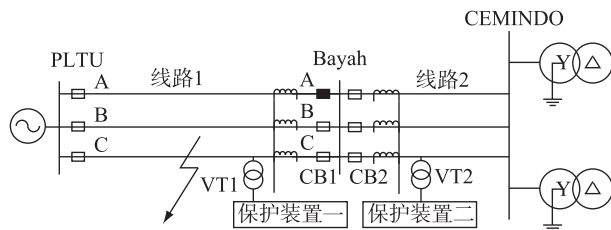


图 1 PLTU-Bayah-CEMINDO 系统

Fig.1 The system of PLTU-Bayah-CEMINDO

致该侧 A 相开关被误跳开, 而 C 相开关未能断开, 故障持续在线路上, 约 30 ms 后, Bayah-CEMINDO 线路 Bayah 侧保护装置二距离 I 段动作, 误跳三相, 从而将 CEMINDO 完全分开。保护装置一及保护装置二动作波形分别如图 2 和图 3 所示。

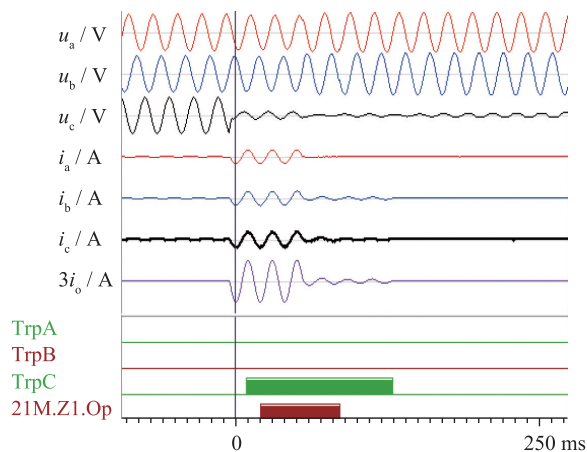


图 2 保护装置一动作波形

Fig.2 Disturbance waveform of relay 1

图中:  $u_a, u_b, u_c$  分别为 A、B、C 相电压;  $i_a, i_b, i_c$  为 A、B、C 相电流;  $3i_0$  为零序电流; TrpA、TrpB、TrpC 为 A、B、C 相跳闸命令; 21M.Z1.Op 为距离 I 段动作信号。如图 3 所示, 系统侧 A 相断开后, 保护装置二经短延时动作误跳闸。

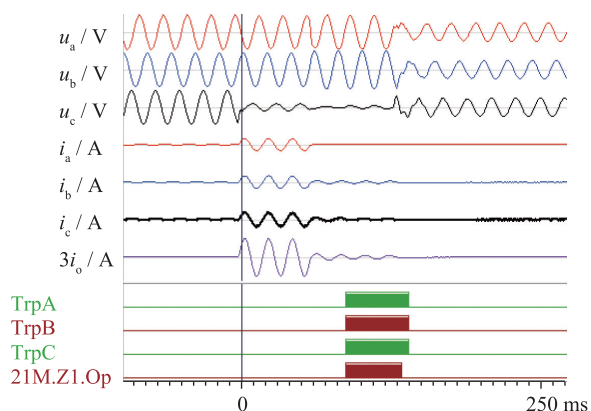


图3 保护装置二动作波形

Fig.3 Disturbance waveform of relay 2

## 2 故障分析

### 2.1 距离保护动作特性

以圆特性距离保护为例,其正方向动作方程如公式(1)所示<sup>[10-13]</sup>:

$$-90^\circ \leq \arg \dot{U}_{\text{op}\varphi} / (-\dot{U}_{1\varphi}) \leq 90^\circ \quad (1)$$

式中:  $\dot{U}_{\text{op}\varphi} = \dot{U}_\varphi - (\dot{I}_\varphi + K3\dot{I}_0)Z_{\text{set}}$ ;  $\dot{U}_{\text{op}\varphi}$  为工作电压;  $\dot{U}_\varphi$  为故障相电压;  $\dot{I}_\varphi$  为故障相电流;  $\dot{I}_0$  为零序电流;  $Z_{\text{set}}$  为距离保护定值;  $\dot{U}_{1\varphi}$  为对应故障相的正序极化电压。公式(1)对应的距离保护动作特性如图4中的圆1所示。

对于短线路,为了提高圆特性距离保护抗过渡电阻的能力,可将正序电压移相,此时动作方程为式(2)所示:

$$-90^\circ \leq \arg \dot{U}_{\text{op}\varphi} / (-\dot{U}_{1\varphi} e^{j\theta}) \leq 90^\circ \quad (2)$$

带偏移特性的圆距离保护动作特性如图4中圆2所示。图中:  $Z_s$  为本侧背后系统阻抗;  $\theta$  为偏移角。由图可见,带偏移特性的圆距离保护提高了抗过渡电阻能力<sup>[14]</sup>。

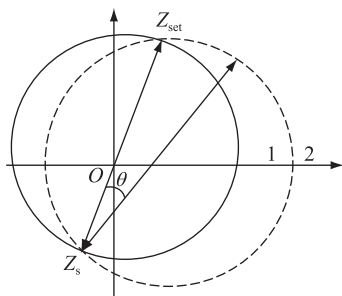


图4 圆特性及偏移特性

Fig.4 Mho operation characteristic

### 2.2 故障分析

CEMINDO 站接 2 台接地负荷变压器,故障发生

时,负序电流均流往 PLTU 侧,而零序电流则根据分配系数分别流往两侧,因此 Bayah 站仅流过零序电流,其三三相故障电流同相位。当 A 相误跳开后,A 相开路,相当于给回路串联了阻抗(系统正序阻抗与负序阻抗的并联值)<sup>[15]</sup>,使得系统零序阻抗增大,故障零序电流变小。

Bayah 站 保护装置二  $\theta$  角整定为  $30^\circ$ , CB1 开关 A 相跳开前,对于保护装置二,根据式(2)求得 C 相电压的工作电压与极电压的关系如下图5所示。

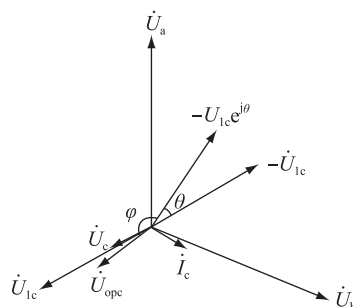


图5 A相开关断开前电压相量

Fig.5 Vector diagram before the open of phase A

由图5可见,  $\varphi_c = \arg \dot{U}_{\text{op}c} / (-\dot{U}_{1c} e^{j\theta}) \approx 166^\circ$ , 不满足距离保护区内故障识别方程(1),故障被识别为区外故障,保护可靠不动。

Bayah 站 CB1 开关 A 相误跳开后,保护装置二测量的 A 相电压并未降到零,而是接近额定电压,根据式(2)求得 C 相工作电压与极化电压的关系如下图6所示。图6中  $\varphi = \arg \dot{U}_{\text{op}c} / (-\dot{U}_{1c} e^{j\theta}) \approx 78^\circ$ , 满足式(2)动作条件,反向故障被识别为区内故障。

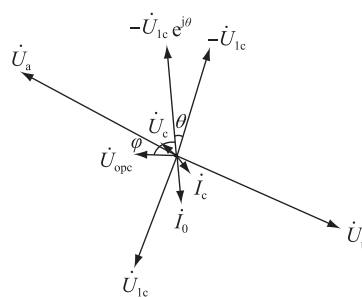


图6 A相开关跳闸后电压电流相量

Fig.6 Vector diagram after the open of phase A

### 2.3 误动原因分析

此次误动,是由于正序电压在 A 相跳开后相位发生了变化导致,A 相跳开后,VT2 测量的 A 相电压  $\dot{U}_a$  与系统侧 A 相电压不一致,原本应该超前  $\dot{U}_b$   $120^\circ$  的  $\dot{U}_a$  变成超前  $\dot{U}_b$   $180^\circ$ 。原因分析如下。CEMINDO 变电站连接 Y-n/ $\Delta$ -11 变压器,正常情况下其结构图以及电压向量如图7所示<sup>[16]</sup>。

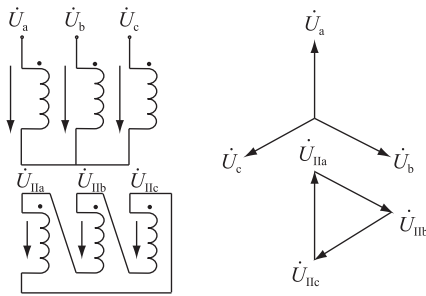


图7 三相变压器 Y/Δ 传变示意图  
Fig.7 Y/Δ transformer diagram

图中： $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$  分别为原边 Y 侧三相电压； $\dot{U}_{IIa}, \dot{U}_{IIb}, \dot{U}_{IIc}$  为副边 Δ 侧三相电压。Δ 侧三相电压应满足式(3)：

$$\dot{U}_{IIa} + \dot{U}_{IIb} + \dot{U}_{IIc} = 0 \quad (3)$$

由式(3)可得：

$$\dot{U}_{IIa} = -(\dot{U}_{IIb} + \dot{U}_{IIc}) \quad (4)$$

由于变压器 Y 侧 A 相与系统断开,因此经 Y/Δ 变压器传变后,Y 侧 A 相电压应满足如下公式：

$$\dot{U}_a = -(\dot{U}_b + \dot{U}_c) \quad (5)$$

由于 C 相接地,因此弱馈侧  $\dot{U}_c$  幅值极小,基于式(5)可知 A 相电压与 B 相电压相位基本反向,本次故障 Y/Δ 变压器各侧电压相量如下图 8 所示。

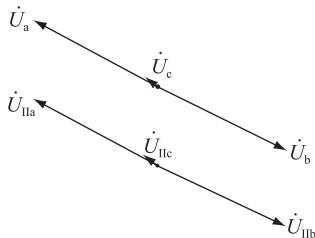


图8 Y/Δ 变压器电压向量示意图  
Fig.8 Voltage vector diagram of the fault

综上所述,对于 Y/Δ 弱馈系统,在系统侧相邻线非全相期间发生反向故障时,由于正序极化电压不能反映系统实际的正序电压,因此导致反向故障误动。

### 3 新判据

基于以上分析,在系统侧非全相期间,对于弱馈侧,发生反向相间故障时,由于故障相间电压为 0,弱馈侧计算的正序电压与系统实际正序电压一致,不存在误判的情况,仅在反向单相故障才存在正序电压计算偏差的问题。

针对该情况,本文提出非全相及故障相识别判

据,能可靠识别 Y/Δ 弱馈系统相邻线非全相,然后由只与系统连接的健全相电压计算正序电压,从而确保装置计算的正序电压与系统实际正序电压一致。

本判据由非全相状态识别判据以及非全相状态正序极化电压计算组成。非全相状态识别判据用来识别故障发生时刻系统非全相相别,而非全相状态正序极化电压计算则是排除非全相相别电压计算得到的正序极化电压。

非全相状态识别判据(以 A 相故障为例)。

(1)  $3U_0 < (0.1U_n + I_0 \times Z_0)$ 。理论上变压器的 Y 侧端口电压  $3U_0 = 0 \text{ V}$ ,但实际上由于零序电流在线路 2 上产生了零序压降,导致装置测量到一定的零序电压,其中  $Z_0$  为正向线路零序阻抗,  $U_n$  为额定电压。

(2)  $U_b > 0.7U_n, U_c > 0.7U_n, U_a < 0.3U_n$  且  $I_a > 0.06I_n$ 。高阻的情况下电压可能大于  $0.3U_n$ ,但是此时测试阻抗不会进入动作特性圆。

(3)  $3I_0 > 0.1I_n$ 。

非全相正序电压计算包括以下步骤:(1) 健全相相别判断。根据非全相状态判据判别出系统侧非全相状态后,根据对应相电流条件判断健全相;电流判断条件只要大于精工电流即可,取  $0.05I_n$ 。单相接地故障时,故障零序电流流入弱馈侧,因此只要该相满足有流条件即可以判断该相为健全相,否则为故障相。(2) 正序电压计算,基于健全相电压形成正序极化电压。

非全相状态识别判据可用图 9 说明。

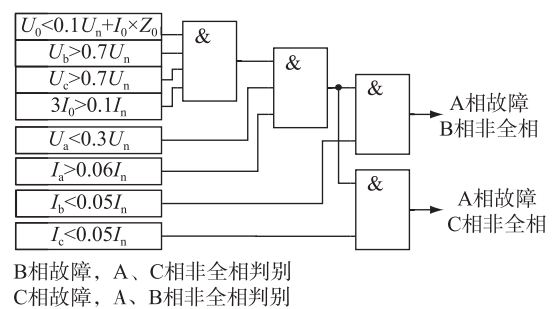


图9 系统非全相及故障相识别逻辑  
Fig.9 System open pole and faulty phase detection logic

对于保护装置二,以本次故障为例,根据以上判据,B 相电压将作为健全相电压计算正序极化电压,从而可得工作电压与正序极化电压的相量关系如图 10 所示。

图中  $\varphi = \arg \dot{U}_{opc} / (-\dot{U}_{Ic} e^{j\theta}) \approx 130^\circ$ ,不满足公式(2) 动作条件,采用该判据能保证装置可靠不误动。

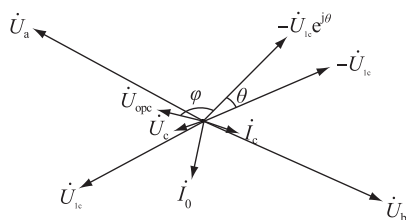


图 10 采用 B 相电压为极化量的动作示意图

Fig.10 Voltage vector diagram based on the polarizing voltage formed by the voltage of phase B

## 4 RTDS 测试

本文讨论的正序极化电压相位偏移所带来的问题与电压等级无关,类似拓扑结构的系统均可能存在该问题。为验证方案正确性,采用图 11 所示单端电源系统为仿真模型,测试改进后的正序极化电压判据对距离保护的有效性。

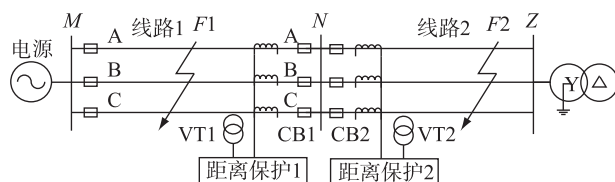


图 11 RTDS 测试系统

Fig.11 System module for RTDS test

系统电压等级为 220 kV, M 侧电源正序阻抗为  $8 \angle 78^\circ \Omega$ , 零序阻抗为  $10 \angle 72^\circ \Omega$ , 线路 1 全长 50 kM, 线路 2 全长 25 kM。线路正序阻抗  $0.28 \angle 85^\circ \Omega/\text{kM}$ , 零序阻抗  $0.8637 \angle 76^\circ \Omega/\text{kM}$ 。距离保护 I 段保护定值范围整定为各自线路全长的 80%, 无延时, 距离保护 I 段偏移角整定为  $30^\circ$ 。

实验模拟了线路 1 单相非全相情况下, 发生在线路 1 及线路 2 的各种类型故障, 故障类型及距离保护测试结果如表 1。

除上述故障类型外, 同时还仿真了各种常规类型故障, 测试结果满足区内故障动作、区外故障不动的要求。仿真结果表明, 本文提出的正序极化电压计算方法能避免 Y/Δ 弱馈系统在非全相期间反向故障时, 正序极化电压偏移导致距离保护可能误动的问题。

## 5 结语

本文分析了一起反向故障距离保护误动的事例, 指出 Y/Δ 弱馈系统非全相再发生故障时, 位于故障点与弱馈侧之间的距离保护采用正序电压作为极化电压存在的不足, 可能导致反向故障距离保护误动。本文提出了 Y/Δ 弱馈系统识别系统侧且非本线路非全相的判据, 提出仅基于健全相电压计

表 1 正序极化电压修改前后距离保护的测试结果比较

Table 1 Test data comparison of distance relay with the original positive sequence polarizing voltage and updated positive sequence polarizing voltage

线路 1 非全相相别	故障地点	故障相别	过渡电阻/Ω	修改前测试结果	修改后测试结果
A		BG	0	误动	不动
			100	不动	不动
	F1	CG	0	误动	不动
			100	不动	不动
		BC	0	不动	不动
	F2	CG	0	动作	动作
		BC	0	动作	动作
B		AG	0	误动	不动
			100	不动	不动
	F1	CG	0	误动	不动
			100	不动	不动
		AC	0	不动	不动
	F2	CG	0	动作	动作
		AC	0	动作	动作
	AG	0	误动	不动	
		100	不动	不动	
F1	BG	0	误动	不动	
		100	不动	不动	
C		AB	0	不动	不动
	F2	BG	0	动作	动作
	AB	0	动作	动作	

算正序电压的方法, 解决了 Y/Δ 弱馈系统, 距离保护因无法识别系统非全相, 导致计算到的正序极化电压与实际系统正序极化电压偏差较大的情况, 避免了在系统非全相运行发生健全相反向故障时距离保护可能误动的情况, RTDS 实验验证了该方法的可靠性。本文提出的判据不但可以用于距离保护, 还可以用于其他以正序电压作为极化电压的方向元件, 包括相过流方向元件等。

### 参考文献:

- [1] 景敏慧. 距离继电器正序极化电压[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 51-54.  
JING Minhui. Positive-sequence polarized voltage of distance relay [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 51-54.
- [2] 姜爱华, 薛晨. 正序电压极化阻抗继电器的保护失效边界模型[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(7): 43-49.  
JIANG Aihua, XUE Chen. Protection failure boundary model of impedance relay with positive-sequence voltage polarization [J]. Power Automation Device, 2015, 35(7): 43-49.
- [3] 马静, 马伟, 闫新, 等. 基于阻抗复数平面的自适应距

- 离保护方案[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 290-296.
- MA Jing, MA Wei, YAN Xin, et al. Impedance complex plane based adaptive distance protection scheme [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 290-296.
- [4] 索南加乐, 许庆强, 宋国兵, 等. 自适应接地距离继电器[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(17): 54-58.
- SUONAN Jiale, XU Qinqiang, SONG Guobing, et al. Phase-to-ground adaptive distance relay [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(17): 54-58.
- [5] 康小宁, 赵选宗, 索南加乐, 等. 输电短线路的相间自适应距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 22-27.
- KANG Xiaoning, ZHAO Xuanzong, SUONAN Jiale, et al. Phase-to-phase adaptive distance relay for transmission short line[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 22-27.
- [6] HE Benteng, LI Yiquan, BO Zhiqian. An adaptive distance relay based on transient error estimation of CVT [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(4): 1856-1861.
- [7] 索南加乐, 谢静, 刘东, 等. 克服距离保护暂态超越的新方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 5(30): 52-57.
- SUONAN Jiale, XIE Jing, LIU Dong, et al. Novel algorithm for overcoming the transient overreach of distance protection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 5(30): 52-57.
- [8] 马静, 马伟, 闫新. 基于电压相位比较的单相接地距离保护方案[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 2010-2016.
- MA Jing, MA Wei, YAN Xin, et al. Voltage phase comparison based single-phase grounding distance protection scheme [J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 2010-2016.
- [9] 杨胜, 何胜利. 一种改善距离保护动作特性的方法及其应用[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(4): 39-47.
- YANG Sheng, HE Shengli. Improving method of action characteristics of distance protection and its application [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2012, 31(4): 39-47.
- [10] 许振亚. 输电线路新型距离保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002: 143-144.
- XU Zhengya. New type distance protection of power line [M]. Beijing: China Hydraulic and Hydroelectricity Press, 2002: 143-144.
- [11] 洪佩孙, 李九虎. 输电线路距离保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 79-82.
- HONG Peisun, LI Jiuhu. Distance protection for transmission line [M]. Beijing: China Water Power Press, 2008: 79-82.
- [12] 洪佩孙. 距离保护与阻抗保护[J]. 江苏电机工程, 2001, 20(1): 48-49.
- HONG Peisun. Distance protection and impedance protection [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2001, 20(1): 48-49.
- [13] 王梅义. 电网继电保护应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997: 171-179.
- WANG Meiyi. Applications of relay protection on power system [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1997: 171-179.
- [14] BLACKBURN J L, DOMIN T J. Protective relaying principles and applications [M]. CRC Press, 2006: 206-215.
- [15] 王梅义. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 143-147.
- WANG Meiyi. The principle and technology of relay protection for high voltage power grid [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005: 143-147.
- [16] 景敏慧. 电力系统继电保护动作实例分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 194-201.
- JING Minhui. Analysis on the operation instance of power system relay protection [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012: 194-201.

#### 作者简介:



沈军

沈军(1975—),男,江苏南通人,高级工程师,从事电力系统继电保护及控制系统研究工作;

张洪喜(1983—),男,河南鲁山人,工程师,从事电力系统继电保护及控制系统研究工作;

王忠(1969—),男,江苏丹阳人,高级工程师,从事电力系统继电保护及控制系统研究工作;

赵青春(1980—),男,湖北武汉人,高级工程师,从事电力系统继电保护及控制系统研究工作;

张春合(1974—),男,辽宁锦州人,研究员高级工程师,从事电力系统继电保护及控制系统研究工作;

朱晓彤(1976—),男,江苏武进人,高级工程师,从事电力系统继电保护及控制系统研究工作。

## Analysis and Solution of a Distance Protection Mal-operation Case

SHEN Jun, ZHANG Hongxi, WANG Zhong, ZHAO Qinchun, ZHANG Chunhe, ZHU Xiaotong  
(NR Electric Co. Ltd, Nanjing, 211102, China)

**Abstract:** As a backup protection, distance protection is widely used as line and component protection for each voltage level. In order to ensure the direction, positive sequence voltage is used as the polarization voltage for distance protection. However, the positive sequence polarization voltage may not reflect the pre-fault voltage correctly when the system is in open-phase operating conditions. This paper introduced a mal-operation case of distance protection for a reverse fault, analyzed the disadvantages of using positive sequence polarization voltage, and proposed corresponding solutions. Finally, experiment results of RTDS validate the correctness of the scheme.

**Key words:** distance protection; mal-operation; positive voltage; polarization voltage; operation voltage; open phase

(编辑 刘晓燕)