

DOI: 10.7667/PSPC161025

# 110 kV 电阻接地系统零序方向电流保护的整定研究

陈念<sup>1</sup>, 吕艳萍<sup>1</sup>, 周凯<sup>1</sup>, 李俊<sup>2</sup>, 刘帆<sup>2</sup>

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 国网湖北省电力公司黄石供电公司, 湖北 黄石 435000)

**摘要:** 中性点经合适阻值的电阻接地, 能有效抑制单相接地故障造成的负荷侧电压暂降, 明显提高供电质量。但中性点电阻的接入改变了系统的零序阻抗, 导致零序电流、电压的大小和分布以及它们之间的相位差与中性点直接接地系统有很大的不同。通过对其零序电流电压特点的分析, 推导出 110 kV 中性点经电阻接地系统零序电流保护的整定计算方法, 修正了中性点经电阻接地系统零序方向元件的动作条件。据此对一个改造的 110 kV 系统进行了整定计算, 并通过现场试验和试运行证明了其正确性。

**关键词:** 中性点经电阻接地系统; 接地故障; 零序电流保护; 零序方向元件

## Research on setting calculation of zero sequence directional overcurrent protection for 110 kV neutral point grounding via resistance system

CHEN Nian<sup>1</sup>, LÜ Yanping<sup>1</sup>, ZHOU Kai<sup>1</sup>, LI Jun<sup>2</sup>, LIU Fan<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Huangshi Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Company, Huangshi 435000, China)

**Abstract:** An appropriate parameter of the grounding resistance at the neutral point can effectively suppress the load-side voltage sag caused by the single phase earth fault, and accordingly is favorable for the development of power quality. However the grounding resistance changes the zero sequence impedance of the system and will cause it fairly different from the directly grounded system in the value and distribution of the zero sequence current and voltage and in their phase difference. Through analyzing characteristics of the zero sequence current and voltage, this paper proposes a setting calculation of zero sequence current protection in 110 kV systems grounded via resistances at neutral points. And the operating condition of the zero sequence directional element is modified. For an enhanced 110 kV system, correctness of the proposed setting calculation is proved through field experiments and trial operation.

**Key words:** neutral point grounding via resistance system; earth fault; zero sequence overcurrent protection; zero sequence directional element

## 0 引言

在我国 110 kV 系统一般采用中性点直接接地的方式运行, 这种系统发生最常见的单相接地故障时, 变压器负荷侧电压出现严重跌落, 且三相明显不对称。随着我国工业的转型升级, 智能控制设备和生产线等敏感性负荷大量增加, 频繁电压暂降给高新技术产业带来巨大的经济损失<sup>[1-7]</sup>, 进一步提高配电网的电能质量, 是供电部门的紧迫任务。

文献[8]提出了一种抑制单相接地故障电压暂降/暂升的方法: 即按约束条件  $R_N \geq 11X_1N/3$  来选择

110 kV 中性点的接地电阻(其中  $R_N$  为单个中性点的接地电阻值;  $X_1$  为实际 110 kV 系统的最大等效正序电抗;  $N$  为系统中性点的接地电阻个数), 则在 110 kV 侧发生单相接地故障时, 能使负荷侧的三相线电压幅值波动范围不超过额定电压的  $\pm 10\%$ , 且三相基本对称。文献[9-11]也表明, 由于中性点经电阻接地产生的系统内、外部过电压也没有超过国产一次电气设备的绝缘水平。这一研究结论为我国 110 kV 配电网采用中性点经电阻接地方式来提高电能质量、降低电压暂降/暂升发生的频率, 提供了一条有效的途径。

然而中性点接地方式的改变引起系统零序参数的很大变化, 导致系统零序电压电流的大小和分

布以及相位差发生改变。文献[12-13]研究了中性点经电阻接地系统单相接地零序电压、电流的大小和分布规律：由于按照抑制电压跌落条件选择的中性点接地电阻数值上远大于系统的各序阻抗，所以零序电压基本降落在中性点接地电阻上， $U_0 \approx U_p$  ( $U_0$  为中性点零序电压， $U_p$  为故障相正常相电压)；故障点的零序电流较小，且基本为一常数， $3I_0 \approx NU_p/R_N$ ，与故障点具体位置无关，仅由中性点电压  $U_p$  和接地电阻  $R_N$  的值及接入个数  $N$  决定；显然这些特点与中性点直接接地系统是不同的。如何进行中性点经电阻接地系统零序电流保护的整定计算，以实现保护动作的选择性和可靠性，是我国 110 kV 配电网能否采用中性点经电阻接地方式来提高供电质量的关键技术之一。

本文将从中性点经电阻接地系统发生接地故障时零序电流、电压的特点入手，在上述研究的基础上，重点讨论 110 kV 中性点经电阻接地系统的零序方向电流保护整定计算方法。

### 1 两相接地与单相接地零序电流电压的关系

当系统中性点改经电阻接地后，系统的等值正序、负序阻抗都不会改变，只有零序阻抗改变<sup>[14]</sup>。在中性点经电阻接地系统发生单相接地故障时，由其复合序网可得故障点的零序电流为

$$i_0^{(1)} = \dot{U}_p / [j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}) + 3(R_n + R_f)] \quad (1)$$

其中： $U_p$  为故障前故障相相电压； $X_{1\Sigma}$ 、 $X_{2\Sigma}$ 、 $X_{0\Sigma}$  分别为系统的等值正序、负序、零序电抗； $R_f$  为接地点过渡电阻； $R_n$  为系统等效接地电阻(设系统中有  $N$  个中性点分别经电阻  $R_N$  接地，则  $R_n \approx R_N/N$ )。

在中性点经电阻接地系统发生两相接地短路时，其复合序网如图 1 所示<sup>[14]</sup>。

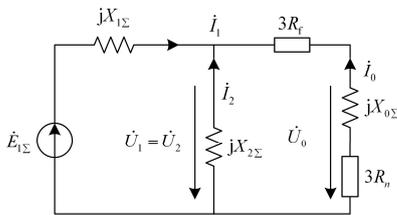


图 1 两相接地故障的复合序网图

Fig. 1 Complex sequence network of two-phase earth fault

由等值复合序网可求出故障点的短路电流正序分量为

$$i_1^{(1.1)} = \dot{U}_p / [jX_{1\Sigma} + jX_{2\Sigma} // (jX_{0\Sigma} + 3R_n + 3R_f)] \quad (2)$$

运用分流公式可求出故障点的零序电流分量为

$$i_0^{(1.1)} = i_1^{(1.1)} \times \frac{jX_{2\Sigma}}{jX_{2\Sigma} + (jX_{0\Sigma} + 3R_n + 3R_f)} \quad (3)$$

注意一般系统有  $X_{1\Sigma} \approx X_{2\Sigma}$ ，且  $X_{1\Sigma}$ 、 $X_{2\Sigma}$ 、 $X_{0\Sigma}$  值远小于中性点等效接地电阻  $3R_n$ ，忽略电抗，有

$$i_0^{(1.1)} \approx \frac{1}{2} \times \frac{\dot{U}_p}{3(R_n + R_f)} \approx \frac{1}{2} i_1^{(1)} \quad (4)$$

即在中性点经电阻接地系统中，故障点两相接地的零序电流是单相接地零序电流的一半，其分布与单相接地故障时相同，通过大地和中性点接地电阻以及与故障点有直接电气联系的线路、变压器构成回路<sup>[15]</sup>。由图 1 同样可得

$$\dot{U}_0^{(1.1)} = -i_0^{(1.1)}(3R_n + jX_{0\Sigma}) \approx -\frac{R_n \dot{U}_p}{2(R_n + R_f)} \quad (5)$$

当故障点过渡电阻  $R_f$  为 0 时，故障点零序电压为

$$U_0^{(1.1)} \approx 0.5U_p \quad (6)$$

即金属性两相接地的零序电压也是单相金属性接地的一半。

### 2 零序电流保护动作定值的确定

在中性点经电阻接地系统中，零序电流保护是作为接地故障的主保护(终端线)和后备保护来配置的。由于这种接地方式的系统在任一处发生接地短路时，故障点的零序电流基本为一常数，难以用其大小来区别故障点的位置，因此，零序电流保护只能通过相邻上下级间的灵敏系数和阶梯时限的配合来保证其动作的选择性。

如图 2 所示的单侧电源供电的中性点经电阻接地系统中，在各线路上任一点发生金属性单相接地故障时，流过电源侧保护的零序电流都基本相同。

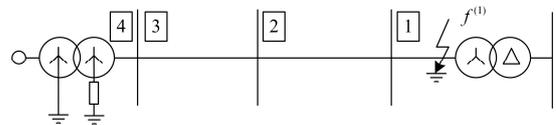


图 2 单侧电源的中性点经电阻接地系统零序电流整定  
Fig. 2 Zero sequence overcurrent setting for neutral point grounding via resistance system in single source network

$$3I_0^{(1)} \approx \frac{\dot{U}_p}{R_n} \approx \frac{\dot{U}_p}{R_N/N} = N \frac{\dot{U}_p}{R_N} = N I_R \quad (7)$$

式中， $I_R = U_p/R_N$ ，为流过每个中性点接地电阻的金属性单相接地电流。

各线路零序电流保护的整定值  $I_{set.i}$  为

$$I_{set.i} = 3I_{0.i} / K_{sen.i} \quad (8)$$

其中： $3I_{0.i}$  为流过保护装置  $i$  的最小零序电流； $K_{sen.i}$

为第  $i$  个保护装置的灵敏系数; 各相邻保护装置的灵敏系数间应满足式(9)。

$$K_{\text{sen},1} > K_{\text{sen},2} > K_{\text{sen},3} > K_{\text{sen},4} \quad (9)$$

即系统末端的零序过流保护的灵敏度最高, 越靠近电源端, 灵敏度越低, 以保证系统末端发生接地故障时, 零序过流保护动作的选择性<sup>[16]</sup>。

在用式(8)计算零序电流的整定值时, 应采用流过该保护装置的最小零序电流, 即应由两相接地短路零序电流来确定。由于计算零序电流的过程中忽略了系统的正序、负序、零序电抗, 其计算结果会大于实际通过保护装置的零序电流, 为了保证据此整定的保护定值能在实际接地短路电流作用下可靠动作, 各保护装置的灵敏度应有较高的裕度, 即不应低于 1.5。如图 2 中(该系统  $N=1$ )要求最靠近电源的保护装置 4 的零序过流灵敏度不得低于 1.5, 即

$$K_{\text{sen},4} = \frac{3I_{0.4}^{(1.1)}}{I_{\text{set},4}} = \frac{0.5 \times 3I_{0.4}^{(1)}}{I_{\text{set},4}} = \frac{0.5I_R}{I_{\text{set},4}} \geq 1.5 \quad (10)$$

则有:

$$I_{\text{set},4} \leq 0.5I_R / 1.5 \approx 0.333I_R \quad (11)$$

取

$$I_{\text{set},4} = 0.3I_R \quad (12)$$

这是系统最靠近电源端(亦称系统首端)的零序过流保护的一次侧整定值, 式中  $I_R$  为流过该保护装置的金属性单相接地电流。

其他各级零序过流的灵敏系数也必须满足式(9)的约束条件, 如取:  $K_{\text{sen},3}=1.55$ ;  $K_{\text{sen},2}=1.6$ ;  $K_{\text{sen},1}=1.65$ 。将上述灵敏系数和对应保护装置流过的两相接地零序电流分别代入式(8), 可依次求出各保护的零序电流整定值。

按照上述原则整定的零序电流保护, 在系统发生单相金属性接地故障时的灵敏度可达两相金属性接地故障时的两倍, 即使故障点经较高的过渡电阻单相接地, 该保护也有较高的灵敏度, 这一特点对于切除系统最常见的经高阻接地故障十分有利。

零序过流保护间的时限配合仍遵循阶梯原则, 系统末级保护动作时限最短: 末端若为线路—变压器组, 其零序过流时限可取为 0 s; 末端若为一般线路, 则应与相邻变压器的主保护动作时限配合, 其零序过流时限可取 0.3~0.5 s, 以保证变压器内部接地故障保护动作的选择性。其他各级零序过流时限依次增加  $\Delta t$ , 这一级差可取为 0.3 s; 若有多个相邻元件的零序过流时限需配合, 则取其中最长的时限加  $\Delta t$ 。

按照上述方法确定的零序电流定值一般都较小, 不能躲过下级相邻元件首端对称短路时出现的

最大不平衡电流, 因此中性点经电阻接地系统的零序电流保护一般都要投入零序电压闭锁元件, 以保证其动作的选择性。严格的说, 该保护应称之为零序电压闭锁的零序电流保护, 其电压整定值可躲正常运行时的最大不平衡电压整定, 一般取为

$$3U_{0,\text{set}} = 0.25U_p \quad (13)$$

当被整定线路与下级相邻元件间还有其他零序分支(即  $N>1$ )时, 其整定值还应考虑其分支系数的影响。

$$I_{\text{set},i} = (I_{0,i-1} / K_{Z0}) / K_{\text{set},i} \quad (14)$$

式中:  $K_{Z0}=I_{0,i-1} / I_{0,i}$  为零序分支系数;  $I_{0,i-1}$  为流过下级相邻元件的零序电流;  $I_{0,i}$  为流过本保护装置的零序电流。

### 3 中性点经电阻接地系统的零序方向元件

当系统由多个电源供电、且有多多个中性点经电阻接地时, 为了判断故障点的方位, 必须投入零序方向元件。由于中性点电阻的接入改变了系统的零序阻抗角, 原用于中性点直接接地系统的零序方向元件的最大灵敏角也应予以修改。

图 3 是有两个 110 kV 中性点分别经  $R_N$  接地系统的零序等值电路, 其中:  $X_{S,0}$  为 220 kV 系统等值零序电抗;  $X_{1,0}, X_{2,0}, X_{3,0}$  为降压变  $T_1$  的高、中、低压侧绕组漏抗;  $X_{1,1}, X_{1,2}$  分别为故障点  $f_1$  至两端保护安装处的线路零序电抗;  $X_{T2}$  为升压变  $T_2$  的零序等值电抗;  $3R_N$  为中性点的零序等效电阻。

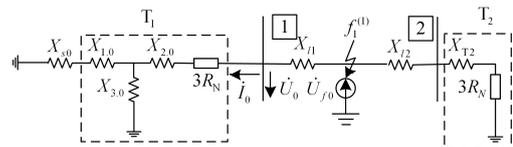


图 3 2 个中性点经电阻接地系统的零序等值电路

Fig. 3 Zero sequence equivalent circuit of a system with two neutral point grounding via resistance

以其中主变  $T_1$  保护的 110 kV 侧零序方向元件为例进行讨论。变压器零序电压、电流的正方向如图 3 中  $U_0$ 、 $I_0$  所示(即设流入变压器的电流为正)。

下面以保护方向指向系统为例(作为外部接地故障的远后备), 比较分析主变零序方向元件工作于中性点直接接地系统与经电阻接地系统的差别。

#### 3.1 中性点直接接地系统的零序方向元件动作特性

在中性点直接接地系统中, 当线路上  $f_1$  点处发生接地故障时, 根据所设的正方向, 有

$$I_0 = \frac{U_0}{j[(X_{s,0} + X_{1,0}) // X_{3,0} + X_{2,0}]} \quad (15)$$

即方向元件的灵敏角应为  $90^\circ$ 。对应的变压器零序方向元件动作特性如图 4 所示。

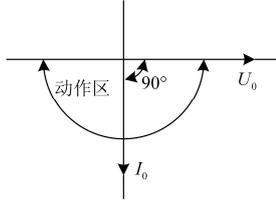


图 4 直接接地系统变压器零序方向元件动作特性  
Fig. 4 Zero sequence directional element of transformer in the neutral directed ground system

### 3.2 中性点经电阻接地系统零序方向元件动作特性

在中性点经电阻接地系统中，仍设  $f_1$  处发生接地故障，对于  $T_1$  的零序方向元件而言：

$$\dot{i}_0 = \frac{\dot{U}_0}{3R_N + j[(X_{S,0} + X_{L,0})/X_{3,0} + X_{2,0}]} \approx \frac{\dot{U}_0}{3R_N} \quad (16)$$

由于零序电抗远小于  $3R_N$ ，将其忽略。即外部故障时，流过变压器的零序电流与零序电压同相位，零序方向元件的灵敏角为  $0^\circ$ 。考虑 CT、PT 角误差等，零序方向元件的动作范围应在最大灵敏角基础上  $\pm 90^\circ$ ，即当保护方向指向系统时，中性点经电阻接地系统的变压器零序方向元件动作方程为

$$-90^\circ = 0^\circ - 90^\circ < \arg(\dot{U}_0/\dot{i}_0) < 0^\circ + 90^\circ = 90^\circ \quad (17)$$

对应动作特性如图 5 所示。

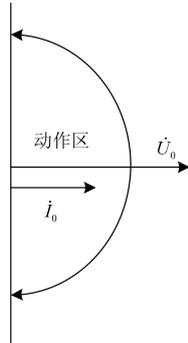


图 5 电阻接地系统变压器零序方向元件动作特性  
Fig. 5 Zero sequence directional element of transformer in the neutral point grounding via resistance system

将图 4 与图 5 比较发现，若将中性点直接接地系统的零序方向元件直接用于中性点经电阻接地系统，则系统侧发生接地故障时，零序方向元件的工作点正好落在动作区和不动作区的分界线上，方向元件可能拒动，见图 6 所示。这时： $0^\circ \geq \arg(\dot{U}_0/\dot{i}_0) > -90^\circ$  为该方向元件的拒动区； $90^\circ < \arg(\dot{U}_0/\dot{i}_0) < 180^\circ$  为该方向元件的误动区。

同理也可分析得出保护方向指向变压器内时，其最大灵敏角应取为  $180^\circ$ 。

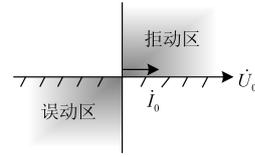


图 6 变压器零序方向元件的拒动区和误动区

Fig. 6 Failure to operate zoom and unwanted operation zoom for zero sequence directional element of transformer

综上所述，在将 110 kV 中性点直接接地系统改造为经电阻接地系统时，为了保证零序方向元件动作的正确性，应将原系统变压器保护的 110 kV 侧零序方向元件的灵敏角调整为  $0^\circ$  (方向指向系统时) 或  $180^\circ$  (方向指向变压器时)。

用同样的方法可以证明：对于工作于 110 kV 中性点经电阻接地系统的线路零序方向元件，为保证其正向故障时能可靠动作，零序方向元件的最大灵敏角也应调整为  $180^\circ$ 。

## 4 整定实例及现场试验结果

选取湖北某 220 kV 变电站的 110 kV 侧系统为改造试点，按照电阻选择条件和系统参数计算得主变 110 kV 侧中性点应接入  $100 \Omega$  电阻，其系统 ( $N=1$ ) 接线如图 7 所示。

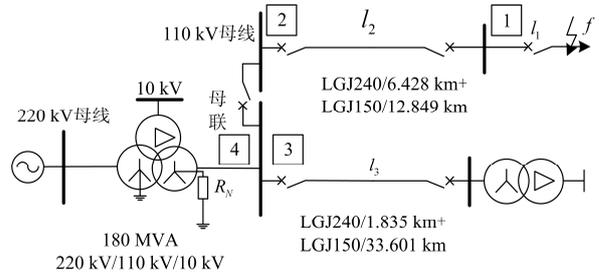


图 7 试验系统接线图

Fig. 7 Wire diagram of testing system

在该系统 110 kV 侧任一点发生单相接地故障时，零序电流将通过大地和工作接地点以及与故障点有直接电气联系的元件构成回路，其大小为

$$3I_0^{(1)} \approx I_R = U_p/R_N = 66.396/0.1 = 663.96 \text{ A}$$

### 4.1 试验系统线路零序电流保护的整定

对于由  $l_1, l_2$  构成的串供线路，接地故障时流过保护 1, 2 的零序电流大小近似相等。由于保护 1 所在出线位于 110 kV 系统的最末端，它应有最高的灵敏度，取其零序过流保护单相接地灵敏度为 3.2 (对应两相接地为 1.6) 整定： $I_{set,1}^I = I_R/K_{sen,1} = 663.96/3.2 = 207.49 \text{ A}$ 。

动作时限： $t_1^I = 0 \text{ s}$ 。

对于保护 2, 由于该线路已配有光纤纵联零序差动作为接地故障主保护, 为保证零序电流保护动作的选择性, 可将零序 I 段退出, 仅投入零序 II 段, 作为本线路接地故障的近后备和相邻线路的远后备, 按本线路单相接地短路有 3.1 倍灵敏度整定:

$$I_{\text{set},2}^{\text{II}} = I_{\text{R}} / K_{\text{sen},2} = 663.96 / 3.1 = 214.18 \text{ A}。$$

动作时限与  $l_1$  零序电流 I 段相配合:  $t_2^{\text{II}} = t_1^{\text{I}} + \Delta t = 0.3 \text{ s}$

线路  $l_3$  仅带一台负荷变压器运行, 其保护 3 可按线路—变压器组整定, 由于本线路或末端变压器高压侧发生单相接地故障时, 流过保护 3 的零序电流仍为  $I_{\text{R}}$ , 按本线路单相接地短路有 3.1 倍灵敏度整定, 可保护本线路全长及负荷变高压侧接地短路:

$$I_{\text{set},3}^{\text{I}} = I_{\text{R}} / K_{\text{sen},3} = 663.96 / 3.1 = 214.18 \text{ A}$$

动作时限:  $t_3^{\text{I}} = 0 \text{ s}$ 。

计算发现相邻线路首端发生三相短路时,  $l_2$ 、 $l_3$  上流过的最大不平衡电流大于该线路零序电流保护的一次侧整定值, 因此必须在零序电流保护中增加零序电压闭锁, 其二次侧整定值为

$$3U_{\text{set},0} = \frac{0.25U_{\text{p}}}{n_{\text{y}}} = \frac{0.25 \times 115 / \sqrt{3}}{1100} = 15.1 \text{ V}$$

其中,  $n_{\text{y}} = 110 \text{ kV} / 0.1 \text{ kV}$  为电压互感器变比。

#### 4.2 主变 110 kV 侧零序电流保护的整定

该系统主变原保护装置的中压侧零序过流 I 段固定带方向, 保护方向指向系统, 作为本侧相邻线路和母线接地故障的后备; 零序 II 段固定不带方向, 作为变压器内部或外部接地故障的后备。

主变 110 kV 侧中性点改经电阻接地后, 110 kV 侧零序过流 I 段的零序方向元件最大灵敏角应改为  $0^\circ$ ; 零序电流 I 段定值可按发生单相接地故障时 3 倍灵敏度整定:

$$I_{\text{set},4}^{\text{I}} = I_{\text{R}} / K_{\text{sen},4} = 663.96 / 3 = 221.32 \text{ A}$$

动作时限设两段, 第一时限  $t_{4,1}^{\text{I}}$  与相邻线路主保护配合, 跳 110 kV 侧母联断路器:

$$t_{4,1}^{\text{I}} = 0 \text{ s} + \Delta t = 0.3 \text{ s}$$

零序 I 段二时限  $t_{4,2}^{\text{I}}$  与第一时限  $t_{4,1}^{\text{I}}$  配合, 跳主变 110 kV 侧断路器:

$$t_{4,2}^{\text{I}} = t_{4,1}^{\text{I}} + \Delta t = 0.3 \text{ s} + 0.3 \text{ s} = 0.6 \text{ s}$$

零序电流 II 段与零序 I 段一次值整定得相同:

$$I_{\text{set},4}^{\text{II}} = I_{\text{set},4}^{\text{I}} = 221.32 \text{ A}$$

II 段动作时限  $t_{4,3}^{\text{II}}$  与 I 段的第二动作时限  $t_{4,2}^{\text{I}}$  配合, 跳主变各侧断路器:

$$t_{4,3}^{\text{II}} = t_{4,2}^{\text{I}} + \Delta t = 0.6 \text{ s} + 0.3 \text{ s} = 0.9 \text{ s}$$

如此整定的零序电流保护, 即使系统发生经  $100 \Omega$  过渡电阻接地的单相故障, 在理论上也有不低于 1.5 的灵敏度。

由于该系统仅由单电源供电, 故实际改造中将零序方向元件退出运行。

#### 4.3 现场试验及结果

为全面检验中性点经电阻接地系统的抗电压跌落能力和继电保护配置及整定计算的正确性, 2016 年 6 月 3 日, 在图 7 所示的  $l_1$  线出口处  $f$  点设置单相接地故障, 进行现场试验。故障录波和线路保护装置记录了试验系统的有关数据和保护动作情况。

1) 故障发生后, 线路  $l_1$  的距离 I 段 33 ms、零序 I 段 35 ms、距离加速 47 ms 相继启动跳开本线路开关, 其保护动作电流为 2.47 A (该线路 CT 变比: 1200/5), 折算到一次侧动作值  $2.47 \times 240 = 592.8 \text{ A}$ , 比简化计算的单相短路电流 663.9 A 要小, 其误差主要是因计算时忽略了线路和变压器阻抗导致的。

2) 保护 2 和保护 4 处的零序电流保护启动、故障切除后返回; 线路  $l_3$  零序保护未启动。

以上保护装置的动作情况与设想完全一致, 证明了中性点经电阻接地系统零序电流保护整定计算方法的正确性。

试验中系统三相线电压幅值波动最大不超过额定电压的  $\pm 4\%$ , 且三相基本对称; 试验及随后的试运行过程中, 系统中各电气设备运行正常, 未发现有参试设备绝缘破坏的现象。

现场试验和试运行结果证明, 在我国 110 kV 配电网采用中性点经电阻接地方式是可行的。

## 5 结论

本文提出的零序电流保护整定方法, 针对中性点经电阻接地系统难以用零序电流大小区分故障点位置的特点, 采用保护上、下级间灵敏度和阶梯时限配合的方法, 保证了系统接地保护动作的选择性; 计算中忽略系统序阻抗产生的短路电流误差, 可由提高零序保护灵敏度的裕度加以补偿; 对工作于中性点经电阻接地系统的零序方向元件最大灵敏角的修正, 消除了其可能出现的误动区和拒动区。

上述研究结论, 为 110 kV 中性点经电阻接地系统零序电流保护的整定提供了理论依据, 并从继电保护的角度, 为我国 110 kV 配电网采用中性点经电阻接地方式来提高供电质量, 提供了可操作性。

#### 参考文献

[1] 程浩忠, 艾芊, 张志刚, 等. 电能质量[M]. 北京: 清华

- 大学出版社, 2006.
- [2] HEINE P, POHJANHEIMO P, LEHTONEN M, et al. A method for estimating the frequency and cost of voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(2): 290-296.
- [3] TARGOSZ R, MANSON J. European LPQI PQ survey[C] // Vienna: CIRED 19th International Conference on Electricity Distribution, 2007.
- [4] 陈众励, 许维胜. 电压中断与电压暂降的成因及其防治[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 518-520.  
CHEN Zhongli, XU Weisheng. Reason and prevention of voltage interruption and voltage sags[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 518-520.
- [5] 孔祥雨, 徐永梅, 陶顺. 基于一种电压暂降新型描述的敏感设备免疫能力评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 165-171.  
KONG Xiangyu, XU Yonghai, TAO Shun. Sensitive equipment immunity assessment based on a new voltage sag description[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 165-171.
- [6] 朱晓荣, 刘世鹏. 电网电压不对称跌落时 DFIG 的控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 71-78.  
ZHU Xiaorong, LIU Shipeng. A control strategy of DFIG under unbalanced voltage dips[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 71-78.
- [7] 黄小庆, 曹阳, 吴卫良, 等. 考虑电压暂降指标的电压协调控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 147-154.  
HUANG Xiaoqing, CAO Yang, WU Weiliang, et al. Research on voltage coordination control method considering voltage sag index[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 147-154.
- [8] 冯光亮, 曾国, 孙珊, 等. 一种抑制和消除接地故障电压跌落方法的研究[J]. 电气应用, 2013, 32(13): 43-47, 81.  
FENG Guangliang, ZENG Guo, SUN Shan, et al. Research on a method of suppressing and eliminating voltage dips when earth fault[J]. Electrical Application, 2013, 32(13): 43-47, 81.
- [9] 王慎杰, 吕艳萍, 刘飞, 等. 110 kV 电阻接地系统电气设备适应性研究及试验[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 193-198.  
WANG Shenjie, LÜ Yanping, LIU Fei, et al. Research on adaptability of electrical equipment of 110 kV resistance grounding system and experiment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 193-198.
- [10] 王慎杰, 刘飞, 邵金良, 等. 110 kV 经电阻接地系统的操作过电压研究[J]. 电气应用, 2014, 33(19): 48-53.  
WANG Shenjie, LIU Fei, SHAO Jinliang, et al. Research on switching overvoltage in 110 kV grounding system via resistance[J]. Electrical Application, 2014, 33(19): 48-53.
- [11] 刘渝根, 许晓艳, 马晋佩, 等. 风电场 35 kV 电缆网络中性点接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 92-99.  
LIU Yugen, XU Xiaoyan, MA Jinpei, et al. Study on neutral grounding modes of 35 kV cable networks in wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 92-99.
- [12] 刘飞, 吕艳萍, 王慎杰, 等. 110 kV 电阻接地系统接地保护特殊问题的研究[J]. 电气应用, 2015, 34(21): 103-107.  
LIU Fei, LÜ Yanping, WANG Shenjie, et al. Research on grounded protection special issues of 110 kV resistance grounding system[J]. Electrical Application, 2015, 34(21): 103-107.
- [13] 梁睿, 杨学君, 薛雪, 等. 零序分布参数的单相接地故障精确定位研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 472-479.  
LIANG Rui, YANG Xuejun, XUE Xue, et al. Study of accurate single-phase grounding fault location based on distributed parameter theory using data of zero sequence components[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 472-479.
- [14] 陈慈荃. 电气工程基础(上)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [15] 何仰赞. 电力系统分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [16] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

收稿日期: 2016-07-07; 修回日期: 2016-09-27

作者简介:

陈念(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护, 智能电网; E-mail: chenian305@126.com

吕艳萍(1955—), 女, 教授, 研究方向为电力系统继电保护, 智能电网; E-mail: luyanping28@126.com

周凯(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护, 智能电网. E-mail: 476987460@qq.com

(编辑 姜新丽)