

DOI: 10.7667/PSPC171347

## 基于零序电流比较的小电阻接地系统接地故障保护

林志超<sup>1</sup>, 刘鑫星<sup>2</sup>, 王英民<sup>1</sup>, 薛永端<sup>2</sup>, 孙迪飞<sup>1</sup>, 王超<sup>3</sup>

(1. 广东省惠州供电分公司, 广东 惠州 516001; 2. 中国石油大学(华东)信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580;  
3. 山东科汇电力自动化股份有限公司, 山东 济南 250101)

**摘要:** 配电网中应用小电阻接地方式可以确保系统能更快排除接地故障, 有效降低过电压。但现阶段小电阻接地系统接地故障零序过电流保护定值过高, 系统发生高阻接地故障时易拒动。提出一种基于各出线零序电流比较的接地保护方法, 利用集中式保护装置收集各出线零序电流信息, 选择零序电流幅值远大于其他出线或者相位超前其他线路零序电流以确定相位的线路为故障线路。该方法原理简单, 可作为现有接地故障的后备保护, 并可有效提高小电阻接地系统接地故障保护灵敏度。

**关键词:** 小电阻接地系统; 单相接地; 高阻接地; 接地保护; 零序电流比较

### Grounding fault protection based on zero sequence current comparison in low resistance grounding system

LIN Zhichao<sup>1</sup>, LIU Xinxing<sup>2</sup>, WANG Yingmin<sup>1</sup>, XUE Yongduan<sup>2</sup>, SUN Difei<sup>1</sup>, WANG Chao<sup>4</sup>

(1. Huizhou Electric Power Supply Company, Huizhou 516001, China; 2. College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 3. Kehui Electric Co., Ltd., Jinan 250101, China)

**Abstract:** The application of low resistance grounding mode in distribution network can ensure that the system can eliminate the grounding fault quickly and reduce overvoltage effectively. The setting value, however, of zero-sequence overcurrent protection in low resistance grounding system is too high to act when high impedance grounding fault occurs. This paper puts forward a grounding protection method based on the comparison of zero-sequence current in each feeder. Zero-sequence current in each feeder is collected by centralized protection device. The feeder whose amplitude of zero-sequence current is far greater than the others or whose phase is in advance of other feeders' for a certain value will be selected as fault feeder. The proposed method with simple principle can be used as backup protection for existing grounding fault protections and can effectively improve the sensitivity of grounding fault protection for low resistance grounding system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477184) and Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Company Limited (No. 031300KK52160023).

**Key words:** low resistance grounding system; single-phase ground; high impedance grounding; grounding protection; zero-sequence current comparison

## 0 引言

小电阻接地系统由于可以有效降低接地故障过电压, 较快排除故障等优点, 在我国部分经济发达地区得到较为广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。现阶段接地故障主要

采用零序过电流保护, 由于要躲过各线路最大对地零序电容电流, 定值过高, 在由于导线落地等原因发生高阻接地故障时易拒动。以现场常用定值 40 A 为例, 当故障点过渡电阻大于 150  $\Omega$  时将拒动。

近年来, 我国对于小电阻接地系统故障保护的研究较多, 上海电力公司提出了利用故障指示器判定逻辑<sup>[3]</sup>的方法; 哈尔滨工业大学提出基于 BP 神经

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51477184); 广东电网有限责任公司科技项目资助(031300KK52160023)

网络分类器对小电阻接地系统高阻故障进行检测并利用小波变换对方法进行改进<sup>[4]</sup>；中国石油大学提出了基于零序电压比率制动<sup>[5]</sup>的保护新方法；清华大学提出了基于零序电流波形畸变凹凸性的小电阻接地系统高阻故障检测方法<sup>[6]</sup>等方法<sup>[7-11]</sup>进行故障识别，实现保护。国外有学者利用信号的多分辨率分析所产生的一系列小波系数的绝对值<sup>[12]</sup>，人工智能算法<sup>[13]</sup>，随机性检测系统<sup>[14]</sup>等<sup>[15-16]</sup>方法应用于高阻故障检测，以实现对系统的故障保护。上述各类方法可应用于小电阻接地系统中实现故障保护，为以后的研究提供了技术支持。

本文针对小电阻接地系统接地故障，尤其是系统发生高阻接地故障时易拒动的问题，分析了各出线零序电流的幅值与相位特征，提出了一种依据各出线零序电流幅值和相位比较的保护方法，并通过仿真验证证实其正确性。

## 1 故障特征分析

图 1 所示为小电阻接地系统接地故障零序等效网络，其中  $\dot{U}_f = -\dot{U}_A$  为故障点虚拟电源的电压， $\dot{U}_A$  为故障点故障前故障相电压， $R_f$  为故障点过渡电阻， $R$  为中性点接地电阻， $C_i (i=0, 1, 2, \dots, n)$  为各出线对地零序电容， $\dot{I}_{00}$  为故障线路的零序电流， $\dot{I}_R$  为中性点接地电阻的零序电流， $\dot{I}_{0i} (i=1, 2, \dots, n)$  为各健全线路的零序电流， $\dot{U}_0$  为母线零序电压。

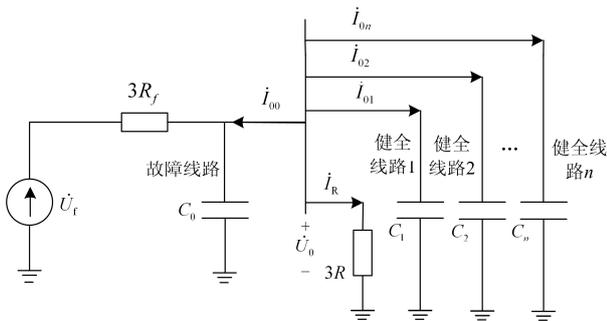


图 1 小电阻接地系统接地故障零序等效网络

Fig. 1 Equivalent zero-sequence network of grounding fault in low resistance grounding system

系统零序阻抗  $Z_0$  等于所有出线对地零序电容与中性点接地零序电阻并联阻抗为

$$Z_0 = 3R \parallel j\omega \sum_{i=0}^n C_i = \frac{3R}{1 + 3j\omega R \sum_{i=0}^n C_i} \quad (1)$$

母线处零序电压为

$$\begin{aligned} \dot{U}_0 &= \dot{U}_f \frac{Z_0}{3R_f + Z_0} = \\ &= -\dot{U}_A \frac{3R}{3R + 3R_f + 9j\omega R R_f \sum_{i=0}^n C_i} \end{aligned} \quad (2)$$

健全线路零序电流为

$$\dot{I}_{0i} = j\omega C_i \dot{U}_0 \quad (3)$$

中性点接地电阻零序电流为

$$\dot{I}_R = \frac{\dot{U}_0}{3R} \quad (4)$$

故障线路零序电流为

$$\dot{I}_{00} = -(\dot{I}_R + \dot{I}_{01} + \dot{I}_{02} + \dots + \dot{I}_{0n}) \quad (5)$$

以国内 10 kV 系统的常用参数为例，即中性点接地电阻为 10  $\Omega$ ，单条健全电缆线路最大零序电流幅值为 22.5 A，可知系统中性点零序电流与任一健全线路零序电流之比满足式(6)。

$$\frac{|\dot{I}_R|}{|\dot{I}_{0i}|} = \frac{\frac{\dot{U}_0}{3R}}{\omega C_i \dot{U}_0} \geq \frac{282.8}{22.5} = 12.57 \quad (6)$$

可认为中性点接地电阻零序电流为任意一条健全线路的零序电流的 10 倍以上。

故障线路零序电流为

$$\dot{I}_{00} = -\left(\frac{\dot{U}_0}{3R} + j\omega C_1 \dot{U}_0 + \dots + j\omega C_n \dot{U}_0\right) \quad (7)$$

由于健全线路零序电流与中性点接地电阻零序电流相位相差为 90°，其合成矢量大于任意一个分量。由式(7)可知故障线路零序电流幅值大于中性点接地电阻零序电流，因此故障线路零序电流幅值为健全线路零序电流的 10 倍以上。

由上述分析可知，系统发生接地故障时中性点接地电阻零序电流受母线零序电压及中性点接地电阻的影响，并且母线电压的变化源于故障时过渡电阻的不同，由此可以得知故障特征 1：

系统发生接地故障时，中性点接地电阻及过渡电阻对母线零序电压的影响较大。在一个系统中，中性点接地电阻固定不变，因此过渡电阻的改变对故障线路的零序电流改变产生主要影响。

由式(2)、式(4)及式(5)可知，在发生非金属性接地故障时，过渡电阻较大导致母线电压较小，进而故障线路零序电流较小，由此可以得知故障特征 2：

系统发生非金属性接地故障时，中性点接地电阻、故障距离及线路长度的变化对故障线路零序电流影响不大，过渡电阻的变化会对故障线路零序电流产生较大影响，各条健全线路零序电流的差别主

要由各线路长度决定。

由式(3)一式(5)代入常用参数值计算可以得知故障特征 3:

系统发生金属性接地故障时, 故障线路零序电流与健全线路零序电流幅值相差可以达到数百安培, 发生非金属性接地故障时, 故障线路零序电流与健全线路幅值相差仅为几安培。

图 2 所示为相量分析示意图,  $\alpha$  为故障线路零序电流与中性点接地电阻零序电流反相量的夹角, 其中

$$\alpha = \arctan \frac{\omega \sum_{i=1}^n C_i U_0}{\frac{U_0}{3R}} = \arctan(3R\omega \sum_{i=1}^n C_i) \quad (8)$$

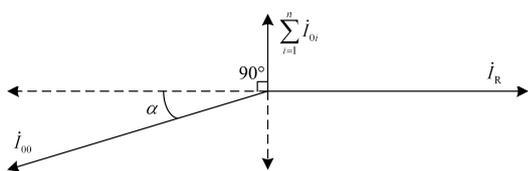


图 2 相量分析示意图

Fig. 2 Diagram for phasor analysis

$\sum_{i=1}^n \dot{I}_{0i}$  为所有健全线路零序电流之和,  $\sum_{i=1}^n C_i$  为所有健全线路的对地零序电容之和, 将  $C = 280 \times 10^{-9}$  F/km 代入式(8)可得

$$\alpha = \arctan(2.6376 \times 10^{-3} L) \quad (9)$$

$L$  为健全线路的全长, 按系统电缆总长最大为 100 km, 代入式(9)求得  $\alpha$  的取值约为  $0 < \alpha < 14.78^\circ$  ( $L$  为 100 km), 由此可知故障线路零序电流相位与健全线路零序电流相位相差  $90^\circ \sim 104.78^\circ$ 。由此可以得知故障特征 4:

故障线路零序电流为所有健全线路零序电流与中性点接地电阻零序电流矢量相加的反向相量, 由此可知故障线路零序电流相位与健全线路存在大于  $90^\circ$  的相位差。

图 3 所示分析母线接地故障时系统零序电流的分布情况,  $R'_f$  为母线接地故障过渡电阻。

故障点处零序电流为

$$\dot{I}'_{R_f} = -(\dot{I}'_R + \dot{I}'_{00} + \dot{I}'_{01} + \dots + \dot{I}'_{0n}) \quad (10)$$

中性点接地电阻处零序电流为

$$\dot{I}'_R = \frac{\dot{U}'_0}{3R} \quad (11)$$

$\dot{I}'_{0j}$  ( $j=0, 1, \dots, n$ ) 为健全线路零序电流, 健全线路零序电流表达式为

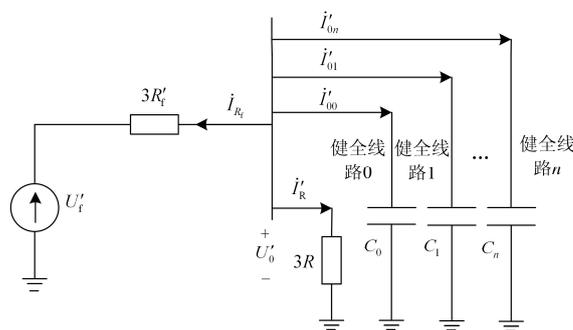


图 3 小电阻接地系统母线接地故障零序等效网络

Fig. 3 Equivalent zero-sequence network of bus grounding fault in low resistance grounding system

$$\dot{I}'_{0j} = j\omega C_i \dot{U}'_0 \quad (12)$$

系统发生母线接地故障时, 零序电流主要集中在母线接地故障点处, 各出线均为健全线路, 由此可以得知故障特征 5:

母线接地时, 过渡电阻改变会对各条出线零序电流幅值变化产生较大影响, 但各条出线零序电流幅值之比不变, 等于各出线对地电容之比, 相位近似相等。

## 2 基于零序电流比较的故障保护新方法

根据小电阻接地系统发生接地故障时的故障特征, 可以发现健全线路与故障线路的零序电流幅值相位信息均有明显差异, 基于此种情况, 可以利用各出线零序电流的幅值相位信息提出保护方法。

### 2.1 利用零序电流幅值比较的保护方法

配电系统正常工作时一般不存在零序电流, 有时配电网会因部分单芯电缆线路三相参数、长度不相等等原因产生不平衡电压从而产生有效值为 0.26 A 的不平衡零序电流<sup>[5]</sup>, 在系统发生故障时, 会有幅值明显大于不平衡电流的零序电流产生。因此在小电阻接地系统发生接地故障时, 可以通过比较各出线的零序电流幅值, 识别出故障线路, 进行故障切除, 实现保护。

保护判据基本流程为: 集中式保护装置采集各出线及中性点接地电阻零序电流, 设置保护门槛值  $I_{set}$  (随实际情况不同设置为 0.5~1.5 A) 存在出线或中性点接地电阻零序电流幅值超过保护门槛值保护启动, 集中式保护装置对各出线零序电流的幅值进行比较, 若其中一条出线的零序电流幅值远远大于 (10 倍以上) 其他所有出线零序电流幅值时, 认为此出线为故障线路, 集中式保护装置控制该条出线的断路器进行动作, 切除线路故障, 实现故障保护; 如果不存在此条出线则判定为母线接地故障, 集中

式保护装置控制母线的进线断路器进行动作，切除故障，实现故障保护。

在上述保护方法中，不平衡零序电流在一定程度上会对保护的可靠性产生影响，为了避免该情况的发生，可以用保护启动后各出线零序电流采样值减去保护启动前各出线零序电流采样值所得的结果作为用于比较的出线零序电流。

### 2.2 利用零序电流相位比较的保护方法

通过上述故障特征分析可知故障线路零序电流相位超前健全线路零序电流相位  $90^\circ\sim 104.78^\circ$ ，在实际情况下由于故障线路及健全线路零序电流方向存在偏移量、集中式保护装置分析所产生的误差等情况的存在，可以保留一定的裕量，在保护判据中设置某条出线零序电流相位超前其他出线零序电流相位  $85^\circ\sim 110^\circ$ 判定为发生了出线接地故障。基于上述分析可以根据各出线零序电流相位关系提出保护判据。

保护判据的基本流程为：集中式保护装置采集各出线及中性点接地电阻零序电流，存在出线或中性点接地电阻零序电流超过  $I_{set}$  时保护启动，集中式保护装置对各出线零序电流的相位信息进行比较，若其中一条出线零序电流相位超前其他所有出线零序电流相位  $85^\circ\sim 110^\circ$ 时，可以判定该条出线发生了故障，集中式保护装置控制该条出线的断路器进行动作，切除故障，实现故障保护，若各出线相位差均在  $30^\circ$ 以内则认定为母线接地故障，集中式保护装置控制母线的进线断路器进行动作，切除故障，实现故障保护。

### 2.3 综合保护方法

小电阻接地系统发生接地故障时一般情况下选用上述零序电流幅值比较或者相位比较的方法即可，但上述两种方法均存在一定的局限性。发生母线接地故障时若存在一条健全线路零序电流远远大于(10倍以上)其他所有健全线路零序电流只用幅值比较的方法时会造成保护的误判；在出线零序电流很小时对于线路零序电流的相位测量不准确，只使用相位保护方法时易造成保护的误判。此时需要一种综合性的保护方法以避免上述单种保护方法的局限性。

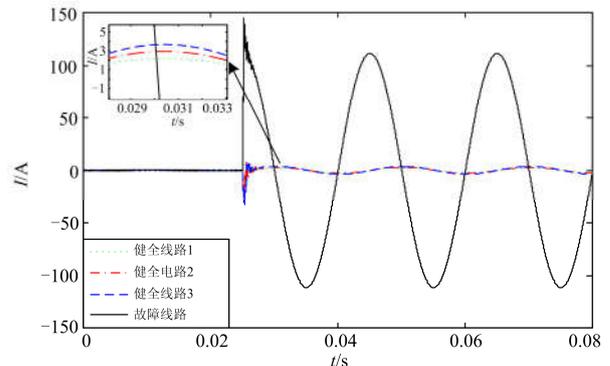
综合判据基本流程为：集中式保护装置采集各出线及中性点接地电阻零序电流，存在出线或者中性点接地电阻零序电流超过  $I_{set}$  时保护启动，用保护启动后各出线零序电流采样值减去保护启动前各出线零序电流采样值所得的结果作为用于比较的出线零序电流，集中式保护装置比较各出线零序电流幅值信息，若不存在某一条出线的零序电流幅值远远

大于(10倍以上)其他所有出线时，认为发生母线接地故障，集中式保护装置控制母线处进线断路器进行动作，实现保护；如果存在此种情况，对各出线相位进行比较，集中式保护装置选取零序电流幅值大于  $0.3\text{ A}$  的所有出线进行比较，若其中一条出线零序电流相位超前其他所有出线零序电流相位  $85^\circ\sim 110^\circ$ 时，认定此出线为故障线路，集中式保护装置控制该条出线的断路器动作，切除故障，实现故障保护；若各出线相位均相差在  $30^\circ$ 以内则认定此故障为母线接地故障，集中式保护装置控制母线处进线断路器动作，切除故障，实现故障保护。

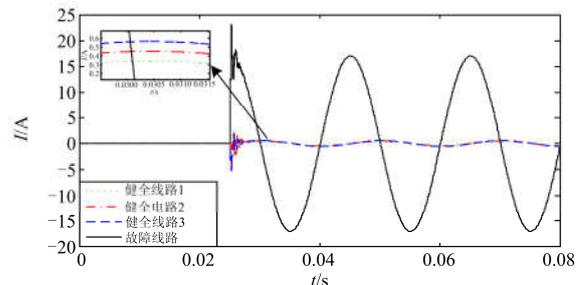
将两种保护方法综合后，综合考虑了不同情况的接地故障，不仅解决了小电阻接地系统发生高阻接地故障时易拒动的问题，同时在系统发生母线接地故障时实现了故障保护，并且消除了两种保护方法各自的局限性，提高了保护的灵敏度及可靠性。

## 3 仿真实验

如图 1 所示利用 Matlab 搭建仿真模型，配电系统电压等级为  $10\text{ km}$ ，取三条健全线路，设置各电缆线路模型长度为  $7.5\text{ km}$ 、 $10\text{ km}$ 、 $12.5\text{ km}$ ，设置一条长为  $10\text{ km}$ 的故障线路，设置故障距离为  $5\text{ km}$ ，设置中性点接地电阻为  $10\ \Omega$ ，取对地电容参数为  $280\times 10^{-9}\text{ F/km}$ 。如图 4 所示分别设置故障点过渡电阻的阻值为  $10\ \Omega$ 、 $150\ \Omega$ 、 $1\ 000\ \Omega$ 进行仿真，观察零序电流在各出线的分布情况。



(a) 过渡电阻为  $10\ \Omega$



(b) 过渡电阻为  $150\ \Omega$

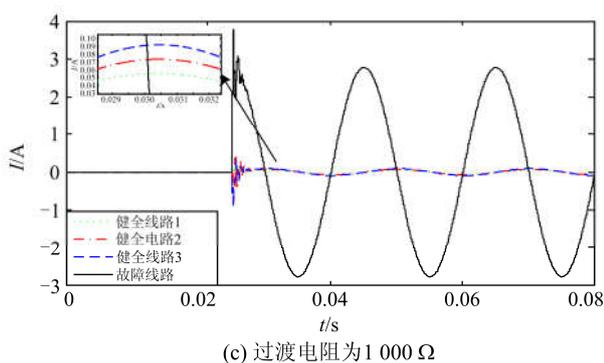


图 4 接地故障各出线零序电流分布

Fig. 4 Distributions of zero-sequence current in each feeder under grounding fault

通过仿真可以直观地发现故障线路零序电流幅值与健全线路零序电流幅值有明显差距, 为了更好地对故障线路零序电流与健全线路零序电流幅值的倍数差距进行分析, 根据图 4 中设置的不同过渡电阻, 通过使用 FFT 获得出线接地故障时各出线零序电流的幅值相位信息, 如表 1 所示。

表 1 出线接地故障时不同过渡电阻下的各出线零序电流

Table 1 Zero-sequence current of each feeder under feeder grounding fault with different transition resistances

出线类型	过渡电阻 $R/\Omega$	零序电流幅值 $I/A$	相位/ $^\circ$
故障线路	10	111.40	-7.7
	150	17.07	-8.2
	1 000	2.78	-8.5
健全线路 1	10	2.20	257.7
	150	0.34	257.1
	1 000	0.06	257.0
健全线路 2	10	2.94	257.4
	150	0.45	256.9
	1 000	0.07	256.8
健全线路 3	10	3.67	257.1
	150	0.56	256.6
	1 000	0.09	256.5
故障线路与健全线路 3 幅值倍数及相位差	10	30.35	95.2
	150	30.48	95.2
	1 000	30.89	95

表 2 母线接地故障时不同过渡电阻下的各出线零序电流

Table 2 Zero-sequence current of each outlet under bus grounding fault with different transition resistances

出线类型	过渡电阻 $R/\Omega$	零序电流幅值 $I/A$	相位/ $^\circ$
健全线路 1	10	2.82	21.0
	150	0.35	19.4
	1 000	0.06	19.2
健全线路 2	10	3.76	20.8
	150	0.47	19.1
	1 000	0.07	18.9
健全线路 3	10	4.71	20.4
	150	0.59	18.8
	1 000	0.09	18.6

如图 4 及表 1 所示, 通过对小电阻接地系统发生金属性接地故障以及非金属性接地故障进行仿真可以看出在系统发生出线接地故障时, 故障线路零序电流幅值为任意健全线路零序电流幅值的十倍以上且各健全线路零序电流幅值之比近似于线路长度之比, 故障线路零序电流相位超前健全线路  $95^\circ$  左右, 故障出线与健全出线零序电流幅值相位信息存在明显差异, 由此可以证实幅值比较, 相位比较, 综合保护三种保护判据的可靠性。

设置 3 条健全电缆线路模型长度为 7.5 km、10 km、12.5 km, 其他参数与上述参数相同, 对母线接地故障进行仿真, 仿真波形如图 5 所示。在中性点接地电阻为  $10\ \Omega$ , 过渡电阻为  $10\ \Omega$  以及过渡电阻为  $50\ \Omega$  的情况下, 仿真所得三条健全线路零序电流幅值相位信息如表 2 所示。

通过对小电阻接地系统母线接地故障进行仿真, 发现在发生母线接地故障时, 各出线零序电流相位相差在  $1^\circ$  以内且各出线幅值之比与各出线长度之比近似相等。

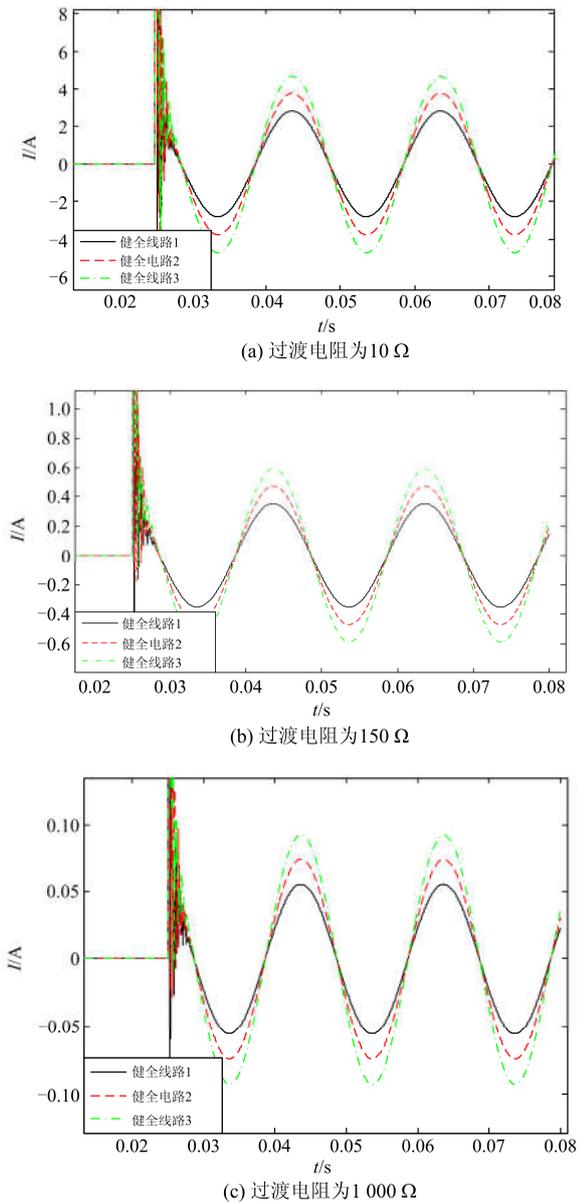


图 5 母线接地故障各出线零序电流分布

Fig. 5 Distributions of zero-sequence current in each feeder under bus grounding fault

### 4 结语

由于现有小电阻接地系统零序过电流保护整定值过高, 在发生高阻接地故障时易拒动。

小电阻接地系统发生接地故障时, 健全出线与故障出线在零序电流幅值相位关系上存在明显差异, 单独利用零序电流幅值或相位比较的保护方法在一般情况下可以使用, 但存在一定局限性, 使用综合保护方法消除了仅使用幅值比较或仅使用相位比较时保护方法的局限性, 扩大了保护的适用范围, 上述保护方法在金属性接地故障以及非金属性接地

故障中均可使用, 并且可以有效地区分出线接地故障还是母线接地故障, 有效地提高了接地故障保护的灵敏度及可靠性, 且不受系统零序电压及零序电流的影响, 具有较好的工程应用前景。

### 参考文献

[1] 申建强. 10 kV 配电网混合接地方式运行研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.  
SHEN Jianqiang. Research on hybrid grounding run of 10 kV distribution network[D]. Changsha: Hunan University, 2011.

[2] 陈念, 吕艳萍, 周凯, 等. 110 kV 电阻接地系统零序方向电流保护的整定研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 91-96.  
CHEN Nian, LÜ Yanping, ZHOU Kai, et al. Research on setting calculation of zero sequence directional overcurrent protection for 110 kV neutral point grounding via resistance system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 91-96.

[3] 李林. 配电网高阻抗故障时频检测方法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.  
LI Lin. Time-frequency methods of high impedance fault detection in distribution network[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.

[4] 薛永端, 刘珊, 王艳松, 等. 基于零序电压比率制动的小电阻接地系统接地保护[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 112-117.  
XUE Yongduan, LIU Shan, WANG Yansong, et al. Grounding fault protection in low resistance grounding system based on zero-sequence voltage ratio restrain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 112-117.

[5] 耿建昭, 王宾, 董新洲, 等. 中性点有效接地配电网高阻接地故障特征分析及检测[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 85-91.  
GENG Jianzhao, WANG Bin, DONG Xinzhou, et al. Analysis and detection of high impedance grounding fault in neutral point effectively grounding distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 85-91.

[6] 方学智, 杨帆, 肖彬, 等. 基于 IEC61850 和 Web Services 服务的中性点小电阻接地系统接地保护装置的研发[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 144-149.  
FANG Xuezhi, YANG Fan, XIAO Bin, et al. Research and development of protective device in neutral grounding via low resistance based on IEC 61850 and Web Services[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 144-149.

- 144-149.
- [7] 于盛楠, 冯蓓艳, 张嘉旻, 等. 中性点经小电阻接地配网系统的故障定位[J]. 电力与能源, 2011, 32(3): 206-209.  
YU Shengnan, FENG Beiyan, ZHANG Jiamin, et al. Research on fault location in distribution network with neutral point grounding via low resistance[J]. Power and Energy, 2011, 32(3): 206-209.
- [8] 李容, 任睿, 宋聚忠. 在配电网中发生单相接地故障时不借助电压互感器计算残余电压角度的方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 143-149.  
LI Rong, REN Rui, SONG Juzhong. A method to compute residual voltage angle without voltage transformers during single phase earth fault in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 143-149.
- [9] 朱亮. 10 kV 配电网小电阻接地系统单相短路故障及其保护研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.  
ZHU Liang. The study of single phase short-circuit fault and protection for 10 kV distribution network with neutral grounding through low resistor[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [10] 张维. 小电阻接地系统分布式零序保护原理及装置[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.  
ZHANG Wei. Protection principle and device of the distributed zero-sequence protection in a low-resistance grounding system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [11] 梁树棠. 10 kV 配电网中性点经小电阻接地系统的研究[J]. 科技与创新, 2015(20): 72-73.  
LIANG Shutang. Research on the small resistance grounding system of the 10 kV distribution network neutral point[J]. Science and Technology & Innovation, 2015(20): 72-73.
- [12] 黄俊恺. 小电阻接地系统复杂故障分析及保护新原理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.  
HUANG Junkai. Study on complex fault analysis and new relaying principles in low resistance grounding system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [13] 翟进乾. 配电线路在线故障识别与诊断方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.  
ZHAI Jinqian. Research for online fault recognition and diagnosis method of distribution line[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [14] MIRZAEI M, KADIR M Z A A, MOAZAMI E, et al. Review of fault location methods for distribution power system[J]. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2009, 3(3): 2670-2676.
- [15] RUSSELL B D, AUCCOIN B M. Randomness fault detection system: U.S., 5485093[P]. 1996-01-16.
- [16] BISWAL M, BISWAL S. A positive-sequence current based directional relaying approach for CCVT subsidence transient condition[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 81-91. DOI: 10.1186/s41601-017-0038-0.

---

收稿日期: 2017-09-10; 修回日期: 2017-11-27

作者简介:

林志超(1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护技术研究。E-mail: 13928313399@139.com

刘鑫星(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统故障检测; E-mail: liuxinxingWJ@yeah.net

王英民(1981—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 35921893@qq.com

(编辑 周金梅)