

文章编号:1671-251X(2016)11-0045-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2016.11.011

宗伟林,许文强,原亚雷,等.矿井配电网单相接地故障选线与定位新方法[J].工矿自动化,2016,42(11):45-50.

矿井配电网单相接地故障选线与定位新方法

宗伟林, 许文强, 原亚雷, 戴经纬, 皮杰, 宋天宝

(中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:分析了矿井配电网特点及单相接地故障选线与定位难点,提出了一种基于中频信号注入式矿井配电网单相接地故障选线与定位新方法。该方法通过安装在矿井配电网线路上的监测装置监测到故障发生时,启动中频信号注入装置向配电网系统注入中频信号,在配电网线路参数已知的前提下,通过分析工频故障信号和中频故障信号来实现故障选线与定位。通过 Matlab/Simulink 建模、仿真分析和相应的数据分析计算,验证了该方法的可行性和正确性。

关键词:矿井配电网;单相接地故障;故障选线;故障定位;中频信号注入

中图分类号:TD60 文献标志码:A 网络出版时间:2016-10-28 16:27

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20161028.1627.011.html>

A new type of single-phase grounding fault line selection and location method for mine distribution network

ZONG Weilin, XU Wenqiang, YUAN Yalei, DAI Jingwei, PI Jie, SONG Tianbao

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Characteristics of mine distribution network and difficulties of single-phase grounding fault line selection and location were analyzed. A new type of single-phase grounding fault line selection and location method for mine distribution network was proposed which was based on intermediate frequency signal injecting type. Through monitoring device of mine distribution network to detect fault occurrence time, intermediate frequency signal injecting device starts to inject intermediate frequency signal at the same time. Fault line selection and fault location are realized by analyzing power frequency fault signal and the intermediate frequency fault signal when distribution network parameters are known. Through Matlab/Simulink modeling, simulation analysis and corresponding data analysis and calculation, feasibility and correctness of the method are verified.

Key words: mine distribution network; single-phase grounding fault; fault line selection; fault location; intermediate frequency signal

0 引言

目前中国煤矿高压电网普遍采用 6 kV 或 10 kV 电缆直接供电,电网中性点均采用非直接接

地方式。煤矿供电系统作为煤矿生产的动力来源,其供电可靠性将直接影响煤矿生产效率和安全。单相接地故障是矿井高压供电系统最常见的故障类型^[1],若故障得不到及时处理,极易造成相间短路故

收稿日期:2016-07-25;修回日期:2016-09-28;责任编辑:李明。

基金项目:江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(SJLX15_0697);国家级大学生创新训练计划资助项目(201610290026)。

作者简介:宗伟林(1963—),男,江苏常州人,副教授,硕士,主要研究方向为电力电子与电气传动、矿山自动化、数字化矿山、电气设备状态监测与故障诊断技术,E-mail:cumtzw1@126.com。通信作者:许文强(1991—),男,安徽蚌埠人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子与电气传动、电气设备状态监测与故障诊断技术,E-mail:anlixuwenqiang@163.com。

障,不仅给人员安全带来极大威胁,还会对设备造成极大损害。

现有的接地故障选线装置^[2-4]原理大致可分为基于稳态信号的方法、基于暂态信号的方法、外加信号法^[5]。基于稳态信号的方法有群体比幅比相法^[6]、五次谐波法、负序电流法^[7]等。该方法受消弧线圈的影响,稳态信号较弱,信号提取困难。另外系统运行方式、线路长度、过渡电阻等因素也会导致误选或漏选。基于暂态信号的方法包括小波分析法、零序电流突变量法^[8]、相电流突变量法^[9]等。暂态信号含有丰富的故障信息,且具有受系统运行方式影响小、灵敏度高优点。但从现场应用效果来看,由于单相接地故障状况复杂,故障状况不同,产生的故障特征量在数值、变化规律上相差悬殊;故障电流很小,难以保证测量精度;现场的电磁干扰及工频负荷电流干扰使检出的故障成分信噪比非常低,且在电压过零点时算法失效^[10]。外加信号法主要有 S 信号注入法^[11]、变频信号注入法、脉冲信号注入法^[12]等。外加信号法的性能与零序电流的大小、方向等均不相关,适用于不同接线方式的小电流接地系统。但实际运用中,在故障电阻较大情况下,故障线路与非故障线路的信号差异不明显;弧光接地时谐波含量丰富,注入信号极易受到干扰,且信号注入能量受电压互感器的限制不能太高;在接地电阻较大时,非故障线路分布电容会对注入信号进行分流,干扰正确选线。

本文提出一种基于中频信号注入式矿井配电网单相接地故障选线与定位方法,不仅可实现对接地线路的准确选线,还能对故障位置进行精确定位。

1 矿井配电网特点和单相接地故障选线与定位难点分析

矿井配电网特点:① 传输线路主要是电缆,向井下供电纵深的电缆线路较长,电缆长度占整个配电网线路长度的比例很大;② 用电负荷以电动机为主,系统平衡性较以架空线为主的地面配电网好得多;③ 煤矿井下供电负荷大,矿井配电网以辐射网络布局为主,普遍采用多条平行电缆向井下供电;④ 高压供电系统普遍采用中性点经消弧线圈接地方式,采用过补偿方式,过补偿度不确定;⑤ 井下供电的低压分支线路较少,供电距离较短;⑥ 变频器负载相对较多,配电网谐波含量相对较大。

矿井配电网单相接地故障选线与定位难点:① 采用谐振接地方式,稳态接地电流小,故障线路

与非故障线路故障特征不明显;② 非线性负载多,配电网本身不确定谐波含量大,对故障信号的提取和分离造成干扰;③ 具有接地方式不确定性和接地时刻随机性;④ 故障信号的检测装置特性不一致,对不同幅值的电压或电流表现出不同的线性度和失真程度;⑤ 电网参数(主要包括系统对地电容大小、系统平衡程度、电网补偿程度、变电所线路数及线路长度等^[13])对故障选线和定位有影响;⑥ 现场干扰大,信噪比小。

2 基于中频信号注入式矿井配电网单相接地故障选线与定位原理

基于中频信号注入式矿井配电网单相接地故障选线与定位方法综合考虑消弧线圈、电力电子器件开关频率、电力系统中含有的谐波频率(主要为 3, 5, 7, 11 等奇次谐波)、数字信号处理等因素,选择的注入信号频率为 300 Hz 中频信号。与传统的 S 信号注入法(220 Hz)和变频信号注入法不同,该方法主要采用傅里叶方法对信号进行处理。

与传统的单相注入法不同,基于中频信号注入式矿井配电网单相接地故障选线与定位方法对配电网 A, B, C 三相同同时注入中频信号。中频信号通过目前较成熟的整流逆变技术产生,在逆变的输出侧增加 LCL 滤波环节,减少其他频段谐波的影响,提高注入信号的纯度,可减少对配电网的污染。针对传统注入信号法采用电压互感器或经消弧线圈注入信号功率受限制的问题,采用注入信号变压器注入中频信号,以提高注入信号功率。具体原理如图 1 所示。

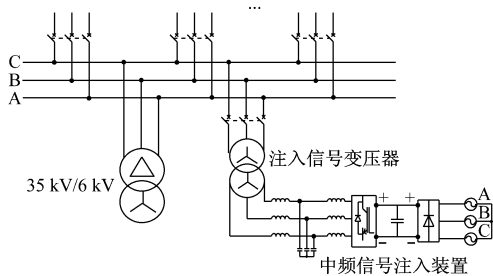


图 1 注入信号原理

配电网正常运行时,注入信号变压器二次侧断路器处于打开状态,并不注入中频信号。配电网分支线路在高压开关处布置有相应的监测装置,实时监测配电网运行状态。监测装置监测到单相接地故障时,会立即向信号源控制装置发出信号,且采用零起升压模式投入中频信号,防止对配电网造成冲击。

谐振接地系统发生单相接地故障时零序电流分

布如图2所示。其中 $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$ 为三相电压, $\dot{I}_{A1}, \dot{I}_{B1}, \dot{I}_{A2}, \dot{I}_{B2}, \dot{I}_{A3}, \dot{I}_{B3}$ 为3条线路 l_1, l_2, l_3 对应相的零序故障电流, C_{01}, C_{02}, C_{03} 为3条线路对地电容, C_{0G} 为电源与母线之间电缆对地电容, $\dot{I}_L$ 为消弧线圈电流, $\Sigma \dot{I}_f$ 为接地点电流总和。

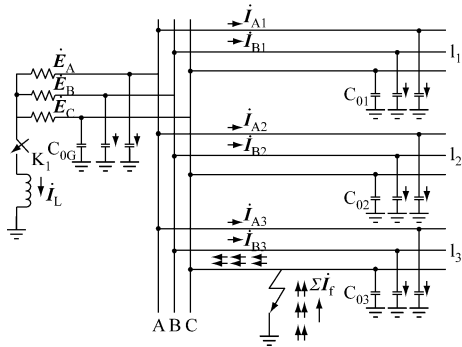


图2 谐振接地系统单相接地故障示意
消弧线圈在中性点对地电压的作用下产生的电感电流为

$$\dot{I}_L = \frac{\dot{U}_0}{X_L} = \frac{\dot{U}_0}{jn\omega L} \tag{1}$$

式中: $\dot{U}_0$ 为零序电压; L, X_L 分别为消弧线圈的电感和电抗; $n=1, 2, \dots$; ω 为角速度。

此时系统产生的零序电流为

$$\dot{I}_{C\Sigma} = \frac{\dot{U}_0}{1/(j3n\omega C_\Sigma)} = j3n\omega C_\Sigma \dot{U}_0 \tag{2}$$

式中 C_Σ 为系统对地电容总和。

接地点流过的电容电流经消弧线圈流过的电感电流补偿, 补偿后的接地点电流为

$$\dot{I}_f = \dot{I}_{C\Sigma} + \dot{I}_L = j(3n\omega C_\Sigma - \frac{1}{n\omega L}) \dot{U}_0 \tag{3}$$

系统谐振点频率为

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_\Sigma}} \tag{4}$$

谐振接地系统普遍采用过补偿方式, 当 $f = 50 \text{ Hz}, n=1$ 时, 接近系统频率, 此时消弧线圈电流 $\dot{I}_L$ 与系统零序电流 $\dot{I}_{C\Sigma}$ 方向相反, 故障点电流因消弧线圈的补偿作用而大大减小。

当 $f = 50n \text{ Hz}, n > 1$ 时, 远离系统频率。随着 n 增大, 频率为 $50n \text{ Hz}$ 的零序电流 $\dot{I}_{C\Sigma}$ 将增大, 而消弧线圈电流 $\dot{I}_L$ 减少。

对于频率为 $50n \text{ Hz}$ 的注入信号, 系统发生单相接地故障时, 消弧线圈对该信号零序电流的补偿作用被大大削弱, 此时故障线路与非故障线路的故障信号特征几乎与中性点不接地系统类似。

此时注入信号的零序电流分布特征如下。

(1) 非故障线路注入信号的零序电流方向由母线流向线路, 随着到母线距离的增加, 零序电流幅值不断减小, 线路末端零序电流几乎为零。

(2) 故障线路上故障点下游监测点注入信号的零序电流与非故障线路上注入信号零序电流在方向和幅值上表现的特征相同。

(3) 故障线路上故障点上游各监测点零序电流方向由线路流向母线, 幅值随到母线距离的增加而增大, 与非故障线路和故障点下游的故障信号特征相反。

故障区段定位的原理基于监测点之间的相邻通信, 通过对比相邻监测点之间的故障信号特征做出故障区段判别。

故障点定位方法主要采用虚部电抗法, 求出故障点所处区段首端监测点与故障点之间线路电感值, 根据线路单位电感值计算监测点与故障点距离。故障点定位原理如图3所示。

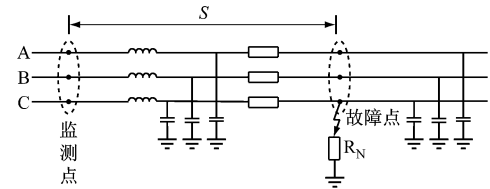


图3 故障点定位原理

故障进入稳态后, 监测点 C 相对地电压 $\dot{U}_{CM}$ 由过渡电阻 R_N 上的电压 $\dot{U}_{R_N}$ 加上故障线路段 S 上的电压 $\dot{U}_{CL}$ 组成, 即

$$\dot{U}_{CM} = \dot{U}_{CL} + \dot{U}_{R_N} \tag{5}$$

根据煤矿井下分级供电线路相对较短的特点, 近似忽略故障线路段对地电容的影响, 故障线路段 S 上的电压 $\dot{U}_{CL}$ 由负荷电流带来的压降 $\dot{U}_{CLL}$ 和故障电流带来的压降 $\dot{U}_{CL0}$ 组成, 即

$$\dot{U}_{CL} = \dot{U}_{CLL} + \dot{U}_{CL0} \tag{6}$$

故障发生后, 稳态状态下监测装置对采集的三相电压工频周期内的稳态采样点进行全周傅里叶计算, 得到工频三相对地电压 $\dot{U}_{ADP}, \dot{U}_{BDP}, \dot{U}_{CDP}$ 和电流 $\dot{I}_{AP}, \dot{I}_{BP}, \dot{I}_{CP}$, 以及注入信号三相对地电压 $\dot{U}_{ADM}, \dot{U}_{BDM}, \dot{U}_{CDM}$ 和电流 $\dot{I}_{AM}, \dot{I}_{BM}, \dot{I}_{CM}$ 。利用对称分量法分别求出工频与注入中频信号 C 相零序电压 $\dot{U}_{C0P}, \dot{U}_{C0M}$ 和电流 $\dot{I}_{C0P}, \dot{I}_{C0M}$ 。

以零序电流和垂直于零序电流的方向作为参考

坐标轴对 $\dot{U}_{C0P}$ 、 $\dot{U}_{C0M}$ 分解,得到故障线路段 S 上零序电压 $\dot{U}_{C0Pl}$ 、 $\dot{U}_{C0Mr}$ 。 $\dot{U}_{C0Pl}$ 、 $\dot{U}_{C0Mr}$ 幅值分别为

$$U_{C0Pl} = L_f \frac{di_{C0P}}{dt} = L_f \omega I_{C0P} \tag{7}$$

$$U_{C0Mr} = L_f \frac{di_{C0M}}{dt} = nL_f \omega I_{C0M} \tag{8}$$

式中: L_f 为故障线路段电感; i_{C0P} 、 i_{C0M} 、 I_{C0P} 、 I_{C0M} 分别为工频与注入中频信号的零序电流瞬时幅值和有效幅值。

将式(7)乘以 I_{C0M} ,等式两边分别减去式(8)乘以 I_{C0P} 得到的等式两边,得

$$L_f = \frac{U_{C0Pl} I_{C0M} - U_{C0Mr} I_{C0P}}{\omega I_{C0M} I_{C0P} (1 - n)} \tag{9}$$

根据线路的具体参数,得到故障线路段长度:

$$S = \frac{L_f}{L_0} \tag{10}$$

式中 L_0 为线路单位长度的零序电感。

3 仿真实验

3.1 仿真模型

在 Matlab/Simulink 中搭建了 6 kV 谐振接地系统 4 线路仿真模型,如图 4 所示。考虑到煤矿配电网的特点,模型中包含 1 条架空线路、1 条混合线路、2 条电缆线路,具体参数见表 1。消弧线圈的补偿度取 10%,由线路参数求得系统对地电容总和 C_s ,可计算出消弧线圈电感 L_N 。

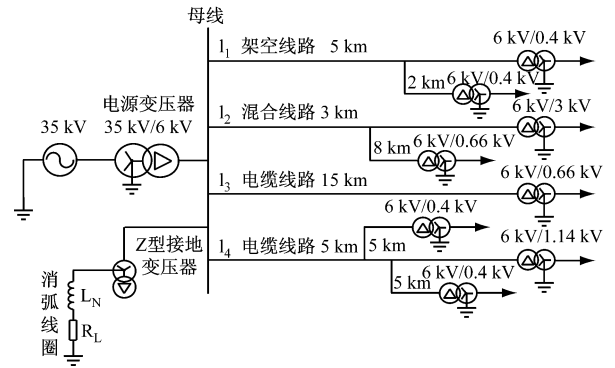


图 4 6 kV 谐振接地系统 4 线路仿真模型

表 1 线路参数

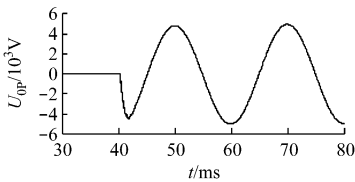
线路类型	相序	电阻/ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	电容/ ($\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$)	电感/ ($\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$)
架空线路	零序	0.230	0.006	5.475
	正序	0.170	0.010	1.210
电缆线路	零序	2.700	0.280	1.019
	正序	0.270	0.339	0.255

消弧线圈的有功损耗约为感性损耗的 3%,计

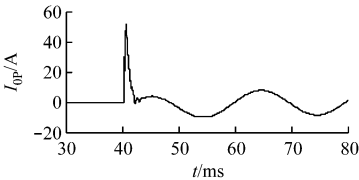
算得消弧线圈阻值 $R_L = 2.280 \Omega$ 。

3.2 仿真结果

故障点设置在线路 l_3 上,接地电阻设置为 10Ω ,故障发生在 $t = 40 \text{ ms}$ 时。发生单相接地故障时,中频信号注入装置启动,向配电网注入中频信号。工频信号和中频信号的零序电压 U_{0P} 、 U_{0M} 与零序电流 I_{0P} 、 I_{0M} 如图 5、图 6 所示。

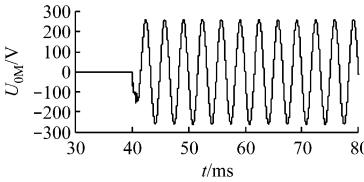


(a) 零序电压

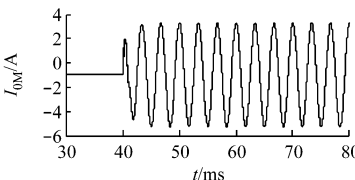


(b) 零序电流

图 5 工频信号零序电压、零序电流波形



(a) 零序电压



(b) 零序电流

图 6 中频信号零序电压、零序电流波形

由图 5 和图 6 可知,对于同一类型的单相接地故障,工频信号与中频信号在暂态和稳态上表现出近似相同的性质和特点,可通过分析工频故障信号与中频故障信号来判别故障线路、故障区段和故障位置。

分别检测工频信号和中频信号下故障线路和非故障线路的零序电流,并对稳态情况的相位进行对比,结果如图 7、图 8 所示。

由图 7 和图 8 可以验证故障状态情况下,消弧线圈对于单相接地故障下工频信号零序电流和中频信号零序电流的不同补偿效果。稳态下对于工频信号,消弧线圈为过补偿方式,故障线路的故障相与非故障相上由故障产生的电流功率方向一致,故障线

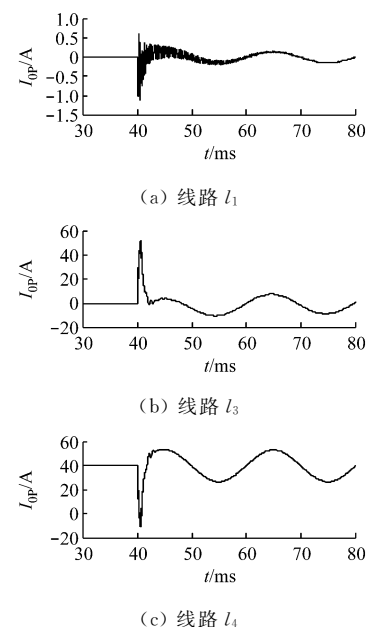


图 7 各线路工频信号零序电流对比

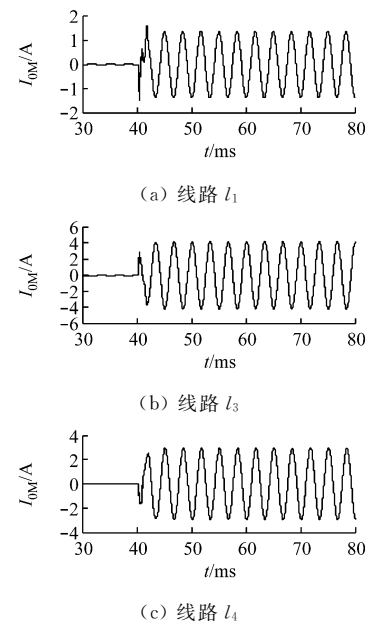


图 8 各线路中频信号零序电流对比

路的零序电流和非故障线路的零序电流功率方向一致。稳态下对于中频信号,消弧线圈为欠补偿方式,故障线路的故障相与非故障相上由故障产生的电流功率方向相反,故障线路与非故障线路零序电流功率方向相反。该特征可作为故障选线的判据。结合同一线路不同监测点监测到的故障信号特征,以及相对于电源变压器的上下逻辑关系可以选出故障区段。

设故障点位置不变,改变故障点过渡电阻值,分别进行仿真,监测点位于故障线路首端距离故障点 2 km 处。根据监测到的故障线路各相电流与电压,分别得到故障相 C 相工频信号与注入中频信号的零序电流(I_{C0P} , I_{C0M})、零序电压(U_{C0P} , U_{C0M})和故障

线路段上零序电压,见表 2。

表 2 故障点监测数据

过渡电阻/ Ω	I_{C0P}/A	U_{C0P}/V	I_{C0M}/A	U_{C0M}/V	测距/km
10	4.25	2.72	3.02	23.26	1.94
50	4.13	2.64	1.04	7.96	1.91
100	3.99	2.55	0.57	4.37	1.87
200	3.72	2.38	0.30	2.46	1.84
500	2.97	1.90	0.12	0.94	1.75
1 000	2.12	1.36	0.06	0.48	1.71

从表 2 可看出,计算得到的监测点与故障点间距接近实际故障距离 2 km,基本可以验证基于中频信号注入式矿井配电网单相接地故障选线与定位方法的可行性。该方法故障定位精度随接地点过渡电阻的增大而减小,主要原因是过渡电阻的增大减弱了故障信号的强度,降低了采样精度。

4 结语

基于中频信号注入式矿井配电网单相接地故障选线与定位方法与现有的信号注入方法相比,其借助特定的信号注入变压器注入频率为 6 倍频工频信号的中频信号,通过分析稳态工频信号和注入的中频信号来确定故障位置,有效提高了故障定位的准确性和可靠性。该方法不仅有效解决了过渡电阻对传统定位方法的限制问题,而且可以在线反复多次注入信号、分析特征、定位故障,还可以调节注入信号的强度,以提高定位的有效性。通过 Matlab/Simulink 的仿真和相应计算,验证了该方法的可行性和正确性。

参考文献:

[1] 梁睿,王崇林,辛健. 煤矿电网含并联供电线路的小电流选线[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 108-113.

[2] 姜博,董新洲,施慎行. 基于单相电流行波的配电线路单相接地故障选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2014(34):6216-6227.

[3] 殷文韬,傅贵,袁沙沙,等. 2001—2012 年我国重特大瓦斯爆炸事故特征及发生规律研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(2):141-147.

[4] 陈娟,赵耀江. 近十年来我国煤矿事故统计分析及启示[J]. 煤炭工程, 2012(3):137-139.

[5] 熊婷婷,曾祥君,王媛媛,等. 非有效接地电网单相接地故障选线技术综述[J]. 电气技术, 2013(5):1.

[6] 王彦文,刘文军,高彦,等. 基于零序电流群体比幅比相的选择性漏电保护新方案[J]. 煤炭学报,2010,35(3):515-519.

[7] 任建文,丁浩,李莎,等. 基于负序电流的配电网单相接地故障选线方法的研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2013,40(1):24-29.

[8] 倪广魁,鲍海,张利,等. 基于零序电流突变量的配电网单相故障带电定位判据[J]. 中国电机工程学报,2010(31):118-122.

[9] 宋国兵,李广,于叶云,等. 基于相电流突变量的配电网单相接地故障区段定位[J]. 电力系统自动化,2011(21):84-90.

[10] 郭清滔,吴田. 小电流接地系统故障选线方法综述[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(2):146-152.

[11] 杜刚,刘迅,苏高峰. 基于 FTU 和“S”信号注入法的配电网接地故障定位技术的研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(12):73-76.

[12] 王凤,康怡. 基于脉冲信号注入法的小电流接地选线技术[J]. 电网技术,2008(15):90-93.

[13] 陈奎,陈士军,唐轶. 矿山电网漏电保护的研究[J]. 电工技术杂志,2004(11):61-64.