

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181043

小电阻接地方式对人身安全的影响及智能电阻接地方式研究

熊卫红¹, 毛兴华², 李景禄², 张春辉³, 李平², 潘子仁², 林俊超²

(1. 国家电网公司华中分部, 湖北 武汉 430077; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114;
3. 长沙信长电力科技有限公司, 湖南 长沙 410076)

摘要: 近年来, 配电网规模不断扩大, 随之增长的是因高压触电所引起的人身伤亡事故, 每年因触电造成的人员重伤及死亡的数字非常惊人。对配电网中性点经小电阻接地方式的零序保护进行了理论和 Matlab 仿真软件计算分析, 表明小电阻接地系统无法处理人身触电问题。针对该问题, 提出一种中性点智能电阻接地方法。该方法根据中性点电压对故障进行分区, 将故障分为高阻、中阻及低阻接地故障。对于人身触电高阻接地故障能快速切除故障线路, 保证人身安全。在漯河 10 kV 真型试验场对该方法进行了试验验证。结果表明: 配电网中性点智能电阻接地方法具有 5 000 Ω 高阻接地故障的识别和处理能力, 可以保证人身安全。

关键词: 人身安全; 小电阻接地; 智能电阻; 故障分区; 高阻接地

Influence of small resistance grounding mode on personal safety and research of intelligent resistance grounding mode

XIONG Weihong¹, MAO Xinghua², LI Jinglu², ZHANG Chunhui³, LI Ping², PAN Ziren², LIN Junchao²

(1. Huazhong Branch of State Grid Corporation of China, Wuhan 430077, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
3. Changsha Xinchang Power Technology Co., Ltd., Changsha 410076, China)

Abstract: In recent years, the scale of distribution network has been expanding, with the increase of casualties caused by high voltage electric shock. The number of serious casualties and deaths caused by electric shock every year is very alarming. In this paper, the zero sequence protection of the neutral point of the distribution network through the small resistance grounding mode is calculated and analyzed by the Matlab simulation software. The analysis shows that the small resistance grounding mode can not deal with the problem of personal electric shock. In order to solve this problem, a neutral point intelligent resistance grounding method is proposed. The method is divided into high resistance, medium resistance and low resistance grounding fault according to neutral point voltage. It can cut off the faulty line quickly and ensure personal safety for human body electric shock high resistance grounding fault. The method is verified by the 10 kV real test field in Luohe. The results show that the intelligent resistance grounding method of neutral point in distribution network has the ability to recognize and deal with 5 000 Ω high resistance ground faults, which can ensure the safety of the human body.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777015) and Science and Technology Project of Huazhong Branch of State Grid Corporation of China (No. SGHZ0000AJJS1700167).

Key words: personal safety; small resistance grounding; intelligent resistance; fault zoning; high resistance grounding

0 引言

近年来, 因人身触电造成行人及电力人员死亡

的人数非常惊人, 仅 2016 年全国约有 8 000 人因触电而死亡, 其中 10% 以上发生在配电网中, 每年近千人因触电死亡, 触电死亡已成为影响社会和谐和家庭幸福的一大杀手^[1-4]。针对配电网频繁发生人身触电伤亡事故, 有人认为小电阻接地方式在发生人身触电时, 小电阻系统配备的零序过流保护能快

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777015); 国家电网公司华中分部重点科技项目资助(SGHZ0000AJJS1700167)

速切除故障线路, 从而小电阻接地系统可以解决人身安全问题^[5-8]。但运行的情况并非如此, 人身触电为高阻接地故障, 故障线路的零序电流太小, 无法达到保护整定值, 零序保护“失灵”不能切除故障线路。

为了解决中性点经小电阻接地方式存在的人身触电高阻故障选线问题与瞬时性接地故障的供电可靠性问题, 本文提出了一种配电网中性点智能电阻接地方法。该方法在发生单相接地故障时, 根据中性点电压通过分区法, 将故障类型分为高阻、中阻及低阻接地故障。在人身触电的高阻接地故障时, 该方法能快速切除故障线路, 从而保证人身安全。

1 小电阻接地方式对人身安全的影响分析

1.1 人身触电分析

传统的配电网线路往往穿越了人口密集地带, 其网络复杂, 同时线路建设对地高度较低, 随着经济的迅速发展, 高层建筑耸立, 在运行中经常发生误碰裸导线而引发的直接接触电事故, 同时绝缘导线断线掉落在有积水地面, 行人也可能存在触电风险^[9-11]。目前配电网人体触电主要有以下两种原因: (1) 因违章、误碰导线造成人体直接接触电是最主要的触电死亡原因; (2) 因架空绝缘导线断线, 人经过断线区域的积水或直接触碰到断线是引发触电死亡的另一主要原因^[12-15]。

对于人体直接接触电而引发的单相接地故障, 其人体自身的内电阻一般为 $1\ 000\sim 1\ 500\ \Omega$, 在发生触电时还需考虑地电阻, 该电阻与人体所处位置的土壤电阻率有关, 一般在 $500\sim 1\ 000\ \Omega$ 。所以对于人体直接接触电的故障其过渡电阻因考虑在 $1\ 500\sim 2\ 500\ \Omega$ 。而对于架空绝缘导线断线接地情况, 接地故障点的接地电阻与导线接地的状况和故障点土壤电阻率有关, 其数值一般在 $500\sim 1\ 000\ \Omega$ ^[16-20]。综合考虑以上两种情况, 对于保证配电网的人身安全, 其配电线路的继电保护装置需满足耐过渡电阻的能力应在 $1\ 500\ \Omega$ 以上。同时在发生人体触电后, 需在很短的时间内切除故障。对于在中压电网上的人身触电事故, 应在 $0.3\ \text{s}$ 脱离电源, 才有可能保证人身安全^[21-22]。

1.2 小电阻接地方式下人身触电分析

图 1 为配电网单相接地故障示意图, \dot{U}_a 、 \dot{U}_b 、 \dot{U}_c 为电网三相电压, R_N 为中性点接地电阻, C_1 、 C_2 、 C_T 为对地电容, R_d 为故障点的过渡电阻。

根据上述的单相接地故障示意图, 其故障零序等值电路图如图 2 所示。

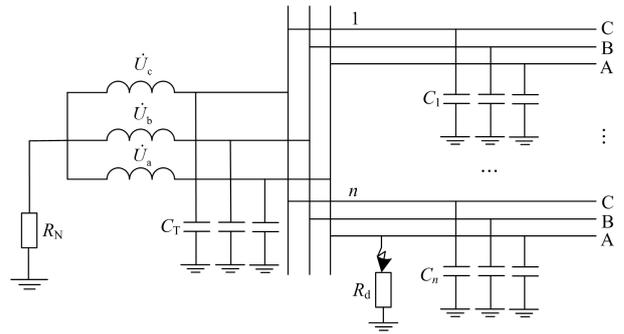


图 1 配电网单相接地故障示意图

Fig. 1 Diagram of single-phase grounding fault in distribution network

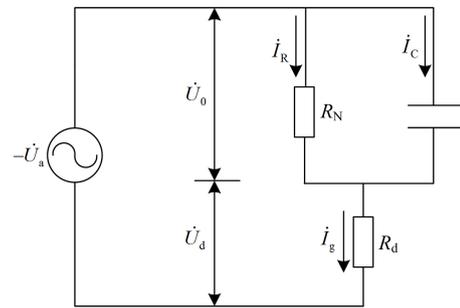


图 2 故障零序等值电路图

Fig. 2 Zero sequence equivalent circuit diagram of fault

图 2 中 \dot{U}_0 为中性点位移电压, \dot{U}_d 为故障点电压, i_g 为流过故障线路的故障电流, C 为单相对地的电容(假设三相对地电容相等), 根据故障时的零序等值电路图, 可以分析出故障电流 i_g 的表达式为

$$i_g = \frac{-\dot{U}_a}{R_d + \left(\frac{1}{\frac{1}{R_N} + j3\omega C} \right)} \quad (1)$$

同时推导出中性点的位移电压 \dot{U}_0 为

$$\dot{U}_0 = \frac{-\dot{U}_a}{R_d \left(\frac{1}{R_N} + j3\omega C \right) + 1} \quad (2)$$

假设接于同一母线上的所有出线的对地电容为 C_Σ , 故障线路 n 的自身对地电容为 C_n , 则故障出线的零序电流为

$$3i_{0n} = \frac{-\dot{U}_a}{R_d + \left(\frac{1}{\frac{1}{R_N} + j3\omega(C_\Sigma - C_n)} \right)} \quad (3)$$

小电阻接地系统配备的电流保护为零序过流保护, 即测量量超过整定量时, 保护才会启动。保护

的整定值需躲过变电站各线路的最大电容电流值, 假设线路 n 的电容电流即为各线路的最大电容电流, 考虑一定的可靠系数 K'_k , 则其零序保护整定值为

$$I_{zd} = K'_k \cdot U_a 3\omega C_n \quad (4)$$

令故障出线的零序电流等于线路的零序保护整定值, 即 $3I_{0n} = I_{zd}$ 。计算后得出线路零序保护临界过渡电阻 R_d 的表达式为

$$R_d = \sqrt{\left(\frac{1}{3\omega C_n K'_k}\right)^2 - \left(\frac{3\omega C_{\Sigma-n} R_N^2}{1 + (3\omega C_{\Sigma-n})^2}\right)^2} - \frac{R_N}{1 + (3\omega C_{\Sigma-n})^2} \quad (5)$$

假设某一变电站同一母线上的所有出线的对地电容电流为 150 A, 故障出线 n 对地电容电流为 40 A, 可靠系数取 1.5, 中性点接地电阻为 11 Ω , 代入式(5)后, 得出其零序电流保护动作的临界过渡电阻值仅为 85 Ω 。而人身触电其电阻一般在 1 500 Ω 以上, 小电阻接地系统不能保证人身安全。

为更好地研究小电阻接地系统实际运行情况, 根据实际线路建立电容电流为 150 A 的仿真模型, 通过改变故障点的过渡电阻值, 研究故障线路零序电流变化情况。总设 7 条馈线, 其中 3 条架空线路, 4 条电缆线路。中性点接地电阻为 11 Ω , 线路 1-7 电容电流依次为 8.47 A, 5.02 A, 6.36 A, 36.78 A, 38.90 A, 35.36 A, 故障模拟在线路 4 进行, 通过改变故障点的过渡电阻值, 分析其零序过流保护是否可以切断故障线路, 从而保证人身安全。

图 3—图 6 依次为进行金属性接地、85 Ω 、500 Ω 、1 500 Ω 故障线路零序电流仿真结果图。通过对该系统的保证定值的分析及仿真的数据, 分析在不同过渡电阻下保护能否可靠动作, 分析小电阻接地系统的选线死区问题。

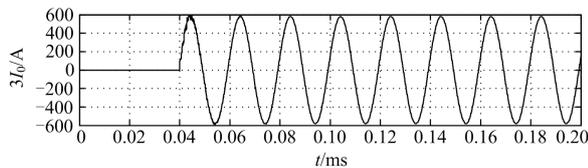


图 3 金属性接地故障线路零序电流($3I_0=421$ A)

Fig. 3 Zero sequence current of metal grounded fault line ($3I_0=421$ A)

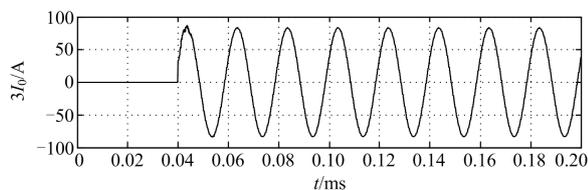


图 4 85 Ω 接地故障线路零序电流($3I_0=60.5$ A)

Fig. 4 Zero sequence current of 95 Ω fault line ($3I_0=60.5$ A)

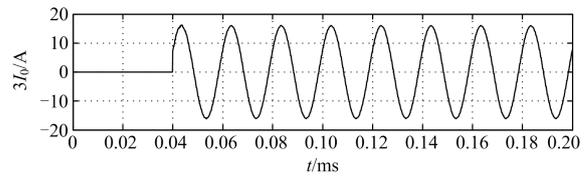


图 5 500 Ω 接地故障线路零序电流($3I_0=11.3$ A)

Fig. 5 Zero sequence current of 500 Ω fault line ($3I_0=11.3$ A)

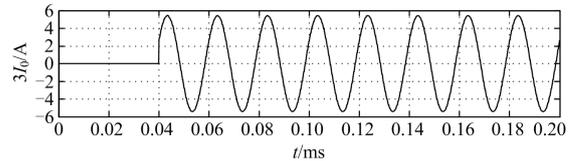


图 6 1 500 Ω 接地故障线路零序电流($3I_0=3.89$ A)

Fig. 6 Zero sequence current of 1 500 Ω fault line ($3I_0=3.89$ A)

通过对上述仿真计算得知: 其故障线路的零序电流受过渡电阻影响较大。根据实际运行情况可知: 考虑可靠系数后, 线路的零序保护定值可设为 60 A。对于该系统而言, 在发生金属性接地故障时, 其故障线路的零序电流达 412 A, 可以快速启动保护切断故障线路。但受过渡电阻影响较大, 在过渡电阻为 85 Ω , 其故障线路的零序电流即达到整定值, 出现选线死区。

同时在小电阻接地系统中, 不同的保护定值其过渡电阻选线死区临界值不同, 对于线路不同的保护定值, 对过渡电阻临界值进行了计算, 其零序电流保护整定值与允许的最大接地电阻对应的关系如表 1 所示。

表 1 不同的保护整定值对应的选线过渡电阻临界值

Table 1 Critical values of line selection transition resistance corresponding to different protection setting values

| 中性点电阻值/ Ω | 保护整定值/A | 过渡电阻临界值/ Ω |
|------------------|---------|-------------------|
| 11 | 30 | 180 |
| | 40 | 130 |
| | 50 | 105 |
| | 60 | 85 |
| 16 | 30 | 175 |
| | 40 | 127 |
| | 50 | 98 |
| | 60 | 84 |

同时, 目前学者提出了利用小电阻接地选线装置进行故障选线, 为验证其选线的效果, 通过现场试验来验证其小电阻接地选线装置的选线能力, 其试验的结果如表 2 所示。

表 2 小电阻接地选线装置在不同过渡电阻下单相接地故障试验

Table 2 Single phase grounding fault test of small resistance grounding line selection device under different transition resistance

| 接地故障 线路 | 故障点 电阻/ Ω | 各相电压/V | | | 中性点 电压/V | 各馈线零序电流/A | | | | | | 选线结果 |
|-------------|---------------------|---------|---------|---------|-------------|-----------|------|------|------|------|------|-------------|
| | | A | B | C | | 线路 1 | 线路 2 | 线路 3 | 线路 4 | 线路 5 | 线路 6 | |
| 真培 2 A 相 | 1 000 | 5 941.4 | 6 054.0 | 6 088.2 | 75 | 0.6 | 5.7 | 0.3 | 0.15 | 0 | 0 | 无动作 |
| 真培 2 A 相 | 2 000 | 5 977.9 | 6 029.0 | 6 044.8 | 27 | 0.3 | 2.8 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | 无动作 |
| 真培 2 A 相 | 3 000 | 5 989.2 | 6 022.0 | 6 044.5 | 13 | 0.15 | 1.95 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | 无动作 |
| 真培 2 A 相 | 3 500 | 6 007.3 | 6 029.6 | 6 047.2 | 8 | 0.15 | 1.65 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | 无动作 |
| 真培 2 A 相 | 5 000 | 5 995.6 | 6 008.8 | 6 020.2 | 2 | 0.15 | 1.2 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | 无动作 |
| 真培 2 A 相 | 瞬时性 接地 | 281.3 | 8 738.2 | 10 608 | 3 945 | 30.7 | 326 | 19.8 | 5.3 | 0.95 | 0.95 | 真培 2 A 相 |

由表 2 可以看出,通过对上述的现场试验发现,该小电阻接地选线装置只在瞬时性接地故障时动作了,而对于过渡电阻在 $1\ 000\ \Omega$ 及其以上时,均无任何动作。主要是因为很多接地选线装置利用中性点电压启动,从试验发现,在过渡电阻在 $1\ 000\ \Omega$ 及其以上时,中性点电压太小,在 $75\ \text{V}$ 及以下,无法启动保护。

而对于人体触电,无论是人体直接接触(电阻 $> 1\ 500\ \Omega$)或者是导线断线(电阻 $> 500\ \Omega$)为高阻接地故障,故障电流的零序电流为十几安培或几安培,远远小于保护整定值。如果发生的是由人身触电而引起的单相接地故障,故障线路零序电流的测量值达不到保护启动的整定值,那么该故障不能被及时处理,此时触电人员的人身安全将受到严重的威胁。

2 中性点智能电阻接地方式

配电网中性点智能动态电阻接地方式的基本原理是对电网原有的小电阻接地方式进行改造,使其变换为中性点经中电阻接地方式。其中又分为中、低电阻接地方式,即 $120\ \Omega$ 和 $60\ \Omega$ 接地方式。智能电阻采用分区法,在发生故障时,根据中性点电压大小将故障类型分为高阻、中阻及低阻三个区域。在低阻故障及中阻故障时,经过延时判断,避免对瞬时性故障的误判;而在高阻故障时,启动中、低电阻动态切换,进行准确选线。其方法及其成套装置原理图如图 7 所示。

如图 7 所示,上部分是接地变压器,用于引出接地中性点,且该部分一次侧与母线相接,二次侧可以带站内负载与装置。下部分中的 R_1 和 R_2 均为中性点接地电阻, QFR_1 和 QFR_2 为切换开关, PT 为中性点电压互感器,用于实时测量中性点电压,

CT 为中性点电流互感器,用于实时测量中性点电流。智能动态电阻接地方式主要是通过 QFR_1 和 QFR_2 两台真空开关接触器的投切配合,实现中性点经中、低电阻接地方式的动态切换,用以解决配电网单相接地故障。而中性点智能动态电阻接地方式能够解决小电阻接地方式中部分供电可靠性低、单相低阻接地时故障点电流过大及单相断线(高阻)接地时零序保护“失灵”等死区问题。

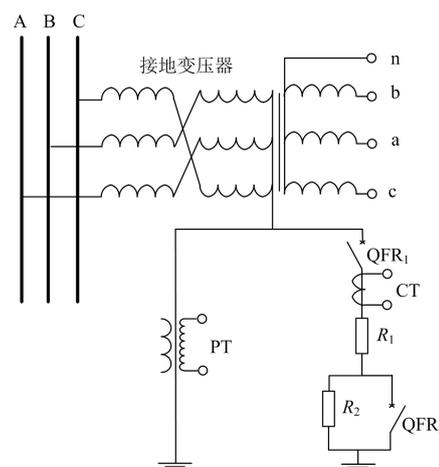


图 7 智能电阻接地方式结构图

Fig. 7 Method and schematic diagram of complete set of devices

2.1 工作原理

(1) 配电网中性点智能动态电阻接地方式首先工作于中电阻状态,即 QFR_1 开关闭合, QFR_2 开关断开,配电网运行于中性点经中电阻(R_1+R_2)接地状态。

(2) 当电网发生单相接地故障时,智能电阻接地方式根据突变量启动法进入故障处理程序,再根据中性点电压 U_N 大小,采用分区法(以 U_{N1} 、 U_{N2} 为

临界值)将故障分为高阻、中阻、低阻三个区域。

(3) 在低阻故障(即 $U_N > U_{N2}$)时, 中电阻虽然降低了故障点的电流大小, 但为了防止中性点电流过大对智能电阻造成影响, 在中电阻(R_1+R_2)运行方式下, 由安装在变电所各馈线的零序电流互感器检测各馈线的零序电流, 利用群体比幅法选出故障线路, 再根据要求决定是否切除故障线路。

(4) 在中阻故障(即 $U_{N1} < U_N < U_{N2}$)时, 因为中阻故障不是人身触电, 因此在智能电阻可承受的时间范围内, 给予一定的延时时间 T 判断。如果是瞬时性故障, 则可以通过中电阻的阻尼作用消弧, 当中性点位移电压 U_N 小于故障恢复电压 U_k , 则故障消除。而如果 $U_N > U_{Nk}$, 则发生永久性故障, 则就要在中电阻(R_1+R_2)进行选线跳闸, 进而可以消除对瞬时性故障的误判, 提高供电可靠性。

(5) 在高阻故障(即 $U_N < U_{N1}$)时, 由于人身触电属于高阻接地, 此时的零序电流较低, 灵敏度低。为防止人身触电危险, 则立刻合上 QFR_2 开关, 动态切换为低电阻 R_1 接地方式, 提高故障线路零序电流值, 使其满足灵敏度要求, 再利用群体比幅法进行快速、准确选线, 保障电网的稳定运行和人身安全。

2.2 对人身触电的处理

人身触电属于高阻接地故障, 其故障点的过渡电阻大, 从而造成故障线路的零序电流小, 存在零序保护难以启动, 保护失灵易造成伤亡事故。本文提出的中性点智能电阻接地方式, 利用突变量启动法进行故障启动, 针对小电阻接地方式的定值保护存在高阻选线死区问题, 该方法在启动后通过中性点电阻助增故障线路的零序电流, 再通过群体比幅

法进行故障选线。

人身触电为高阻接地故障, 综合考虑两种触电原因, 保护设备需满足 1500Ω 过渡电阻识别能力才能处理人身触电问题。发生人身触电时, 其中性点电压较低 ($U_N < U_{N1}$), 判断对于高阻接地故障, 方法对高阻接地的处理是不通过延时, 直接切除故障线路。同时针对人身触电引起的高阻接地故障, 其故障线路零序电流较小, 智能切换为低电阻 R_1 运行下, 助增故障线路的零序电流, 有利于选线。快速选出故障线路, 从而保证人身安全。

3 现场试验

为了验证基于中性点智能动态电阻接地方法对单相接地故障处理的能力, 及对永久性故障的选线准确性, 特别是在发生人身触电时高阻接地时的选线能力, 在国家电网公司配电网智能化应用及关键设备联合实验室(漯河真型试验场)进行现场测试。

3.1 试验环境

试验网通过集中电容模拟线路分布电容。总设 6 条线路, 试验时各线路配置为 I 真培线 1: $2 \mu F \times 3 + 4 \mu F \times 3 \approx 18 \mu F$ 电容, $1.6 mH \times 3$ 串抗; II 真培线 1: $1.6 mH \times 3$ 串抗; III 真培线 1: $4 \mu F \times 3 \approx 12 \mu F$ 电容; IV 真培线 1: $1 \sim 2 km$ 电缆(折算 $0.88 \mu F \times 3$); I 真城线 1: 架空线路; II 真城线 1: 架空线路。试验调整系统的电容电流为 65 A。试验在 II 真培故障点 2 进行。

在母线、故障点及各馈线线路装设有录波器的节点采集三相电压、故障点电流和馈线零序电流。试验线路结构如图 8 所示。系统的三相电压、故障点电流、各馈线零序电压为互感器二次侧值。

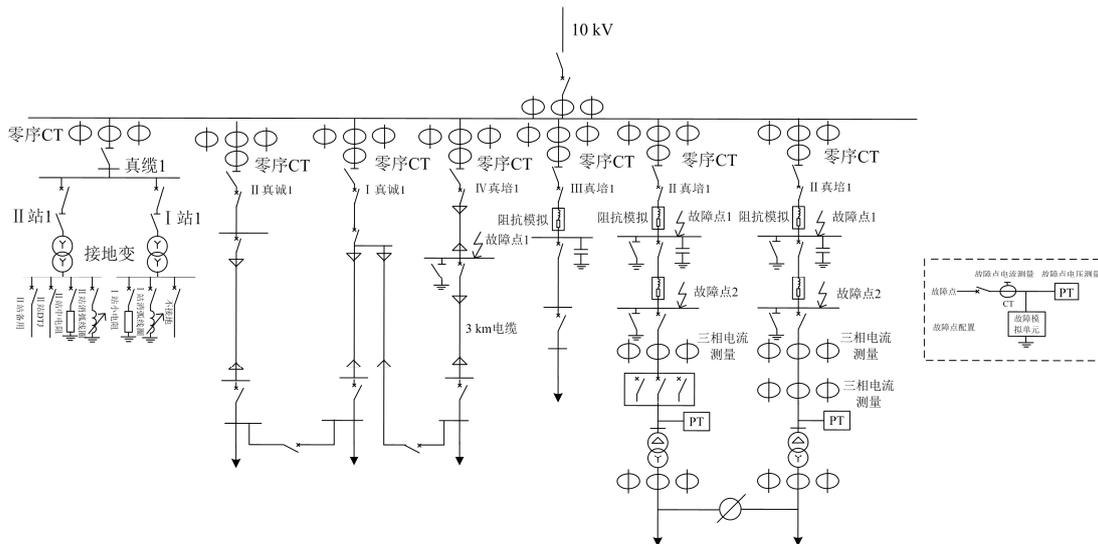


图 8 现场试验拓扑图

Fig. 8 Topology diagram of field test

3.2 试验结果

试验时,通过在线路2故障2改变接地的不同电阻进行高阻接地故障模拟,分别对A、B、C三相进行故障模拟。对于永久性高阻接地故障,考虑到有人身触电的风险,为保证人身安全,需通过断开QFR₂开关,助增故障直流电流,通过群体比幅法直接进行选线处理。方法在中性点电阻为60Ω时,模拟的在不同过渡电阻下故障点各馈线零序电流及方法的选线结果如表3所示。

通过在高阻接地故障下对提出的方法进行了试验,提出的中性点智能电阻接地方式在故障点电阻

在5000Ω及其以下均能对故障进行识别并处理,对于高阻接地故障,能快速进行故障选线。对于不管是人身直接接触电(电阻1500~2500Ω)还是绝缘导线断线引发的触电(电阻500~1000Ω)方法均可以快速进行选线处理,从而保证了人身安全。

由表3可以看出,通过提出的中性点智能电阻进行了高阻永久性快速选线现场试验。试验结果证明:提出的方法对于高阻永久性接地试验,考虑到人身触电为高阻接地故障,方法直接进行快速选线处理,且在发生永久性单相接地过渡电阻为5000Ω及其以下均准确选出了故障馈线,可以保证人身安全。

表3 不同过渡电阻下单相接地故障试验

Table 3 Single-phase grounding fault test under different transition resistance

| 接地故障线路 | 故障点电阻/Ω | 相电压/V | | | 中性点电压/V | 各馈线零序电流/A | | | | | | 选线结果 |
|-----------|---------|--------|--------|--------|---------|-----------|------|------|------|------|------|------|
| | | A | B | C | | 线路1 | 线路2 | 线路3 | 线路4 | 线路5 | 线路6 | |
| 真培2 A相 | 1000 | 5757.7 | 5889.1 | 6423.3 | 396 | 2.12 | 5.43 | 1.52 | 0.32 | 0.00 | 0.00 | 线路2 |
| 真培2 A相 | 2000 | 5915.8 | 5970.5 | 6253.1 | 197 | 1.05 | 2.71 | 0.75 | 0.15 | 0.00 | 0.00 | 线路2 |
| 真培2 A相 | 3000 | 5935.9 | 5971.5 | 6162.8 | 128 | 0.75 | 1.84 | 0.63 | 0.15 | 0.00 | 0.00 | 线路2 |
| 真培2 A相 | 3500 | 5972.8 | 5991.2 | 6173.7 | 102 | 0.62 | 1.65 | 0.45 | 0.15 | 0.00 | 0.00 | 线路2 |
| 真培2 A相 | 5000 | 5964 | 5982.2 | 6101.2 | 67 | 0.45 | 1.23 | 0.32 | 0.15 | 0.00 | 0.00 | 线路2 |

4 结语

(1) 人身触电为高阻接地故障,其继电保护装置需满足1500Ω及其以上故障的识别与处理能力,才能处理人身触电问题。

(2) 小电阻接地方式存在高阻选线死区,在过渡电阻为200Ω以上,其零序的零序保护不能选出故障线路,不能处理人身触电问题,无法保证人身安全。

(3) 中性点智能电阻接地方式对于人身触电而引发的高阻接地故障,能快速进行选线,保证了人身安全,永久性接地故障的接地电阻识别度可达到5000Ω。

参考文献

- [1] 魏秀宁,杨悦群,王淦彪,等. 供电作业人身安全风险评估与控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(8): 105-110.
WEI Xiuning, YANG Yuequn, WANG Ganbiao, et al. Human safety risk evaluation and control of power-supplying operation[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2016, 28(8): 105-110.
- [2] 候义明. 配电网接地与人身安全[C] // 2018年配电网接地故障检测处理与新保护技术论坛, 2018年6月12-14日, 河南, 郑州: 1-41.

- [3] 本书编写组. 全国电力事故和电力安全事件典型案例(2016年版)[M]. 杭州: 浙江人民出版社, 2016.
- [4] 本书编写组. 全国电力安全生产人身伤亡典型案例(2016年版)[M]. 杭州: 浙江人民出版社, 2016.
- [5] 徐玉琴, 杨浩, 李鹏. 不同接地方式电缆型配电网单相接地故障下的可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 41-47.
XU Yuqin, YANG Hao, LI Peng. Reliability evaluation of different grounding cable networks on single-phase grounding fault[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 41-47.
- [6] 李朝晖, 段绍辉, 郑志铿. 中性点小电阻接地配电网单相接地故障人身安全性试验研究[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(9): 40-42.
LI Zhaohui, DUAN Shaohui, ZHENG Zhikeng. Research on human safety test under single phase grounding fault of distribution network with neutral point resistor grounding[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(9): 40-42.
- [7] 干耀生, 唐庆华, 方琼, 等. 城市中压配网中性点小电阻接地方式分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(3): 138-141.
GAN Yaosheng, TANG Qinghua, FANG Qiong, et al. Analysis of low-resistance neutral grounding in urban medium-voltage power grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2013, 25(3): 138-141.

- [8] 姜宪国, 王增平, 张执超, 等. 基于过渡电阻有功功率的单相高阻接地保护[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 187-193.
JIANG Xianguo, WANG Zengping, ZHANG Zhichao, et al. Single-phase high-resistance fault protection based on active power of transition resistance[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 187-193.
- [9] 张林利, 曹丽丽, 李立生, 等. 不接地系统单相断线故障分析及区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 1-7.
ZHANG Linli, CAO Lili, LI Lisheng, et al. Analysis and fault section location of single-phase open fault for ungrounding system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 1-7.
- [10] 关海鸥, 杜松怀, 苏娟, 等. 一种触电信号的自动快速检测模型[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2328-2335.
GUAN Haiou, DU Songhuai, SU Juan, et al. An automatic and quick detection model of electric shock signals[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2328-2335.
- [11] 孙宇新. 触电原因分析及预防措施[J]. 中国安全生产科学技术, 2001, 21(6): 42-43.
SUN Yuxin. Cause analysis and preventive measures of electric shock[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2001, 21(6): 42-43.
- [12] 韩晓慧, 杜松怀, 苏娟, 等. 触电信号暂态特征提取及故障类型识别方法[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3591-3596.
HAN Xiaohui, DU Songhuai, SU Juan, et al. Fault transient feature extraction and fault type identification for electrical shock signals[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3591-3596.
- [13] 沈海滨, 陈维江, 王颂虞, 等. 10 kV 架空线路雷击断线故障的模拟试验研究[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 117-121.
SHEN Haibin, CHEN Weijiang, WANG Songyu, et al. Simulation tests on lightning stroke-caused wire-breakage of 10 kV overhead transmission line[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 117-121.
- [14] 陈忠仁, 张波, 黄健. 配电网单相接地故障的识别与智能补偿控制[J]. 电瓷避雷器, 2014(2): 66-76.
CHEN Zhongren, ZHANG Bo, HUANG Jian. Identification and intelligent compensation control of single-phase grounding[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(2): 66-76.
- [15] 徐丙垠, 李天友, 薛永端. 配电网触电保护与中性点接地方式[J]. 供用电, 2017, 34(5): 21-26.
XU Bingyin, LI Tianyou, XUE Yongduan. Electric shock protection and earthing methods of distribution networks[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(5): 21-26.
- [16] 马杰, 李磊, 李乃永, 等. 基于故障信息的高阻接地故障辨识与定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 74-78.
MA Jie, LI Lei, LI Naiyong, et al. Identification and location of high-resistance grounding fault based on fault records[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 74-78.
- [17] 陈文广, 鲁海亮, 文习山. 交流电流下土壤电阻率变化规律及仿真分析[J]. 电瓷避雷器, 2018(2): 156-163.
CHEN Wenguang, LU Hailiang, WEN Xishan. Variation rule and simulation analysis of soil resistivity under AC current[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(2): 156-163.
- [18] 晏烽. 110 kV 沙土变同等条件下不同中性点接地设备故障处理对比试验及其分析[J]. 电瓷避雷器, 2018(2): 106-110.
YAN Feng. Comparative test and analysis of fault treatment in different neutral ground[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(2): 106-110.
- [19] 潘文霞, 柴守江, 周建文, 等. 基于最低合理可行准则的接地网安全风险评估[J]. 电工技术学报, 2017, 32(21): 128-134.
PAN Wenxia, CHAI Shoujiang, ZHOU Jianwen, et al. Risk assessment research based on as low as reasonably practicable principle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21): 128-134.
- [20] 电力安全工作规程发电厂和变电站电气部分: GB 26860—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [21] 李景禄. 实用配电网技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [22] 李景禄. 电力系统安全技术[M]. 北京: 中国科学出版社, 2009.
- [23] HE Yuqing, CHEN Yuehui, YANG Zhiqiang, et al. A review on the influence of intelligent power consumption technologies on the utilization rate of distribution network equipment[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 183-193. DOI: 10.1186/s41601-018-0092-2.
- [24] PATTANAIK J K, BASU M, DASH D P. Opposition-based differential evolution for hydrothermal power system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 40-56. DOI: 10.1186/s41601-017-0033-5.
- [25] 何润华, 潘靖, 霍春燕. 基于变电抗的接地选线新方法[J]. 电力自动化设备, 2008, 27(12): 48-52.
HE Runhua, PAN Jing, HUO Chunyan. Faulty line selection based on variable reactance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 27(12): 48-52.

收稿日期: 2018-03-31; 修回日期: 2018-08-25

作者简介:

熊卫红(1971—), 男, 教授级高工, 从事电力系统自动化专业工作; E-mail: 5358692@qq.com

毛兴华(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网技术、电力系统防雷接地技术等。E-mail: 879723963@qq.com

(编辑 魏小丽)