

DOI: 10.7667/PSPC171867

一种新型配电网在线监测装置的研制

谭卫斌¹, 张维², 权立³, 陈勇¹, 宋国兵², 张敏¹

(1. 珠海许继电气有限公司, 广东 珠海 519000; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049;
3. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为解决配电网中传统的故障指示器无法准确识别小电流单相接地故障与定位问题, 引入了基于暂态量零模的参数识别法, 研制了一种应用于配电网的新型在线监测装置。三相探头通过自取电模块从线路电流中获取能量为其自身提供电源, 利用罗氏线圈采集线路电流, 采用非接触式电压传感测量线路电压, 通过一种基于近距离无线通信的分布式同步录波方法实现故障波形的录制。通信终端汇总故障波形并对其进行零序矢量合成, 自动完成对单相接地故障的识别与告警指示, 为解决小电流单相接地故障定位和提升配网自动化覆盖率提供了一种新的解决方法。现场实验结果证明了该装置的实用性和对小电流单相接地故障检测与定位的准确性。

关键词: 配电网; 在线监测; 参数识别法; 同步录波; 单相接地故障

Development of a new on-line monitoring device for distribution network lines

TAN Weibin¹, ZHANG Wei², QUAN Li³, CHEN Yong¹, SONG Guobing², ZHANG Min¹

(1. Zhuhai XJ Electric Co., Ltd., Zhuhai 519000, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to solve the problem that the traditional fault indicator in distribution network can't distinguish and locate the single-phase grounding fault in small current system, a model identification method based on transient zero sequence network is introduced, and a new on-line monitoring device for distribution network is developed. The three-phase probes obtain energy from the line to provide power for their own use through its self power module, use Roche coil to acquire the circuit, and measure voltage by the non-contact sensors, and realize the recording of fault waveform through distributed synchronous recording method based on short distance wireless communication. The communication terminal summarizes the fault waveforms and makes zero sequence vector synthesis. It automatically completes the identification and alarm instruction for single-phase grounding fault, and provides a new solution to solve the problem of the single-phase grounding fault location and improve the coverage rate of distribution network automation. The field experiment results show the practicability of the device and the accuracy of the detection and location of the single phase grounding fault in small current system.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52020116000F) and Science and Technology Project of Guangdong Province (No. 2015B010128006).

Key words: distribution network; on-line monitoring; model identification; synchronous recording; single-phase grounding fault

0 引言

我国 10 kV 配电网系统主要采取的是中性点非有效接地运行方式^[1]。据统计表明, 10 kV 配网系统

中约 70% 以上的非计划停电都是由单相接地故障所导致。因为在小电流系统中, 当单相接地故障发生时, 线路的故障电流小, 所以传统的故障指示器很难正确地识别该故障。而且, 传统的故障指示器^[2]为三相分布式安装, 无法获取准确的零序相量。此外, 纵然能有效地获取零序矢量, 应用现有的稳态零序电流比较法^[3]、零序电流突变法^[4]、五次谐波

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(52020116000F); 广东省科技计划项目资助(2015B010128006)

法、零序首半波法^[5]、暂态有功功率方向法^[6]等都有一定的缺陷或应用的限制条件;其次,采用信号注入法^[7]的故障指示器,需额外增加信号发生装置,不利于配电网维护。随着 2015 年国家电网公司科技项目《提高配电网故障处理能力的关键技术与开发》的结题验收以及现场应用表明,基于暂态量零模的参数识别法^[8]是一种非常有效的解决单相接地故障识别与区段定位的新方法。本文基于该故障检测原理,设计了一种新型配电网在线监测装置。该装置从线路电流中获取能量为自身提供电源,集成 CT 取电最大效率点跟踪,采用多通道电源管理体系,对自取电、后备电池、超级电容实现智能化供电切换管理;可实时采集相电压和相电流,通过无线远传到主站,实现远程实时在线监测;具备故障录波功能,在故障发生后,装置汇总三相录波数据进行零序相量合成,自动识别单相接地故障并告警指示。

1 小电流单相接地故障检测原理

本装置中采用的是基于暂态量零模的参数识别法对小电流系统中发生的单相接地故障进行检测和识别,现对其基本原理进行介绍。

基于参数识别的继电保护原理是通过识别网络元件参数获取故障网络内部信息并构成保护判据。健全元件参数在故障前后不发生变化,故障元件参数在故障前后发生变化。因为配电网线路长度有限,所以配电网线路在一定频带内的物理模型可以采用π模型^[9]进行等效简化。再依据线路零序阻抗串联谐振、并联谐振公式,在 150~1 000 Hz 特定频带^[10]内,电感补偿作用可忽略,中性点非有效接地配电系统发生单相接地故障后对应的零序网络图以及等效简化的电容模型^[11]如图 1 所示。

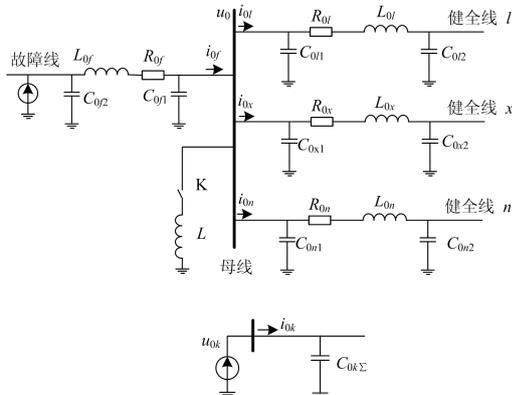


图 1 零序网络等效图与零序等值简化电路图

Fig. 1 Zero sequence network equivalent diagram and zero sequence equivalent simplified circuit diagram

采用单端口网络的参数识别思想,健全线路和故障侧都可等效为一对地电容,电流电压有如式(1)所示关系。

$$i_{0k} = C_{0k\Sigma} \cdot \frac{du_{0k}}{dt} \quad (1)$$

式中, i_{0k} 、 u_{0k} 、 $C_{0k\Sigma}$ 分别为线路 k 的零序电流、电压和对地电容值之和。这样,已知线路 k 的零序电流和电压,采用式(1)就可求得线路 k 的等效电容参数值。在单相接地故障发生后,故障线路的暂态零序电流与实际参考方向相反^[12],所以故障线路的零序电容模型参数为负值,故该特征可作为单相接地故障检测的依据。

本装置基于上述检测原理,采用三个探头实时采集各相电压和电流,完成故障发生时刻的录波并上送到通信终端进行零序电压和电流的矢量合成,得到故障发生时刻的零序电压和电流的暂态量,对其进行 150~1 000 Hz 带通滤波处理后,采用式(1)求取线路的对地电容参数值,然后判断其对地电容参数的正负极性,即可识别出线路是否为故障线路。如果线路的对地电容参数为负值,则判定该线路为故障线路,即为界内故障;相反则为健全线路,即为界外故障。该单相接地故障检测方法是基于网架参数,因此中性点接地方式、故障发生时刻、网架结构、电弧间歇程度等因素并不影响其判定结果,所以故障识别的准确性和可靠性高,并且无需整定值^[13]。

在线监测装置的具体应用如图 2 所示。在配电网线路中,在各个线路节点上安装本设计的在线监测装置。若 11 号装置与 12 号装置之间的线路发生单相接地故障时,1—11 号装置计算出的零序对地电容 C 都为正值,则亮灯进行告警。沿着线路电流方向,最后一个亮灯装置的末端区段则为单相接地故障区间,这样,可极大地方便主站和工程维护人员进行故障定位与检修^[14]。

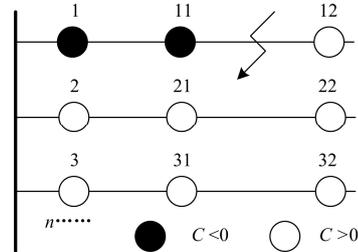


图 2 在线监测装置应用示意图

Fig. 2 Application of the on-line monitoring device

2 在线监测装置软硬件设计

新型在线监测装置由三个探头和一台通信终端

两部分组成,如图3所示。三个探头与传统的故障指示器类似,可带电安装在10 kV配电网线路上通过电流感应取电,既能实时采集电流、电压等模拟量,又能自动识别相间短路故障并闪灯指示,还能通过短距离无线通信网与通信终端交互实时测量数据和故障录波数据。而且,通信终端识别出单相接地故障后可控制探头进行闪灯告警。本文将着重介绍探头的软硬件设计。

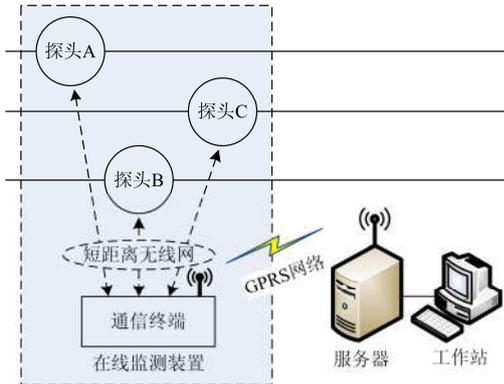


图3 在线监测装置整体结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the on-line monitoring device structure

图4所示的是探头的整体方案设计,探头主要由模拟量采集模块、CT取电及电源系统、CPU数据处理平台以及短距离无线通信四大部分组成。

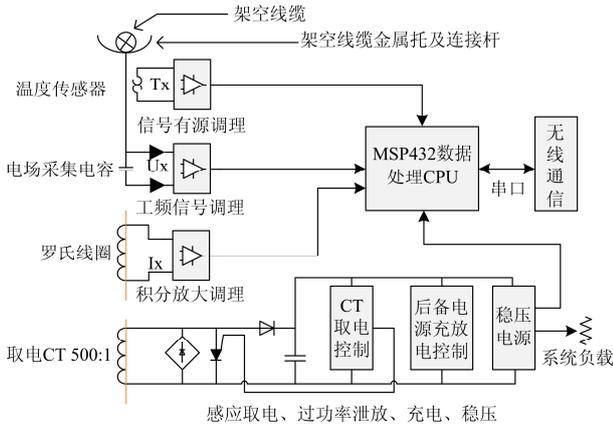


图4 探头的整体设计方案原理图

Fig. 4 Schematic diagram of the probe overall design

2.1 电流采集模块设计

电流采集的主元件是罗氏线圈,它是一种微分电流传感器,输出的信号是电流对时间的微分,只需要设计一个模拟积分器就可以真实还原出输入电流^[15]。基于上述原理,并考虑到低功耗要求,本设计选择TI公司的OPA2333运放元件设计的积分电

路如图5所示。

本设计采用电子式互感器原理实现电流采集,具有抗电磁饱和、有效频带宽并且测量精度高的优点,而且质量轻,与传统电流互感器比较,大大降低了成品探头的重量。整个电路主要由积分放大、隔直通交、相位校正共三部分构成。其中:积分倍率为 $R_5 \parallel \frac{1}{j\omega C_3} / R_3 = 8.946$; 相位校正倍率为 $\frac{1}{1+j\omega R_1 C_1}$, 这里计算得出的结果为0.995; 隔直电路的倍率为 $\frac{R_6}{R_6 + \frac{1}{j\omega C_4}} = 1$; 后端输出的放大电路倍数为 $1 + \frac{R_8}{R_7}$, 这里为3.4。所以该电路的总放大倍数为 $8.946 \times 0.995 \times 1 \times 3.4 = 30.26$, 如果要改变放大倍数,只需对 R_2 、 R_3 、 R_7 和 R_8 这几个参数进行修改即可。

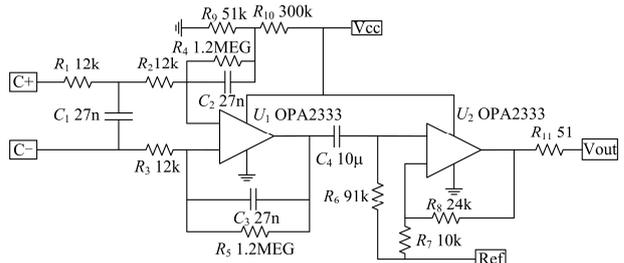


图5 积分电路设计原理图

Fig. 5 Schematic diagram of integrating circuit design

2.2 电压采集模块设计

本设计采用非接触式电压传感原理提出了一种10 kV架空线路对地电压的测量方法,其原理如图6所示。架空线路感应板对大地的非接触等效电容 C_2 作为低压臂电容,架空输电线路与传感器感应板之间的接触电容 C_x 和取样电容 C_1 为高压臂电容^[16]。电压信号从取样电容 C_1 两端经过匹配电阻引出到数据采集系统。

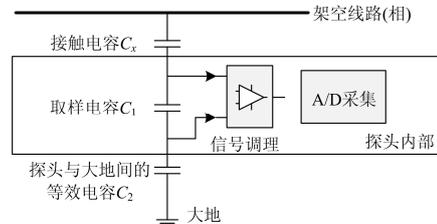


图6 电容分压测量模块原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the principle of capacitance partial voltage in measurement module

架空线绝缘层关联着接触电容 C_x 的大小:当导线直接裸露时 $C_x \approx \infty$, 则可认为 $\dot{u}_x = \dot{U}$; 当绝缘导

线带有绝缘层时,一旦探头安装完毕则 C_x 电容值就

确定,即 $\frac{C_2 C_x}{C_1 C_x + C_2 C_x + C_1 C_2}$ 为恒定值,采样电压 \dot{u}_x

与相电压 \dot{U} 成正比。因此,探头与大地的等效电容 C_2 的值直接影响传感器的分压比,故可将 C_1 电容两端的电压 \dot{u}_x 计算公式近似为

$$\dot{u}_x = \dot{U} \frac{\frac{1}{C_1}}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} = \dot{U} \frac{C_2}{C_1 + C_2} \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{eS}{4\pi kd} \quad (3)$$

式中: \dot{U} 为线路相电压; C_1 是采样电容; C_2 为探头与大地间的等效电容; e 是电介质常数; k 为静电力常量; d 为电容极板的间距; S 为电容极板的正对面积(即线路板敷铜面积)。

由于采样电容 C_1 的容量已知且固定不变,则根据上述式(2)易知,影响相电压采样幅值大小的决定因素为探头与大地间的等效电容 C_2 。而 C_2 的电容值与架空线对地距离、天气湿度、地面干燥程度有关^[17],但是安装后基本恒定不变或者缓慢变化(如天气变化)。本设计根据经验数据确定了传感器高压臂

电容 C_1 为155 nF,采样的分压比约为1:10 000。特别需要注意的是:本设计应用具有一定的限制条件,只能适用于单回输电线路三角形排列的架空线,而同塔双回或同塔多回输电线路并不适用。

2.3 CT自取电与能量管理模块设计

供电电源是装置长时间可靠运行的基础,本设计中采用多通道电源管理体系,集成了CT取电最大效率点跟踪(CT-MTTP),后备电池管理、超级电容一体化管理^[18],实现智能化供电。

图7是CT取电与能量管理系统的设计示意图,系统主要包括:CT感应取电单元、全波整流单元、低阻大功率可控硅、二极管、电容能量池、过功率防护监控单元、能量搜集单元、微功率负载等。CT感应取电线圈采用纳米晶体材料,双开启结构,初始磁导率低,取电能力强;全波整流采用凌特LT4320芯片,内置同步无损电路和二极管;低阻大功率可控硅、二极管、电容能量池、过功率防护监控单元共同构建过功率防护系统电路。CT感应取电后向电容能量池充电,过功率防护监控单元由低功耗电压监视元件以及比较控制电路组成。当能量池电压大于设定阈值时,过功率防护监控单元自动控制低阻大功率可控硅导通,电流直接跨过能量池进行泄放^[19]。

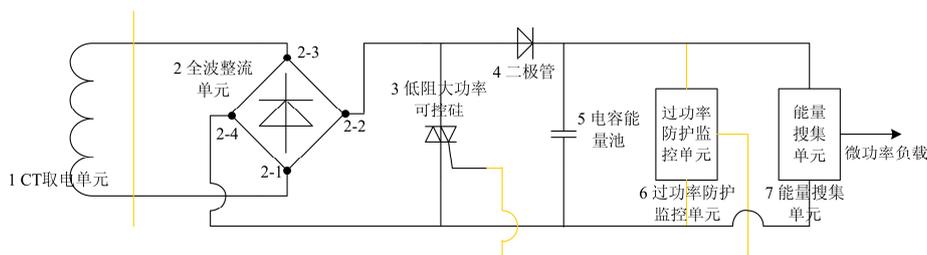


图7 CT取电与能量管理系统设计示意图

Fig. 7 Schematic diagram of CT power-taking and energy management system

本设计的探头可在线路电流5~630 A范围内连续自给取电,在电流大于6 A时即可满足产品全功率运行,有效地延长产品使用寿命。

2.4 基于近距离无线通信的分布式同步录波设计

目前,配电线路对于分布式同步故障录波的方法通常依赖于同步或准同步实时芯片,各通道的模拟量或数字量存储在缓存中,系统通过无线通信交互分别读取各相的故障录波数据,再按照录波数据的时间戳进行数据对齐,实现三相录波数据同步^[20]。该方法的优点是实现方法简单,但是对时间计数准确度要求非常高。通常做法是采用GPS模块进行授时,但生产成本低,占用大量录波数据缓存空间。

本设计基于近距离无线通信设计了一种分布式

同步录波方法,克服了上述缺陷,无需物理通道的直接连接,实现了对三个独立探头的故障录波数据的同步,同时提出并实现了双缓存区架构无线传输存在的时延和拥塞等问题,保障了故障录波数据的实时性和有效性。

分布式同步录波方法实施流程如图8所示。本装置中的通信终端(以下简称主节点)对探头(以下简称从节点)进行周期性时钟同步,各分散从节点实时采集并录波;当任意一个分散从节点检测到故障,则向主节点上送故障时刻标志;主节点接收到故障时刻标志后,广播录波锁定标志;分散从节点收到录波锁定标志后停止录波,并冻结录波数据,回复确认标志。主节点逐一按照故障时段召回分散从节点故障波形数据,并进行数据时间戳对齐(各相的每

个采样数据都有时标, 截取相同时刻的采样点序列), 实现三相同步故障录波。本方法是基于时间戳的对齐, 所以各个从节点的时间同步性要求很高。主节点负责对各从节点时间同步, 时间同步指令采用广播方式以确保从节点收到的时间戳一致。

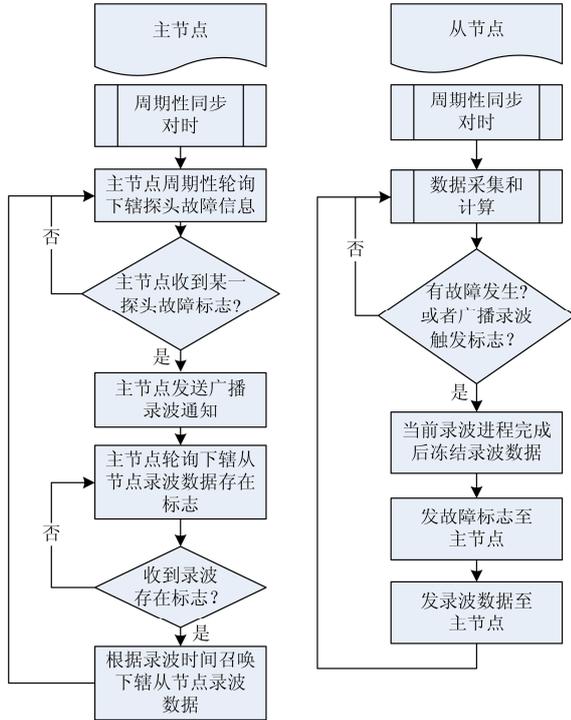


图 8 分散定时同步录波流程图

Fig. 8 Program flow diagram of the distributed time-synchronous recording

3 在线监测装置功能测试

根据以上软硬件设计, 研制出了新型配电网在线监测装置, 现已制成产品投入 10 kV 配网架空线路运行。为了测试装置的整体性能和精度, 本文对电流测量精度、电压采集线性度、取电能量转换效率、能量泄放保护、分布式同步采样定时精度、单相接地故障录波与检测等功能进行了测试。

3.1 电流测量精度测试

因考虑到 CPU 核心控制平台中 ADC 输入的电压范围为 0~3.3 V, 为能计量出输入交流双极性信号, 线路负荷电流到达 660 A 时, 调制输入 ADC 的电压已满偏。因此, 本装置的罗氏线圈设计规格为 1 000 A/966 mV, 额定电流值为 600 A, 有效测量线路负荷电流值在 660 A 以下。从罗氏线圈串入的回路中施加电流, 测量积分器输出端的电压并从探头装置读取到的实际测量电流值如表 1 所示。

测试结果表明, 本设计所研制的探头装置在输入原边电流 0~660 A 范围内, 电流测量的相对误差

小于 0.1%, 测量精度完全满足国网技术要求标准 (0~300 A ±3 A, 300~600 A 1%)^[21]。

3.2 电压采集的线性度测试

探头装置中设计的取样电容 $C_1=155$ nF(取样电容的一极紧贴高压裸导线)。在高压实验室环境中, 取样电容 C_1 距大地垂直距离 1 m, 通过高压调压器向架空线路施加不同幅值的电压, 测量取样电容电压幅值和读取到的装置测量电压值如表 2 所示。

表 1 电流测量精度测试结果

Table 1 Results of current measurement accuracy

原边电流值/A	输出电压值/V	实际测量电流值/A	相对误差/%
0	0.000	0.000	0.0
3	0.013 3	3.340 6	0.056 8
9	0.037 3	9.351 3	0.058 6
15	0.061 4	15.380 7	0.063 4
24	0.097 5	24.450 0	0.075 0
30	0.121 3	30.397 9	0.066 3
90	0.360 3	90.316 5	0.052 8
150	0.599 5	150.297 7	0.049 6
240	0.957 5	240.050 1	0.008 3
360	1.436 5	360.137 8	0.023 0
450	1.795 3	450.078 3	0.013 1
540	2.154 5	540.144 1	0.024 0
600	2.393 3	600.000 0	0.000 0

表 2 取样电容 C1 电压反映架空线电压的精度

Table 2 Results of C1's voltage measurement accuracy

架空线 电压/kV	取样电容 电压/V	测量电压 值/kV	相对误差/%
1.005	0.122	1.053	0.488
2.001	0.221	2.008	0.068
3.005	0.320	2.972	-0.331
4.005	0.423	3.970	-0.350
5.005	0.528	4.983	-0.224
5.995	0.631	5.981	-0.144
7.035	0.735	6.993	-0.418
8.015	0.837	7.982	-0.334
9.040	0.945	9.023	-0.167
10.015	1.048	10.026	0.112

实验测试结果表明, 本设计所研制的探头装置在输入 1.0~10 kV 中低压范围内, 装置的相电压采集模块具有非常高的线性度, 电压测量的相对误差最大为 0.488%, 满足测量精度小于 0.5% 的要求。

3.3 同步定时测试

分布式同步录波功能实现的前提是各个分布式单元探头计时时钟必须同步, 本设计中采用通信单元每 3 min 广播对时的方法, 确保各个探头运行时钟的一致性。为测试同步定时存在的最大偏差, 本

设计中采用监视各个探头接收到报文后立刻从指定 I/O 口发出的对时脉冲信号。使用示波器捕捉每两个探头各自发出的对时脉冲即可直观地显示对时同步效果。如图 9 所示, 从测试结果可得出分布式探头的对时同步最大误差小于 5 μ s。

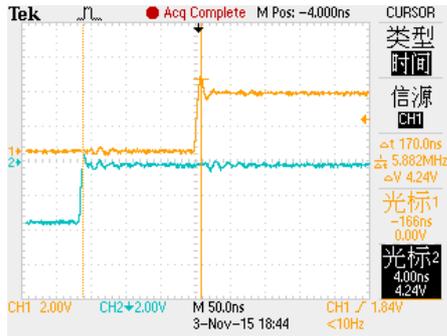
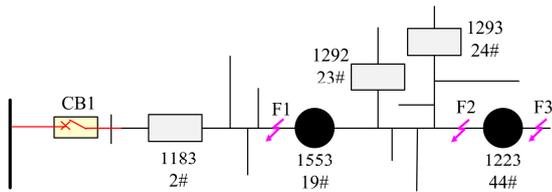


图 9 对时脉冲测试图

Fig. 9 Time pulse test diagram

4 现场试验验证

在北京怀柔选择琉璃庙变电站 10 kV 琉青路线, 更换了 4 台柱上开关, 配套安装具有单相接地检测功能的智能 FTU 和 2 套本项目研制的新型配电网在线监测装置, 都能通过无线公网将信息上传至主站。主站具有单相接地故障判断功能的处理软件, 在主站实现单相接地故障区段定位及处理。琉璃庙变电站琉青线主要为农网架空裸线, 线路总长度为 26.033 km。其中 25.973 km 为架空线路, 新架 JKLYJ/QN-150 钢芯铝绞线 21 896 m, 新架 JL/G1A-150/10 高压导线 16 848 m, 其余部分支线为 JKLYJ/QN-70 钢芯铝绞线, 线路如图 10 所示。琉青线主要以农村及小企业负荷为主, 负荷电流约 100~240 A, 属于单相接地多发线路。全网对地电容电流约为 60 A。



CB1: 变电站出线开关; 19#和44#: 新型配电网在线监测装置

图 10 琉青路线开关和装置布置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of switches and device arrangement on Liu-Qing line

分别在 F1~F3 挂接地线进行相关接地试验, 19# 和 44# 安装有新型在线监测装置, 通过挂钩钩住绝缘线将试验相引至试验保护开关(断路器), 再引至绝缘试验支柱。接地线经接地电阻连接到绝缘杆并

在绝缘试验支柱上接触, 模拟电阻型接地, 接地时间 1~3 s。利用间隙球模拟接地弧光, 间隙球放电持续最长时间为 4 s, 超过 4 s 后自动断开。试验时开关速断保护整定电流值为 120 A, 延时 0 s。本设计装置探头启动录波的突变电压幅值设定为 1.2 kV。

故障发生时, 三个探头分别记录波形并上传至通信终端。通信终端根据时间戳对三相波形进行对齐、裁剪及合成零序, 采用基于暂态量零模的参数识别法对单相接地故障判定, 并上送相应的故障告警信息给主站。主站收到告警信息后召唤故障录波数据然后查询支线的各个开关和装置告警信息并结合线路拓扑结构完成单相接地故障的区段定位。图 11 是 19# 装置的通信终端在 F2 点发生金属性单相接地故障时记录的故障波形图。

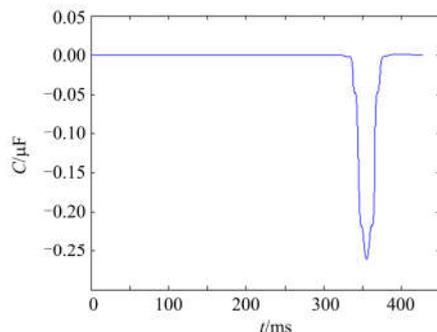


图 11 金属性单相接地故障界内录波图

Fig. 11 Wave record figure of single-phase grounding fault

分别提取 19# 装置和 44# 装置的零序电压和零序电流采样数据, 经过 150~1 000 Hz 带通滤波处理后, 采用式(1)求取对应线路的对地电容参数值, 其结果如图 12 所示。

根据图 12 所示结果, 19# 装置对地电容参数值为“-”, 属于界内故障并闪灯告警; 而 44# 装置对地电容参数值为“+”, 属于界外故障, 无闪灯告警。分别在 F1 上游、F2 区间、F3 下游各区间段进行单相接地故障试验, 两装置记录的结果如表 3 所示。



(a) 19# 零序对地电容

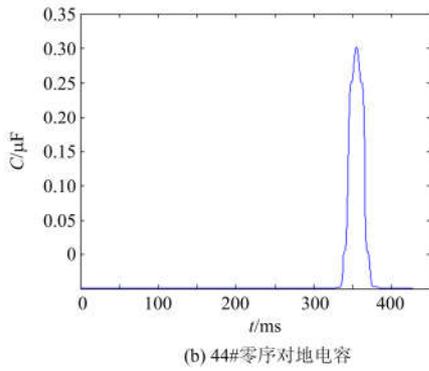


图 12 零序对地电容参数结果

Fig. 12 Zero sequence to ground capacitance parameter results

表 3 各区段对地电容值

Table 3 Ground capacitance value of each segment

故障点	故障类型	19#装置对地 电容值	44#装置对地 电容值
F1 上游	金属性接地	+	+
	500 Ω接地	+	+
	500 Ω接地	-	+
F2 区内	树枝接地	未启动	未启动
	金属性接地	-	+
F3 下游	500 Ω接地	-	-
	金属性接地	-	-

5 结论

本文研制的一种应用于配电网的新型在线监测装置采用了具有抗电磁饱和、有效频带宽、精度高并且重量轻的电子式互感器实时采集线路电流，在输入电流 0~660 A 范围内电流测量精度小于 0.1%；采用了非接触式的电容分压式相电压测量模块，在输入电压为 1~10 kV 范围内，电压的测量精度小于 0.5%，而且线性度非常高；电源运用了 CT 自取电技术，实现智能化供电，在线路电流大于 6 A 时即可满足产品全功率运行。

新型配电网在线监测装置已投入产品应用并完成了单相接地故障现场验证实验，结果表明该装置实用性强，能实时在线监测线路的电流电压信息，具有故障录波功能，能准确识别并定位出小电流系统中过渡电阻不大于 500 Ω 的单相接地故障，弥补了传统故障指示器存在的缺陷。该装置造价低、重量轻、体积小、安装维护方便，适合大面积分布式安装，为解决小电流单相接地故障定位和提升配网自动化覆盖率提供了一种新的解决方法。

参考文献

[1] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 2 版. 北京:

中国电力出版社, 2009: 166-174.

[2] 岳仁超, 孙建东. 新型配电网故障指示器的设计[J]. 电子器件, 2015(4): 845-848.
YUE Renchao, SUN Jiandong. Design of new distribution network fault indicator[J]. Electronic Device, 2015(4): 845-848.

[3] 徐兆慧. 影响小电流接地选线准确度的因素分析[J]. 电力科学与工程, 2015, 31(增刊 1): 93-97.
XU Zhaohui. Analysis of factors affecting the accuracy of low current grounding line selection[J]. Electric Power Science and Engineering, 2015, 31(S1): 93-97.

[4] 杨萃源, 舒勤. 基于线模行波突变的配电网全架空线路单相接地的多端检测定位新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 22-28.
YANG Luoyuan, SHU Qin. A new multiterminal detecting location method of single-phase grounding to the overhead-line for distribution network based on travelling-wave mutation of line-mode[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 22-28.

[5] 刘健, 张志华, 张小庆. 配电网故障处理若干问题探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 1-6.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing. Investigation on fault processing for electric power distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 1-6.

[6] 薛颢, 王自强. 零序功率选线方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(6): 8-10.
XUE Hao, WANG Ziqiang. Method of fault line selection based on zero sequence power[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(6): 8-10.

[7] 战祥新, 郝世勇. 注入法选线在小电流接地系统中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(6): 11-13, 36.
ZHAN Xiangxin, HAO Shiyong. Study of the signal injection method in indirectly earthed power system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(6): 11-13, 36.

[8] 索南加乐, 张超, 王树刚. 基于模型参数识别法的小电流接地故障选线研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(19): 65-70.
SUONAN Jiale, ZHANG Chao, WANG Shugang. Fault line selection in the non-solid earthed network based on the model identification method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(19): 65-70.

[9] 刘健, 芮骏, 张志华, 等. 智能接地配电系统[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 130-134.
LIU Jian, RUI Jun, ZHANG Zhihua, et al. Smart grounding power distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 130-134.

[10] 杨健翔, 常仲学, 豆敏娜, 等. 一种配网单相接地选线的频带自适应获取方法[J]. 电力系统保护与控制,

- 2015, 43(15): 60-66.
YANG Jianxiang, CHANG Zhongxue, DOU Minna, et al. A frequency band adaptive acquisition method for single phase grounding line selection in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 60-66.
- [11] 李森, 宋国兵, 康小宁, 等. 基于时域下相关分析法的小电流接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(13): 15-20.
LI Sen, SONG Guobing, KANG Xiaoning, et al. Time-domain fault line selection based on correlation analysis in neutral indirect ground system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(13): 15-20.
- [12] 宋洪运, 吕艳萍, 夏云非. 小电流接地系统两点单相接地故障选线的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2005, 33(10): 31-35.
SONG Hongyun, LÜ Yanping, XIA Yunfei. Research on fault line selection of single-phase grounding at two localities in power system with neutral unearthed[J]. Power System Protection and Control, 2005, 33(10): 31-35.
- [13] 郭上华, 宋国兵, 张维, 等. 一种无信道配电网单相接地故障自愈方案[J]. 供用电, 2015, 32(8): 64-70.
GUO Shanghua, SONG Guobing, ZHANG Wei, et al. A self-healing solution of single-phase ground fault for distribution network without communication[J]. Distribution & Utilization, 2015, 32(8): 64-70.
- [14] 刘健, 张志华, 张小庆. 配电自动化主站的容错故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 6-11.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing. Fault tolerant fault location method for main station of distribution automation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 6-11.
- [15] 张华伟, 孙越强. 几种非侵入式电流测量技术[J]. 现代电子技术, 2005, 28(21): 80-83, 88.
ZHANG Huawei, SUN Yueqiang. Several non-invasive current measurement techniques[J]. Modern Electronic Technology, 2005, 28(21): 80-83, 88.
- [16] 杜林, 常阿飞, 司马文霞, 等. 一种非接触式架空输电线路过电压传感器[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(11): 93-97.
DU Lin, CHANG Afei, SIMA Wenxia, et al. A non-contact automatic voltage sensor for overhead transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(11): 93-97.
- [17] 杜林, 杨勇, 常阿飞, 等. 输电线路过电压传感器波形解耦及影响其测量精度的相关因素[J]. 高电压技术, 2012, 38(1): 52-58.
DU Lin, YANG Yong, CHANG Afei, et al. Waveform decoupling of transmission line overvoltage sensors and related factors affecting their measurement accuracy[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(1): 52-58.
- [18] 冯小明, 吴国平, 周献飞, 等. 基于非接触式电流互感器取电的故障指示器设计[J]. 电测与仪表, 2014, 51(12): 98-102.
FENG Xiaoming, WU Guoping, ZHOU Xianfei, et al. Fault indicator design based on non contact current transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(12): 98-102.
- [19] 王哲, 焦彦军, 张新国, 等. 高性能故障录波器的方案设计[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(3): 40-42.
WANG Zhe, JIAO Yanjun, ZHANG Xinguo, et al. Scheme design of high performance fault recorder[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(3): 40-42.
- [20] 陈伊卿. 无线传感器网络时间同步算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
CHEN Yiqing. Research on time synchronization algorithm for wireless sensor networks[D]. Xi'an: Xi'an Electronic and Science University, 2011.
- [21] 暂态录波型故障指示器技术条件和检测规范(试行): Q/GDW 436—2013[S]. 北京: 国家电网公司, 2013.
Transient record type fault indicator technical specifications and detection code (trial): Q/GDW 436—2013[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2013.

收稿日期: 2017-12-25; 修回日期: 2018-05-08

作者简介:

谭卫斌(1986—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要研究方向为配电网继电保护和自动化; E-mail: vip_yahoo123@163.com

张维(1984—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为配电网继电保护和自动化; E-mail: jonefei@163.com

权立(1979—), 男, 高工, 主要研究方向为配电网继电保护和自动化。E-mail: 18629579705@139.com

(编辑 魏小丽)