

基于无线同步通信的变电站漏电流检测系统研究

刘鑫¹,袁明哲¹,黄寅²,令狐静波¹,邹经鑫¹,刘豫航¹

(1. 国网四川省电力公司成都供电公司,四川 成都 610041;2. 西安交通大学
电力设备电气绝缘国家重点实验室,陕西 西安 710049)

摘要:变电站站用电系统是保障变电站安全稳定运行的关键,电缆中的漏电流可能引发沟道着火等严重事故。固定式监测装置存在造价成本过高、推广难度大等诸多不足。针对站用电系统漏电流的准确检测问题,研发了一套新型的站用电系统漏电流检测系统。该系统由多个无线采集终端构成,具备多通道同步采集、自动数据通信、电流矢量和计算等功能,可实现变电站站用电系统漏电流的精确检测与缺陷的精准定位,从而及时消除事故隐患。为验证所研发系统的有效性与准确性,在变电站现场进行了实际检测,排查发现并处理了多处站用电系统漏电流隐患。结果表明,所研发系统能够快速、有效、准确地检测站用交流系统的运行情况,具有较高的经济性与实用性,有助于保障变电站的安全稳定运行。

关键词:变电站站用电系统;漏电流检测;无线采集终端;矢量计算

中图分类号:TM 93 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2024)01-0098-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240115

Research on Substation Leakage Current Detection System Based on Wireless Synchronous Communication

LIU Xin¹, YUAN Mingzhe¹, HUANG Yin², LINGHU Jingbo¹, ZOU Jingxin¹, LIU Yuhang¹

(1. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong
University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract: Auxiliary power system of substation is the key to ensure the safe and stable operation of substation, but the leakage current in the cable may cause serious accidents such as channel fire. And the fixed monitoring device has many disadvantages, such as high cost and difficult popularization. Aiming at the problem of accurate detection of leakage current of auxiliary power system, a new leakage current detection system of auxiliary power system is developed. This system is composed of multiple wireless acquisition terminals and has the functions of multi-channel synchronous acquisition, automatic data communication, current vector sum calculation, which can realize the accurate detection of leakage current and the accurate positioning of defects in auxiliary power system, so as to eliminate the potential accidents in time. In order to verify the effectiveness and accuracy of the proposed system, the actual detection is carried out in the substation site, and many potential current leakage problems in auxiliary power system are found and processed. The results show that this system can quickly, effectively and accurately detect the operation of auxiliary power system and is helpful to ensure the safe and stable operation of substation, which has high economy and practicability.

Key words: auxiliary power system of substation; leakage current detection; wireless acquisition terminal; vector calculation

0 引言

“十四五”电力行业工作要求将电力系统的安

全稳定摆在了至关重要的位置,其中各级变电站作为电网的枢纽节点,它们的可靠运行是保障电力系统安全稳定的关键^[1-2]。其中变电站的站用电系统能够为变电站一、二次装置及生产活动提供持续可靠的操作或动力电源,是保证变电站安全可靠运行

的重要设施^[3-4]。据调查,站用电系统的故障主要是绝缘故障,重庆 500 kV 张家坝变电站、湖南 500 kV 梦山变电站均因电缆绝缘故障而引发过严重的火灾事故^[5]。因此站用电线路的漏电状态监测是变电站日常运行维护中最重要的工作之一^[6]。现阶段漏电流的检测与保护装置仍存在一定的不足,无法准确鉴别线路中的漏电流与不平衡电流,可能使得漏电保护装置误动。因此,设计新型的变电站站用电漏电流检测方案与装置是降低变电站站用电系统运维工作难度,提升电力系统安全稳定性的有效手段。

针对线路的漏电流检测技术与方案,已有不少文献进行了相关研究。文献[7-8]阐述了对低压配电网中漏电流的实际检测,并对检测过程中的误差产生原因进行了分析,提出了一些初步的解决措施。文献[9]针对交联聚乙烯电缆,分析了电缆线路存在漏电流时的特征,但并未考虑长段电缆的检测。而文献[10]考虑了非理想通信情况下的漏电流检测方法,提高了对长电缆漏电流状态判断的准确性。文献[11]通过物联网技术实现了配电网中多个终端的漏电流检测信息的互联互通,有效减少了故障的发生时间。文献[12]使用无线传感器建立了矿井内电网漏电故障定位系统,并有效降低了传统物联网技术造成的通信延迟。文献[11-12]较好地实现了漏电流检测信息的远端通信,而在实际线路的多点位漏电流检测中,应考虑测量点位之间的数据同步性,且在变电站的强磁场环境中,电磁对通信的干扰不容忽视^[13]。

为解决变电站中多点位同步通信的漏电流检测的难题,下面设计了一套新型漏电流检测系统。该系统具备多点位电流信号同步采集、有效值与相位计算、同步通信等多项功能,能够有效、准确判断变电站站用电系统是否存在漏电流,若存在漏电流则能迅速定位故障发生处。使用该系统在某变电站进行了现场漏电流检测,结果表明,该系统能够有效判断变电站交流系统漏电流情况,及时排除交流系统漏电流缺陷,保障变电站的安全稳定运行。

1 检测方案

1.1 漏电流检测原理与现存问题

对于变电站站用电系统供电支路的漏电流检

测一般是通过剩余电流互感器(residual current transformer, RCT)或常规电流传感器对线路的 A、B、C、N 4 根线路的电流矢量和进行采集,采集原理如图 1 所示^[14]。

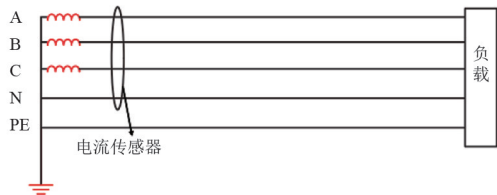


图 1 漏电流检测原理

当线路正常运行时,A、B、C、N 4 根线路上的电流矢量和应为 0,即

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C + \dot{I}_N = 0 \quad (1)$$

而在实际变电站的漏电流检测中,4 条线路的电流矢量和并不为 0,这可能是线路绝缘损坏存在漏电流使得四相电流不平衡,但更多的原因是因为 N 相线路存在电流分流的情况,使得四相线路电流不平衡^[15]。例如:1) 变电站的两台站用变压器低压侧中性点两点接地且同时接至 N 相线路,如图 2 所示,因此在单台站用变压器出线处将出现不平衡电流;2) 支路电源处 N 相错接至接地汇流排,未按标准接至 N 相接线路处;3) 支路负荷接线方式不规范,存在多点共 N 现象等不规范接线方式。

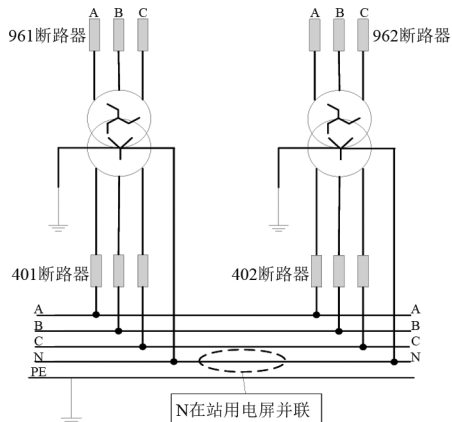


图 2 站用变压器出线端接线

综上所述,在单独测量某一线路时,均能测量到明显的不平衡电流,但无法判断是线路绝缘损坏导致的漏电流,还是因为接线不规范产生的不平衡电流。由于在变电站站用电系统大多数线路中无法加装漏电流保护装置,线路中的不平衡电流将导致保护装置误动切除站用供电线路,使得变电站无法稳定运行。若需在站用电系统的全部线路中装设漏电

保护装置,必须先改造现有站用电源系统,打开共 N 母排,分离共 N 回路,规范所有支路的接线方式,消除各线路共 N 连接点,排除胡乱接地点。此举成本较高,施工难度较大,现阶段在变电站内分开所有共 N 回路难以实现。因此,为能够在 N 相共接的情况下检测变电站站用电系统的漏电流情况,需要设计全新的检测方案与监测装置。

1.2 新型漏电流检测方法

为判断变电站站用电系统是否存在真正的漏电流,最直接的方法是在站用变压器出线端测量总的负荷电流,若所有出线端的负荷电流与回流 N 相端的电流在一定允许的误差范围内相等,则认为整个站用电系统并不存在漏电流;若两者存在较大的误差,则认为变电站站用电系统存在漏电流,有一定的绝缘故障,需进一步排查故障点位置。

220 kV 以上电压等级的变电站一般存在两台及以上数量的站用变压器,因此在检测变电站站用电系统总的漏电流时,应同时检测所有变压器出线端线路。如图 3 所示,检测漏电流时,两个检测点应同步检测。现阶段的漏电流检测装置虽具有通信功能,但不具备同步检测功能,这将造成两个测量点位的测量值存在差别,无法判断实际的漏电流情况。因此需要开发具备同步通信检测的漏电流检测装置。

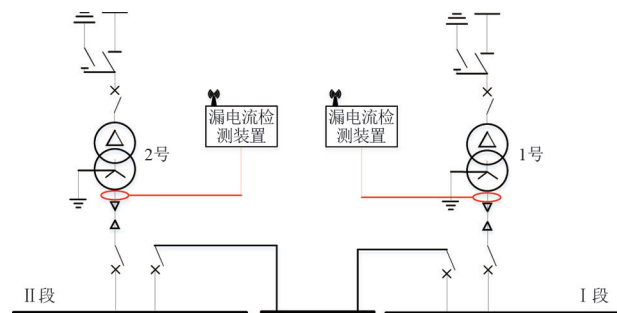


图 3 站用变压器出线端漏电流检测

当检测发现站用变压器出线端确实存在漏电流时,需要进一步排查故障发生点位。在变电站站用电系统的母线处对每条馈线支路的漏电流进行检测,如图 4 所示。若该线路的检测电流呈现平衡状态,则说明该线路电缆及与之相连接的负荷器件不存在漏电流;若检测出有漏电流,则需进一步排查该条馈线支路上的所有分支线路与用电设备。同时也应同时检测母线上的其余馈线,避免存在多故障点的情况。

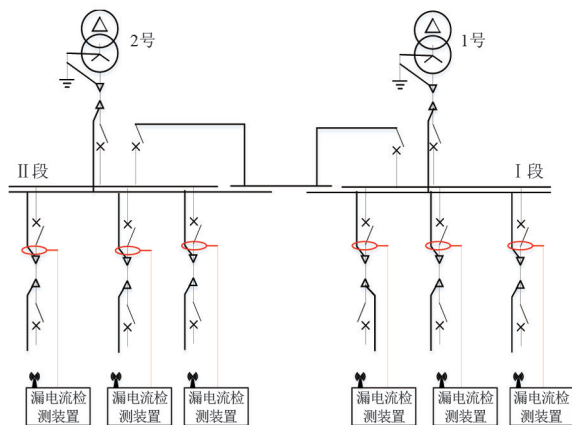


图 4 站用电源系统馈线漏电流检测

在每条馈线支路的站用配电屏处,一般会存在多条出线。由于站用配电屏两端共零,负载端也共零,形成了共零回路,所以两路馈线的 N 相电流已不再是各组三相的不平衡电流,可能会有相邻线路的 N 相不平衡电流流过,CT 采集得到的 A、B、C、N 相电流数据不再是剩余电流(可能是不平衡电流),所以需要将两路共零回路的 CT 进行矢量合成,得到的剩余电流数据是负载端的剩余电流。站用电系统配电屏漏电流检测如图 5 所示:当在配电屏端检测时,应同步检测 I 段与 II 段的出线端,以避免 N 相分流导致的测量误差;而在用电负荷端检测时,也应同时对两路进线的漏电流进行检测。

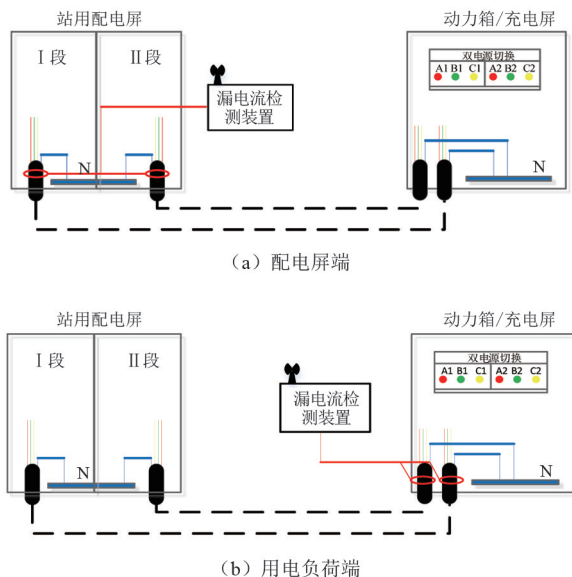


图 5 站用电系统配电屏漏电流检测

因此在进行变电站站用电漏电流检测时,由于上述的一些接线不规范等现场问题,使得传统的漏电流检测方案与装置不再适用,需开发具备同步检测、多点通信等功能的漏电流检测装置。

2 装置设计与实现

为实现变电站中多个位置的漏电流同步测量,设计了一套具有同步通信功能的漏电流测量装置。该装置由检测主机与从机以及电流传感器(罗氏线圈、钳形电流传感器)组成,可以实现主机与从机同步检测线路电流并计算,从而判断线路中的漏电流是否存在。

2.1 总体结构设计

漏电流检测主机的结构如图 6 所示,主要由锂电池(3.7 V)、MCU 控制核心(STM32H730)、充电管理模块、同步通信模块、蓝牙通信模块、A/D 模块(16 位)等部分组成。检测从机与主机的结构完全一致,区别仅在于同步通信模块的设置。

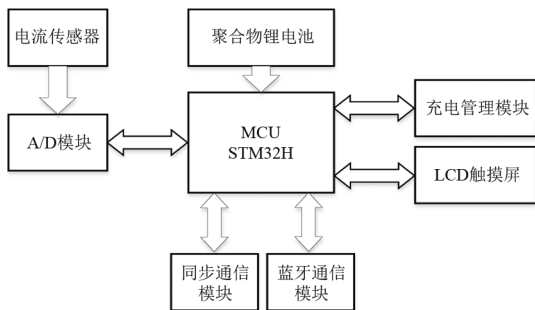


图 6 漏电流检测主机结构

2.2 同步通信原理

同步通信是该新型漏电流检测装置的核心功能,主机的同步通信模块在通电后自动扫描信道并选择一个可用信道,建立通信网络,从机模块通电后将自动发出加入网络的请求并自动分配到地址。此时检测装置间已经完成通信连接。在主、从机的通信芯片建立通信通道后,通信芯片与控制核心的工作流程如图 7 所示。首先主模块将向各从模块发送系统同步时间,从模块收到后将再向主模块返回同步时间。根据各模块的实际空间距离,主模块将对模块间产生的数据传输时延进行自动补偿,以保证各模块间的同步延时达到要求,若时间同步失败将重复上述步骤。

在各模块同步完成后,主、从模块间将进行脉冲信号同步发出指令确认。在确认各模块指令正常后,各模块将同步发出重复脉冲信号,各终端控制核心通过识别同步芯片发出的脉冲信号的上升沿或下降沿便可实现采集通道的同步采集。

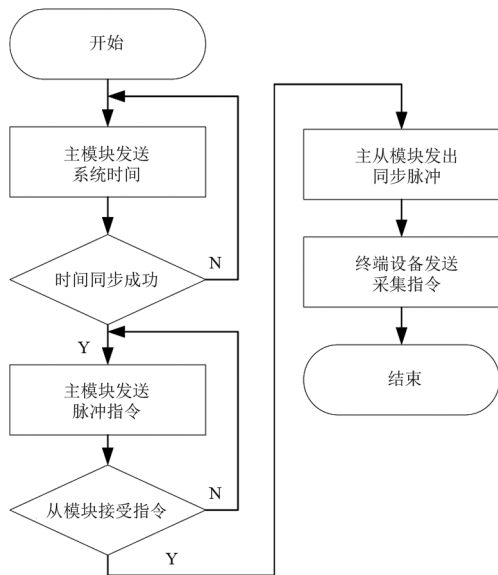


图 7 通信芯片同步流程

此外,采集装置在现场实际使用时可能存在远距离隔墙通信,因此各采集终端设计有天线接口,可以根据实际现场情况加装天线以保证通信质量。

2.3 采集信号处理与计算

检测线路电流时,应根据线路的直径选取适合的电流传感器,且主机与从机应采用相同型号的电流传感器,以保证测量精度。漏电流检测装置通过同等长度的同轴屏蔽线连接电流传感器,以保证信号传播的时延基本相同。信号进入检测装置后,将通过滤波电路滤除低压信号上叠加的高频干扰,用于后续电路处理分析^[16]。A/D 数模转换的采样工作时钟由控制核心系统时钟分频得到^[17]。

采集的电流信号每个周期中的有效值由傅里叶算法^[18]计算,其本身也具有一定的滤波作用。由于被采样线路的电流矢量和仍为周期性信号,除 50 Hz 基波外还含有不衰减的直流分量与各次谐波,可用式(2)表示。

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} [a_n \sin(n\omega_1 t) + b_n \cos(n\omega_1 t)] \quad (2)$$

式中: a_n 、 b_n 分别为各次谐波正弦项与余弦项的幅值; n 为自然数; ω_1 为 100π 。

其中,50 Hz 的基波分量,即理想的测量信号可表示为

$$x_1(t) = a_1 \sin(100\pi t) + b_1 \cos(100\pi t) \quad (3)$$

式中 a_1 与 b_1 可由梯形法计算出,即:

$$a_1 = \frac{1}{N} \left[2 \sum_{k=1}^{N-1} x_k \sin\left(k \frac{2\pi}{N}\right) \right] \quad (4)$$

$$b_1 = \frac{1}{N} \left[x_0 + 2 \sum_{k=1}^{N-1} x_k \cos\left(k \frac{2\pi}{N}\right) + x_N \right] \quad (5)$$

式中: N 为一个周期的采样点数, 本装置 $N=32$; x_k 为第 k 次的采样值; x_0 、 x_N 分别为 k 为 0、 N 时的采样值。

检测装置连续采集 3 个周期中的电流数据, 将 3 个周期的电流有效值进行平均, 得到此时被测线路中电流的有效值。

检测装置设计有检测当前电流频率的功能, 通过计算得出, 如图 8 所示。以通道 1 的采集数据为例, 以曲线过零点后的 A_1 点数值为基准, 当数值再次以上升趋势达到这一基准值的一定范围内时, 即 A_2 点, 则认为 A_1 点与 A_2 点间的时延 Δt_2 为通道电流信号的周期, 其倒数为电流频率。

漏电流的计算不能仅仅考虑电流有效值的叠加, 还要考虑不同电流信号的相位。由于所设计的漏电流检测装置没有设计电压信号同步, 因此电流信号的相位可以任意一个通道的信号为基准, 其相位始终为 0° 。以图 8 中通道 2 采集信号的 B_1 点为例, 通过判断 B_1 点与 A_1 点间的时延 Δt_3 与周期 Δt_2 便可计算出通道 2 信号与基准信号相差的相对相位角度。

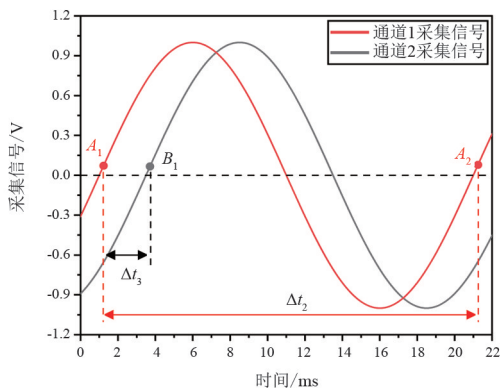


图 8 采集信号计算

当主机与从机均将自身通道的数据完成计算后, 各自的蓝牙模块会将主机与从机的数据进行交互, 并计算出总的电流矢量和数据, 计算精度达 9%。

2.4 其他功能

为便于后续的设备拓展, 在主机装置中设置了联机通道选择功能, 当有新加设备时, 仅需将新设备的联机通道号码设置成与主机一致即可, 便于漏电流测量装置的拓展。考虑到被测电流相角还与电流传感器的放置方向有关, 在通道功能中设置了反相

功能, 以便于计算与数据查看。此外还有通道选择功能, 可以选择哪几个通道进行漏电叠加计算。

3 现场测试结果

为验证所设计装置检测站用电系统漏电流的准确性与可靠性, 对某变电站站用电系统的漏电流水平及接线状况进行实地测量, 现场检测如图 9 所示。

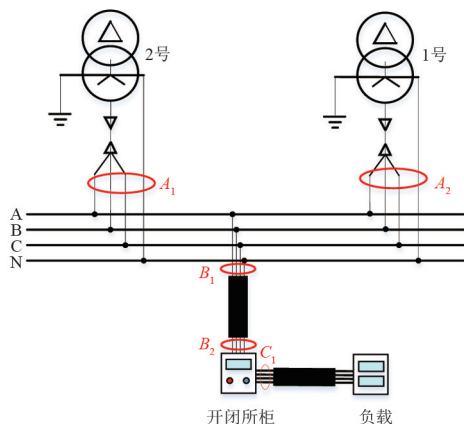


图 9 现场检测

首先在两台站用变压器的出线柜处(图 9 中 A_1 与 A_2 点)同时进行漏电流检测, 出线柜现场照片如图 10 所示。其中站用变压器 1 处采用两个 CT 卡钳, A、B、C 三相由 CT1 测量, N 相由 CT2 测量。站用变压器 2 处采用一个 CT 卡钳。采用所设计的漏电流检测装置对线路电流进行采集, 其中主机检测站用变压器 1 出线柜, 从机检测站用变压器 2 出线柜, 检测结果如图 11 所示。

其中站用变压器 1 出线柜中, CT1 采集到的 A、B、C 三相电流为 $43.81 \angle 0^\circ$ A, CT1 采集到的 N 相电流为 $51.26 \angle 173.5^\circ$ A。站用变压器 2 出线柜中,

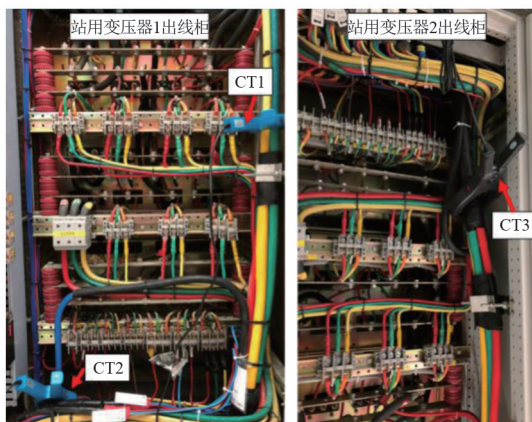


图 10 站用变压器出线端现场检测

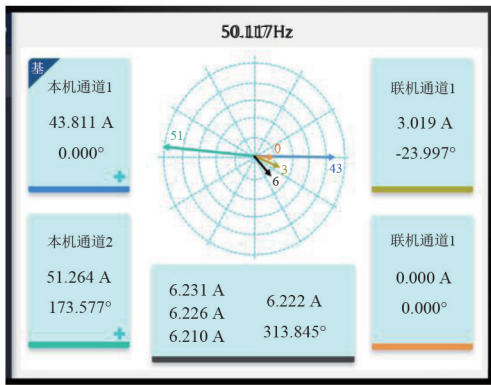


图 11 站用变出线端漏电流检测结果

CT3 采集到的 A、B、C、N 四相电流为 $3.02 \angle -23.9^\circ$ A。漏电流总和为 $6.22 \angle 313.8^\circ$ A, 这表明站用电系统中存在较大的漏电流, 具有较大的风险隐患。

当确定站用电系统中存在漏电流后, 依次排查站用变压器低压侧母线上的所有馈线支路, 寻找故障的具体位置。在经过现场排查后, 发现在某一开闭所柜支路存在明显的漏电流, 在 B_1 点对该支路漏电流进行检测的结果为 3.613 A。

再进一步检测确定故障点位置。首先检测该条支路的电缆绝缘情况, 在 B_1 与 B_2 处同步测量 A、B、C、N 四相电缆是否存在绝缘破损导致漏电流的情况。检测结果如表 1 所示。

表 1 支路电缆漏电流检测结果

相别	B_1 点电流/A	B_2 点电流/A	漏电流/A	漏电流比例/%
A	3.367	3.368	0.018	0.53
B	6.870	6.881	0.028	0.40
C	7.374	7.384	0.029	0.39
N	1.370	1.383	0.032	2.32

电缆绝缘检测结果表明, A、B、C 三相中的漏电流较小, 而 N 相中的漏电流较大, 推测 N 相可能存在电流分流的情况。进一步细致排查, 发现开闭所柜内存在 N 相直接接地的不规范接线情况, 如图 12 所示。同时发现另有两处站用屏内也同样存在 N 相直接接地的不规范接地现象, 这都导致 N 相出现漏电流。

在排除完所有故障后, 再次在站用变电站的出线端 A_1 、 A_2 点进行漏电流检测, 整个站用电系统的漏电流仅为 0.397 A, 满足站用电系统的漏电流标准。现场的检测结果表明, 所设计装置能够快速、有效地检测站用电系统漏电流情况, 同时也能节省大量装置成本与人力成本, 有助于排除站内交流系统

的各项隐患与风险。

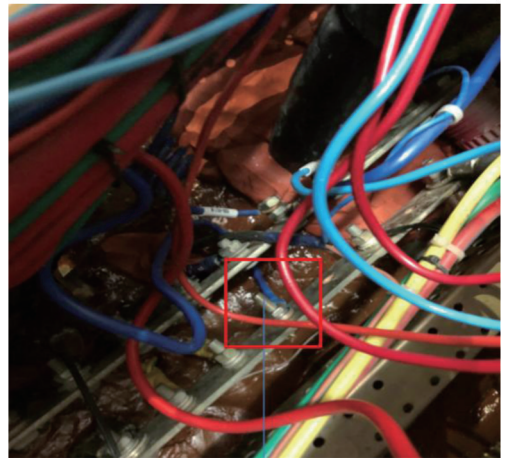


图 12 开闭所柜内 N 相直接接地

4 结 论

上面研究了一套基于无线同步通信的变电站漏电流检测系统, 用以应对实际现场中 N 线共接、直接接地等绝缘异常工况下的漏电流检测。现场测试结果表明, 该检测系统能够有效判别变电站站用电系统的运行情况, 准确、有效地测量漏电流水平, 并能快速定位线路中缺陷及故障点位置, 有利于保障变电站的安全稳定运行。

参考文献

- [1] 张琳. 创新转型实现高质量发展——电力行业“十四五”发展展望[J]. 中国电力企业管理, 2020(33): 18-20.
- [2] 陈昊, 刘怀宇, 姚凯, 等. 采用自补偿复合电流判据的变电站长段动力电缆漏电监测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 172-179.
- [3] 刘永梅, 杜松怀, 盛万兴. 基于 SVM-神经网络融合反馈的触电电流检测方法[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1972-1977.
- [4] 宋小会, 杨建翔, 郭志忠, 等. 交流特高压变电站站用保护技术方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 110-115.
- [5] 成先文, 宫晓彤, 吕志鹏, 等. 一种基于集成 SoC 芯片的中低压配电网故障监测系统[J]. 供用电, 2020, 37(1): 8-14.
- [6] 张烈, 吕鹏飞, 申华, 等. 2013 年国家电网公司 220 kV 及以上电压等级交流系统继电保护设备及其运行情况分析[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 1153-1159.

- [7] 吴兵.新型漏电检测技术在低压配电系统中的应用[J].工程技术研究,2019,4(15):223-224.
- [8] 陈航宇,李天友,杨智奇.低压配网剩余电流保护运行现状及相关措施分析[J].电气技术,2021,22(1):104-108
- [9] 黄光磊,李喆,杨丰源,等.直流交联聚乙烯电缆泄漏电试验特性研究[J].电工技术学报,2019,34(1):192-201.
- [10] 陈昊,刘怀宇,姚凯,等.采用自补偿复合电流判据的变电站长段动力电缆漏电监测方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(12):172-179.
- [11] 杨志淳,徐志超,沈煜,等.基于物联网的低压配电网漏电保护器监测与应用[J].高电压技术,2019,45(S1):137-141.
- [12] 朱延凯,李振璧,姜媛媛,等.基于 ZigBee 无线传感器网络的井下电网漏电保护系统[J].工矿自动化,2014,40(5):15-17.
- [13] 唐志国,蒋佟佟.变电站特高频局放监测的电磁干扰特征影响因素[J].电网技术,2018,42(4):1350-1358.
- [14] 王进城,岳三玲,孙荣川.基于铁氧体电感的漏电流检测电路设计[J].电子测量技术,2019,42(13):60-64.
- [15] 谢杨.变电站站用电交流系统的现状分析及改进建议[J].科技与创新,2014(16):60.
- [16] 黄寅,孟永鹏,黄彦钦,等.一种双回路驱动的纳秒快前沿高重复频率脉冲源[J].西安交通大学学报,2021,55(10):114-122.
- [17] 黄寅,王鹏,李金泉,等.基于 FPGA 的变频电机绝缘击穿监测系统设计与实现[J].国外电子测量技术,2019,38(10):70-74.
- [18] 杨兴雄,曲延滨,宋蕙慧,等.基于同步挤压小波变换的双馈风电场送出变保护研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(12):22-32.

作者简介:

刘鑫(1986),男,高级工程师,从事电力系统继电保护相关工作;

袁明哲(1985),男,硕士,高级工程师,从事电力系统继电保护及信号处理在电力系统中的应用相关工作。

(收稿日期:2023-07-07)

王进城,岳三玲,孙荣川.基于铁氧体电感的漏电流检测 (上接第 90 页)

- [3] 胡毅.输电线路运行故障的分析与防治[J].高电压技术,2007,33(3):1-8.
- [4] 陈海波,王成,李俊峰,等.特高压输电线路在线监测技术的应用[J].电网技术,2009,33(10):55-58.
- [5] 黄新波,孙钦东,王小敬,等.输电线路危险点远程图像监控系统[J].高电压技术,2007,33(8):192-197.
- [6] 万康.无人机在山区高压输电线路隐患巡检中的应用[J].南方农机,2019,50(23):269-270.
- [7] 陈剑刚,姚璞,杨俊武,等.无人机在架空输电线路巡检中的应用研究[J].湖南电力,2019,39(5):74-77.
- [8] 罗星宇.无人机在输电线路中的应用[J].低碳世界,2019,9(9):115-116.
- [9] 黄谨益.电力输电线路巡检中无人机的应用[J].电子技术与软件工程,2019(1):233.
- [10] 王权.全站仪系统误差分析及检定方法探讨[J].甘肃科技,2022,38(6):19-22.
- [11] 景钦刚.电子全站仪在青海电力行业中的应用[J].青海电力,2009,28(1):32-34.
- [12] 文学.全站仪三角高程测量应用综述[J].测绘与空间地理信息,2014,37(1):47-50.
- [13] 李倩竹,杜永永,杨阳.无人机智能巡检在输电线路中的应用与发展研究[J].四川电力技术,2020,43(3):53-56.
- [14] 张吴明,杨又华,阎广建,等.机载多角度多光谱成像技术在电力系统中的应用[J].华中电力,2006,19(6):1-2.
- [15] 蓝增荣,胡庆武,隆华平.基于机载 LiDAR 的数字电网巡线应用研究[J].大众科技,2013,15(1):57-59.
- [16] 李倩竹,杜永永.基于无人机激光雷达技术的杆塔倾斜度精确测量方法研究[J].青海电力,2020,39(4):56-60.
- [17] 姚钺,任明武.基于 PointNet++ 改进的点云特征提取与分类网络架构[J].计算机与数字工程,2021,49(10):2052-2056.
- [18] QI C R, SU H, KAICHUN Mo, et al. PointNet: Deep learning on point sets for 3D classification and segmentation[C]//Proceedings of 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017:652-660.
- [19] QI C R, YI L, SU H, et al. PointNet++: Deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space[C]//Advances in Neural Information Processing Systems, 2017:5099-5108.

作者简介:

黄宇航(1997),男,硕士,从事输电线路无人机运维工作。

(收稿日期:2023-06-07)