

引用格式: 阎寒冰, 冯智慧, 陈秀芳, 等. 变电站电磁环境智能移动监测装置设计与实测[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(1): 193-200.

Citation: YAN Hanbing, FENG Zhihui, CHEN Xiufang, et al. Design and measurement of intelligent mobile monitoring device for electromagnetic environment in substation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 193-200.

变电站电磁环境智能移动监测装置设计与实测

阎寒冰¹, 冯智慧², 陈秀芳¹, 郭力强¹, 柳逢春¹, 方书博²

(1. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030001; 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为提升变电站电磁环境信息采集的工作效率, 提高数据测量精度, 研究制作一台变电站电磁环境智能移动监测装置。所设计的工频电场探头可实现 3 个方向工频电场同步测量; 带有复位电路的工频磁场采集电路可消除磁阻传感器处于过强磁场干扰时的异常问题; 外置温湿度模块可保证测量准确度, 采用憎水性复合材料支架, 在湿度小于 70% 条件下测量误差在 5% 以内。第三方测试结果表明, 电磁场测量结果误差在 5% 以内, 采用此装置在实际 110 kV 变电站进行电磁环境实测, 可准确按规定路径自主行走并进行测量。建立三维模型, 进行空间电磁场分布的仿真模拟, 所得实测数据与仿真数据有相同的变化趋势, 进一步验证装置测量的准确性。

关键词: 变电站; 电磁环境; 智能监测装置; 电磁场仿真; 实地测量

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.01.019 中图分类号: TM863 文章编号: 1673-9140(2024)01-0193-08

Design and measurement of intelligent mobile monitoring device for electromagnetic environment in substation

YAN Hanbing¹, FENG Zhihui², CHEN Xiufang¹, GUO Liqiang¹, LIU Fengchun¹, FANG Shubo²

(1. State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, China; 2. Wuhan NARI Limited Liability Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of substation electromagnetic environment information collection and the accuracy of data measurement, an intelligent mobile monitoring device is designed and manufactured in this paper. Self-designed power frequency electric field probe can realize synchronous measurement of power frequency electric field in three directions. The power frequency magnetic field acquisition circuit with reset circuit can eliminate the abnormal problem caused by the interference of strong magnetic field to the magneto-resistive sensor. External temperature and humidity module are installed to ensure the accuracy of measurement. When the humidity is less than 70%, the measurement error is within 5%. The third-party test results show that the error of electromagnetic field measurement results is within 5%. The electromagnetic environment measuring results in actual 110 kV substation indicate that, this device can walk and measure accurately following the specified path. A three-dimensional model is established to simulate the spatial electromagnetic field distribution. The measured data and simulation data achieve the same change trend, which further verifies the measuring accuracy of the device.

Key words: substation; electromagnetic environment; intelligent monitoring device; electromagnetic simulation; field measurement

收稿日期: 2021-11-17; 修回日期: 2022-09-11

基金项目: 国网山西省电力公司科技项目(520530200002)

通信作者: 阎寒冰(1971—), 女, 高级工程师, 主要从事电力系统电磁环境监测研究; E-mail: zstdq_hb@163.com

随着城镇用电量不断提升,变电站建设量也不断增多,而变电站选址首要考虑电磁环境的影响,同时在变电站运维过程中,同样需要对电磁环境进行监测^[1-3]。为满足信息化大数据采集需求,电磁环境监测测量增加,而传统的电磁环境数据测量手段主要依靠人工测量,不仅耗费时间人力,而且巡检方法单一、易受天气环境影响,也无法实时快速有效地对数据进行处理,现有测量人员难以完成相应工作量,亟需采用更智能高效的测量装置^[4-5]。目前,输变电运维中越来越多地采用智能机器人完成巡视、数据采集等工作,但现有机器人的主要功能是图像识别、红外成像、噪声监测、微气象监测等,关于电磁环境监测的智能装置研究较少^[6-8]。

针对电磁环境监测的研究主要从仿真分析和测量仪器优化2个方面进行。相关研究人员利用有限元法、边界元法、3D模拟电荷法等不同仿真方法分析了输电线路及变电站的空间电磁场分布特性^[9]。随着计算能力的提高,三维建模更加精确,空间电磁场计算结果准确性不断提高。测量方面,广泛使用有悬浮体探头的场强仪对工频电场进行测量,通常采用木质或环氧三脚架作为支撑以保证悬浮体探头对地绝缘^[10-12]。学者在电磁测量方面也做了深入研究,主要分析了测量支架结构、温湿度等对测量结果的影响^[13-17]。上述仪器为定点监测方式,如果要监测变电站整体电磁环境,需要人员多次测量,较为繁琐。为此,利用现有智能终端的优势,综合应用不同信息化手段,设计一种变电站电磁环境智能移动监测装置,实现电磁环境数据的自动采集,可提高采集效率、有利于后期数据分析。

为提升变电站电磁环境信息采集的工作效率、提高数据测量精度,本文设计制造一台变电站电磁环境智能移动监测装置。首先,介绍电磁环境监测模块的总体框架结构以及工频探头、工频磁场测量电路、温湿度模块、可听噪声模块等的设计特点;同时介绍无人驾驶平台的基本功能设计和指定路径自动巡视方法。制作样机并在实际110 kV变电站进行电磁环境实测,同时根据变电站结构建立三维电磁场仿真模型,仿真对比实测数据和仿真数据变化趋势,验证装置的实用性和准确性。

1 电磁环境智能移动监测装置设计

电磁环境智能移动监测装置主要包括电磁环

境监测模块、支架和无人驾驶平台,整体组装如图1所示。以下主要介绍监测模块设计、无人驾驶平台的自动寻径方法、支架材料选择及测量准确性验证。



图1 电磁环境智能移动监测装置

Figure 1 Intelligent mobile monitoring device for electromagnetic environment

1.1 电磁环境监测模块

1.1.1 总体框架结构

电磁环境监测模块的总体结构框架如图2所示,工频电场和磁场采集模块采集到的模拟量通过调理电路进行信号调理后传送到微控制器STM32中;温湿度传感器和气压传感器会将采集到的数字量信号传送到微控制器中;可听噪声模块把噪声信号传送到微控制器中;微控制器再通过通信模块将测量数据传输到上位机中进行存储和显示。

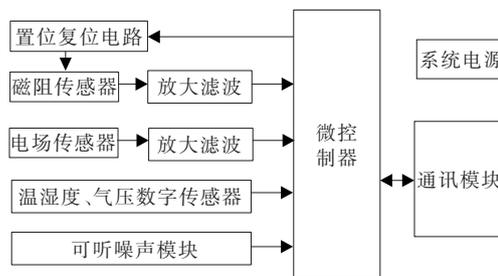


图2 监测模块的框架结构

Figure 2 Frame structure of monitoring module

1.1.2 工频电场探头设计

为了实现3个方向工频电场的同步测量,自主设计和研发三维电场传感器。该传感器由3对金属平板和一个接地电极组成,采用薄绝缘层填充连接。目前,大多数工频电场探头利用2个大小相同的薄膜铜模作为极板材料,然后通过强力胶将2块铜模固定在绝缘材料上或者直接固定在装置盒内部,这种结构在高温下可能导致铜模脱落或探头损坏,影响测量结果。此处将电场探头制作到印制电

电路板 (printed circuit board, PCB) 上, 选择一对圆铜焊盘作为平行板, 利用中间的环氧树脂作为绝缘材料, 牢固可靠。

测量探头的固有电容在电路中可能影响测量结果, 考虑环氧树脂 FR4 的相对介电常数约为 4.2~4.7, 此处取中间值 4.5, 圆形平行极板半径为 $r=40\text{ mm}$, 由平行板电容器的电容计算公式可计算得到探头的固有电容约为皮法级, 取测量电容为纳法级, 使其远远大于探头固有电容, 则可近似忽略探头固有电容对测量电压的影响。

1.1.3 工频磁场采集电路设计

为采集 X、Y、Z 3 个方向的磁场数据, 在每个方向都设计一个工频磁场采集电路, 主要包括: 工频磁场传感器、信号调理电路、AD 转换电路、置位复位电路。信号调理电路将采集到的信号进行两级放大和滤波, 筛选出工频磁场信号, 保障磁场监测数据的精确度; AD 转换电路将磁场真有效值进行模数转换, 输出至微处理器; 置位复位电路用于消除环境对工频磁场传感器的影响。

工频磁场通过磁阻传感器采集并输出电压信号, 当其处于过强的磁场干扰时, 铁磁薄膜材料中的磁畴会出现随机排列的状态, 影响输出电压, 使其出现非永久性的失效, 同时环境温度也会使输出电压发生偏移, 可设计置位复位电路消除上述影响。选择 HMC1001 传感器, 通过微控制器 STM32 的 I/O 接口产生置位/复位脉冲, 连接到 HMC1001 的置位/复位电流带上, 即可产生一个强大磁场, 将随机排列的磁畴重新排列, 校正到同一个方向上。

各向异性磁阻传感器的信号调理电路是电磁信号采集十分重要的环节, 调理电路的好坏直接影响输出信号精度。信号调理电路可以分为 4 个部分: ① 第 1 级信号放大电路, 磁阻传感器的输出电压大小为毫伏级, 需要对信号进行适当放大以提高传感器灵敏度和测量精度; ② 所设计的装置主要针对变电站电磁环境进行测量, 通过带通滤波电路选取 50 Hz 频段的信号; ③ 采用 AD736 将前级电路输出的交流信号转换为直流信号; ④ 通过第 2 级信号放大电路将直流信号进一步放大。

1.1.4 温湿度模块设计

由于器件在工作中会发热, 如果温度传感器放置在监测模块内部, 长期工作时内部温度升高可能导致温度数据偏高, 而内部监测模块也可能导致

湿度监测数据不准确, 所以配置外置温湿度模块, 安装在监测模块的下侧, 如图 3 所示, 其中图 3(b) 为倒放。

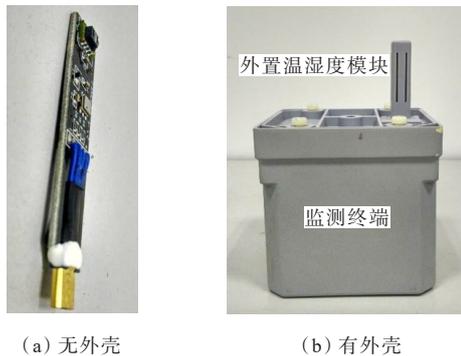


图 3 外置温湿度模块

Figure 3 External temperature and humidity module

1.1.5 可听噪声模块设计

考虑普通电容传声器可能受变电站电磁环境干扰, 为提高测量准确度, 可听噪声模块采用驻极体电容传声器。驻极体电容传声器是在一般电容传声器背极板上喷涂一层薄而均匀的驻极体材料, 在高温和高压下使之极化, 让电荷永久性地存贮在驻极体材料之中, 从而使得传声器的两极之间产生一个内电场, 用来取代由外加极化电压所产生的电场。考虑环境噪声测量高度一般为 1.2 m, 而电磁环境监测终端的监测高度设置为 1.5 m, 因此同样配置了外置的可听噪声模块, 通过接口接入信号。同时考虑大风可能对噪声测量造成影响, 在探头处加装了高密度的防风罩。

1.1.6 模块样机与外壳

为满足户外使用条件, 测量模块样机的外壳采用倒扣方式拼装, 所有接口均处于下端, 避免了某些气候环境可能沿接口对模块内部造成影响, 如图 4 所示。同时为避免影响电磁场测量数据, 壳体选用高强度工程塑料, 并使用橡胶螺丝固定。

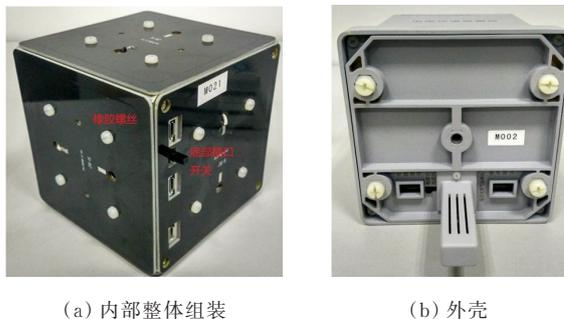


图 4 电磁环境监测模块

Figure 4 Electromagnetic environment monitoring module

1.2 无人驾驶平台

选择用于搭载电磁环境监测模块的是清华大学开发的无人驾驶平台 Autolabor Pro1,此平台安装有激光雷达、深度相机、高精度定位标签等,可采用4G/5G/Wi-Fi远程遥控,具有实时图像传输、指定路线巡迹、自动导航、自动避障等功能。同时,可通过预留的接口进行二次开发。无人驾驶平台底部车体的尺寸为726 mm×617 mm×273 mm,其上为可扩展安装面,安装有深度相机、定位标签等。小车按指定路线移动,即通过上位机软件可设定电磁场数据采集的路径,采用变电站实地布置的多个定位标签和车载定位标签可实现站内的准确定位,实现自动沿规划路径行进。同时小车可采用自动避障和主动操控避障2种功能绕过障碍物。

1.3 支架选择及测量准确性验证

行业标准中规定测量工频电场和磁场时,测量仪表应架设在地面上1~2 m的位置,一般情况选择1.5 m,同时为避免测量支架泄漏电流对测量结果的影响,测量时环境湿度应在80%以下^[11]。本装置测量模块高度一般选择在1.5 m,同时也可按需求配置不同高度的可拆卸式支架,方便更换安装。

为减小湿度对测量结果的影响,本装置采用了憎水性复合材料支架,进行不同湿度下的电场强度测量,同时采用木质支架和环氧树脂支架进行对比。测量结果表明木质支架和环氧支架在80%湿度时,误差分别达到19%和14%,而采用憎水性复合材料支架,在80%湿度条件下,误差约为6%,在一般条件下湿度小于70%时,对测量结果的影响小于5%,满足行标中^[11]测量准确度的要求。将电磁环境测量装置进行第三方检测,检测结果如表1,测量范围和误差均满足行标要求的5%以内^[11]。

表1 第三方测试结果

Table 1 Third part test results

测试项目	测试结果
工频电场	测量范围0~20 kV/m,测量误差小于±5%, 样品能够三维测量
工频磁场	测量范围0~2 000 μT,测量误差小于±5%, 样品能够三维测量
温度	测量范围-40~+85 ℃, 测量误差小于±0.3 ℃
湿度	测量范围0~100%, 测量误差小于±2%

2 110 kV 变电站电磁环境实测与仿真数据对比

电磁环境智能移动监测装置样机组装完成后,选取一个110 kV变电站进行电磁环境的实地测量,同时根据110 kV变电站各设备的实际布置建立三维仿真模型,计算空间的电场和磁场分布,将实测数据与仿真数据进行对比,检验实测数据与仿真得到的电磁场分布是否有相同的变化趋势。

2.1 电场和磁场仿真分析

2.1.1 三维模型建立与剖分

仿真分析中采用1:1等比例尺寸建模,如图5所示,根据变电站各金具和导线的实际尺寸建立整体三维模型。需要说明的是,由于重点分析电磁环境,即空间的电磁场分布,而不是像其他文献那样计算设备金具表面电场分布、对金具尺寸结构进行优化,本文为减小计算量,在不影响空间电磁场分布趋势、保证工程允许误差的前提下,对设备局部较小金具结构进行了简化处理。设置一个70 m×60 m×30 m的长方体外围空气包作为整体模型的计算边界。变电站主要由4个电容器组、2台主变、2个消弧线圈室、1台GIS设备、1个主控室、1个110 kV二次设备舱、若干导线、2个龙门架组成。

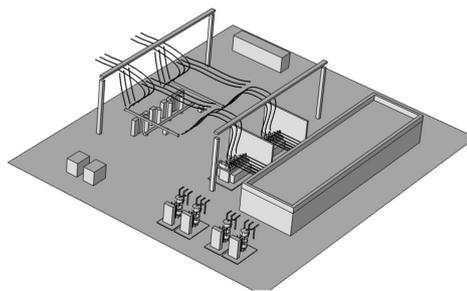


图5 110 kV 变电站整体模型

Figure 5 Overall model of 110 kV Substation

采用有限元法进行仿真计算,首先要对模型进行剖分处理。由于所建三维模型设备多,各设备组成零件也较多,且各部分尺寸差异较大,如果仅使用常规自动剖分方法,可能出现部分单元剖分不规则从而导致计算不收敛的问题,同时考虑计算量问题,不能全部采用极细化剖分。本文根据各设备结构大小,人为控制不同的剖分尺寸,同时在独立设备外和细导线外人建立包围设备的空气包用于剖分控制,典型的设备剖分如图6所示。

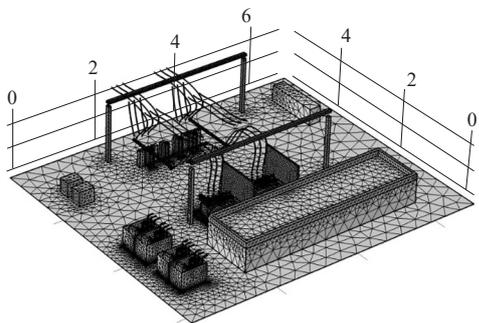


图 6 三维模型网格剖分结果(单位:10⁴ mm)

Figure 6 Mesh generation results of 3D model(unit:10⁴ mm)

需要说明的是,在电场仿真和磁场仿真中建模和剖分有一定差异,电场仿真中建立实体导线,然后通过外包空气控制剖分网格。而在磁场仿真中,由于磁场求解运算更复杂,如果仍然建立导线,不利于求解,可以根据原理将其等效为线电流源,而不用建立实体导线,这样可以有效减小剖分网格,提高计算效率,对计算精度的影响也很小。

2.1.2 空间电场仿真

考虑交流的三相电压在不同相位时在空间的电压是不同的,但空间每一个点仍能通过三角变换看作一个幅值一定的交变电场。为此,进行电场计算时选择在静电场条件下研究频域响应,求解频率设为 50 Hz。加载时,变压器低压 10 kV 侧四回低压导线及母线排、高压 110 kV 侧两回导线分别加载对应电压,加载时需注意每一回线路中三相相位彼此相差 120°,而接地部分及外边界加载地电位。

利用有限元法计算整体电场分布,结合标准选取变电站地面上方 1~2 m 的区域分析电场分布特性。对比不同高度电场强度分布趋势,从 1~2 m,整体分布趋势相似,随着高度的上升,整个平面的电场强度逐渐增大,最大值出现在高压导线下方避雷器附近。以变电站空间 1.5 m 高度平面的电场强度分布为例进行分析,如图 7 所示。110 kV 带电导体及主变附近电场强度较大,房屋和围墙附近电场强度较小,在高压导线下方附近电场强度最大,110 kV 二次设备舱、围墙、主控室附近电场强度最小。

2.1.3 空间磁场仿真

设定 3D 磁场求解器,求解频率设为 50 Hz。由于磁场强度的数值与线路和变压器的工作电流有关,仿真时令工作电流为实地测量时的运行电流。高压侧相电流幅值为 58.2 A,低压侧相电流幅值为 580 A,每一回线路中三相相位彼此相差 120°。利用

有限元法计算整体磁场分布,取变电站地面上方 1~2 m 区域分析磁场强度分布特性。

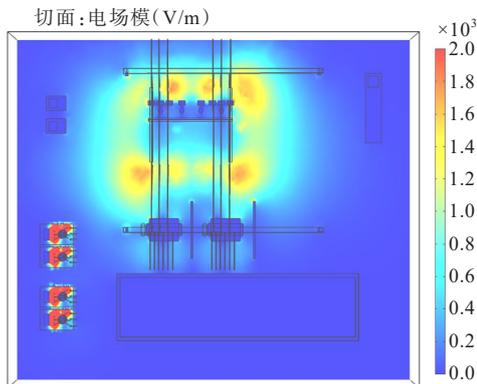


图 7 变电站空间电场分布(高度 1.5 m)

Figure 7 Spatial electric field distribution of substation

对比不同高度的电场强度分布趋势,高度 1~2 m 时,随着离地高度的上升,整体平面磁感应强度逐渐增大,尤其在变压器附近,磁感应强度较大值主要在变压器低压侧、110 kV 二次设备以及外部进站导线附近,其中变压器低压侧磁感应强度最大值达到了 1 800 nT。以变电站空间 1.5 m 高度平面的磁场强度分布为例进行分析,如图 8 所示。在户外场 110 kV 带电导体附近、主变附近磁感应强度较大,房屋和围墙附近场强较小,这也与理论分布相一致。图 8 中电容器组区域电场较大是由于部分电容器布置在这个高度,端部连接为高电位,其附近有较大电场强度,并不影响巡检路径上的电场。

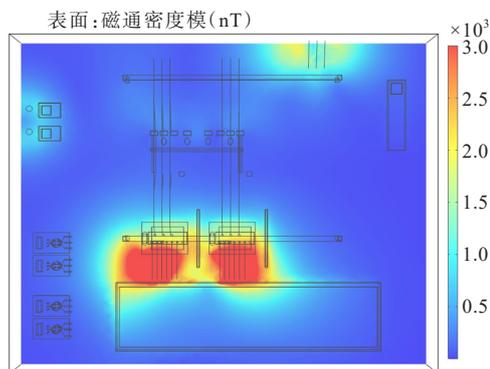


图 8 变电站空间磁场分布(高度 1.5 m)

Figure 8 Spatial magnetic field distribution of substation

2.2 电磁场仿真结果与实测值对比

2.2.1 实测路径与自动寻径误差

结合站内的主要巡检路线,利用电磁环境智能移动监测装置进行实地测量。在站内选择多个位

置布置定位标签,建立自有坐标体系。选择实测路径,在路线上选取多个点进行标记和编号,如图9所示,测量点与设备的距离依据行标设定。为进行对比分析测试,所取点远比行标中设置得多,同时根据站内运维人员人工测量的关注点,补充测量了40~43号测量点^[18]。装置在每个测量点均停留1 min,取测量结果平均值。设置自动巡径测量,无人驾驶平台自动行走,对每个标记点处小车的偏差进行记录,最大偏差约为13 cm,平均偏差约为6.7 cm。平均偏差在10 cm以内,表明无人驾驶平台可以自主准确地按路径进行自动测量。

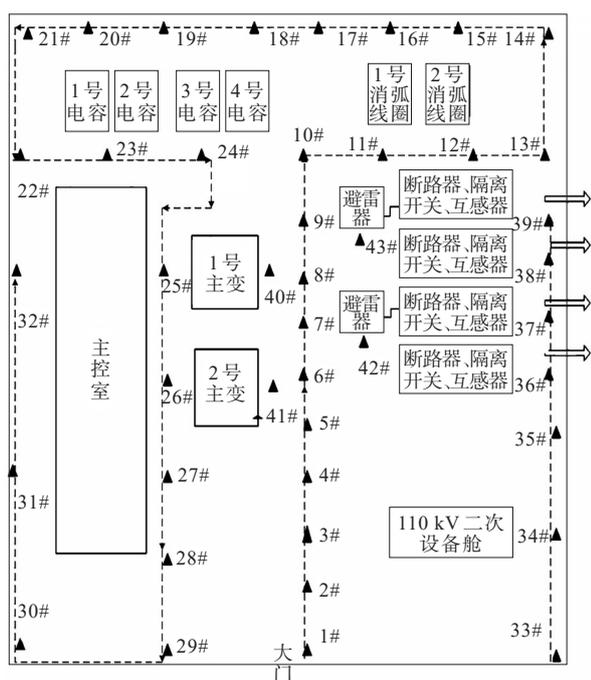


图9 实际测量路线

Figure 9 Actual measurement path

2.2.2 测量结果与仿真值对比

实测温度约为27℃,湿度约为61%。对应上述坐标位置,电场强度和仿真结果如图10所示,仿真与实测数值有一定差异,大部分误差在5%以内,某测量点误差达到16%。经分析,误差原因主要是由于仿真时对部分模型进行了一定简化,且实际测量位置与仿真中取值位置有一定差异,但可以看到电场强度与实测值的变化趋势较为吻合,最大电场处误差约为3.94%。变压器以及高压导线下面靠近高压导体,电场强度最大,最大值出现在避雷器附近,为3 002 V/m。站内围墙、主控室和110 kV二次设备舱为地电位,且表面相对平整,电场强度很小。

磁场强度测量结果和仿真值如图11所示。同样,仿真与实测数值有一定差异,大多数测量点的误差都在5%以内,也可以看到测量值与仿真结果的整体变化趋势基本吻合,在相同容量下,高压侧电流小,且母线高度高,对应下方的测量点的磁场强度比低压侧母线下方的的小很多。监测位置26(2号变压器低压侧下方)的磁感应强度最大,仿真结果为1 817.5 nT,测量结果为1 883 nT,误差约为3.6%。最小值位于大门附近,此处与电流源相隔最远。上述电场和磁场对比结果验证了所开发装置可以有效地按设定路径准确测量电磁环境数值。

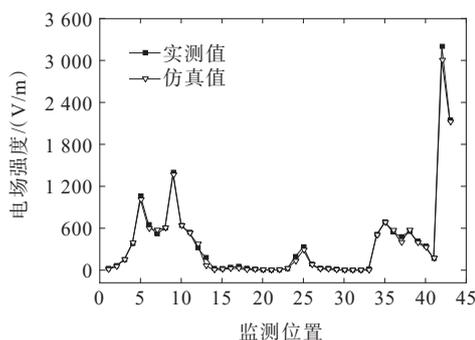


图10 电场强度仿真值与实测值对比

Figure 10 Comparison of simulated and measured electric field strength

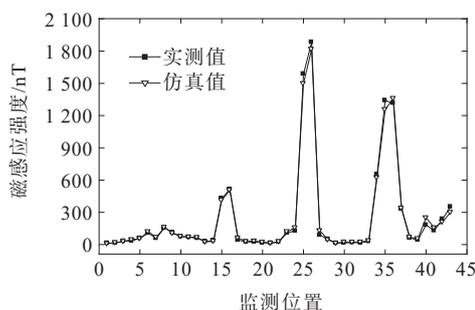


图11 磁场强度仿真值与实测值对比

Figure 11 Comparison of simulated and measured magnetic field strength

3 结语

设计制作了一台变电站电磁环境智能移动监测装置,并在实际变电站中进行了测试,同时与理论计算结果进行了对比,主要结论如下。

1) 通过抗干扰和传感器优化布置,抑制环境干扰,保证了测量准确度,实现了3个方向的工频电场和工频磁场的同步测量,使测量点总电场和磁场值更为准确。

2) 本装置采用了憎水性复合材料支架,在湿度小于70%条件下的误差在5%以内,第三方测试结果中电磁场测量误差在5%以内,温湿度测量误差满足要求,验证了装置测量的准确性。

3) 在实际110 kV变电站进行了电磁环境实测,验证了按路径自动行走的准确性,同时建立了三维电磁场仿真模型,实测数据和仿真数据变化趋势基本一致,数值相差在工程可接受范围,验证了装置可自动准确地测量电磁环境数值。

参考文献:

- [1] 郭天伟,罗日成,潘茜雯,等.750 kV同塔双回交流输电线路电磁环境分析[J].电力科学与技术学报,2018,33(1):46-53.
GUO Tianwei, LUO Richeng, PAN Qianwen, et al. Analysis on electromagnetic environment of 750 kV double-circuits transmission lines[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2018,33(1):46-53.
- [2] 王容,史嘉昭,郭璨,等.基于CVT的特高压换流站复杂电磁环境下操作过电压测量[J].中国电力,2022,55(10):92-99.
WANG Rong, SHI Jiazhao, GUO Can, et al. CVT-based switching overvoltage measurement of UHV converter station under complex electromagnetic environment[J]. Electric Power,2022,55(10):92-99.
- [3] 贺家慧,张丹丹,张露,等. ± 500 kV换流站工频电磁环境测量与实验室模拟[J].高压电器,2023,59(4):10-16.
HE Jiahui, ZHANG Dandan, ZHANG Lu, et al. Measurement and laboratory simulation of power frequency electromagnetic environment of ± 500 kV converter station[J]. High Voltage Apparatus,2023,59(4):10-16.
- [4] 江炳蔚,魏斌,何浩,等.磁耦合谐振式无线电能传输技术在电力系统中的应用[J].发电技术,2022,43(1):32-43.
JIANG Bingwei, WEI Bin, HE Hao, et al. Application of magnetic coupling resonance wireless power transfer in power system[J]. Power Generation Technology,2022,43(1):32-43.
- [5] 张洪彬,徐志科,金龙,等.混合叠压圆筒型永磁直线振荡电机电磁特性分析[J].电工技术学报,2023,38(19):5090-5100+5140.
ZHANG Hongbin, XU Zhike, JIN Long, et al. Electromagnetic characteristics analysis of tubular permanent magnet linear oscillation actuator with hybrid lamination[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2023,38(19):5090-5100+5140.
- [6] 马锋,高明亮,许崇耀,等.基于仿真优化智能变电站巡检机器人路径研究[J].电测与仪表,2023,60(9):14-20.
MA Feng, GAO Mingliang, XU Chongyao, et al. Research on path of intelligent substation inspection robot based on simulation optimization[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2023,60(9):14-20.
- [7] 付殷,余占清,曾嵘,等.输电线路电磁环境试验数据清理方法研究[J].高电压技术,2018,44(1):289-295.
FU Yin, YU Zhanqing, ZENG Rong, et al. Data cleaning method of electromagnetic environment of power transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1):289-295.
- [8] 杨文刚,杨发.110 kV双回交流T接塔电场仿真分析[J].电力科学与技术学报,2020,35(5):138-143.
YANG Wengang, YANG Fa. Simulation analysis of electric field of 110 kV double-circuit AC T-tower[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(5):138-143.
- [9] 蒋冠前,吴红艳,王帅卿,等.柔性直流输电换流阀塔电场分布与结构设计研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(17):178-186.
JIANG Guanqian, WU Hongyan, WANG Shuaiqing, et al. Electric field distribution and structural design of a converter valve tower in a VSC-HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control,2022,50(17):178-186.
- [10] 冯智慧,张广洲,吴健,等.超高压交流变电站金具电晕特性与选型研究[J].智慧电力,2022,50(8):82-88.
FENG Zhihui, ZHANG Guangzhou, WU Jian, et al. Corona characteristics and type selection of EHV AC substation fittings[J]. Smart Power,2022,50(8):82-88.
- [11] 王莹,孙海涛,薛彦登,等.750 kV变电站噪声测量与特性分析[J].西安工程大学学报,2019,33(5):524-530.
WANG Ying, SUN Haitao, XUE Yandeng, et al. Measurement and characteristic analysis of noise in a 750 kV substation[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University,2019,33(5):524-530.
- [11] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.高压交流架空送电线路、变电站工频电场和磁场测量方法:DL/T 988—2005[S].
National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Methods of measurement of power frequency electric field and magnetic field from high voltage overhead power transmission line and substation:DL/T 988—2005[S].
- [12] 刘婵媛,张楠,匡宇来,等.基于共享铁塔的5G天线对微气象在线监测设备的电磁干扰[J].电网与清洁能源,

- 2022,38(12):24-32.
- LIU Chanyuan, ZHANG Nan, KUANG Yulai, et al. Electromagnetic interference of 5G base station antennas of the shared tower on micro-meteorological online monitoring equipment[J]. *Power System and Clean Energy*,2022,38(12):24-32.
- [13] 彭继文,周建飞,周年光,等.湿度对500 kV超高压交流架空送电线路区域电磁环境的影响研究[J]. *电网技术*,2008,32(S2):236-239.
- PENG Jiwen, ZHOU Jianfei, ZHOU Nianguang, et al. Study on the influence of humidity on electromagnetic environment of 500 kV UHV AC overhead transmission line area[J]. *Power System Technology*, 2008, 32(S2): 236-239.
- [14] 黄悦华,陈照源,陈庆,等.基于边缘计算和改进YOLOv5s算法的输电线路故障实时检测方法[J]. *电力建设*,2023,44(1):91-99.
- HUANG Yuehua, CHEN Zhaoyuan, CHEN Qing, et al. Real-time detection method for transmission line faults applying edge computing and improved YOLOv5s algorithm[J]. *Electric Power Construction*,2023,44(1):91-99.
- [15] 孙涛,何旺龄,万保权,等.湿度对高压输电线路工频电场测量的影响[J]. *高电压技术*,2014,40(6):1710-1716.
- SUN Tao, HE Wangling, WAN Baoquan, et al. Influence of humidity on power frequency electric field measurements for high voltage transmission lines[J]. *High Voltage Engineering*,2014,40(6):1710-1716.
- [16] 刘守豹,吴迪,兰新生.工频电场测量仪支架材质对空间电场影响研究[J]. *四川电力技术*,2018,41(2):34-37+75.
- LIU Shoubao, WU Di, LAN Xinsheng. Study on influence of stent material of power frequency electric field tester on space electric field[J]. *Sichuan Electric Power Technology*,2018,41(2):34-37+75.
- [15] 杨国清,郭玥,王德意,等.不均匀电场下纳米氧化锌改性环氧树脂的绝缘特性[J]. *高电压技术*,2017,43(9):2825-2830.
- YANG Guoqing, GUO Yue, WANG Deyi, et al. Dielectric characteristics of epoxy composites modified with nano ZnO in non-uniform electrical field[J]. *High Voltage Engineering*,2017,43(9):2825-2830.
- [16] 孟旋,郭若琛,袁文泽,等.空间电荷及金属颗粒对换流变阀侧套管的电场分布影响[J]. *电力工程技术*,2022,41(1):48-55.
- MENG Xuan, GUO Ruochen, YUAN Wenzhe, et al. Influence of space charge and metal particles on the electric field distribution of converter transformer is valve-side bushing[J]. *Electric Power Engineering Technology*,2022,41(1):48-55.
- [17] 俞集辉,郑亚利,徐禄文,等.湿度、温度对工频电场强度的影响[J]. *重庆大学学报*,2009,32(2):137-140.
- YU Jihui, ZHENG Yali, XU Luwen, et al. Effect of humidity and temperature on power electric-field intensity[J]. *Journal of Chongqing University*,2009,32(2):137-140.
- [18] 国家能源局.电力行业劳动环境监测技术规范 第7部分:工频电场、磁场监测:DL/T 799.7—2010[S]. National Energy Administration. Labour environment monitoring technological specification of electric power industry Part 7: Monitoring of power frequency electromagnetic fields:DL/T 799.7—2010[S].