

计及电磁干扰的接地网磁场诊断研究

张翔¹, 范丽君¹, 陈冠¹, 仇式鹞¹, 贺润平², 王哲斐²

(1. 国网上海市电力公司嘉定供电公司, 上海 201800; 2. 宁波得弘企业发展有限公司, 浙江宁波 315000)

摘要: 埋设在地下的变电站接地网若是出现断裂等故障将影响设备和人身的安全性, 而目前针对接地网的故障诊断仍然以定期开挖检测为主, 具有盲目、低效等缺点, 因此针对接地网的无损检测具有重要的应用前景。针对网络诊断法诊断方程欠定的缺点, 提出运用磁场反演法对接地网进行检测, 并且考虑到接地网现场的电磁干扰问题, 设计一套相应的硬件系统装置。首先对接地网进行分析, 论述磁场反演法的可行性及其具体操作方法; 其次, 根据变电站接地网现场电磁干扰产生的特点, 开发具有抗电磁干扰能力的磁场检测硬件系统; 最后, 通过在接地网模型上的实验和某变电站接地网的现场应用, 验证该方法和系统的可行性和准确性。

关键词: 接地网; 故障诊断; 磁场检测法; 电磁干扰; 硬件设计

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.03.019 中图分类号: TM773 文章编号: 1673-9140(2023)03-0174-08

Study on magnetic field diagnosis of grounding grid considering electromagnetic interference

ZHANG Xiang¹, FAN Lijun¹, CHEN Guan¹, QIU Shikun¹, HE Runping², WANG Zhefei²

(1. State Network Shanghai Electric Power Company Jiading Power Supply Company, Shanghai 201800, China;
2. Ningbo Dehong Enterprise Development Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

Abstract: The fracture failure of substation grounding grid buried underground endanger the safety of equipment and person. However, the current fault diagnosis for the grounding grid is still mainly based on regular excavation detection. This method has shortcomings such as blindness and low efficiency, so the nondestructive testing of grounding grids is of important application prospects. Aiming at the under-determined diagnosis equations defect of the electrical network diagnosis method, this paper proposes the method of applying magnetic field inversion to detect the grounding grid. Considering the electromagnetic interference problem of the grounding grid site, a corresponding hardware system device is designed. First, the grounding grid is analyzed, and the feasibility and specific operation of magnetic field inversion method are discussed. Secondly, according to the characteristics of electromagnetic interference in substation grounding network, a magnetic field detection hardware system with anti-electromagnetic interference ability is developed. Finally, the feasibility and accuracy of the method and system are verified through the experiment on the grounding grid model and the field application of the grounding grid in a substation.

Key words: grounding grid; fault diagnosis; magnetic field detection method; electromagnetic interference; hardware design

接地网一般埋设在变电站地下约 0.5~2.0 m 深处, 起到保障电力设备参考电位统一、疏散泄漏电
流和雷击电流、保障变电站人身安全和设备安全的重大作用^[1]。但是由于接地网一般采用镀锌钢材

收稿日期: 2021-05-06; 修回日期: 2021-07-06

基金项目: 国网上海市电力公司科技项目(5209312000B6)

通信作者: 张翔(1986—), 男, 工程师, 主要从事线缆及项目管理研究; E-mail: 13764986204@139.com

质,当埋设在湿润的土壤中、在空气的作用下会出现腐蚀故障,导致接地性能下降,危及系统安全^[2]。

目前在实践中对于接地网的检修方法仍然以定期的大面积开挖为主^[3],这种方法一方面会耗费大量的人力物力,需要断电检修,有悖于电力系统长期建设的经济性与稳定性。另一方面,由于各个地区气候条件、土壤环境、埋设深度不同,接地导体的腐蚀速率可能有较大的差异^[4],因此难以确定一个准确的开挖检修时间。为此,近年来相关研究人员一直致力于接地网的免开挖故障诊断方法探索。其中,基于电网络理论的故障诊断法研究较多,其基本原理就是将接地导体等效为多端口纯阻性电网络,通过对电网络建立诊断方程,求解节点电压方程,实现对接地导体阻值的求解^[5-6]。这一方法的优点是只需要在接地引下线之间测量阻值,操作较为方便;缺点是其诊断结果高度依赖接地引下线的数量及位置,一旦数量较少,诊断方程将会高度欠定,导致结果不准确。文献[7]提出运用迭代法,文献[8]提出运用Tikhonov正则化算法,从数学上求取总体最优解。文献[9]提出一种分块求解的方法,建立分块诊断模型和诊断方程,将问题转化为对区域内导体的诊断,降低了方程的欠定程度。但这些方法只能在一定程度上减少不可及节点过少造成的方程欠定问题,而不能从根本上予以解决。由于磁场的分布不受电路拓扑结构的制约,因此可以引入磁场检测法实现对接地网精确、直观的故障诊断。加拿大学者DAWALIBI F P首次提出了这一构想,文献[10]系统提出了基于这一思路的磁场检测法。该方法的原理可以概述为通过从接地引下线注入励磁电流,在接地导体上方地表形成检测磁场,通过检测磁场的磁感应强度的实际分布状况,推导出接地导体的健康程度。这一方法具有检测直观、不受不可及节点数量和位置分布影响的优点,但其缺点在于变电站现场磁场检测时,容易受到变压器、互感器等电力设备产生的磁场干扰,导致传统的磁场检测装置无法在该环境下正常工作^[11]。

因此,本文在磁场检测法的基础上,对变电站现场的电磁干扰分布情况进行分析,设计并制作可以产生特定频率的反演磁场、可以抑制电磁场干扰

的磁场检测装置。本文首先对接地网进行分析,研究了磁场检测法的基本原理,分析其在理论上的优越性以及在实际应用中面临的重大问题——变电站现场电磁干扰严重,传统的磁场检测设备无法有效工作;其次,分析变电站现场电磁场干扰的产生原因、分布特点,从而根据其特点获取对硬件检测装置的设计要求;然后,根据上述的设计要求,设计并制作整个硬件系统,包括选取合适的励磁电源、设计合适的信号接收与调理采集电路等。最后,利用接地网模型进行实验,验证整个检测方法和系统的有效性、准确性。

1 磁场检测法原理分析

1.1 基本原理

接地网由水平铺设在地下的镀锌钢导体和接地引下线组成,接地引下线是从地面可以接触接地网的唯一测量端口。考虑到土壤的电阻率远远大于导体本身,因此将土壤视作绝缘介质,整个接地网视作一个多端口纯阻性电网络,其基本单元是各个导体的阻值,其等效模型如图1所示。

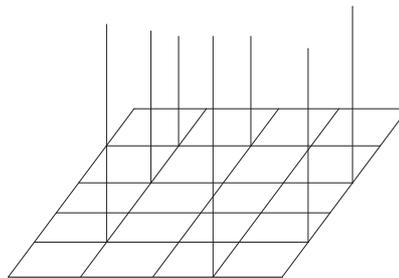


图1 接地网等效模型

Figure 1 Grounding grid equivalent model

在上述电网络中,接地引下线对应的节点称为可及节点,其余节点称为不可及节点。由电网络的特性可知,网络的端口电阻值是全部支路阻值的函数,因此通过在接地引下线之间量测该网络的端口电阻值,可以反推出支路电阻值。但在工程实际中,由于不可及节点数量众多,导致列写的端口阻值诊断方程是欠定的。此时电网络的方法难以精确求解支路电阻值,并且,可及节点越少,诊断的可信度越低^[12]。

考虑到磁场的分布不受电路拓扑结构的约束,

因此可以采用磁场检测法突破电网方法求解精度的局限性。

磁场检测法的基本思路是在接地网可及节点之间注入激励电流^[13],使得励磁电流尽可能地流经全部接地网导体支路,此时在地表描绘激励磁场的磁感应强度分布情况,并与理论上的磁场磁感应强度分布进行比较,即可找出具体的病态支路。根据毕奥萨法尔定律^[14],可以得到:

$$B_{ij} = \int \frac{\mu}{4\pi} \frac{I_j dl_j}{z_{ij}^2} e_r \quad (1)$$

式中, B_{ij} 为原接地网中的第 j 段导体在第 i 个地表点感应的磁感应强度矢量; μ 为土壤中的磁导率; I_j 为第 j 段导体中电流矢量; dl_j 为导体中的电流微元; e_r 为电流微元到第 i 个地表点的方向矢量; z_{ij} 为第 j 段导体线元到第 i 个地表测量点的距离,则第 i 个地表测量点的磁感应强度为所有 b 条导体感应出的磁感应强度向量和,即

$$B_i = \sum_{j=1}^b \int \frac{\mu}{4\pi} \frac{I_j dl_j}{z_{ij}^2} e_r = \sum_{j=1}^b (M_{ij} \cdot I_j) \quad (2)$$

式中, B_i 为第 i 个地表测量点感应出的磁感应强度; M_{ij} 为第 j 段导体电流在第 i 个地表测量点的磁感应强度算子。进一步可以整理成如下矩阵公式:

$$B = MI_b \quad (3)$$

式中, B 为 m 维地表测量点磁感应强度向量; M 为 $m \times b$ 维磁感应强度算子矩阵; I_b 为 b 维接地网导体支路电流向量。

当接地导体发生故障时,主要影响与其激励电流方向垂直的磁感应强度分量。即当沿 X 轴分布的接地导体故障、流经导体的电流大小发生变化时,地表磁感应强度 B_y 分量会出现较大变化,如图2所示。

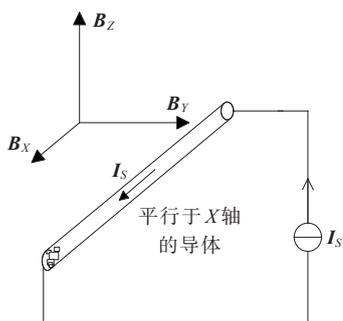


图2 垂直方向磁场分布

Figure 2 Schematic diagram of vertical magnetic field distribution

根据上述影响规律,可以通过大量测量接地网地表磁场,描绘出磁场分布图像,再与完好接地网地表磁场进行对比,从而判断接地网是否发生故障,并且确定故障位置。

若病态区域^[15]由3个及以上的可及节点确定,则选定某一节点为参考节点,剩余的节点分别接通异频交流电流源,这样可以在所关注的病态支路区域唯一确定电流分布。又因为磁感应强度大小和电流大小成正比,所以可以测得的磁感应强度大小与正常情况下的理论值进行比较,反推出具体支路电阻的大小。

1.2 变电站电磁干扰分析

上述接地网磁场检测法原理清晰,检测结果直观,但是限制这一方法应用的主要因素是现场磁场测量困难。传统的磁场检测一般采用特斯拉计^[16],配备霍尔探头来实现空间磁场的测量。但是,该设备的信号选择性较差,在变电站的工作环境下,由于输电线路及变压器中高电压、大电流的存在,环境中广泛存在着各种频率的电磁场干扰信号,上述的磁场检测设备难以区分干扰信号和励磁电源产生的测量信号^[17]。因此,为了有效采集磁场信号,需要对变电站的电磁环境进行分析。

电力系统变电站中的电磁干扰按照来源可以分为一次系统产生的干扰和二次系统产生的干扰。一次侧产生的电磁干扰包括稳态电磁干扰和暂态电磁干扰,稳态干扰由工频50 Hz的高电压、大电流产生,包括了广泛存在于设备附近范围的电场、磁场,频率为工频50 Hz及其各个奇数倍的谐波;瞬态电磁干扰则主要由雷击、故障、开关动作瞬间的电压、电流的变化产生,成分复杂,一般都含有大量的高频干扰。而二次侧设备产生的电磁干扰则以数千赫兹的高频电磁场为主^[18]。

考虑上述电磁干扰信号,工频干扰信号的幅值最大,其奇数次谐波的幅值随着频率的变大而快速减小,并且这些干扰信号只要电力系统正常稳定工作就会一直存在。而瞬态的干扰信号只在雷击、短路、过载、开关动作的瞬间大量出现,正常情况下幅值较小。因此,对应的磁场检测装置应该满足:①具备匹配励磁电源频率的能力;②有非常强的抑制工频信号的能力;③有一定的抑制高频信号干扰的

能力;④系统的测量频率不应该改变接地导体的电网络模型。

2 硬件模块设计

2.1 励磁电源频率选择

根据上述变电站电磁环境分析,励磁电源的选择原则^[19]如下。

1) 频率为异频。激励频率避开变电站工频及其各个奇次谐波频率点,如50、150、250、350 Hz等,以保证测量信号在各种频率的干扰信号中保持分辨率;

2) 能够输出特定频率下稳定的交流电流,并确保在安全、合理的范围内,输出电流能够在接地网上方的地面产生磁感应强度较强的磁场,即必须能够穿透接地导体上方厚度达到0.5~2.0 m的土壤、砂石等介质,以便进行测量;

3) 考虑当励磁频率过高时,接地导体之间的自感、互感以及对地的等效电容将不再可以忽略不计,为了不偏离导体电阻值检测这一初衷,励磁频率不宜过高^[14]。

综合以上分析,励磁电源选用33220A型函数信号发生器,频率选择为1 000 Hz。

2.2 信号调理电路设计

磁场的接收探头采用特制的线圈来实现。考虑到密绕线圈的线圈耦合程度更高,漏感更小,且占用体积较小,因此本次设计采用密绕的平面矩形线圈实现磁场接收。根据法拉第电磁感应定律,线圈两端的感应电动势 ϵ 的大小与磁场的磁感应强度的大小 $B(t)$ 、检测线圈的匝数 N 以及线圈切割磁场的横截面积 S 的关系为

$$\epsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{NSdB(t)}{dt} = -\frac{kdB(t)}{dt} \quad (4)$$

探测线圈接收到的初始信号一般较微弱,因此必须在线圈后接入前置放大电路模块。考虑到本次磁场检测高精度、低噪声的需求,前置放大电路采用AD620放大电路来实现。前置放大电路增益和 R_G 关系计算公式为

$$G = \frac{49.4}{R_G} + 1 \quad (5)$$

考虑变电站现场的电磁场干扰以工频50 Hz的干扰最为显著,因此在回波接收环节加入50 Hz工频陷波环节,对50 Hz的信号进行完全滤除处理,其电路采用双T型网络设计,如图3所示。

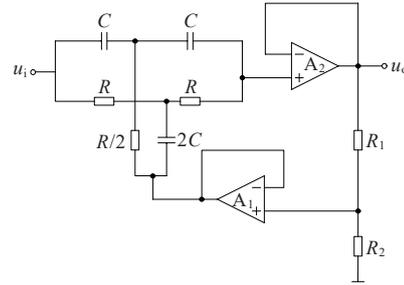


图3 双T型陷波电路拓扑

Figure 3 Topology diagram of double T trap circuit

该陷波电路的传递函数为

$$G(s) = \frac{U_o}{U_i} = \frac{s^2 + (\frac{n}{C})^2}{s^2 + (\frac{n}{C})^2 + 4(1-m)s\frac{n}{C}} \quad (6)$$

式中, $n = \frac{1}{R}$; $m = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ 。

令 $s = j\omega$ 得到:

$$G(j\omega) = \frac{\omega^2 + (\omega_0)^2}{\omega^2 - \omega_0^2 - j4(1-m)\omega\omega_0} \quad (7)$$

式中, $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ 。

当信号频率 $\omega = \omega_0$ 时, $G(j\omega_0) = 0$,频率是 $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ 的信号就会被陷波电路滤除,陷波电路 Q

值是 $Q = \frac{1}{4(1-m)}$, Q 值越大性能越好,需要 m 值接近1,即 $R_2 \gg R_1$,结合 $f_0 = 50$ Hz,故选择元器件的参数如下: $C = 33$ nF, $R_1 = 5.1$ 、 $R_2 = 91$ 、 $R = 96.2$ k Ω 。

此时,工频50 Hz信号已被滤除完毕。由于变电站除了工频以外的谐波干扰信号成分复杂,但是幅值较弱,因此,设计一个中心频率可调节(中心频率即为励磁电源的频率)的带通滤波器环节。考虑到现场测量的复杂性以及对信噪比的高要求,本文采用性能较好的LTC1068型数字电容滤波芯片。

最后,为了补偿信号在上述环节的能量损失,在带通滤波电路后外接一个LM358放大电路作为后置补偿放大电路。

2.3 信号记录与显示

考虑到现场测量与数据记录、处理的便捷性,采用型号为 TLA CTE-7104 的虚拟示波器^[20],将收集到的磁场信号通过 USB 接口传送到 PC 端,配合上位机软件 ChengTecTool 即可实现实时观测波形、记录和导出数据。

至此,完成了整个磁场检测硬件电路的设计。该电路具备较强的抗电磁干扰能力,能够在电磁环境复杂的变电站有效采集到测量所需的磁场信号。整个系统的框架如图 4 所示,据此制作的硬件系统实物如图 5 所示。

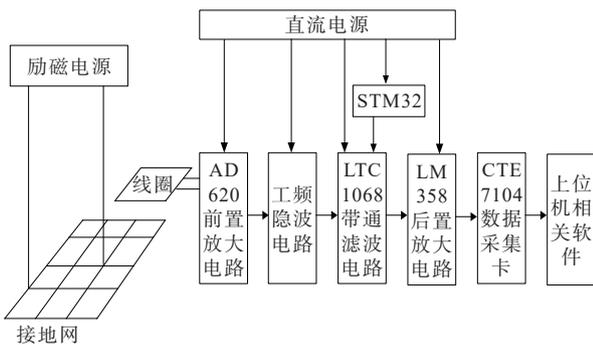


图 4 检测系统总体架构

Figure 4 Overall architecture of detection system

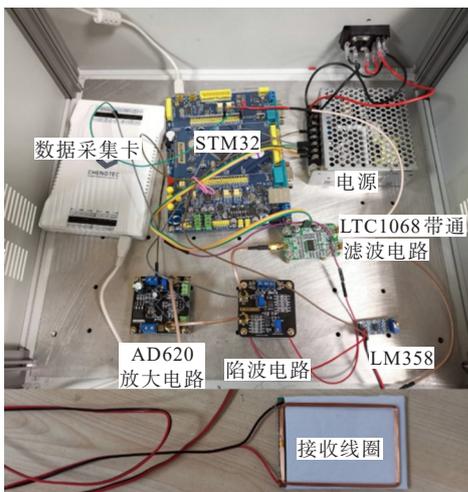


图 5 检测系统硬件装置实物

Figure 5 Object picture of detection system hardware device

3 实验诊断分析

3.1 接地网模型检测

在完成了上述硬件系统的设计与制作后,本文

使用该系统在镀锌钢材质的网格状的接地网模型上进行了参数标定与实验测试。

采用 33220A 信号源作为激励源,稳定输出幅值为 1 A,频率为 1 kHz 的交流电。通过模拟接地引下线注入电流,在接地网模型上方产生磁场,并使用 TD8650 特斯拉计测量磁场的磁感应强度。作为对比与参考,不断调节磁场检测装置中的放大电路的放大倍数,并在各个不同的位置反复测量,直至测到的磁场数据与特斯拉计几乎完全一致。实验测试示意如图 6 所示。



图 6 硬件系统实验测试

Figure 6 Hardware system experiment test chart

模拟接地网拓扑模型如图 7 所示,该模型共有 30 个节点,49 条导体支路,每条导体支路长 10 cm。施加一个频率为 1 000 kHz,最大幅值为 0.1 V 的激励电源,从图 7 中的 A 点与 B 点注入。

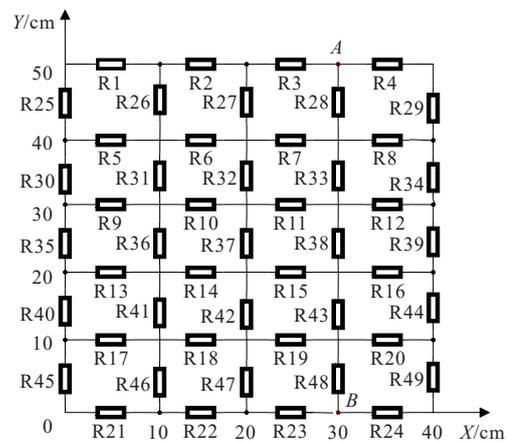


图 7 接地网拓扑模型

Figure 7 Topological model of grounding grid

参数标定完成后,在接地网模型上方选取 10 处测量点,进行对比实验测试,如表 1 所示。数据拟合对比如图 8 所示。

可以看出,经过参数整定后,利用本文设计的磁场测量装置测得的磁场数据与特斯拉计测到的

结果非常接近,误差在 5% 以内,可以认为上述磁场检测装置能独立完成磁场测量的工作。

利用 33220A 信号源在实验接地网上同时施加频率分别为工频 50、150、550 Hz 的奇数次谐波分量的干扰信号,分别测量上述序号 1、2、3 处测量点,重复磁场测量实验取平均值,并计算与基准数据的偏差,结果如表 2 所示。

表 1 测量数据
Table 1 Measured data

序号	测量数 据/mT	基准数 据/mT	误差/ %	序号	测量数 据/mT	基准数 据/mT	误差/ %
1	0.104 5	0.105 9	-1.32	6	0.079 8	0.082 5	-3.27
2	0.123 8	0.130 1	-4.84	7	0.067 2	0.069 3	-3.03
3	0.135 8	0.138 3	-1.81	8	0.088 2	0.088 7	-0.56
4	0.101 5	0.104 1	-2.50	9	0.100 1	0.098 4	1.73
5	0.191 2	0.200 3	-4.54	10	0.101 5	0.105 9	-4.15

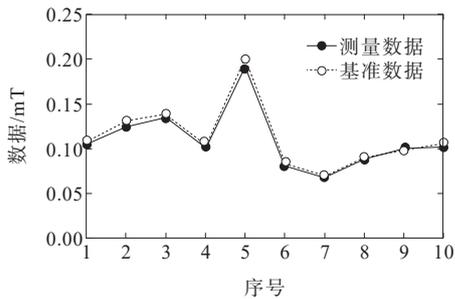


图 8 实验数据对比

Figure 8 Experimental data comparison

表 2 测量数据对比

Table 2 Comparison of measured data

测量点 序号	干扰信 号/Hz	特斯拉计测 量数据/mT	偏差/ %	本硬件装置测 量数据/mT	偏差/ %
1	50	0.130 5	23.23	0.109 4	3.31
	150	0.136 7	29.08	0.108 1	2.08
	550	0.148 5	40.23	0.110 2	4.06
2	50	0.172 1	32.28	0.128 9	-0.92
	150	0.168 9	29.82	0.133 8	2.84
	550	0.171 6	31.90	0.135 4	4.07
3	50	0.168 5	21.84	0.141 2	2.10
	150	0.184 1	33.12	0.144 1	4.19
	550	0.185 8	34.35	0.139 2	0.65

可以看出,在工频或奇数次谐波分量的干扰信号作用下,本文的磁场测量装置较特斯拉计具有更好的抗电磁干扰的能力,具备在电磁环境复杂的变电站现场应用的能力。

在该接地网模型中,进一步分别模拟支路 R37 出现腐蚀故障和断裂故障,测得的垂直于 R37 方向的磁感应强度沿 $Y=25\text{ cm}$ 的剖面图如图 9 所示。

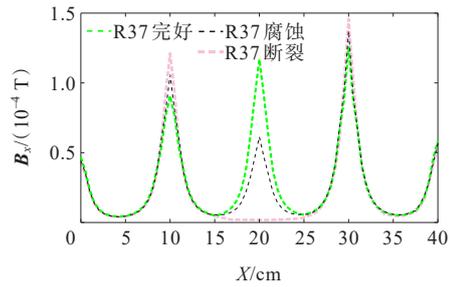


图 9 B_x 沿 $Y=25\text{ cm}$ 磁场剖面图

Figure 9 Section curve of B_x along $Y=25\text{ cm}$

由图 9 可见,支路 R37 发生腐蚀故障时,其地表上方 B_x 分量衰减明显,并且相邻接地导体地表上方 B_x 分量有所增强;当支路 R37 发生断裂时,该现象愈加显著。

3.2 现场接地网应用

将本硬件系统带到某变电站接地网现场进行检测,该变电站接地网的设计如图 10 所示。

建立坐标后,化简成如图 11 所示的接地网拓扑。该拓扑图共 74 条导体支路,每条导体支路长 5 m,从 C 点与 D 点注入施加激励电源。

测得若干的磁感应强度沿 X 轴或者 Y 轴的剖面图,选取有代表性 $Y=7.5\text{ m}$ 的磁场剖面如图 12 所示,发现在 $X=5\text{ m}$ 处,即支路 R58 上方磁场数值起伏较为平缓,这与仿真情况差异较大,并且该接地网拓扑结构和注入激励电流的 2 个节点都是关于 $X=20\text{ m}$ 对称的,对比 $X=35\text{ m}$ 处,即支路 R64 上方发现差异明显,因此判断该处存在导体支路腐蚀故障的情况。后经挖开检验,证明了诊断结果的正确性。

综上所述,本磁场测量装置具有检查接地网腐蚀故障的能力,并且装置模块搭建简单、经济性高,具有一定应用价值。

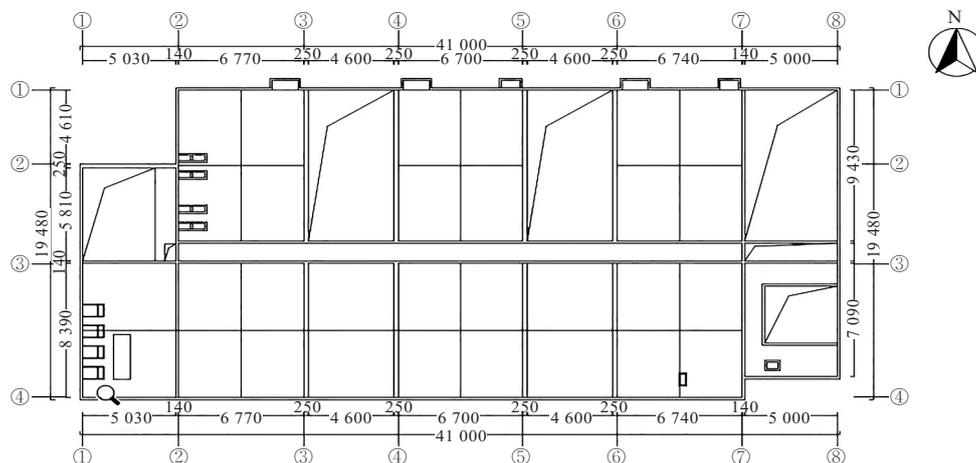


图 10 某接地网设计图纸(单位:mm)

Figure 10 Design drawing of a grounding grid(Unit:mm)

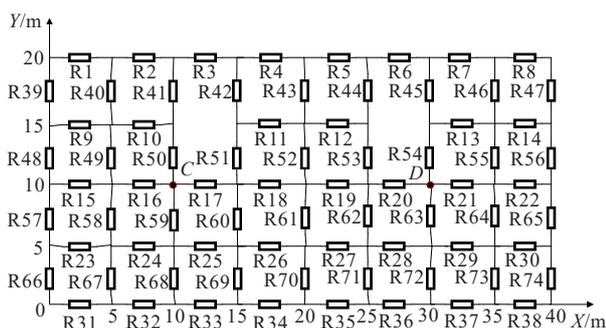


图 11 某接地网拓扑

Figure 11 Topological diagram of a grounding grid

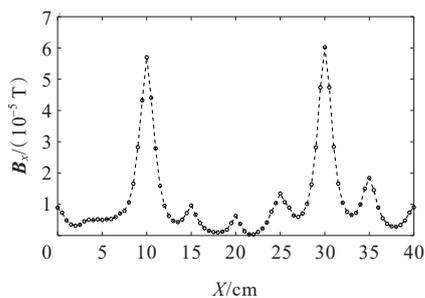


图 12 B_x 沿 $Y=7.5$ m 剖面

Figure 12 Section curve of B_x along $Y=7.5$ m

4 结语

采用磁场检测法检测接地网故障支路不需要盲目开挖,因此,针对磁场检测法检测接地网时存在着大量电磁干扰的问题,本文提出一种计及接地网现场电磁干扰状况的接地网磁场检测法,并给出了硬件设计方案。通过对本系统的分析与实验研究,得到如下结论:

1) 对于可及节点较少或分布不均的接地网,磁

场检测法能够有效克服电参数检测法存在的方程欠定问题,实现更高精度的故障诊断;

2) 变电站现场稳态电磁干扰以工频干扰及其奇数次谐波分量为,暂态干扰来自开关动作或二次设备,以高频分量为;

3) 能够实现抗电磁干扰的磁场信号检测硬件系统,通过接地网模拟测试实验与变电站接地网现场应用,能够测取有效精度数据,验证了该硬件测量系统的可用性。

参考文献:

- [1] 闫孝姮,林晓雪,吕秋皓,等.基于 Homotopy-Tikhonov 算法的接地网电阻抗成像方法[J].电工技术学报,2022,37(9):2284-2294.
YAN Xiaoheng, LIN Xiaoxue, LÜ Qiuhaio, et al. Grounding grid electrical impedance tomography based on homotopy-tikhonov algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(9): 2284-2294.
- [2] 李谦,张波.大型接地网多维度评价及指标校核[J].中国电机工程学报,2018,38(S1):129-136.
LI Qian, ZHANG Bo. Multi-aspect assessment and parameter calculation method of large grounding grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 129-136.
- [3] CHEN H C, DU Y P. Lightning grounding grid model considering both the frequency-dependent behavior and ionization phenomenon[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61(1): 157-165.
- [4] 裴海根.基于电网络理论的赣西某变电站接地网故障诊断研究[D].北京:华北电力大学,2018.
PEI Haigen. The research on Ganxi grounding grids fault diagnosis base on theory of electrical network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.

- [5] 葛瑜,王晓静,朱光辉,等.基于Petri网基础标识的分散式故障诊断方法研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(15):178-186.
GE Yu, WANG Xiaojing, ZHU Guanghui, et al. Decentralized fault diagnosis of labeled Petri nets by basis markings[J]. Power System Protection and Control, 2022,50(15):178-186.
- [6] 谭波,董晓辉,刘鸣亚,等.考虑土壤电阻率分布各向异性的高压直流接地极均流电阻配置方法及试验验证[J].高压电器,2021,57(5):144-150.
TAN Bo, DONG Xiaohui, LIU Mingya, et al. Configuration method and test verification for equalizing resistance of HVDC earth electrode considering anisotropy of soil resistivity distribution[J]. High Voltage Apparatus, 2021,57(5):144-150.
- [7] 许磊,李琳.基于电网络理论的变电站接地网腐蚀及断点诊断方法[J].电工技术学报,2012,27(10):270-276.
XU Lei, LI Lin. Fault diagnosis for grounding grids based on electric network theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012,27(10):270-276.
- [8] SHAYOVITZ S, RAPHAELI D. Message passing algorithms for phase noise tracking using Tikhonov mixtures[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(1):387-401.
- [9] 刘利强,罗先觉,王森,等.接地网腐蚀分块诊断的混合优化算法[J].中国电机工程学报,2009,29(7):33-38.
LIU Liqiang, LUO Xianjue, WANG Sen, et al. Hybrid optimal algorithm for corrosion diagnosis for grounding grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2009,29(7):33-38.
- [10] DAWALIBI F. Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors part 1-single conductor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, 1(4):105-111.
- [11] 姜海波,何思阳,高浩乾,等.接地网缺陷诊断中电磁场检测技术的研究进展[J].功能材料与器件学报,2019,25(3):156-161.
JIANG Haibo, HE Siyang, GAO Haoqian, et al. Summary of research progress on electromagnetic field detection technology in grounding network defect diagnosis[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2019, 25(3): 156-161.
- [12] 刘健,王树奇,李志忠,等.基于网络拓扑分层约简的接地网腐蚀故障诊断[J].中国电机工程学报,2008,28(16):122-128.
LIU Jian, WANG Shuqi, LI Zhizhong, et al. Grounding grids corrosion diagnosis based on hierarchical simplification of network topology[J]. Proceedings of the CSEE, 2008,28(16): 122-128.
- [13] 周秀,吴旭涛,汲胜昌,等.基于空间电容耦合原理的局部放电检测方法及其传感器研究[J].高压电器,2022,58(4):63-69.
ZHOU Xiu, WU Xutao, JI Shengchang, et al. Study on partial discharge detection method and sensor based on principle of space capacitive coupling[J]. High Voltage Apparatus, 2022,58(4):63-69.
- [14] 王丰华,王劭菁,刘亚东,等.采用地表电位和磁感应强度进行变电站接地网故障诊断的效果对比[J].高压电压技术,2016,42(7):2281-2289.
WANG Fenghua, WANG Shaojing, LIU Yadong, et al. Comparison of substation grounding grid fault diagnosis results using surface potential and magnetic induction intensity[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2281-2289.
- [15] CHEN S D, ZHANG Y J, ZHOU M, et al. Transient response of surge protective devices during the potentials transferred between independent grounding grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020,35(2):630-638.
- [16] 李志忠,汤亮亮,王森,等.基于感应视磁阻抗法的接地网拓扑结构和故障的检测系统[J].腐蚀与防护,2021,42(3):57-63.
LI Zhizhong, TANG Liangliang, WANG Sen, et al. Grounding grid topology and fault detection system based on inductively apparent magnetic impedance method[J]. Corrosion & Protection, 2021,42(3):57-63.
- [17] 施会,王丰华,胡徐铭,等.变电站接地网电磁诊断法的试验研究[J].电测与仪表,2018,55(16):6-12.
SHI Hui, WANG Fenghua, HU Xuming, et al. Experimental studies on substation grounding grid fault diagnosis using electromagnetic diagnosis method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018,55(16):6-12.
- [18] 王劭菁,王丰华,周东旭,等.基于电磁层析成像技术的接地网导体异常检测[J].电测与仪表,2021,58(6):140-147.
WANG Shaojing, WANG Fenghua, ZHOU Dongxu, et al. Abnormal detection of grounding grid conductor based on EMT technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021,58(6):140-147.
- [19] 唐晓辉.变电站的电磁干扰预测分析[D].天津:河北工业大学,2007.
TANG Xiaohui. Forecast and analysis of electromagnetic interference in substations[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2007.
- [20] 程宏伟,高莲,于虹,等.基于改进果蝇算法优化BP神经网络的接地网腐蚀速率预测模型[J].电测与仪表,2022, 59(11):71-78.
CHENG Hongwei, GAO Lian, YU Hong, et al. Corrosion rate prediction model of grounding grid based on BP neural network optimized by updated fruit fly optimization algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022,59(11):71-78.