

应用磁感应强度诊断接地网故障的试验研究

为进一步提高变电站接地网导体断点故障的诊断准确度，基于测量接地网地表面磁感应强度的诊断方法，以某35 kV变电站接地网为原型设计和定制了接地网试验模型，对接地网发生导体变细、断裂和脱焊等典型腐蚀故障下的磁感应强度及接地电阻进行了测试分析。试验结果表明：接地网在正常情况与典型腐蚀故障下的接地电阻基本保持不变，而地表面的磁感应强度则随导体状态的变化有明显改变。接地网导体变细时，故障支路的地表面磁感应强度下降明显；接地网存在断裂与脱焊故障时，故障处的地表面磁感应强度则接近于0，但与之相邻的正常支路的地表面磁感应强度则有不同程度的上升。研究结果可为有效诊断因接地网腐蚀而引起典型接地网故障提供依据。

司文荣/上海电力公司电力科学研究院

王丰华 穆卡 刘亚东/上海交通大学电气工程系

0 引言

接地网是变电站的重要组成部分，其可靠性对电力系统的安全运行有着重大意义。我国主要采取镀锌扁钢材料制造接地网，且大部分的变电站接地网运行时间已达到5~10年^[1]。因此，此类接地网不同程度地存在着腐蚀缺陷，轻则使接地网导体变细，重则使接地网导体发生断裂、脱焊等现象，引起接地网接地性能的降低，甚至会造成严重事故，已成为电力系统中亟待解决的重大问题。

现有工程应用中，往往通过大面积开挖对接地网的故障进行诊断，较为盲目且费时费力。为准确高效地实现隐患接地网的故障诊断，查找接地网的腐蚀段已成为电力部门的一项重大的反事故措施。有大量文献对这一问题进行研

究，主要可分为采用电路和网络理论分析方法、基于地表电位或磁场分布的方法两大类。

电路网络和理论分析方法主要是根据接地网拓扑结构与支路电阻的数据建立故障诊断方程，通过求解方程获取支路导体电阻的变化情况对接地网的故障进行诊断^[2-5]。为了提高应用该方法进行接地网故障诊断的准确性，研究者分别从如何计算得出接地网各导体的实际电阻准确值^[2]、使用诸如具有记忆特性的禁忌搜索算法^[3]、单纯形与禁忌搜索结合的改进诊断算法^[4]和遗传算法^[5]等方法来提高诊断方法的准确性。但在实际应用中，常常难以获取接地网每条支路的电阻准确值，且实际电网中并不是所有节点都用上导体，从而限制了该方法的应用。基于地表电位分布的方法通过测量接地网的地表电位、跨步电压和接触电压等参数进行诊断，但当接地网导体局部断开时，利用此方法存在一定不足^[6]。

磁场法则通过向接地网注入异频交流电流，测量该电流激发的地表磁感应强度来进行诊断。研究人员进行了仿真计算，基于有限元方法计算了电流在地表激发的磁感应强度^[7]，实现了接地网导体断点故障的诊断^[8]、未知形状接地网网格结构的探测^[9]。研究结果表明该方法可有效诊断出接地网的断点故障，其原理简单，便于应用到工程中。

但无论基于何种理论，现有研究更多是以仿真计算为主，虽有部分文献辅以接地网模型试验研究，但所关注的故障类型较为单一，而实际接地网的故障



司文荣/高级工程师

关键词/Keywords

变电站·
磁感应强度·
接地网·
接地电阻·
腐蚀·

国家自然科学基金(51307109)。

复杂多变, 需要进一步寻求不同类型、不同严重程度故障的诊断方法。

考虑到现有基于接地网地表磁感应强度分布诊断接地网故障的方法具有较大的工程应用价值, 文中通过设计和定制接地网模型, 对接地网导体典型故障下的地表磁感应强度分布进行试验研究, 期望获取更为准确的接地网地表磁感应强度随接地网导体状态的变化规律, 为实际工程应用提供依据。

1 基本原理

电磁感应法诊断接地网故障的基本思路是通过两根电流引线向接地网注入交流电流。根据电磁感应原理, 接地网导体流过电流时会在其周围空间产生感应磁场, 磁场强度的大小可根据毕奥-萨伐尔定律确定, 为

$$B = \int \frac{\mu_0 I r dl}{4\pi r^3} \quad (1)$$

式中, B 为导体单元轴向电流在地表所激发的磁感应强度; I 为水平导体单元的轴向电流; r 为线单元点与地表场点之间的位置矢量。

式(1)所示的磁场信号可以用感应线圈进行测量, 根据法拉第电磁感应定律, 该交变磁场在线圈中会感应出来一个感应电动势。若设导体轴向电流在地表产生的磁感应强度为

$$B = B_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

式中, ω 为电流的频率; B_m 为磁感应强度幅值。

则感应线圈中的总磁链和感应电动势分别为

$$\Psi = NBS \cos \theta \quad (3)$$

$$E = \frac{d\Psi}{dt} = 2\pi f N S B_m \cos(\omega + \varphi) \cos \theta \quad (4)$$

式中, N 为线圈的总匝数; S 为线圈的截面积; θ 为感应线圈平面与磁感应强度的夹角。

因此, 可通过采集接地网导体的感应电压信号得到地表磁感应强度, 进而获取接地网导体通过电流的状况, 判断导体是否发生故障。若导体存在断点, 则无电流通过, 磁感应强度应接近于0; 若该段导体被腐蚀变细, 则其电阻变大导致电流减小, 磁感应强度应小于正常情况。

2 试验研究

2.1 试验接地网描述

研究对象源于某供电公司35 kV变电站接地网, 该接地网为34.4 m × 42.6 m、埋设0.8 m的不规则接地网, 由5根横向水平导体、5根纵向水平导体及若干垂直接地极构成。其中, 水平导体采用的材料均为规格25 mm × 6 mm的镀锌扁钢, 垂直接地极同样采用圆钢材料, 其规格为直径38 mm, 长2.5 m。

图1为根据实际接地网基于量纲相似原理设计的接地网模型示意图, 该模型接地网与实际接地网形状基本一致, 按照约1:5的比例进行了缩小。其占地面积为7 m × 9 m, 水平导体采用了25 mm × 6 mm规格的镀锌扁钢, 垂直接地极采用了直径为38 mm、长0.5 m规格的圆钢, 埋深为0.5 m。

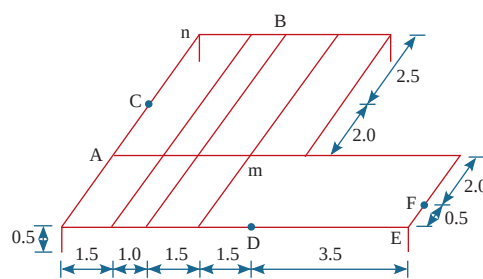


图1 试验接地网模型

为便于分析记录数据, 根据接地网模型的结构建立如图2所示坐标系。

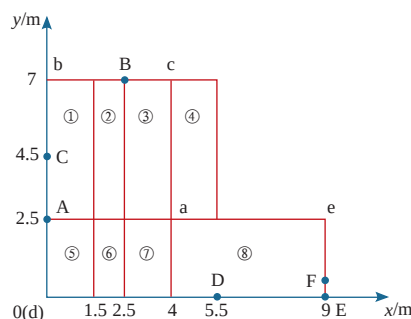


图2 接地网模型坐标系设置

测量故障设置点的方框地表磁感应强度分量 B_x 与 B_y , 其中 B_x 代表沿x轴方向的磁场分量, B_y 代表沿y轴方向的磁场分量。测量时, 沿x、y轴方向每隔0.5 m取一个测量点, 测量范围包括水平导体正

上方以及各方框内地下无导体的部分。

电流注入点按如下原则选择：测量图2中上方①~④方框时采用a-b注入方式；测量下方⑤~⑧方框时采用d-e注入方式。

2.2 典型故障模拟

本研究主要对接地网导体腐蚀变细、导体断裂和导体连接点脱焊等三种故障类型进行了模拟，并通过设置故障点多少来模拟故障的严重程度。具体如下表所示。下表中各类故障在接地网模型的设置位置如图1所示。A、B点是脱焊设置点；C点在A点上方2 m处，是导体断裂模拟点；D点位于最下方一根导体5.5 m处，同样是导体断裂模拟点；E点是导体连接点；EF段长0.5 m，模拟导体变细故障。

表 故障设置

试验序号	具体故障	故障设置方式
1	A点脱焊	断开A点螺栓
2	A、B点同时脱焊	断开A、B点螺栓
3	C点断裂	断开C点螺栓
4	C、D同时断裂	断开C、D点螺栓
5	EF段腐蚀变细	用细导体替换EF段

为便于操作，模型接地网制作时各个故障点与故障段采用螺栓铆接，故在试验过程中可较为方便地进行故障的设置与恢复。

2.3 磁场信号的获取

磁场信号采集系统包括异频电流信号源、感应线圈、信号采集系统和数据处理软件等环节。图3为磁场信号产生、采集和处理的流程。

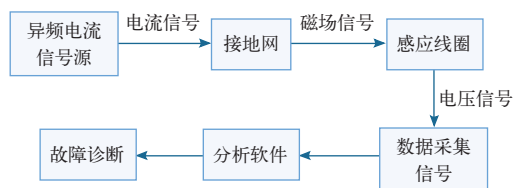


图3 磁场信号处理流程

试验采用澳大利亚红相公司的8100型接地装置特性测量与管理系统，该系统的变频信号源4046可输出频率40~69 Hz，大小2~20 A的电流信号。为了减小周围环境的工频干扰，试验采用异

频电流信号注入接地网，对异频电流信号产生的磁场信号进行采集处理。本文在此采用65 Hz、6 A的电流信号注入接地网进行试验。

试验利用感应线圈采集磁场信号来探测地下导体。其中，感应线圈由直径1 mm的漆包线缠绕在长16 cm、宽4 cm的矩形线框上制作而成，线圈匝数为 $N=350$ 。依据此感应线圈尺寸，根据式(3)和式(4)计算可得线圈中1 μV 感应电压对应磁感应强度为1.09 nT。

由磁场信号感应出来的电压信号由基于NI/COMPACTRio的数据采集系统进行采集。对采集到的电压信号进行FFT处理，提取频率为65 Hz的分量，根据对应关系即可得到地表磁感应强度数据。

2.4 试验过程

将6 A、65 Hz的电流信号注入接地网，按如下步骤开始试验。

(1) 导体探测

不设置任何故障，在正常工况下首先按照温纳法测量土壤电阻率，利用0.618法测量接地网模型的接地电阻。然后测量接地网各方框内的磁感应强度 B_x 与 B_y 。

(2) 故障模拟

按照上表的试验顺序设置故障类型，每种故障下首先测量接地电阻的大小，然后测量存在故障的方框内磁感应强度的分布情况，测量点的分布以及电流注入方式与正常工况完全相同。

3 结果分析

根据理论与试验结果，垂直导体电流方向的磁感应强度分量最大，因此选择该方向的磁感应强度分量进行分析，即x方向导体选择 B_y 分量，y方向导体选择 B_x 分量进行分析。

为了对比正常情况与故障情况下地表磁感应强度分布情况，本文主要选取存在故障设置点的导体及其平行相邻的导体进行分析。

3.1 导体探测

试验测量了正常情况下，地表的磁感应强度分布情况。正常情况下，接地网实测接地电阻为

2.06 Ω 。选取 $x=0$, $x=0.75$, $x=1.5$ 三段直线进行分析,其磁场分布情况如图4所示。其中, $x=0$ 与 $x=1.5$ 正下方存在导体, $x=0.75$ 正下方无导体。由图4可见,在①方框内,导体正上方的地表磁感应强度约为0.25~0.5 μT ;而无导体处对应的地表磁感应强度约为0~0.1 μT ,二者区别明显,电磁感应方法能够有效探测到地下导体的存在。电流从点(4, 2.5)注入,从点(0, 7)抽出,故此处磁感应强度较大。

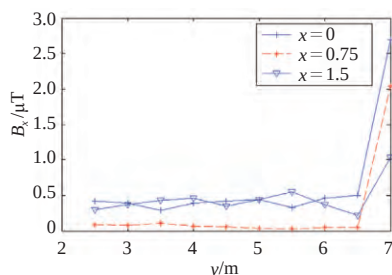


图4 磁场测量结果

文献[10]采用20 A、410 Hz的异频正弦波注入埋深0.8 m的接地网,正常情况下其磁感应强度测量结果为0.3~0.5 μT 。根据式(1)将其测量结果进行距离折算后,与本文的测量结果在数量级上保持一致,在一定程度上说明了本文测试结果的有效性。

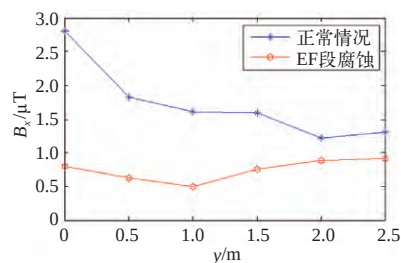
3.2 腐蚀变细故障

试验模拟了0.5 m长的导体变细故障。EF段导体即变细导体段,位于方框⑧内。腐蚀变细故障下,接地网实测接地电阻为2.094 Ω 。

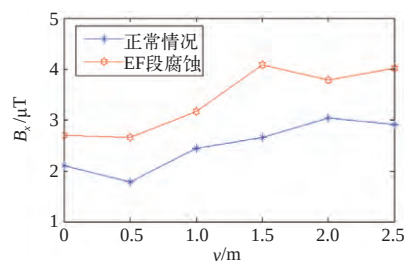
图5为导体腐蚀故障与正常情况的对比。当导体发生腐蚀故障时,其电阻变大,通过的电流变小,磁感应强度随之变小。发生腐蚀故障的EF段导体只与方框⑧内 $y=0$ 段导体相连。由图5可见,腐蚀故障下 $y=0$ 段导体磁感应强度明显减小,约为正常情况的35%~70%。同时,与之相邻的 $y=2.5$ 段正常导体磁感应强度较正常情况有所增大,达到了正常情况的1.2~1.7倍。

3.3 断点故障

断点故障位于导体中间。单点断裂故障下,接地网的接地电阻为2.16 Ω ;两点断裂情况下,接



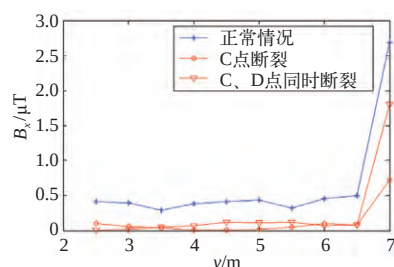
(a) $x=9$ 段导体磁感应强度分布



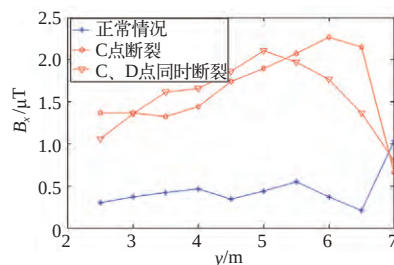
(b) $x=4$ 段导体磁感应强度分布

图5 腐蚀故障磁场测量结果

地网的接地电阻为2.022 Ω 。图6为两种导体断裂故障与正常情况的对比。由图6可见,导体发生断点故障时,发生断点故障的 $x=0$ 段导体无电流通过,磁感应强度同样接近于0。同时,与之相邻的 $x=1.5$ 段正常导体磁感应强度也达到正常情况的4倍左右。D点断裂时,方框⑧内有类似方框①的磁感应强度分布规律,即故障段磁感应强度接近于0,其相邻的正常导体磁感应强度变大为正常情况的2~4倍。



(a) $x=0$ 段导体磁感应强度分布



(b) $x=1.5$ 段导体磁感应强度分布

图6 断裂故障磁场测量结果

3.4 脱焊故障

脱焊故障位于导体连接点处,会造成多条支路断开。单点脱焊故障下,接地电阻为 $2.094\ \Omega$;两点脱焊故障下,接地电阻为 $2.042\ \Omega$ 。图7为两种脱焊故障与正常情况的对比。由图7可见,导体发生脱焊故障时,方框①内与脱焊点相连的 $x=0$ 段导体无电流通过,磁感应强度明显降低,接近于0。此外,在同样的脱焊故障下, $x=1.5$ 段导体无故障发生,但其磁感应强度较正常情况也发生了较大变化:A点脱焊时,该段导体磁感应强度达到了正常情况的3~5倍,A、B点同时脱焊时,达到正常情况的8~20倍。这是由于 $x=1.5$ 段导体两侧相邻导体发生故障,该段导体通过电流变大而造成的,相邻导体故障越严重,该导体的磁感应强度变化也越大。

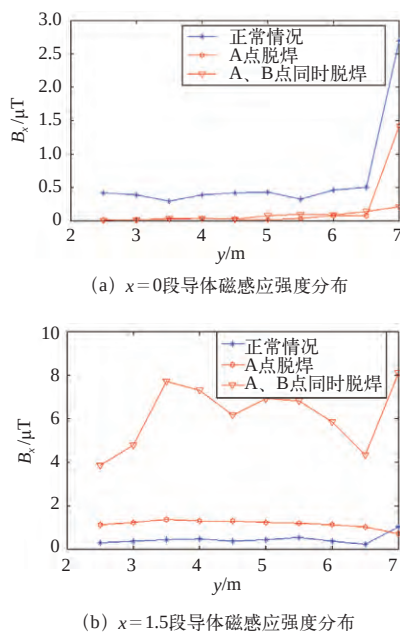


图7 脱焊故障的磁场测量结果

综合接地网正常与前述接地网导体典型故障时的地表磁感应强度分布可见,利用电磁感应原理测量地表磁感应强度分布的方法能够有效地诊断出接地网断点、脱焊和腐蚀等故障,且不同类型的故障各有其特点,主要为:

1) 导体发生断点、脱焊和腐蚀等故障时,导体正上方的地表磁感应强度较正常情况会发生明显的跌落。断点、脱焊故障下磁感应强度跌落至0

左右,腐蚀故障下跌落至正常情况的10%~70%,腐蚀故障越严重,跌落幅度越大。

2) 故障导体对应的地表磁感应强度会发生明显变化,与之相邻的正常导体对应的地表磁感应强度也会发生变化。断点与脱焊故障下,相邻正常导体对应的地表磁感应强度能够达到正常情况的3倍以上;腐蚀故障下,可达正常情况的1.3~2倍。若已知某段导体发生脱焊、断点等故障,相邻导体的磁感应强度较正常情况没有增大甚至减小,则该段导体有较大可能性发生腐蚀故障。

3) 导体的故障点越多,腐蚀的情况越严重,与故障导体相邻的正常导体的磁感应强度增大幅度越大。

4 结束语

本文基于电磁感应原理,利用测量地表磁感应强度分布的变电站接地网故障诊断方法,针对腐蚀引起的导体变细、断裂和脱焊等典型故障进行了模拟试验,测量了不同故障下的接地电阻与磁感应强度分布情况,得到了如下结论:

1) 在各种工况下,接地网的接地电阻基本保持不变,与是否发生故障无关。

2) 利用测量地表磁感应强度分布的方法可有效区分接地网的正常状态与故障状态,进而诊断接地网腐蚀而引起的导体变细、断裂和脱焊等故障。

3) 导体变细故障下,故障支路对应磁感应强度明显下降,约为正常情况的10%~70%;断裂与脱焊故障下对应的磁感应强度接近于0。相对应地,与故障支路相连的正常支路磁感应强度则会有不同程度的增大,达到正常情况的几倍。

因该模型来源于实际,下一步将根据本文的诊断方法,对工程接地网的腐蚀状态进行分析与评估。

参考文献

- [1] 李志忠. 接地网腐蚀故障诊断方法的研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2008: 1-62.
- [2] Hu Jun, Zhang Rong, He Jinliang. Novel method of corrosion diagnosis for grounding grid [C].

- Proceedings of the 2000 International Conference on Power System Technology, Perth Australia, 2000, 3: 1365-1370.
- [3] 刘渝根, 田资, 钱国超, 等. 基于遗传算法的接地网腐蚀故障研究 [J]. 高压电器, 2013, 49 (7): 18-24.
- [4] 程红丽, 刘健, 王森, 等. 基于禁忌搜索的接地网故障诊断 [J]. 高电压技术, 2007, 33 (5): 139-142.
- [5] 张蓬鹤, 何俊佳, 尹小根. 采用模糊理论的接地网故障诊断方法 [J]. 高压电器, 2011, 47 (5): 54-58.
- [6] 刘健, 王建新, 王森. 一种改进的接地网故障诊断算法及其测量方案评价 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (3): 71-77.
- [7] 刘洋, 崔翔, 赵志斌, 等. 基于电磁感应原理的变电站接地网腐蚀诊断方法 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (4): 97-103.
- [8] 刘洋, 崔翔, 卢铁兵. 变电站接地网的断点诊断方法 [J]. 电网技术, 2008, 32 (2): 21-25.
- [9] 刘洋, 崔翔, 赵志斌. 变电站接地网结构判断与缺陷诊断方法 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (24): 113-118.
- [10] 刘洋, 江明亮, 崔翔. 变电站接地网导体与网格结构探测方法 [J]. 电工技术学报, 2013, 28 (5): 167-173.
- [11] 江明亮. 磁场测量方法及在变电站接地网检测中的应用研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2013: 1-73.
- [12] 刘渝根, 滕永禧, 陈先禄, 等. 接地网腐蚀的诊断方法研究 [J]. 高电压技术, 2004, 30 (6): 19-21.
- [13] 张晓玲, 黄青杨. 电力系统接地网故障诊断 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14 (1): 48-51.
- [14] 刘健, 王树奇, 李志忠, 等. 接地网腐蚀故障的可测性研究 [J]. 高电压技术, 2008, 34 (1): 64-69.
- [15] 程红丽, 杨燕娜, 刘健, 等. 接地网故障诊断自动测试系统及其关键技术 [J]. 高电压技术, 2009, 35 (12): 2989-2994.
- [16] 肖新华, 刘华, 陈先禄, 等. 接地网腐蚀和断点的诊断理论分析 [J]. 重庆大学学报, 2001, 24 (3): 72-75.

(收稿日期: 2015-03-16) EA

信息动态

台达亮相2016 DCD Enterprise China “微模块”相约上海中心

作为全球知名数据中心峰会——“2016年Datacenter Dynamics Enterprise”（以下简称：DCD Enterprise）的主要赞助商，台达于2016年6月15日华丽亮相上海站现场，聚焦微模块数据中心，展示在金融、数据中心机房（IDC）和教育等行业的领先基础架构解决方案。

数据中心正在转型，或将是一场颠覆性的行业革命。高冗余设计和漫长的规划实施周期正逐渐变得多余，追求高性能、低功耗和便捷扩容的“互联网+”时代数据中心必须首先解决这些问题，更要兼具系统的稳定性和智慧化的管理运维。DCD Enterprise China 2016齐聚行业大咖来定义数据中心的未来，一起讨论全球趋势和创新如何影响

中国数据中心行业。

作为绿色数据中心解决方案的领导者，台达在倡导为数据中心提供可靠的解决方案的同时，更努力打造适应行业发展趋势所需的新产品与方案，降低客户的运营成本，节约更多的能源。针对互联网+时代整合、敏捷、高性能及高可用性的特点，台达提出了兼具“模块架构、随需成长”，“节能降耗、绿色效益”，“智能管理、便捷营运”三大特征的微模块数据中心解决方案，并在2016年DCD Enterprise上海场隆重展示。活动同期，台达集团-中达电通的技术专家戴林华先生也在大会《随需扩容 无“微”不至》的主题发言中做详尽阐述。