

# 变电站接地网结构判断与缺陷诊断方法

刘洋, 崔翔, 赵志斌

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北省保定市 071003)

## Method of Structure Estimation and Fault Diagnosis of Substations' Grounding Grids

LIU Yang, CUI Xiang, ZHAO Zhi-bin

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

**ABSTRACT:** In order to estimate grounding grids' structure of substation, search the fault position and diagnosis the fault state, a sine wave current was injected directly into grounding grid by two existing ground lead wires. At the same time, the distributions of the surface magnetic induction intensities were measured. Then the structure of grounding grids was concluded and the faults position was deduced. The fault states of mesh conductor becoming thin or broken could be diagnosed based on the distribution characteristics and changing laws. The experimental results show that the method is simple and effective, and it can be used in engineering practice.

**KEY WORDS:** substation; grounding grids; measuring magnetic field; structure estimation; fault diagnosis

**摘要:** 为了推断变电站接地网的结构, 寻找缺陷部位和缺陷状态, 利用接地网现有的两下引导体直接注入正弦波电流, 通过测量地表面磁感应强度的分布, 判断出接地网的结构。根据磁感应强度的分布特征和变化规律, 寻找接地网缺陷部位, 诊断网格导体断点和变细的缺陷状态。实验研究结果表明, 所提方法简便、有效, 可用于工程实际。

**关键词:** 变电站; 接地网; 磁场测量; 结构判断; 缺陷诊断

## 0 引言

变电站接地网为站内各种电气设备提供了一个公共的电位参考地, 既可以起到均压的作用, 当系统遭受雷击或发生短路故障时还可以泄放故障电流, 这对保障变电站的安全运行, 保护站内工作人员及各种电气设备的安全至关重要。接地网的设计和接地安全性能一直受到相关生产部门的重视

和许多学者的关注<sup>[1-5]</sup>。在接地网设计和接地性能测试方面, 国外起步较早, 开展了大量研究工作, 开发了接地网设计与接地性能分析软件包<sup>[6]</sup>, 制订了相关标准<sup>[7]</sup>。在中国、印度等国家, 由于接地网大多使用钢质材料, 随着投入运行年限的增加, 因焊接施工不当及地质条件的影响等原因易发生腐蚀, 接地均压导体可能变细甚至断裂, 导致接地网的接地性能降低, 出现安全隐患。

寻找接地网导体的缺陷位置并诊断缺陷状态是评估接地网安全性能的一个重要手段。有文献基于电路和网络理论, 依赖可触及节点间电阻的测量进行诊断<sup>[8-16]</sup>, 有的通过测量接地网地表面的电位差进行接地网故障诊断<sup>[17]</sup>, 也有的通过测量地表面的磁场分布进行诊断<sup>[18-20]</sup>。其中, 磁场测量诊断方法在实际工程中较为方便。有的还专门开发了电流源和磁场测量系统<sup>[21-22]</sup>。另外, 在对年限较久的变电站接地网进行诊断时, 有时会遇到接地网图纸缺失或出现接地网实际结构与图纸存在较大误差的情况。本文准备通过磁场检测方法, 研究在接地网图纸缺失的情况下, 判定埋入地下接地网的位置和结构的方法, 并确定接地网导体缺陷状态和部位。

## 1 基本原理

### 1.1 仿真计算

判断接地网结构与缺陷诊断的方案是: 通过接地网的两根上引导体线向接地网注入一定频率的正弦波电流, 基于电磁感应原理, 利用磁感应强度测量系统检测接地网导体各支路电流在地表面激发的磁感应强度, 然后, 根据磁感应强度的分布特征和规律确定接地网的结构和网格导体的故障状态。

为了说明推断接地网结构及缺陷诊断的方法和原理, 进行模拟仿真计算。变电站接地网电磁场

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAA02A20); 华北电力大学博士基金项目(200912008)。

Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China (2006BAA02A20); Project Scientific Funds for Doctors of North China Electric Power University (200912008).

的数值计算方法已比较成熟。本文直接应用课题组开发的接地网接地性能分析软件,对诊断原理和方法进行分析和检验。该软件是基于矩量法和电路理论,以接地导体漏电流为未知量开发的,可以分析土壤结构、接地网接地性能、地表电位分布和磁感应强度分布,其有效性已得到充分验证<sup>[5]</sup>。以图1所示的接地网模型为例,水平和垂直方向分别有11根接地导体,每根导体长100m、直径12mm,每隔10m有一个交叉焊点,每根导体分为10段,设接地导体电阻率为 $1.78 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ ,相对磁导率为200,接地网埋深为0.8m;设定土壤水平分为2层,第1层厚5m,土壤电阻率为 $80 \Omega \cdot m$ ,第2层土壤电阻率为 $200 \Omega \cdot m$ 。

从图1中的点B(50,0)处注入正弦波电流,电流强度为10A,频率为380Hz,从点A(50,100)处抽出电流。计算结果以地表面上沿 $x=40m$ 和 $y=60m$ 两个方向的磁感应强度分量幅值 $B_x$ 的分布为例,计算结果如图2所示。从图2可以看出 $B_x$ 的分布规律,

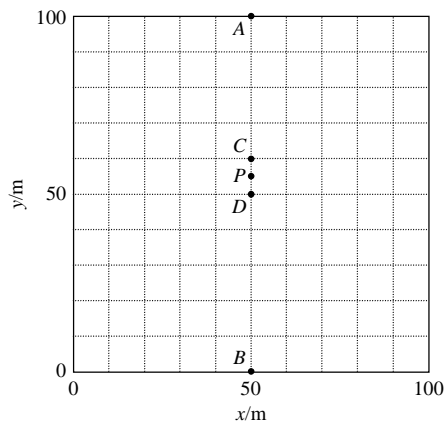


图1 接地网仿真计算模型

Fig. 1 A simulation calculation model of grounding grids

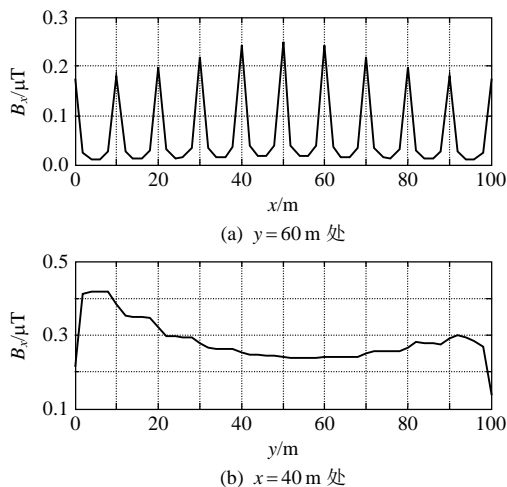


图2  $B_x$  的分布

Fig. 2 Distributions of  $B_x$

接近电流注入与抽出点的接地网地表面邻近区域, $B_x$ 的值较大;垂直于AB段导体电流方向的地表面, $B_x$ 呈现波浪式分布,并且对应每根导体地表面出现一个峰值;平行于AB段导体电流方向的导体地表面, $B_x$ 的分布较平缓,正常情况下,不存在突变和明显跌落的情况。

为了寻求接地网网格均压导体缺陷诊断的判据,需要研究当接地网导体局部变细断裂或出现断点后引起地表面磁场的变化规律和特征。本文作下述几种假设:1)图1中点D(50,50)与点C(50,60)之间的导体直径腐蚀变细为6mm;2)图1中DC段导体腐蚀变细为3mm;3)图1中点P(50,56)处出现一个1mm的小断口。3种缺陷状态与接地网正常时 $B_x$ 沿 $x=50m$ 处的仿真计算结果如图3所示。

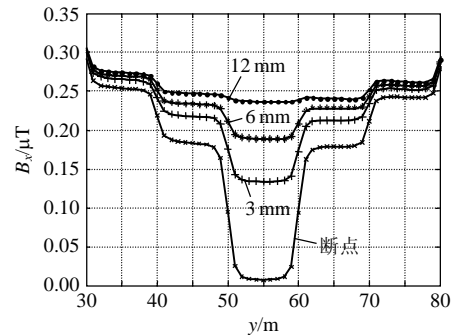


图3 磁感应强度分布的比较

Fig. 3 Comparisons of the  $B_x$  distributions

由图3可以看出,接地网某段网格导体变细后,该导体对应地表面的磁感应强度 $B_x$ 均有明显下降,在本文仿真条件下,约为50nT。接地网导体即使出现一个很小的断点,也会导致 $B_x$ 骤降,趋于零。上述模拟计算结果表明,当某段导体出现断点或严重腐蚀变细后,该导体对应地表面邻近区域的磁感应强度变化明显。因此,可以得到接地网均压导体缺陷诊断的依据为:若平行于电流方向的地表面磁感应强度分量出现明显突变或跌落,即可判断该处埋入地下的导体存在缺陷。

## 1.2 接地网结构推断的判据和方法

在接地网图纸缺失时,可利用地表面磁感应强度的测量,根据垂直于接地网导体电流方向的每个峰值对应一根导体的特征规律,推断出接地网的结构。向接地网注入电流后,分别沿 $x$ 和 $y$ 方向测量接地网地表面磁感应强度的分布,同时记录下出现峰值的位置坐标,根据分布规律可以反推出地下接地网有无导体以及导体的走向,进而确定接地网的结构。推断的具体步骤为:1)通过接地网的两条

上引导体线，向接地网注入一定频率的正弦波电流；2) 以电流注入点作为参考坐标原点创建一个直角坐标系；3) 分别沿着  $x$  和  $y$  方向测量地表面磁感应强度，并记录出现峰值的位置坐标，每个方向测量 2~3 组数据；4) 根据测量数据，由出现磁感应强度峰值的位置坐标推断出接地网的结构，绘制出接地网结构图。

### 1.3 诊断接地网导体缺陷位置和状态的判据和方法

根据 1.1 节的仿真计算结果：正常情况下，平行于电流方向的导体地表面  $B_x$  的变化较平缓，一般不出现突变和明显跌落。当接地网导体局部出现严重变细断裂或断点缺陷后，地表面磁感应强度在邻近区域变化明显或跌；且跌落程度不同，接地网导体缺陷状态不同，改变了正常时的分布特征，这就为诊断提供了判据。缺陷诊断的步骤为：1) 通过接地网的两条下引导体线，向接地网注入一定频率的正弦波电流，观察测量系统采集信号的情况，调整电流和测量系统增益等参数至适宜值；2) 移动载有磁感应强度测量系统的测量小车，测量接地网地表面的磁感应强度并记录下相应的位置坐标；3) 汇总、处理测量数据，获得接地网地表面磁感应强度的整体分布特征；4) 对测量结果进行分析，根据磁感应强度有无明显突变和跌落以及位置坐标，判断对应接地网缺陷导体的状态和位置。

## 2 接地网结构的实验判断

在华北电力大学二校区的试验接地网上，通过两根上引导体注入频率为 300 Hz 的正弦波电流，地表面回流线长度为 100 m。调节注入电流的大小和测量系统的增益参数，观察输出波形，在信号能够分辨且不失真的条件下，开始测量。以电流注入点为参考原点，建立如图 4 所示的坐标系，点  $O(0,0)$  为电流注入点作为参考原点，点  $Q(18,24)$  为电流抽出点。每个方向上，随机选择 2 个测量位置，如图 4

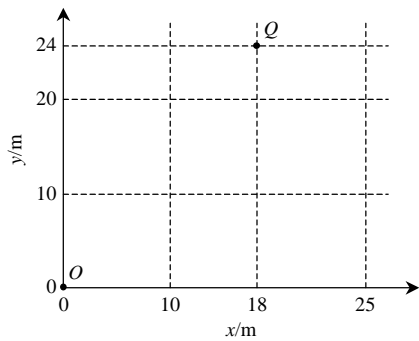


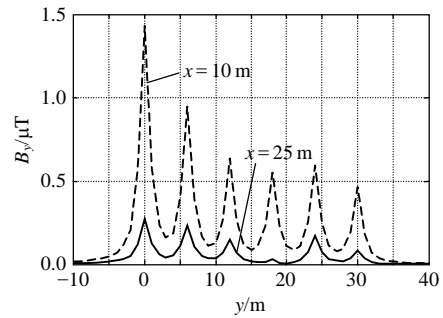
图 4 按注入点建立的坐标系  
Fig. 4 Coordinate series built by injecting point

中  $x=10, 25\text{m}$  的测量位置线，以及  $y=10, 20\text{m}$  的测量位置线，利用测量小车，在接地网地表面进行磁感应强度的测量并记录位置坐标，测量方法如图 5 所示。因垂直于导体支路电流方向上的磁感应强度值相对较大，所以测量时应测量这个分量，测量结果如图 6 所示。

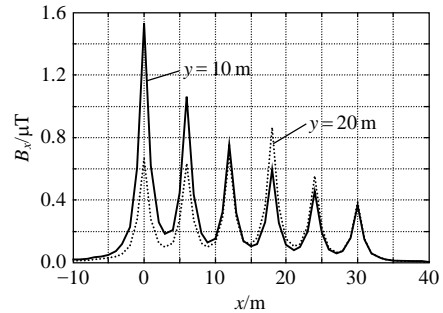


图 5 磁场测量方法

Fig. 5 Measuring method of magnetic field



(a) 沿  $x=10, 25\text{m}$  两条线，地表面  $y$  方向磁感应强度分量分布情况

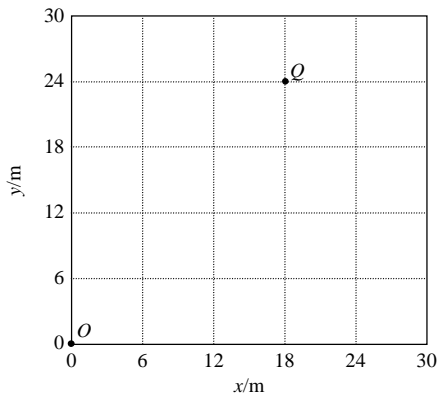


(b) 沿  $y=10, 20\text{m}$  两条线，地表面  $x$  方向磁感应强度分量分布情况

图 6 磁场测量结果

Fig. 6 Measuring results of magnetic fields

由图 6(a)可以推断，图 4 中  $y=0, 6, 12, 18, 24, 30\text{m}$  的位置处，存在沿垂直方向铺设的导体。据图 6(b)可以判断，图 4 中，在  $x=0, 6, 12, 18, 24, 30\text{m}$  处，存在沿水平方向铺设的导体。因此，在图 4 坐标系中，以原点  $O(0,0)$  为起始点，分别绘出沿水平和垂直方向的导体线位置，可得到如图 7(a)所示的试验接地网结构图。图 7(b)为接地网实际铺设图。结果发现推断出的接地网结构与实际铺设情况基本一致，证明了推断接地网结构方法的正确性。



(a) 判断出的接地网结构图



(b) 实验接地网埋设图

图7 接地网结构

Fig. 7 Structure of the grounding grid

### 3 模拟接地网缺陷实验

模拟接地网缺陷诊断的实验如图8所示,在点 $E(0,0)$ 处向接地网注入300 Hz正弦波电流,通过一条长100 m的地表回流线,从点 $F(0,30)$ 处引回,如图8中虚线所示。调整注入电流和测量系统增益等参数至最佳,此时注入电流为20 A。在点 $M(18,16)$ 处,作3种缺陷状态模拟:1) 锯开一个小断口;2) 利用直径1 mm的铜导线将断口连接;3) 断口处跨接上 $1\ \Omega$ 电阻。

在接地网正常和3类缺陷状态共4种情况下,保持注入电流和测量系统参数不变,利用测量小车装载的磁感应强度测量系统,沿 $x=0, 3, 6, 9, 12, 15,$

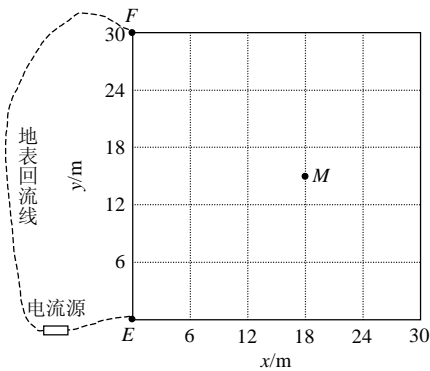
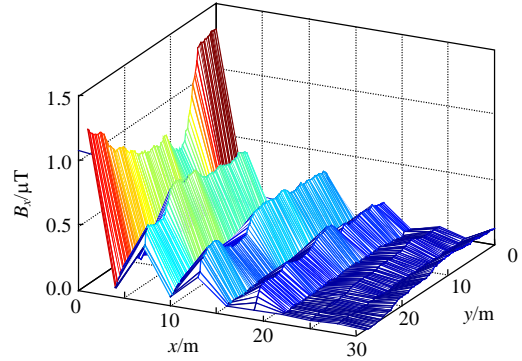


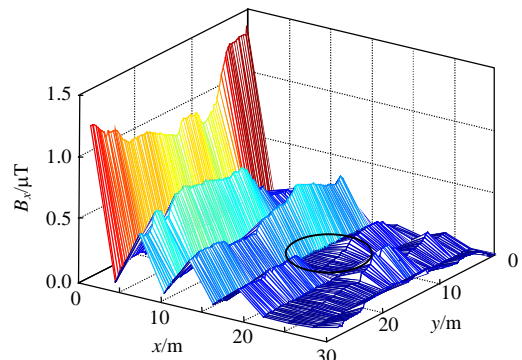
图8 模拟缺陷实验

Fig. 8 Experiments of simulating faults

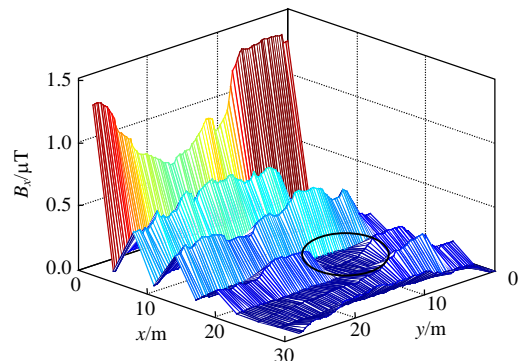
18, 21, 24, 27, 30 m 的直线,测量垂直于y方向导体地表面的磁感应强度分量,同时记录位置坐标。根据测量数据,分别得到地表面磁感应强度的整体分布规律,如图9所示。



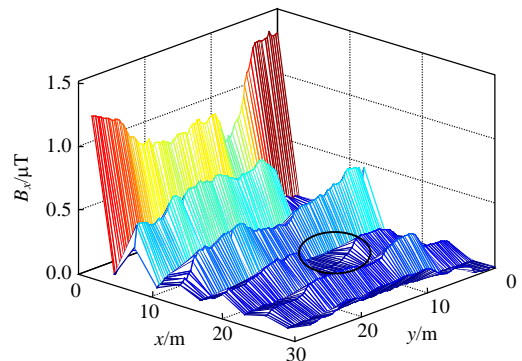
(a) 正常情况



(b) 点P处导体锯断



(c) 断口处用直径1 mm的铜导线连接



(d) 断口处接入 $1\ \Omega$ 电阻

图9 地表面磁场分布

Fig. 9 Distributions of the surface magnetic field

从图 9(a)可见, 接地网正常的情况下, 对应  $y$  方向试验接地网上方的地表面磁感应强度分量, 不存在突变和明显的跌落现象。从图 9(b)、(c)、(d) 的圆形区域处可以发现, 模拟接地网缺陷后, 大约对应  $x=18\text{m}$ 、 $y=12\sim 18\text{m}$  处均出现了明显的跌落, 可以初步推断该处接地网均压导体存在缺陷。为了进一步验证该诊断结果的可靠性, 对实验接地网按相同的模拟条件进行仿真计算, 并与  $x=18\text{m}$  处的地表面磁感应强度分布进行对比, 实验与仿真结果对比如图 10 所示。

从图 10(a)可以看出, 接地网正常的情况下, 仿真结果与实验结果基本一致, 不存在明显突变。图 10(b)和(d)中  $y=15\text{m}$  附近区域, 在接地网出现断点和严重腐蚀后, 磁感应强度下降明显, 几乎跌落为零, 这与实验结果是相符的。图 10(c)的仿真结果表明, 在接地网导体腐蚀变细的情况下, 该处地表

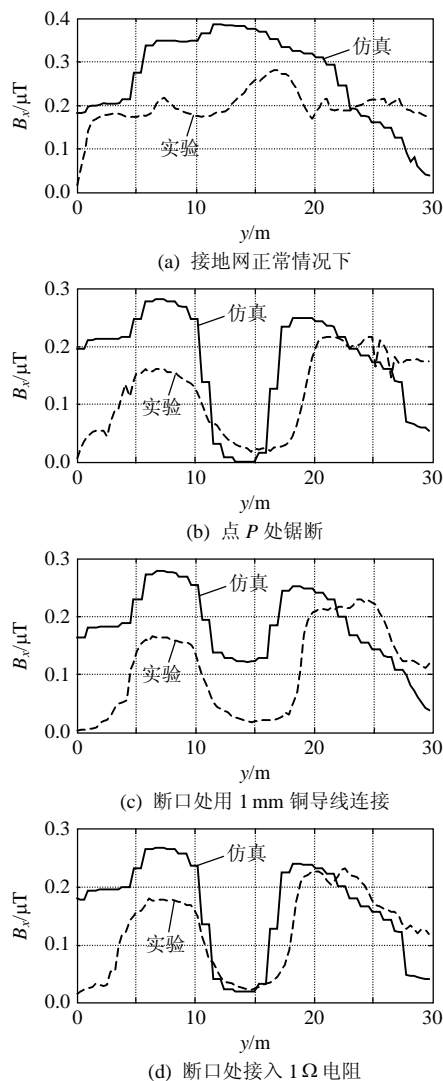


图 10 实验与仿真结果的比较

Fig. 10 Results contrast of experiment and simulation

面磁感应强度出现跌落, 约下降了  $0.1\mu\text{T}$ , 下降幅度比断裂状态小, 这与实验结果有一定差异, 这是由于接入  $1\text{mm}$  铜导线时, 存在接触电阻, 而在仿真计算时未考虑, 但实验与仿真结果大致相符, 都出现了跌落。

实验测量与仿真计算的磁感应强度整体分布与局部变化特征相符, 验证了本文所提诊断方法的可行性。同时, 也可以发现实验结果曲线局部出现了小的跌落或突起, 这是由于: 1) 地表障碍物对测量结果有一定影响; 2) 实验测量过程中测量小车偶有偏斜, 使得传感器线圈平面偏离, 也会造成一定的测量误差。由于上述两点原因引起的测量结果变化量较小, 对磁感应强度的整体分布影响不大, 故不会对诊断结论产生影响。

## 4 结论

本文基于地表面磁感应强度分布的测量, 给出了在接地网图纸未知的情况下, 确定接地网结构和诊断接地网均压导体缺陷状态和位置的具体方法和步骤。实验与仿真计算结果表明, 本文提出的方法可行、有效, 可用于工程实际。

## 参考文献

- [1] Zhao Zhibin, Cui Xiang, Zhang Bo, et al. Analysis of grounding systems in multi-layer soil with finite volumes of different resistivities [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 218-223.
- [2] 鲁志伟, 文习山, 史艳玲. 大型变电站接地网工频接地参数的数值计算[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 89-93.  
Lu Zhiwei, Wen Xishan, Shi Yanling. Numerical calculation of large substation grounding grids in industry frequency[J]. Proceedings of CSEE, 2003, 23(12): 89-93(in Chinese).
- [3] 张波, 崔翔, 赵志斌. 计及两端接地电缆影响的接地网数值分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 144-148.  
Zhang Bo, Cui Xiang, Zhao Zhibin, et al. Numerical analysis of the grounding grid with two-end grounded cables[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 144-148(in Chinese).
- [4] 张波, 崔翔, 赵志斌. 大型变电站接地网的频域分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 59-63.  
Zhang Bo, Cui Xiang, Zhao Zhibin, Analysis methods for substation' grounding systems in frequency domain[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 59-63(in Chinese).
- [5] 张波. 变电站接地网频域电磁场数值计算方法研究及其应用[D]. 保定: 华北电力大学, 2003.  
Zhang Bo. Research on the numerical methods for electromagnetic fields of substations' grounding systems in frequency domain and application[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2003(in Chinese).
- [6] CIGRE WG 36.04. Guide on electromagnetic compatibility in electric power plants and substation[R]. Paris: CIGRE, 1997.
- [7] IEEE Power Engineering Society. IEEE Std 80-2000, IEEE guide for



- safety in AC substation grounding[S]. USA: IEEE, 2000.
- [8] Zeng Rong, He Jinliang, Hu Jun. The theory and implementation of corrosion diagnosis for grounding system[C]. IEEE Industry Applications Conference, Pittsburgh, USA, 2002.
- [9] Hu Jun, Zeng Rong, He Jinliang, et al. Novel method of corrosion diagnosis for grounding grid[C]. International Conference on Power System Technology, Perth, Australia, 2000.
- [10] 刘渝根, 滕永禧, 陈先禄. 接地网腐蚀的诊断方法研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(6): 19-21.  
Liu Yugen, Teng Yongxi, Chen Xianlu. A method for corrosion diagnosis of grounding grid[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(6): 19-21(in Chinese).
- [11] 张晓玲. 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(10): 48-51.  
Zhang Xiaoling. Fault diagnosis of grounding grid of electric power plants and substations[J]. Proceedings of the EPSA, 2002, 14(10): 48-51(in Chinese).
- [12] 刘健, 王建新, 王森. 一种改进的接地网的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.  
Liu Jian, Wang Jianxin, Wang Sen. An improved algorithm of corrosion diagnosis for grounding grids & its evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 71-77(in Chinese).
- [13] 黄文武, 文习山, 朱正国. 接地网腐蚀与断点诊断软件系统的开发[J]. 高电压技术, 2005, 31(7): 42-44.  
Huang Wenwu, Wen Xishan, Zhu Zhengguo. Development of the diagnosis software system for the corrosion and the broken point of the grounding grid[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(7): 42-44(in Chinese).
- [14] 刘庆珍, 蔡金锭. 电力系统接地网故障的无伤检测方法[J]. 高电压技术, 2003, 29(6): 47-48, 51.  
Liu Qingzhen, Cai Jinding. Fault detection of grounding grid of power system[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(6): 47-48, 51(in Chinese).
- [15] 何智强, 文习山, 潘卓洪. 一种地网腐蚀故障诊断的新算法[J]. 高电压技术, 2007, 33(4): 83-86.  
He Zhiqiang, Wen Xishan, Pan Zhuohong. Novel algorithm for fault diagnosis of grounding grid[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(4): 83-86(in Chinese).
- [16] 彭珑, 郭洁, 李晓峰. 微量处理法在变电站接地网腐蚀诊断中的应用[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 199-202.  
Peng Long, Guo Jie, Li Xiaofeng. Application of micro disposal technology in diagnosing the corrosion of grounding grid[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(7): 199-202(in Chinese).
- [17] Zhang Bo, Zhao Zhibin, Cui Xiang. Diagnosis of breaks in substation's grounding grid by using electromagnetic method[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2002, 38(2): 473-476.
- [18] Dawalibi F. Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1986, 1(4): 112-119.
- [19] 刘洋, 崔翔, 赵志斌. 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.  
Liu Yang, Cui Xiang, Zhao Zhibin. Method of corrosion diagnosis of substations' grounding grids based on electromagnetic induction theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 97-103(in Chinese).
- [20] 刘洋, 崔翔. 测量磁感应强度诊断变电站接地网导体断点[J]. 高电压技术, 2008, 34(7): 1389-1394.  
Liu Yang, Cui Xiang. Method for diagnosis the conductor broken point of grounding grids in substation based on measuring the magnetic induction intensity[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(7): 1389-1394(in Chinese).
- [21] 刘洋, 崔翔, 赵志斌. 应用阻抗变换技术的变电站接地网检测系统激励源的设计与应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 18-23.  
Liu Yang, Cui Xiang, Zhao Zhibin. Design and application of exciting power for substation grounding grids testing system based on impedance transformation technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28): 18-23(in Chinese).
- [22] 刘洋, 崔翔, 赵志斌. 变电站接地网腐蚀诊断磁场检测系统的设计与应用[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 176-182.  
Liu Yang, Cui Xiang, Zhao Zhibin. Design and application of testing magnetic field system for corrosion diagnosis of substations' grounding grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(1): 176-182(in Chinese).



刘洋

收稿日期: 2009-12-24。

作者简介:

刘洋(1970—), 男, 博士, 副教授, 从事电磁场理论及其应用研究, hdwlly@163.com;

崔翔(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电磁场理论及其应用、特高压输电技术、电力系统电磁兼容、电力系统接地技术等研究, x.cui@ncepu.edu.cn;

赵志斌(1978—), 男, 博士, 副教授, 从事电磁场理论及其应用的研究, zzb770917@163.com。

(责任编辑 张玉荣)