

文章编号: 1000-582X(2012)09-080-06

接地网故障诊断的磁场逆问题求解方法

何 为, 史庆岩, 杨 帆, 张瑞强

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 变电站接地网是变电站安全运行的保障, 接地网出现故障会严重威胁站内人员和设备的安全。笔者提出了基于磁场逆问题的接地网诊断方法, 通过向接地网两根上引导体注入和抽出低频电流, 在接地网地表产生磁场, 从而建立磁场逆问题方程, 采用正则化方法对逆问题的病态性进行处理, 采用牛顿迭代法对逆问题进行求解, 得出接地网各个回路的电流分布, 进而分析其电阻变化, 判断接地网的腐蚀状态。以一个 4×4 接地网为例, 建立了其磁场逆问题方程, 利用正则化的方法对逆问题进行求解, 将计算结果与正问题结果相比, 误差控制在 3% 以内, 验证了所提出逆问题的求解方法。讨论了测量点数量的选择, 指出测量点数量选取为网孔数的 40% 即可较好地近似真实磁场分布。

关键词: 接地网; 故障诊断; 磁场逆问题; 正则化

中图分类号: TM862

文献标志码: A

Computation method of magnetic field inverse problem on grounding grids fault diagnosis

HE Wei, SHI Qingyan, YANG Fan, ZHANG Ruiqiang

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Grounding grids are the guarantee of substation running safety. The fault of grounding grids is a threat to people and equipment in substations. A method to diagnose the fault of grounding grids based on magnetic field inverse problem. The inverse problem of magnetic field is established by injecting and extracting a low frequency current. The morbid of inverse problem is solved through regularization and Newton iteration method to obtain the distribution of the mesh currents. The approximate distribution of the magnetic field is calculated to diagnose the fault of the grounding grid. A 4×4 substation grounding grids is taken as an example. By comparison of the forward problem result, the error is under 3%, so the proposed method of inverse problem is verified. The selection of measurement point is discussed, and 40% of the number of meshes is accounted to approximate the real distribution of the magnetic field on the grounding grids.

Key words: grounding grids; diagnosis; inverse problem of magnetic field; regularization

接地网是变电站安全运行的重要保证, 其接地性能一直受到生产运行部门的重视, 准确诊断接地

网网格导体因腐蚀等原因造成的锈断, 对于变电站的人员和设备安全具有重要的工程应用价值。在中

收稿日期: 2012-04-25

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51007096)

作者简介: 何为(1957-), 男, 重庆大学教授, 主要从事电磁场逆问题计算等方面的研究, (E-mail) hewei@cqu.edu.cn。

国接地网大多采用扁钢、圆钢等钢制材料,易造成腐蚀,严重的会造成接地网均压导体的断裂,严重危害变电站内工作人员和设备的安全。因此找到一种能够快速方便检测接地网故障的方法已成为国内外迫切需要解决的问题。

国内外已出现了一些关于接地网故障诊断方法的研究^[1-8]。文献[1-3]将整个接地网看作一个电阻网络,利用接地网的可及节点通入直流电流,通过特勒根定理建立故障诊断方程,通过对方程的优化求解得到每条支路电阻的增量,从而判断接地网的腐蚀状况。由于实际变电站接地网中的可及节点数目较少,无法得到足够多的方程,从而无法准确确定接地网腐蚀故障的情况。文献[4]通过测量接地网上方的地表电位来对接地网进行故障检测,但是由于接地网导体间的互感作用,使得在腐蚀状况下地表电位的变化也不大,从而造成腐蚀故障诊断的困难。文献[5]提出基于网络拓补变换的接地网分层简约方法,但需要较多的故障诊断方程求解本征接地网。方程的求解受引出线数量的影响。文献[6]提出了基于禁忌搜索算法的接地网故障诊断方法,但仍是基于电网络的方法,且随机算法的收敛速度慢。

Dawalibi 首次提出利用地表磁场分布来对接地网进行故障检测^[7],但并没有进行深入的探讨,只是提供了一种接地网故障检测的新方法。国内也有学者展开了利用磁场进行接地网故障检测的研究,并提出了计算接地网地表磁场的方法^[8-10]。利用磁场进行接地网故障检测的基本原理是利用接地网的上引接地体,从一点注入电流并从另一点抽出电流,在地表会产生磁场。通过测量接地网地表磁场得到地表磁场分布,从而利用磁场的陷落进行故障诊断。但这种方法需要对大量的地表点进行磁场测量,才能够通过插值的方法得到整个接地网地表磁场分布,检测工作量较大,比较费时。

笔者在现有基于磁场接地网故障检测方法的基础上,提出了接地网磁场逆问题,研究了其求解方法,并给出了一个接地网算例进行磁场逆问题计算。计算结果表明,笔者提出的正则化方法能够有效求解逆问题的病态性,网孔电流计算结果误差在3%之内,从而验证了笔者所提出的逆问题求解方法的准确性,并针对给出的接地网算例讨论了测量点的选择对计算结果的影响。

1 接地网磁场正问题

对于一个接地网,当有电流从接地网导体一点注

入接地网时,电流的分布情况复杂,在接地网导体中会产生电流,同时接地网导体也会向周围的土壤中流散电流。考虑一个简单的接地网模型如图1所示。

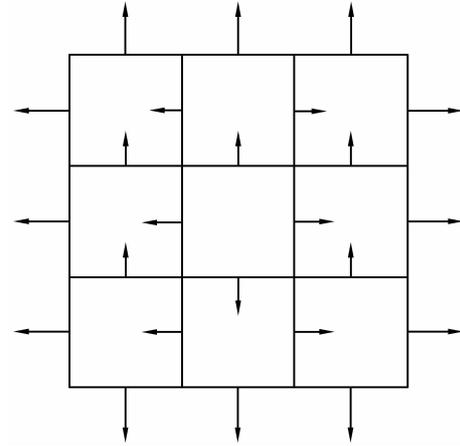


图1 简单接地网模型

考虑文献[8]的方法,在接地网中一点注入电流,从另一点抽出电流。文献[13]介绍了利用有限元方法计算地表磁场,同时考虑了导体轴向电流和泄露电流产生的磁场,但是由于需要对接地网进行单元划分,造成有限元刚度矩阵过大,影响计算效率。笔者给出了计算接地网地表磁场的简单算法,大大提高了计算效率。与轴向电流相比泄露电流可以忽略,因此泄露电流产生的磁场可以忽略。

为了减少变量的个数,利用回路电流法可以得到方程:

$$CI = b, \quad (1)$$

其中 C 为与接地网导体电阻有关的 $n \times n$ 矩阵(n 为接地网网孔数); I 为网孔电流 n 维列向量; b 为与接地网导体电阻和注入电流有关的 n 维列向量。

回路电流在地表产生的磁场可以利用毕奥-沙伐定理计算:

$$B = \int \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \times r}{r^3}. \quad (2)$$

因此可以利用较少的回路电流来计算接地网地表磁场分布。

图2为一个 10×10 网格的接地网模型,接地网埋深 0.8 m ,在 A 点注入电流, B 点抽出电流,电流有效值 10 A ,频率 40 Hz 。正问题计算其地表磁场 x 方向的磁场分布如图3所示。当图2中 N 点出现断点时,接地网地表磁场分布如图4所示。可以看出当接地网导体出现故障时,导体上方周围的磁场会出现一个明显的下陷,因此利用这个特点可以对接地网的故障进行检测。

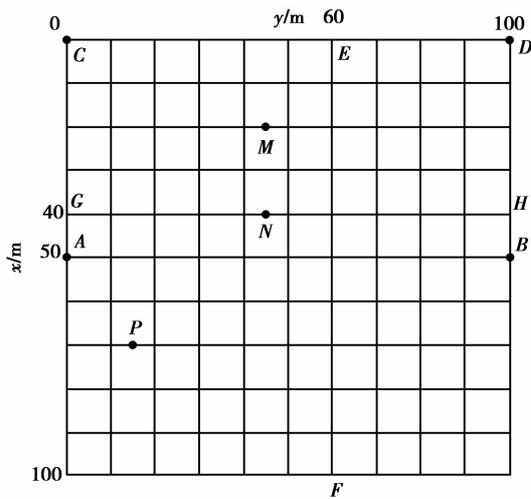


图 2 10×10 接地网模型

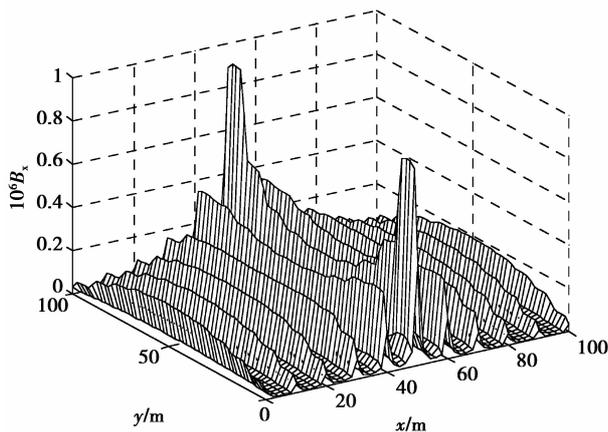


图 3 正常时地表磁场分布

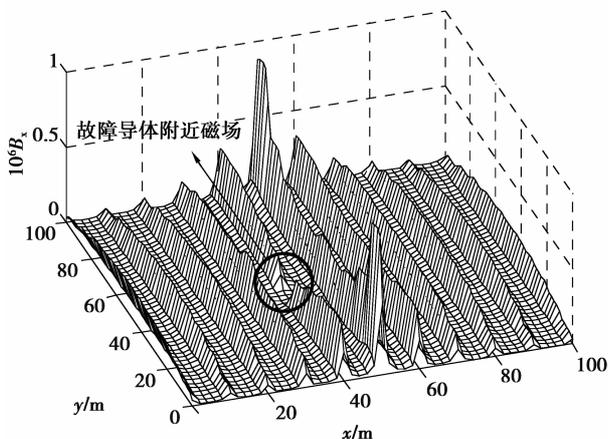


图 4 N 点断点时地表磁场分布

对于一个 5×5 网格的接地网模型,文献[14]中给出了地表磁场 x 方向分量的测量结果,其一共测量了 208 个点,然后通过插值得到地表磁场分布。由此可知使用插值方法工作量较大,笔者提出的接地网磁场逆问题的诊断方法只需少量测量点就可以得到接地网上方磁场分布情况,减少了测量工作量。

2 接地网磁场逆问题与求解方法

根据上面的讨论可知通过原始的测量来得到整个接地网地表磁场的分布所需要的测量点数量较多,在工程实际中存在很大困难。因此,考虑到地表磁场和接地网导体中电流分布的关系,提出利用磁场逆问题的思想来减少测量点的数目。接地网网孔回路的电流数量较少,而且回路电流和地表磁场可以通过毕奥-沙伐定理建立关系如下:

$$DI = B, \quad (3)$$

其中 D 为与地表点位置有关的 $n \times n$ 系数矩阵(n 为接地网网孔数); I 为 n 维网孔电流向量; B 为地表点 x 方向磁感应强度 n 维向量。因此可以利用测量得到较少点的地表磁场反演出接地网的回路电流,然后通过正问题的分析方法计算出与实际相近的整个接地网地表磁场分布,从而可以对接地网故障进行诊断。

由以上分析知,为了得到接地网中网孔回路电流,只需对式(3)进行求解。式(3)是一个病态的线性方程组,为了消除逆问题的病态性和测量误差,可以采用正则化的方法求解。

对于病态方程组 $Ax = b$,常用的最小二乘法并不能得到准确解,为了克服问题的病态性,可以采用 Tikhonov 正则化方法,即最小化 Tikhonov 泛函:

$$J_{\alpha}(x) := \|Ax - b\|^2 + \alpha \|x\|^2. \quad (4)$$

其中 α 是正则化参数。式(4)极值问题的解为

$$x_{\alpha} = (A^T A + \alpha I)^{-1} A^T b. \quad (5)$$

正则化方法中正则化参数的选取至关重要,在这里选用 Morozov 偏差原理,即在 $\|Ax - b\| = \delta$ 条件下求取方程的最小范数解。其中 δ 为误差水平。笔者采用牛顿法求解非线性方程 $\|Ax - b\| = \delta$ 。令 $f(\alpha) = \|Ax - b\|^2 - \delta^2$, x 满足式(5),其迭代格式为

$$\alpha_{k+1} = \alpha_k - \frac{f(\alpha_k)}{f'(\alpha_k)}, \quad (6)$$

其中

$$f'(\alpha) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, L, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right) \left(\frac{\partial x_1}{\partial \alpha}, \frac{\partial x_2}{\partial \alpha}, L, \frac{\partial x_n}{\partial \alpha} \right)^T, \quad (7)$$

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, L, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right) = 2(Ax - b)^T A = -2\alpha x^T, \quad (8)$$

$$\left(\frac{\partial x_1}{\partial \alpha}, \frac{\partial x_2}{\partial \alpha}, L, \frac{\partial x_n}{\partial \alpha}\right)^T = -(A^T A + \alpha I)^{-1} x. \quad (9)$$

Tikhonov 正则化流程如图 5 所示。

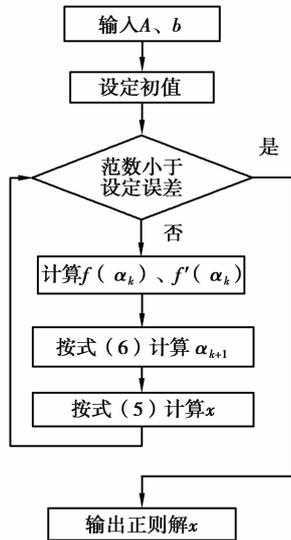


图 5 正则化求解逆问题流程图

利用正则化方法对病态方程组(3)进行求解,可以得到接地网各个回路电流,从而可以利用正问题的方法计算与实际情况相近的地表磁场分布。

3 接地网磁场逆问题算例分析

本节通过对一个 4×4 网格接地网算例进行分析,验证磁场逆问题诊断接地网的可行性。

算例接地网结构如图 6 所示,接地网网格边长为 10 m,埋深为 0.8 m,其中点 A、B 是电流注入和抽出点,注入电流为 40 Hz、1 A 电流。

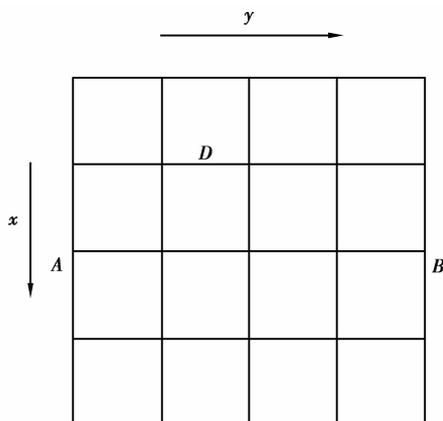


图 6 算例 4×4 接地网结构图

在接地网 D 点所示导体发生故障时,随机选取

12 个测量点,将正问题的计算结果作为逆问题计算的测量值,考虑到现实中存在的干扰误差,加入 5% 的扰动,将其带入逆问题方程,利用正则化计算逆问题求解接地网网孔电流,并利用逆问题的计算结果得出接地网上方的磁场分布图。

图 7 所示为正问题的计算结果和选取 12 个测量点时逆问题计算结果对比,其中图(a)为正问题计算结果,图(b)为逆问题计算结果。

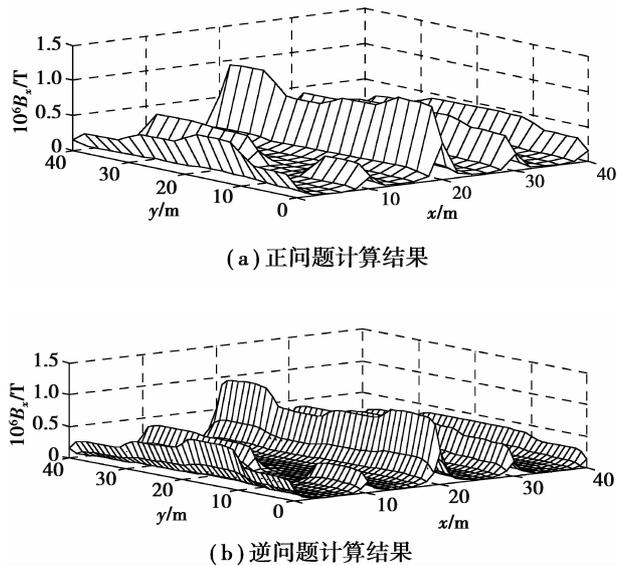


图 7 正问题结果和逆问题计算结果对比

图 7(b)中逆问题计算结果表明在 $x=10\text{ m}$ 、 $y=10\sim 20\text{ m}$ 处 x 方向磁场出现陷落的情况,由此可断定此处导体发生故障,与正问题假设 D 处导体断裂的情况相符。

表 1 正、逆问题计算电流对比

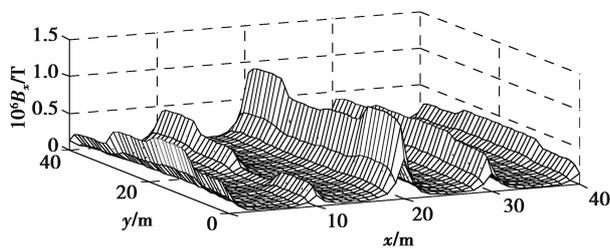
网孔号	正问题网孔电流/A	逆问题网孔电流/A	相对误差/%
1	0.128 1	0.131 7	2.81
2	0.247 5	0.240 1	2.99
3	0.172 7	0.168 9	2.2
4	0.114 2	0.116 8	2.28
5	0.264 8	0.270 5	2.15
6	0.247 9	0.241 3	2.66
7	0.328 9	0.326 6	0.7
8	0.284 3	0.289 1	1.69

由图 7 的磁场分布对比与表 1 的网孔电流计算

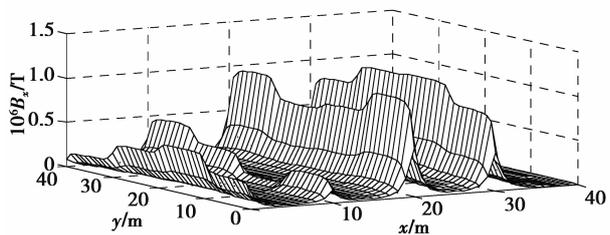
值看出,使用了正则化对接地网磁场逆问题进行计算可以得到与正问题相近的结果,其误差在 3% 以内。从本算例可知,在对接地网进行故障诊断时,利用正则化方法求解接地网磁场逆问题可以准确地对接地网故障进行诊断。

4 测量点数量的选择

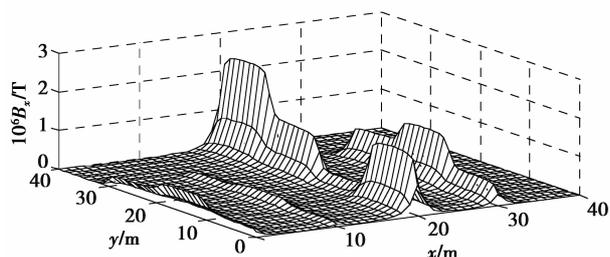
为了更准确得到接地网的网孔电流和地表磁场分布,应尽量多地选取测量点数,但在实际应用时过多的测量会加大现场工作量,本节针对上节中 4×4 的接地网讨论测量点个数的选取。



(a) 选取9个测量点的计算结果



(b) 选取6个测量点的计算结果



(c) 选取4个测量点的计算结果

图 8 不同数量测量点时的计算结果

分别选取 9 个、6 个、4 个测量点,用正问题结果作为测量值,并加入 5% 的干扰误差。计算出逆问题结果与正问题结果进行对比,如图 8 所示。从图中可以看出当选择 9 个和 6 个测量点时,逆问题结果与正问题结果相近,并能够准确判定接地网故障导体的位置。当选取 4 个测量点时,逆问题计算结果与正问题结果有较大差别,计算误差已超出允许

范围。因此对于本算例接地网,测量点数量应在 6 个以上,才能保证计算结果的准确性。

表 2 为不同接地网网孔数情况下选择测量点数量和网孔电流最大误差关系,大量的仿真实验表明最佳测量点数为接地网网孔数的 40%,逆问题的计算结果可以很好地逼近接地网上方真实的磁场分布情况。

表 2 接地网网孔数与测量点数

接地网网孔数	测量点数量	网孔电流最大误差/%
5×5	10	3.5
6×6	15	2.9
7×7	20	3.4
8×8	30	2.1

5 结 语

笔者通过磁场逆问题提出一种对接地网进行故障诊断的方法,在现有接地网计算方法的基础上提出计算接地网地表磁场的简化算法,且提出磁场测量点数量的选取规则。对比现有的基于磁场的接地网故障检测方法,笔者提出的方法仅需测量较少测量点的磁场即可得到整个接地网地表磁场的分布,从而对接地网故障进行诊断,大大减少了测量工作量,而且避免了测量一些不可测点,有利于对大型变电站接地网进行故障检测。

参考文献:

- [1] 张晓玲,黄青阳. 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.
ZHANG Xiaoling, HUANG Qingyang. Fault diagnosis of grounding grid of electric power plants and substations[J]. Proceedings of the EPSA, 2002, 14(1): 48-51.
- [2] 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.
XIAO Xinhua, LIU Hua, CHEN Xianlu, et al. Analysis of theory and method about the corrosion as well as the broken point of the grounding grid [J]. Journal of Chongqing University, 2001, 24(3): 72-75.
- [3] 张晓玲,陈先禄. 优化技术在发、变电所接地网故障诊断中的应用[J]. 高电压技术,2000,26(4):64-66.
ZHANG Xiaoling, CHEN Xianlu. The technique of the optimization applied in the grounding grids' failure diagnosis[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(4): 64-66.

- [4] Zhang Bo, Zhao Zhibin, Cui Xiang. Diagnosis of breaks in substation's grounding grids by using the electromagnetic method [J]. IEEE Transaction on Magnetic, 2002, 38(2): 473-476.
- [5] 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 Lian, 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.
- [6] 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.
CHENG Hongli, LIU Jian, WANG Sen, et al. Fault diagnosis for grounding grids based on tabu search [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(5): 139-142.
- [7] Dawalibi F P. Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors part 2-ground networks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, 1(4): 112-119.
- [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.
LIU Yang, CUI Xiang, LU Tiebing. A diagnosis method of breaking points in grounding grid for substations [J]. Power System Technology, 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, 32(24): 113-118.
LIU Yang, CUI Xiang, ZHAO Zhibin. Method of structure estimation and fault diagnosis of substations' grounding grids [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 32(24): 113-118.
- [10] 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.
LIU Yang, CUI Xiang, ZHAO Zhibin, et al. Method of corrosion diagnosis of substations' grounding grids based on electromagnetic induction theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 97-103.
- [11] Qiu Q R, Wang P. A new optimization algorithm for grounding grid fault diagnosis [C] // Proceedings of the International Workshop on Modelling, Simulation and Optimization, December 27-28, 2008, Hong Kong, China, Piscataway, N. J., USA: IEEE Press, 2008: 294-297.
- [12] Zhang Z X, Ma H Z, Pu L, et al. A research on fault diagnosis of grounding grids [C] // Proceedings of the International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, April 6-7 2009, Nanjing, China. Piscataway, N. J., USA: IEEE Press, 2009: 1-4.
- [13] 高长征, 赵志斌, 李琳, 等. 变电站接地网的空间磁场快速计算方法 [J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 1990-1993.
GAO Changzheng, ZHAO Zhibin, LI Lin, et al. Fast computation method for magnetic field generated by substation grounding grids [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(8): 1990-1993.
- [14] Hu J, Zhang R, He J L, et al. Novel method of corrosion diagnosis for grounding grid [C] // Proceedings of the International Conference on Power System Technology, December 4-7, 2000, Perth, WA. Piscataway, N. J., USA: IEEE Press, 2000, 3: 1365-1370.
- [15] Dawalibi F P, Xiong W, Ma J X. Transient performance of substation structures and associated grounding systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, 31(3): 520-527.
- [16] 黄卡玛, 赵翔. 电磁场中的逆问题及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [17] 刘洋. 变电站接地网缺陷诊断方法和技术的研究 [D]. 河北: 华北电力大学, 2008.
- [18] 刘渝根, 吴立香, 王硕. 大中型接地网腐蚀优化诊断实用化分析 [J]. 重庆大学学报, 2008, 31(4): 417-420.
LIU Yugen, WU Lixiang, WANG Shuo. Practicality analysis for optimized erosion diagnosis of large and grid medium-scale grounding grid [J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(4): 417-420.
- [19] Augusto J S, Almeida C F B. Circuit equations for fast fault simulation and diagnosis of linear circuits [C] // Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Electronics Circuits and Systems, September 7-10, 1998, Lisboa, Portuguesa. Piscataway, N. J., USA: IEEE Press, 1998, 1: 125-128.
- [20] Lawson V R. Problems and detection of line anchor and substation ground grid corrosion, Industry Applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1988, 24(1): 25-32.
- [21] Liu L Q, Luo X J, Niu T, et al. Grounding grid corrosion diagnosis based on large change sensitivity [J]. Information Assurance and Security, 2009, 1: 71-74.
- [22] 刘渝根, 孟宪, 田金虎, 等. 接地网故障诊断中测量节点对选取方法分析 [J]. 重庆大学学报, 2010, 33(1): 73-77.
LIU Yugen, MENG Xian, TIAN Jinhui, et al. Analysis on the method of selecting nodes on the erosion diagnosis of grounding grid [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(1): 73-77.