

文章编号:1000-582x(2001)03-0072-04

## 接地网腐蚀和断点的诊断理论分析<sup>\*</sup>

肖新华<sup>1</sup>, 刘 华<sup>2</sup>, 陈先禄<sup>1</sup>, 张晓玲<sup>3</sup>

(1 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆医科大学基建处, 重庆 400046; 3. 福州大学电气工程系, 福州 350002)

**摘 要:** 对发、变电站接地网腐蚀和断点的诊断理论进行了研究。通过严谨的理论分析, 采用灵敏度分析法建立了故障诊断方程, 并将能量最低原理及优化技术引入地网的故障诊断方程的求解中, 讨论了目标函数为线性和非线性两种情况下, 故障诊断方程结合一定的约束条件及目标函数的求解问题。仿真计算和模拟试验结果验证了该诊断理论与方法的正确性、可行性及实用性。

**关键词:** 接地网; 地网腐蚀; 故障诊断; 断点

**中图分类号:** TM 86

**文献标识码:** A

发、变电站的接地网是维护电力系统安全可靠运行、保障运行人员和电气设备安全的重要措施。构成接地网的均压导体常因施工时焊接不良或漏焊、土壤的腐蚀、接地短路电流的电动力作用等原因, 使地网均压导体之间或接地引线与均压导体之间存在电气连接不良的故障点。若遇电力系统发生接地短路故障, 将造成地网本身局部电位差和地网电位异常升高, 除给运行人员的安全带来威胁外, 还可能因反击或电缆皮环流使得二次设备的绝缘遭到破坏, 高压窜入控制室, 使监测或控制设备发生误动或拒动而扩大事故, 带来巨大的经济损失和不良的社会影响。

在我国, 因地网腐蚀或发生断裂而引起的电力系统事故时有发生, 每次事故都带来了巨大的经济损失。例如: 1981年3月广东员村变电站员文线绿相刀闸雷击闪络接地, 35 kV #1, #2 电压互感器刀闸和员文线黄、红相刀闸同时损坏, 部分接地网在相间短路时烧断、地电位升高, 高压窜入二次回路, 击穿电缆 10 多条, 并损坏一些继电器、电度表等, #1 主变的 35 kV 线圈也在事故中损坏; 1981年广西合山电厂 110 kV 开关站内 A 相母线侧的支柱瓷瓶在雨雾中闪络, 造成弧光接地, A 相接地发展成两相短路, 最后发展成三相短路, 损坏二次电缆、端子排及二次设备, 一台 10 万 kW 发电机损坏, 造成全厂停电的重大事故, 事故扩大的主要原因是接地引下线在地表以下几十公分处腐蚀

严重, 有的只剩下  $\varphi 7.5$ <sup>[1]</sup>; 1985~1986 年两年间湖北省胡集、潜江、武钢等三个 220 kV 变电所因接地不良将变电所内弧光短路事故扩大为全站停电和设备严重损坏事故<sup>[2]</sup>; 1991 年浙江电网一个 110 kV 变电所发生了 35 kV 开关站接地短路, 由于接地装置存在问题, 使一次系统事故扩大到二次系统, 造成全所停电 13 个小时, 一、二次设备大量损坏<sup>[3]</sup>; 再如 1994 年 1 月 1 日, 四川华莹山发电厂因变压器中性点接地不良, 当系统发生污闪时, 造成变压器、发电机严重烧毁的恶性事故, 损失十分严重<sup>[4]</sup>。

由此可见, 接地网的故障已是电力系统安全运行的心腹大患, 诊断接地网的断点及地网的腐蚀情况已成为电力部门的一项重大反事故措施。过去一般都是在发现接地电阻不合格或出现事故后, 通过开挖查找地网的电气连接故障点或腐蚀段, 这种方法带有盲目性、工作量大、速度慢, 并且还受现场运行的限制。根据自然科学基金项目的要求, 对发、变电站接地网腐蚀和断点的诊断理论进行研究。

### 1 基本思路

在接地网竣工之后, 由于各段导体的长度、截面积、及其电阻率已被确定, 很容易计算出它们的电阻值, 若忽略土壤温度变化的影响该值应为恒定值, 称为设计值或者标称值; 当地网某段导体发生断裂或者出

\* 收稿日期: 2000-08-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59677016)

作者简介: 肖新华(1974-), 男, 湖南新邵人, 重庆大学硕士生。主要从事接地网方面研究。

现腐蚀时,其电阻会增大,此值称为实际值。另一方面,由于各种电气设备都有和地网相连接的接地引线,如果将地网看作一个电阻性网络的“黑匣子”,那么接地引线就是这一“黑匣子”网络的可及节点,也就是可测点。根据这些可测点之间的电压或电阻测量值,应用适当的计算方法,就可以求出各段导体的电阻实际值,将它与标称值相比较,并按照一定的阈值就可以判断地网导体是否有断裂或被腐蚀的情况存在。如图 1 所示的地网,有  $b$  条支路,  $n$  个节点,  $m$  个可及节点,可将其等效为一个如图 2 所示的纯电阻性线性网络  $N$ 。

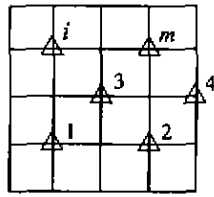


图 1 有  $m$  个可及节点的地网图

## 2 故障诊断方程的建立

### 2.1 故障诊断方程

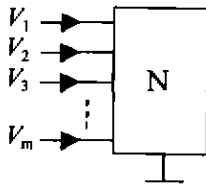


图 2 地网等效的线性网络  $N$

如图 2 所示,由网络理论可得

$$Y_n \cdot V_n = I_n \quad (1)$$

其中  $Y_n$  是节点导纳矩阵,  $V_n$  为节点电压列向量(相对于参考节点而言),  $I_n$  为节点电流源激励列向量(除激励的可及节点外,其余节点的电流值均为 0),则

$$V_n = Y_n^{-1} \cdot I_n \quad (2)$$

令  $Z_n = Y_n^{-1} \quad (3)$

则有  $V_n = Z_n \cdot I_n$

式中  $Z_n$  为阻抗矩阵。由接地引线确定的可及节点只有  $m$  个,与  $m$  个可及端口对应的行向量组成的阻抗矩阵为  $Z_{mn}$ ,  $m$  个可及端口电压列向量的理论计算值为  $V_m$ ,测量值为  $V_m^*$ ,其增量为  $\Delta V_m$ ,于是有

$$V_m = Z_{mn} \cdot I_n \quad (4)$$

$$\Delta V_m = V_m^* - V_m$$

令  $\Delta V_m = V_{mb} \cdot X \quad (5)$

式(5)为故障诊断方程。其中  $V_{mb}$  是故障诊断方程的系数矩阵,通常称为灵敏度矩阵,其中各元素  $v_{ij}$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, b$ ) 代表的物理意义为第  $j$  支路导体电阻增加 1% 时,对测量节点  $i$  电位的影响值。 $X$  是  $b$  维列向量,  $x_j$  代表第  $j$  段导体电阻增加的倍数。

### 2.2 目标函数

对于实际地网而言,由于可及节点数  $m$  总是小于地网支路数  $b$ ,因此故障诊断方程是个欠定方程,故无唯一解;再加上测量误差及现场电磁场的干扰,故障诊断方程就变成了严重的病态方程,通常是无解或多解的情况较多,而在实际的故障诊断过程中要求解是唯一的,因此求解故障诊断方程必须结合一定的约束条件及目标函数来求解,从而使解尽量反映真实的故障情况。

由于任意网络均满足能量最低原理,对地网而言就是整个网络电阻消耗的能量最少,即以电阻热能的方式消耗掉。

地网每段导体的实际电阻为:

$$R_j^* = R_{j0} \cdot (1 + X_j) \quad (6)$$

如果假设故障前、后地网各段支路的电流相等,即  $I_j^* = I_{j0}$ 。

整个地网能量损耗表达式为  $\sum_{j=1}^b I_{j0}^2 R_{j0} (1 + X_j)$ ,由于是求能量损耗最少,因此化简整理得

$$P = \sum_{j=1}^b I_{j0}^2 R_{j0} X_j \quad (7)$$

采用最优化理论中的单纯形法求解,其约束条件为故障诊断方程的等式约束和各变量的非负约束,目标函数式(7)是一个线性关系式。

此外,由欧姆定理可得:

$$I_j = \frac{V_i}{R_j} \quad (8)$$

当电阻变化后,令  $R_j^* = R_{j0} + \Delta R_j$ ,  $I_{j0} = \frac{V_{j0}}{R_{j0}}$ ,其支路的电流也随之变化,忽略电阻变化的二阶导数,可求得变化后的支路电流为:

$$I_j^* = I_{j0} (1 - X_j) \quad (9)$$

将电阻变化后的电流值和电阻值代入能量损耗方程得

$$P = \sum_{j=1}^b I_j^{*2} R_j^* = \sum_{j=1}^b I_{j0}^2 R_{j0} (1 - X_j)^2 (1 + X_j) \quad (10)$$

目标函数式(10)为非线性函数。

对于实际地网来说,其约束条件是故障诊断方程

的等式约束和各支路电阻增量的非负约束;目标函数主要是将能量学中的能量最低原理引入地网的故障诊断,即认为整个地网的电阻热损耗最小。由于故障前、后的电流大小变化比较显著,因此将目标函数分为线性和非线性两种情况来对故障诊断方程进行求解。下面分别讨论线性和非线性目标函数与约束条件相结合的数学模型。

### 3 由线性目标函数构成的数学模型

线性目标函数与约束条件构成的数学模型是一个典型的线性规划问题,因此采用较成熟的线性规划理论中的单纯形法<sup>[5]</sup>求解。

约束条件由故障诊断方程的等式约束和电阻增量的非负约束两部分组成,表示如下:

约束条件为:

$$\begin{cases} v_{11}x_1 + v_{12}x_2 + \dots + v_{1b}x_b = \Delta v_1 \\ v_{21}x_1 + v_{22}x_2 + \dots + v_{2b}x_b = \Delta v_2 \\ \dots\dots\dots \\ v_{m1}x_1 + v_{m2}x_2 + \dots + v_{mb}x_b = \Delta v_m \\ x_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, b) \end{cases} \quad (11)$$

目标函数为:

$$P = \sum_{j=1}^b I_{j0}^2 R_{j0} X_j = \min \quad (12)$$

通常采用两阶段法或大M法来寻求一个起始的基础可行解;然后采用非负减少费用规则来检验它的最优性;最后一步实质上是寻找一个好的移动方向和一个适当的步长来寻找一个使目标函数值有所改善的一个基础可行解。单纯形算法的具体迭代步骤参见文<sup>[6]</sup>。

### 4 由非线性目标函数构成的数学模型

由于目标函数不是变量的线性函数,而是三次函数,因此不能用线性规划最优化法来解,这里采用非线性规划最优化理论中的简约梯度法<sup>[7]</sup>,其数学模型如(13)、(14)、(15)式所示。约束条件(13)式由故障诊断方程的等式约束和电阻增量的非负约束两部分组成。

约束条件为:

$$\begin{cases} v_{11}x_1 + v_{12}x_2 + \dots + v_{1b}x_b = \Delta v_1 \\ v_{21}x_1 + v_{22}x_2 + \dots + v_{2b}x_b = \Delta v_2 \\ \dots\dots\dots \\ v_{m1}x_1 + v_{m2}x_2 + \dots + v_{mb}x_b = \Delta v_m \\ x_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, b) \end{cases} \quad (13)$$

目标函数为:

$$p = \sum_{j=1}^b c_j (1 - x_j)^2 (1 + x_j) \quad (14)$$

$$c_j = I_{j0}^2 R_{j0} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

对于非线性规划问题,目前的解法很多,但都是针对不同的工程实际问题提出来的,因此没有通用的解法。对上述数学模型,可以转化为无约束的最优化问题,也可以用二次规划法来逼近原问题。一般来说,不满足约束条件,并且在地网的故障诊断中,由于各端口的电压都是毫伏级电压,诊断结果对测量误差较敏感。因此采用简约梯度法来直接处理约束问题,可以增加故障诊断的准确性。有关简约梯度法的基本思想和具体迭代步骤见文<sup>[6]</sup>。

### 5 仿真计算

据上面的理论分析,用FORTRAN 77语言编制了接地网腐蚀和断点诊断的计算程序GCSI(Grounding Corrosion State Inspect),其原理框图如图3所示。

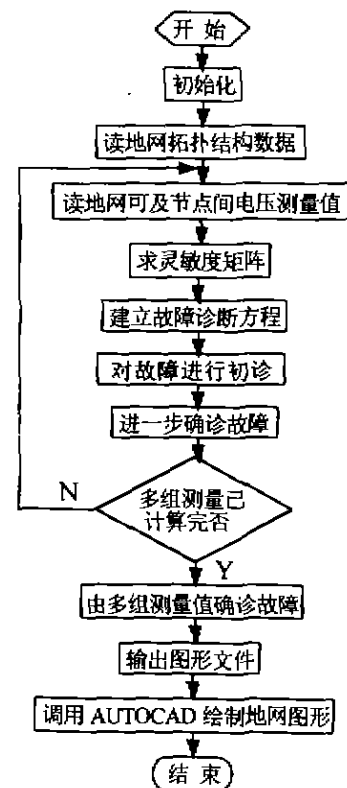


图3 GCSI程序框图

仿真计算的诊断过程是首先在任意两可及节点间加直流的电流激励;其次,计算出各可及节点对参考节点的电压值  $V_m^*$ ,建立诊断方程;然后求解诊断方程,计算出各支路电阻的增量,从而对地网的故障情况进行

行判断。论文对各种实际情况进行了大量的仿真计算,其仿真计算结果都与假设故障分布完全一致。由于篇幅所限,仅举一例说明。例如图4所示的地网,假设第6、14、19、34支路为故障支路,分别接入 $0.01 \sim 100 \Omega$ 的电阻来模拟地网导体的断裂及不同程度的腐蚀情况,仿真计算结果如图5所示,与假设故障分布完全一致。

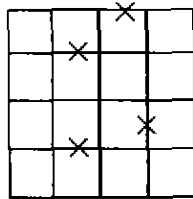


图4 假设的故障支路分布图

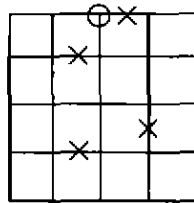


图5 诊断结果图

## 6 结束语

笔者经过理论分析和研究,建立了寻求地网腐蚀

和断点的故障诊断方程。由于实际中地网的可及测点数总是小于地网的导体段数,所以此故障诊断方程是一欠定方程,无唯一解。笔者将最优化理论和最小能量原理应用到此欠定方程的求解过程中,成功的解决了地网各段导体实际电阻值的计算难题,并通过仿真计算证明了本文中提出的诊断理论是正确的、有效的。有关对诊断判据、模拟试验验证等的研究将在另外的文章中叙述。

## 参考文献:

- [1] 周配明. 广西合山电厂污闪及地网故障分析[R]. 贵阳: 贵州省电机工程学会安全技术专委会, 1991.
- [2] 周配明. “地网”的不良引起事故扩大的分析[R]. 贵阳: 贵州省电机工程学会安全技术专委会, 1991.
- [3] 鲍敏铎. 110 kV 变电所接地装置事故扩大的分析[J]. 高压技术, 1993, 19(4): 53-55.
- [4] 重庆电力局. 华莹山电厂“94.1.1”事故调查报告[R]. 重庆: 重庆电力局, 1994.
- [5] 何献忠. 优化技术及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- [6] 张晓玲. 变电站接地网腐蚀和断点的诊断理论与方法[D]. 重庆: 重庆大学电气工程学院, 1999.
- [7] 席少霖. 非线性最优化方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.

## Analysis of Theory and Method about the Corrosion as well as the Broken Point of the Grounding Grid

XIAO Xin-hua<sup>1</sup>, LIU Hua<sup>2</sup>, CHEN Xian-lu<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-ling<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Capital Construction Department, Chongqing Medical University, Chongqing 400046, China; 3. Department of Electrical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** The paper studies the theory about the corrosion as well as the broken point of the grounding grid in power plants and substations. By using sensitivity analysis, failure diagnosis equation is put up through rigorous theoretical analysis. Meanwhile the problem of morbid equation is solved by introducing lowest energy theory and technique of optimization to diagnosis equation solution of grounding grid combined with definite constraint condition and linear or non-linear objective function, the fault diagnosis equation is discussed. The results of emulation calculation and analogous experiments verify the correctness, feasibility and practicality of the theory and method.

**Key words:** grounding grid; grid corrosion; fault diagnosis; broken point

(责任编辑 李胜春)