

发电厂、变电站接地网故障诊断研究

许慧中¹, 马宏忠², 张志新², 濮岚², 李广河³, 赵峰³

(1. 南京工业职业技术学院电气工程系, 江苏 南京 210046; 2. 河海大学电气工程学院, 江苏 南京 210098; 3. 河南省济源供电公司, 河南 济源 454650)

摘要: 应用电网络理论和矩阵理论, 以灵敏度矩阵的形式建立了故障诊断方程。然后采用多激励法显著增加了独立方程的个数, 有效解决了故障诊断方程的欠定问题。通过微量处理法和采用迭代的方法, 可用线性方程来逐步逼近非线性方程, 从而应用最小二乘法求解。经仿真计算和模拟实验表明, 该方法简单、可行, 可用于接地网的故障诊断。

关键词: 接地网; 故障诊断; 非线性方程; 微量处理法; 最小二乘法

Research of fault diagnosis of grounding grid of electric power plants and substations

XU Hui-zhong¹, MA Hong-zhong², ZHANG Zhi-xin², PU Lan², LI Guang-he³, ZHAO Feng³

(1. Nanjing Institute of Industry Technology, Nanjing 210046, China; 2. College of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210046, China; 3. Jiyuan Power Supply Company, Jiyuan 454650, China)

Abstract: Making use of the electric network theory and the matrix theory, the fault diagnosis equations are set up in the form of sensitivity matrix. Then the method of multiple-excitation is applied to increase the number of independent equations and resolve the problem of morbid equations effectively. By introducing the micro-disposal method and the iterative algorithm, we can use the least squares approach to solve the nonlinear equations progressively by a series of linear equations. The results of the emulation calculation and simulation experiment show that the proposed method is simple and feasible, so the method can be applied to fault diagnosis of grounding grid.

The work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50477010).

Key words: grounding grid; corrosion diagnosis; non-linear equations; micro-disposal; least squares approach

中图分类号: TM771; TM835 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)24-0051-04

0 引言

发电厂、变电站的接地网是确保电力系统安全可靠运行、保障电气设备和人身安全的重要设施。但随着使用年限的增加, 由于受腐蚀性土壤的电化学腐蚀致使接地网的故障电流导通能力逐年减小, 热稳定能力大幅降低, 严重威胁着电网的安全稳定运行。因此能及时、正确掌握接地网的运行情况具有重要意义。

目前国内外在接地网故障诊断方面取得许多成就^[1-3], 从最近发表的文献来看, 大部分是采用多激励法测量, 而且建立的故障诊断方程也基本相同, 主要区别在于对故障诊断方程的求解方法不同。文献[4]采用线性规划理论中的单纯形法求解, 文献[5]采用迭代的办法, 将非线性方程转化为线性方程运

用最小二乘法求解, 增加了诊断的准确性, 文献[6]用禁忌搜索算法求解方程。文献[7]在文献[5]的基础上, 在求解中采用微增量处理技术, 更进一步改善了接地网故障诊断结果。

本文在上述文献的基础上, 结合网络理论、模式识别、优化算法对接地网故障诊断问题进行了研究, 最终实现了一种简单、准确不受运行条件限制, 不停电, 不开挖情况下, 对地网腐蚀故障进行诊断定位的方法。

1 基本原理

根据故障诊断学中的参数辨识法^[8,9], 建立已知接地网的数学模型, 得到能反映支路电阻(系统参数)变化情况的故障诊断方程。当对该网络施加电流源激励(输入量)时, 通过可及节点(可接入引下线进行测量的节点)测量电压(输出量), 由已知输入量和输出量, 根据最小二乘法求解该方程便可

得到支路电阻的变化情况。

1.1 建立故障诊断方程

设接地网有 n 个独立节点数, b 条支路, 忽略各条支路的电感和电容时, 可将接地网等效为纯电阻线性网络, 由电路理论可得^[10]:

$$Y_n U_n = J_n \quad (1)$$

$$Y_n = A \cdot Y \cdot A^T \quad (2)$$

$$J_n = A I_s - A Y U_s \quad (3)$$

式中: A 为关联矩阵; Y 为支路导纳矩阵 ($Y = Z^{-1}$), 它是一个对角阵; I_s 为电流源列向量; U_s 为电压源列向量; Y_n 为节点导纳矩阵; U_n 为节点电压列向量; J_n 为由独立电源引起的注入节点的电流列向量。

由式 (1) 可变形得:

$$U_n = Y_n^{-1} \cdot J_n \quad (4)$$

对上式关于 R_i 求偏导, 得:

$$\frac{\partial U_n}{\partial R_i} = \frac{\partial Y_n^{-1}}{\partial R_i} \cdot J_n + \frac{\partial J_n}{\partial R_i} \cdot Y_n^{-1} \quad (5)$$

因为实际测量中采用电流源作为激励, 所以 U_s 为零向量, 关联矩阵 A 和电流源列向量 I_s 均与

支路电阻无关, 即 $\frac{\partial J_n}{\partial R_i}$ 一项为零, 故上式等价于

$$\frac{\partial U_n}{\partial R_i} = \frac{\partial Y_n^{-1}}{\partial R_i} \cdot J_n = \frac{\partial Y_n^{-1}}{\partial R_i} \cdot A \cdot I_s \quad (6)$$

由于

$$\frac{\partial (Y_n^{-1} \cdot Y_n)}{\partial R_i} = 0 \quad (7)$$

所以有

$$\frac{\partial Y_n^{-1}}{\partial R_i} = -Y_n^{-1} \cdot \frac{\partial Y_n}{\partial R_i} \cdot Y_n^{-1} \quad (8)$$

将上式代入式 (6) 得

$$\frac{\partial U_n}{\partial R_i} = -Y_n^{-1} \cdot \frac{\partial Y_n}{\partial R_i} \cdot Y_n^{-1} \cdot A \cdot I_s \quad (9)$$

由上式可得一个 n 维的列向量, 表示支路电阻 R_i 对各个节点电压的影响。逐个对每条支路电阻求偏导, 得到一 $n \times b$ 维的矩阵 U_{nb} , 从中抽取与 m 个

可及节点有关的行向量, 组成一 $m \times b$ 维的矩阵 U_{mb} , 称该矩阵为灵敏度矩阵 (当电阻变化极小时该矩阵才有效), 其中元素 U_{ij} 的意义是第 j 个支路电阻的变化对第 i 个可及节点电压的影响。

由式 (4) 可计算出在电阻未发生变化、某种激励的情况下可及节点的节点电压 U_m , 设所测得的可及节点的节点电压 U_m^* , 则电压的增量为

$$\Delta U_m = U_m^* - U_m \quad (10)$$

结合灵敏度矩阵建立故障诊断方程:

$$\Delta U_m = U_{mb} \cdot \Delta R \quad (11)$$

通过求解上述方程便得到反映支路电阻变化情况的 ΔR ($\Delta R \geq 0$)。

1.2 求解故障诊断方程

由于一般 $m < n < b$, 所以式 (11) 为一欠定方程。在实际测量中常常采用多激励法, 即变换激励位置和每处激励多处测量的方法。若设有 L 种激励方式, 在第 i 种激励下对 N_i 个可及节点进行测

量, 则可以获得 $K = \sum_{i=1}^L N_i$ 个节点电压增量的观测值, 即可获得 K 个方程。这样显著增加了方程的个数, 较好解决了诊断方程的欠定问题^[5]。

由灵敏度矩阵求解的过程可看出其与支路电阻有关, 即灵敏度矩阵不是常数, 因此式 (10) 为非线性方程, 且是在电阻有微量变化的情况下才成立。为了利用线性的办法求解非线性方程, 采取迭代和微量处理技术的办法, 即每次迭代求 ΔR , 令

$$\Delta U_{m0} = \Delta U_m \cdot \alpha \quad (12)$$

式中, $0 < \alpha \leq 1$, α 的选取与网络的级数、要求的精度有关。然后求

$$\Delta U_{m0} = U_{mb} \cdot \Delta R \quad (13)$$

具体的求解步骤如下:

1) 根据式 (4) 计算节点电压理论值 U_m , 通过测量得到节点电压测量值 U_m^* , 从而由式 (10)、(12) 得到节点电压增量 ΔU_{m0} 。

2) 由式 (9) 得到灵敏度矩阵 U_{mb} 。

3) 利用最小二乘法, 求解方程 (13) 得到 ΔR_i , 并令 $R_i = R_i + \Delta R_i$ 。

4) 若此时 $\|\Delta U_m\| < \varepsilon$ (ε 是一很小的正数, 代表收敛精度), 退出迭代, 否则根据此时的 R_i , 转到第一步, 重新求 U_m 和 U_{mb} 。

另外, 若在施加电流源的两节点间无支路则虚拟一条高阻抗支路, 设其电阻为 $1000\ \Omega$, 支路号为 $b+1$ 。

1.3 测量方案的选择

虽然通过多激励法可获得 K 个方程, 但这 K 个方程并非全部独立, 有不少方程是线性相关的, 而诊断方程中独立方程的个数直接影响诊断结果的准确性。因此正确选择测量方案很重要。

对于具有 m 个可及节点的接地网, 只有 $m-1$ 个激励位置是独立的^[5]。

在第一次激励时, 共可以得出 $m-1$ 个不重复的电压测量值。由互易定理可知, 在第二次激励时可获得 $m-2$ 个不重复的电压测量值, 在第三次激励时可获得 $m-3$ 个不重复的电压测量值, 以此类推, 第 i 次激励时只有 $m-i$ 个不重复的电压测量值。因此, 对于具有 m 个可及节点的接地网, 不重复的电压测量值数 N 为:

$$N = \sum_{i=1}^{m-1} (m-i) \quad (14)$$

显然当 $b \leq N$, 则在 N 组不重复的测量值中任选 b 组数据, 构成节点电压方程是关于支路电阻相互独立的。

2 仿真分析

设接地网如图1所示, 图中有20条支路, 11个独立节点, 各支路和节点的标号如图所示, 可及节点为0、2、3、4、5、6、7, 取0节点为参考节点。各条支路的电阻均设为 $2\ \Omega$ 。

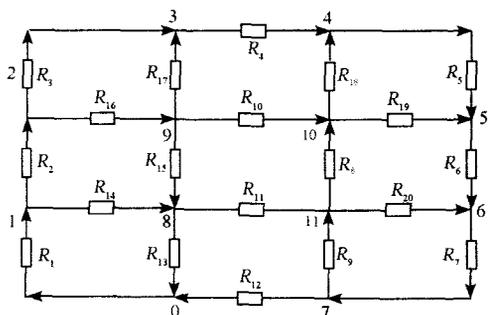


图 1 一个用作算例的接地网

Fig.1 A grounding grid for calculation

假设下列支路发生变化: $\Delta R_3 = 1\ \Omega$;

$\Delta R_6 = 18\ \Omega$; $\Delta R_9 = 3\ \Omega$; $\Delta R_{12} = 18\ \Omega$; $\Delta R_{20} = 3\ \Omega$

其余支路未变。

设所加电流源激励为 $1\ \text{A}$, 激励位置和电压测量位置如表 1 所示。其中电压值由程序计算得到(这里的电压是指各个可及节点到参考节点的电压值)。

诊断结果如表 2 所示。

在表 2 及后面的表 4 中引入了相对偏离度的概念, 其定义为:

$$\text{相对偏离度} = \frac{\text{诊断值} - \text{设计值}}{\text{设计值}} \times 100\% \quad (15)$$

它近似反映了接地电阻增加的百分数, 实际上也就反映了腐蚀的程度。假设当相对偏离度大于 25% 时就说明支路发生了腐蚀。

表 1 测量方案

Tab.1 Programme of measurement

实验	激励位置	电压测量位置
1	2~0	2, 3, 4, 5, 6, 7
2	3~0	3, 4, 5, 6, 7
3	4~0	4, 5, 6, 7
4	5~0	5, 6, 7
5	6~0	6, 7
6	7~0	7

表 2 仿真计算诊断结果

Tab.2 Diagnosis results of a simulation

支路号	实际值/ Ω	诊断值/ Ω	相对偏离度(%)
1	2	2.046 6	2.328 2
2	2	2.000 0	0
3	3	2.974 9	48.75
4	2	2.000 0	0
5	2	2.000 0	0
6	20	13.656 7	582.83
7	2	2.000 0	0
8	2	2.206 2	10.308 2
9	5	5.647 4	182.37
10	2	2.000 0	0
11	2	2.000 0	0
12	20	15.957 1	697.85
13	2	2.026 4	1.321 3
14	2	2.175 7	8.785 6
15	2	2.000 0	0
16	2	2.000 0	0
17	2	2.003 9	0.194 4
18	2	2.000 0	0
19	2	2.110 7	5.534 5
20	5	6.262 8	213.14

从表 2 可看出: 支路 3, 6, 9, 12, 20 的电阻阻值变化较大(如表黑体部分所示), 可判断这些支路有故障, 与假设相符, 由此可实现故障支路的定位。

3 实验研究

由仿真计算知, 该诊断方法可行, 下面再在实验室对其进行实验测试与研究。算例同上, 用不同阻值的电阻代表各段接地导体, 用功率可调电阻器来模拟腐蚀的接地导体, 并按照上例中的测量方案

进行测量,测得的节点电压见表3。

表3 实验所测电压值(V)

Tab.3 Tested voltage of nodes

方案	U_{02}	U_{03}	U_{04}	U_{05}	U_{06}	U_{07}
1	2.16	1.68	1.50	1.43	1.08	1.02
2		2.71	2.21	2.01	1.38	1.30
3			3.08	2.63	1.63	1.52
4				3.44	1.79	1.65
5					4.33	3.42
6						4.10

用这些所测数据进行计算,得到的诊断结果见表4。

表4 模拟实验诊断结果

Tab.4 Diagnosis results of an experiment

支路号	实际值/ Ω	诊断值/ Ω	相对偏离度/(%)
1	2.1	2.007 9	0.392 8
2	2.0	2.003 1	0.154 9
3	3.05	3.401 7	70.087 2
4	2.0	2.042 8	2.140 7
5	2.0	2.000 4	0.020 0
6	19.6	16.305 0	715.252 2
7	2.0	2.000 1	0.005 0
8	2.1	2.249 9	12.495 8
9	4.85	4.728 2	136.410 9
10	2.0	2.000 0	0
11	2.0	2.003 4	0.171 9
12	20.5	17.857 5	792.875 9
13	2.05	2.212 7	10.636 4
14	2.1	2.495 5	24.773 4
15	2.0	2.000 0	0
16	2.0	2.108 9	5.444 1
17	2.0	2.008 8	0.440 5
18	2.2	2.423 4	21.171 5
19	2.05	2.188 4	9.4198
20	5.09	5.928 6	196.428 2

由表4可看出,五个故障支路均能检测出来。因此,通过仿真计算和模拟实验可得:只要测量数据在允许的误差范围内,该方法是可行的。

4 结论

采用多激励法进行测量后,能显著增加独立方程的数目,从而提高诊断的准确性。经过仿真计算和模拟实验发现,该算法能反映接地网腐蚀断裂情况。但是可及节点的数目和位置,以及测量误差都对方程的求解有很大的影响。如果可及节点的数目过少,或测量误差过大,都可能使方程不收敛。因此如何提高算法的鲁棒性将是论文下一步要研究的方向。

参考文献

[1] 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 Xiao-ling, CHEN Xian-lu. The Technique of the Optimization Applied in the Grounding Grid's Failure Diagnosis[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(4):

64-66.
[2] 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):42-45.
HUANG Wen-wu, XI Wen-shan, ZHU Zheng-guo. 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.
[3] 刘健,王建新,王森.接地网腐蚀故障诊断的可测性研究[J].高电压技术,2008,34(1):64-70.
LIU Jian, WANG Jian-xin, WANG Sen. Testability of Grounding Grids Corrosion Diagnosis [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(1): 64-70.
[4] 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 Xiao-ling, HUANG Qing-yang. Fault Diagnosis of Grounding Grid of Electric Power Plants and Substations[J]. Proceedings of the EPSA, 2002, 14(1): 48-51.
[5] 刘健,王建新,王森.一种改进的接地网故障诊断算法及测试方案评价[J].中国电机工程学报,2005,25(3):71-77.
LIU Jian, WANG Jian-xin, WANG Sen. An Improved Algorithm of Corrosion Diagnosis for Grounding Grid & Its Evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (3): 71-77.
[6] 程红丽,刘健,王建新.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 Hong-li, LIU Jian, WANG Jian-xin. Fault Diagnosis for Grounding Grids based on Taboo Search [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(5): 139-142.
[7] 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 Xiao-feng. Application of Micro Disposal Technology in Diagnosing the Corrosion of Grounding Grid [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(7): 199-202.
[8] 杨士元.模拟系统的故障诊断与可靠性设计[M].北京:清华大学出版社,1993.
YANG Shi-yuan. Fault Diagnosis and Reliability Design of Simulation System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.
[9] 姜建国.故障诊断学及其在电工中的应用[M].北京:科学出版社,1995.
JIANG Jian-guo. Fault Diagnostics and Its Application in Electrical Engineering[M]. Beijing: Science Press, 1995.
[10] 邱关源.电路[M].北京:高等教育出版社,2000.
QIU Guan-yuan. Electric Circuit[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.

收稿日期:2009-02-28; 修回日期:2009-03-13

作者简介:

许慧中(1955-),女,副教授,主要研究领域为电力系统及其自动化FACTS、供电技术、电工电子;

马宏忠(1962-),男,教授,博士,博士生导师,研究领域为电气设备状态监测与故障诊断,电机运行与控制,风力发电; E-mail: hhumhz@163.com

张志新(1984-),女,硕士研究生,研究领域为电力系统及其自动化。