

一种线性的接地网故障诊断新方法

倪云峰¹, 王树奇¹, 李志忠², 王森²

(1. 西安科技大学电气工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西电力科学研究院, 陕西 西安 710054)

摘要: 提出了一种采用参数识别法将接地网等效为电阻网络进行故障诊断的方法。根据接地网可及节点的分布位置将其约简为本征网络。采用建议量测方案, 根据特勒根定理建立线形方程组直接求解本征网络的支路电阻, 在此基础上通过逐层上溯的方法精确获取可以约简为该本征网络的接地网支路电阻信息, 达到接地网故障诊断的目的。采用数值法对给定接地网在已知可及节点位置条件下各条支路诊断结果的可靠性分析, 给出了接地网各支路诊断结果可靠性判断的通用方法。以一个中规模的36节点实验接地网验证了所提出方法的可行性。

关键词: 接地网; 故障诊断; 网络等效; 最小二乘法

A linear approach of grounding grid fault diagnosis

NI Yun-feng¹, WANG Shu-qi¹, LI Zhi-zhong¹, WANG Sen²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: To benefit for grounding grid fault diagnosis, a novel method for grounding grid fault diagnosis is proposed. In which the grounding grids can be equaled into a purity resistance net and equaled into an intrinsic branches grids that only contained touchable nodes by the position of touchable nodes. Based on above, the resistance of intrinsic branches grids can be calculated by the Tellegen theory. The branch resistances of the branches in the grounding grids are worked out by using the least square method proposed in [14]. Another approach was proposed that evaluated the reliability for the result of branches resistances, and the program steps are illustrated in the paper. Finally, an experimental grounding grid with sixty branches is used as an example. The results of fault diagnosis show that the proposed approaches are correct and feasible.

Key words: grounding grids; fault diagnosis; equivalent branches grids; least square method

中图分类号: TM86 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)17-0024-04

0 引言

在国内, 接地网一般是用扁铁制成的网格, 它对变电站电气设备的可靠运行和人身安全至关重要。由于埋入地下, 多年后接地网常常会因为腐蚀或断裂而造成缺陷, 降低其电气性能, 成为设备和人身安全事故的隐患, 因此对接地网进行故障诊断具有重要意义。

学者们在对接地网进行了分析和计算方面取得了大量研究成果^[1,2]; 采用电磁场的方法探测了导体的断裂位置^[3]; 采用基于特勒根定理的电阻测量法计算接地网各条导体的实际电阻^[4]; 建立灵敏度故障诊断方程并采用单纯形法求解接地网中各段导体的电阻增量^[5,6]; 文献[7]采用禁忌搜索算法进行了

故障诊断; 文献[8]在文献[5]的基础上, 采用多处激励多处测量方法建立足够多方程, 并采用迭代方法求解灵敏度故障诊断方程获得接地网支路电阻最小二乘意义下的最优解, 解决了文献[5, 6]的缺陷; 文献[9]采用拓扑撕裂和分层约简的方法解决了可测性问题, 将接地网支路分为明晰支路和不确定支路, 并将接地网约简为保留全部可及节点的本征接地网, 且指出本征接地网中的所有支路(称为本征支路)都可唯一确定。但是已有的方法及文献很少涉及可测性分析, 且进行可测性分析的文献在求解本征接地网所建立的方程是非线性方程, 可能掉入局部最优陷阱。

本文在文献[9]所提出的拓扑分层约简方法的基础上, 提出了一种为求解本征支路电阻建立线性方程的方法, 从而避免了非线性迭代过程。论述了本文所建议方法的求解过程。

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET050875)

1 基本原理

1.1 电路的等效变换

一个网格状的接地网, 可以将其等效为复杂纯电阻网络。对于埋入地下的接地网来讲, 只有设备下引线与之相连, 称与下引线相连的节点为可及节点(可以进行量测), 而没有引出线的节点称之为不可及节点。

对于一个已知网络结构(即关联矩阵)但各条支路电阻未知的纯电阻网络, 则可将其等效为一个仅有可及节点引出线的“黑盒子”网络。

将等效为“黑盒子”的接地网所有节点按照可及节点在先不可及节点在后规则重新进行编号。设描述接地网结构的关联矩阵变换用 A_a 表示, 其降阶关联矩阵变换用 A 表示。通过给可及节点加载恒定直流电流源激励, 并量测可及节点间的电压进行估计“黑盒子”网络中的支路电阻。

根据电路理论的节点电压方程(包含参考点)有:

$$G \cdot U_n = I_n \quad (1)$$

其中: G 、 U_n 和 I_n 分别表示包含参考点在内的节点电导矩阵、节点电压列向量和节点注入电流列向量。

假设组成网络各支路电导矩阵为 Y (对角矩阵, 且对角线元素为支路电导), 则节点电导矩阵为

$$G = A_a \cdot Y \cdot A_a^T \quad (2)$$

则(1)式可分块表示为

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{n1} \\ U_{n2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{n1} \\ I_{n2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: G_{11} 、 G_{22} 分别为可及节点和不可及节点电导矩阵; G_{12} 、 G_{21} 为反映不可及节点与可及节点间的支路电导矩阵; U_{n1} 、 U_{n2} 分别为可及节点电压向量和不可及节点向量; I_{n1} 、 I_{n2} 分别为可及节点和不可及节点注入电流的列向量。

由于不可及节点不可使用, 注入电流为 0, 显然 I_{n2} 是一个零向量。

根据电路网络理论, 将只有可及节点引线的纯电阻网络等效为一个只含可及节点且任意两个可及节点间最多仅有一条支路的纯电阻网络, 称其为本征网络, 描述其网络结构的关联矩阵 A_{eqa} 表示, 其降阶关联矩阵表示为 A_{eq} , 称本征网的支路为本征支路。本征网的节点电导矩阵可表示为:

$$G_a = G_{11} - G_{12} \cdot (G_{22})^{-1} \cdot G_{21} \quad (4)$$

采用下列步骤可快速获得本征网络的网络结构, 即关联矩阵 A_{eqa} 。

第 1 步: $k=0$, 将 len 赋值为可及节点数目, 令 $j=1$ 。

第 2 步: $i=j+1$, 判断 $G_a(i, j) < 0$ 是否成立? 若为真, 则进行第 3 步, 否则跳转至第 6 步。

第 3 步: $k=k+1$, 判断 $i > j$ 是否成立? 若为真, 则进行第 4 步, 否则跳转进行第 5 步。

第 4 步: $A_{eqa}(i, k) = -1$, $A_{eqa}(i, k) = 1$, 跳转至第 6 步。

第 5 步: $A_{eqa}(j, k) = -1$, $A_{eqa}(i, k) = 1$, 跳转至第 6 步。

第 6 步: $i=i+1$, 判断 $i \leq len$ 是否成立? 若为真, 则跳转至第 2 步, 否则进行第 7 步。

第 7 步: 判断 $j < len - 1$ 是否成立? 若为真, 则退出, 否则 $j=j+1$ 后跳转至第 2 步。

1.2 根据本征网结构建立基本测试方案

本文采用的测试方案指施加激励源位置和电压量测位置的选取。

一个完善的测试方案应该满足如下要求:

1) 从提高抗干扰能力和减少量测误差影响角度考虑, 测试方案应在给定激励电流时使得测量电压信号足够大。

2) 从提高诊断灵敏度和减少量测误差对诊断结果的影响角度考虑, 测试方案中使用的信号源能对支路电阻的变化较敏感。

3) 从测试的完整性角度考虑, 施加激励和电压量测时, 建立的独立方程数目最多。采用叠加定理和互易定理证明, 该方案得到的方程不重复。

综上所述, 可以通过选取本征网络各条支路端节点对应接地网节点加载激励, 并测量这两端节点间的电压, 就可满足上述要求, 将此测试方案称为基本测试方案。其推理证明从略。

1.3 本征网支路电阻的计算

根据特勒根定理: 对于一个具有 n 个节点和 b 条支路的电路, 设各支路电流和电压取关联参考方向, 令 (i_1, i_2, \dots, i_b) 和 (u_1, u_2, \dots, u_b) 分别表示 b 条支路的电流和电压, 则对任意时间 t 有:

$$\sum_{k=1}^b u_k \cdot i_k = 0 \quad (5)$$

进而等效为:

$$\sum_{k=1}^b (u_k)^2 \cdot Y_k = 0 \quad (6)$$

式中: Y_k 为该电路每条支路的电导。由式(6)可知,若能测量获得一个电路网络在已知激励作用下每条支路的电压,则可建立一个关于支路电导的线性方程。若当能够建立 b 条独立支路电导的线性方程,则可求解获得各条支路电导值。

为此对本文中 1.2 节的测试方案作补充,在对本征支路节点(对应接地网节点)处施加激励源时,必须测量所有本征支路节点电压。值得一提的是测量的支路电压还应该包括激励支路。

需要强调的是:若量测误差、测试仪表精度限制以及系统误差干扰等存在且较大时,本征支路电阻解向量的精度将受到限制。

1.4 从本征网回溯接地网

文献[8]建立灵敏度故障诊断方程(如式(7)所示),指出该方程的使用条件为接地网的各支路电阻发生微小变化,且应将灵敏度矩阵视为变量。因此应将灵敏度故障诊断方程作为非线性方程进行求解。

$$\Delta U|_R = \sum_{i=1}^{LB} M_i|_R \cdot \Delta R_i \quad (7)$$

式中: $\Delta U|_R$ 为接地网电阻向量为 R 时测试电压与实际电压的偏差, $M_i|_R$ 为接地网电阻向量为 R 时接地网第 i 支路电阻对各个节点电压的影响, ΔR_i 为第 i 支路当前电阻与实际电阻的偏差。

为了求解非线性方程式(7),文献[8]提出一种迭代方法获取该方程最小二乘意义下的最优解。

给通过上节已经获取的本征网所有支路分别加载直流源进行激励,同时量测该支路电压,并将其作为测试电压 U_T ,用文献[8]的方法求解出满足测试电压 U_T 的接地网支路电阻,从而获取接地网支路的故障诊断结果。

文献[9]对接地网采用电路网络理论进行分层约简,从而获得接地网的本征网络结构,根据本征网的网络结构建立测试方案,直接采用文献[8]的方法求解满足测试电压的本征网支路电阻,然后根据本征网网络采用逐层上溯方法计算接地网支路电阻。

而本文是在文献[9]分层约简得到其本征网结构的基础上,采用特勒根定理建立线性方程,通过求解线性方程来获取本征网的支路电阻,然后再根据简化本征网过程的约简原则,采用逐层上溯方法计算接地网支路电阻。

显然,采用线性方法求解各条本征支路电阻值,可以避免非线性迭代过程,提高了求解效率。

2 用数值统计法评估接地网诊断结果可靠性

由于接地网可及节点数目与分布位置的限制,对于接地网支路所建立的方程组可能是病态方程组,即不能完全唯一确定各条接地网支路电阻值为真。诊断结果是否可靠,认为可靠则作为诊断结果,否则其结果仅有参考价值。为区分支路诊断结果可靠程度,下面给出了一般接地网各支路阻值可靠性判断法则步骤。

步骤 1: 在一定范围内随机生成 k 组接地网支路电阻向量 R_{real} , 分别作为实际接地网的支路电阻。

步骤 2: 计算接地网的等效本征网络,并由此获取基本测试方案。

步骤 3: 以基本测试方案计算步骤 1 所生成的接地网 k 组测试电压。

步骤 4: 直接根据文献[8]求取 k 组接地网支路电阻向量的诊断结果 $R_{\text{diagnosis}}$ 。

步骤 5: 分别求取 k 组诊断结果的相对误差向量 err (这里 $err = \frac{|R_{\text{real}} - R_{\text{diagnosis}}|}{R_{\text{real}}} \cdot 100\%$)。

步骤 6: 计算 k 组诊断结果的相对误差向量 err 的均值 err_{mean} 。

显然,向量 err_{mean} 中取值较小支路对应位置的诊断结果是可靠的,称之为明晰支路,而其它支路的诊断结果 err_{mean} 较大者称之为不确定支路,其支路电阻值仅供参考作用。

3 仿真计算

图 1 为一个 36 节点 60 条支路的中规模实验接地网的构成,数字表示节点序号。无任何标记的支路为无故障支路,其电阻设计值均为 0.1Ω 。有标记的支路为故障支路,其电阻值如表 1 所示。

表 1 实验接地网故障支路电阻设计值

支路类型	/	//	///	○	×	
电阻/ Ω	0.19	0.36	0.47	0.57	0.78	1.35

该接地网的可及节点有: 0、3、5、8、10、12、13、15、17、18、20、21、22、23、24、25、27、29、30、32、33 和 34。

依据本文方法对图 1 所示的接地网进行等效变换,其本征网如图 2 所示。

为能够最大限度地模拟接地网真实复杂情况,在求解本征支路电阻时,给采用本文建议测试方案进行量测获得的测试电压叠加 0.5% 随机误差,以更加真实地反映测试仪表误差和测量时的主观随机误差。

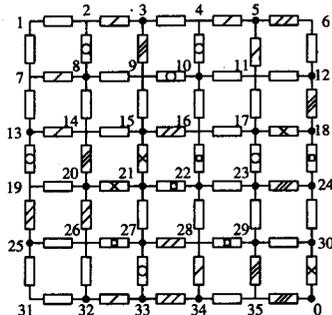


图 1 一个实验接地网

Fig.1 An experiment grounding grid

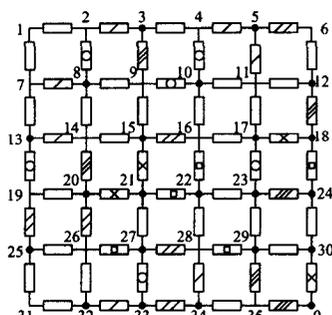


图 2 实验接地网对应的本征网

Fig.2 The intrinsic grounding grid of experiment grounding grid

用文中 1.3 节诊断方法可以获得接地网层次的所有支路电阻, 在此基础上采用本文 2 节所述方法进行判断即可得到接地网诊断结果可靠支路如表 2 所示, 接地网明晰支路诊断结果如表 3 所示。

表 2 接地网诊断结果可靠支路

Tab.2 The reliable branches of the grounding grid

接地网支路	接地网支路	接地网支路	接地网支路	接地网支路	接地网支路
5-11	10-11	11-12	10-16	11-17	29-35
12-18	15-16	16-17	17-18	15-21	30-0
16-22	17-23	18-24	20-21	21-22	32-33
22-23	23-24	20-26	21-27	22-28	33-34
23-29	24-30	25-26	26-27	27-28	34-35
28-29	29-30	26-32	27-33	28-34	35-0
23-29	24-30	25-26	26-27	27-28	
23-29	24-30	25-26	26-27	27-28	

4 结论

本文研究可以得出下列结论:

1) 提出了一种将接地网等效为纯电阻网络, 根据接地网可及节点的分布位置将其约简为本征网络, 采用特勒根定理采用线性的方法求解获得本征支路电阻, 在此基础上采用逐层上溯方法对接地网支路电阻进行故障诊断的方法。采用线性方法求解

表 3 明晰支路故障诊断结果

Tab.3 The results of clear-branches

支路号	实际值	诊断值	支路号	实际值	诊断值
5-11	0.19	0.1951	22-28	0.1	0.1000
10-11	0.1	0.1000	23-29	0.1	0.1002
11-12	0.1	0.1012	24-30	0.1	0.1000
10-16	0.1	0.1008	25-26	0.1	0.1015
11-17	0.1	0.1000	26-27	0.57	0.5695
12-18	0.47	0.4684	27-28	0.36	0.3606
15-16	0.36	0.3558	28-29	0.57	0.5965
16-17	0.1	0.1029	29-30	0.1	0.1000
17-18	1.35	1.3474	25-31	0.1	0.1007
15-21	1.35	1.3609	26-32	0.1	0.1000
16-22	0.57	0.5775	27-33	0.78	0.7789
17-23	0.78	0.7724	28-34	0.19	0.1920
18-24	0.57	0.5706	29-35	0.47	0.4608
20-21	1.35	1.3740	30-0	1.35	1.3208
21-22	0.57	0.5708	31-32	0.1	0.1007
22-23	0.1	0.1000	32-33	0.1	0.1897
23-24	0.47	0.4671	33-34	0.36	0.3606
20-26	0.36	0.3682	34-35	0.1	0.1000
21-27	0.1	0.1000	35-36	0.47	0.4723

各条本征支路电阻值, 可以避免非线性迭代过程, 提高了求解效率。

2) 对接地网诊断结果进行了可靠分析, 给出了一般接地网各支路阻值可靠性判断方法。

3) 以一个 36 节点的中规模实验接地网进行验证, 结果表明提出的方法是可行的。

参考文献

- [1] 张丽萍, 袁建生, 李中新. 变电站接地网模拟计算[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(5): 76-79.
ZHANG Li-ping, YUAN Jian-sheng, LI Zhong-xin. Numerical Calculation of Substation Grounding Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(5): 76-79.
- [2] 张波, 崔翔, 赵志斌, 等. 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 Zhi-bin, et al. Analysis of Grounding Grids at Large Scale Substations in Frequency Domain[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 59-63.
- [3] Dawalibi F P. Electromagnetic Fields Generated by Overhead and Buried Short Conductors Part 2—Ground Conductor[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1986, 1(1): 112-119.
- [4] HU Jun, ZHANG Rong, HE Jin-liang, et al. Novel Method of Corrosion Diagnosis for Grounding Grid[A]. In: Proceedings of the 2000 International Conference on Power System Technology[C]. Perth(Australia): 2000. 1365-1370.

(下转第 74 页 continued on page 74)

4 结论

提出了Microsoft Visio2003VBA编程的图形化电力系统计算软件开发的新技术和新方法,研究了Visio图形化电力应用软件开发的一般过程,开发了适于各种电力系统计算的电力网通用图形化建模方法,并进行了电网拓扑结构的自动识别,基于此最终实现了所绘电气接线图的潮流等电气计算。实际电网算例结果表明了所进行的Visio二次开发为电力系统技术开发提供了一种有效的途径和方法。

参考文献

- [1] 顾晓辉,冯林桥,等. 面向对象的可视化电力系统分析软件研究[J]. 电力自动化设备,2001,21(3):20-22.
GU Xiao-hui,FENG Lin-qiao,et al.Research on Power System Analysis Software with Object-oriented Visual Programming[J].Electric Power Automation Equipment, 2001,21(3):20-22.
- [2] 美国Microsoft公司. 开发Microsoft Visio解决方案[M]. 莱恩工作室,译.北京:北京大学出版社,2002.
Microsoft Corporation.Developing Microsoft Visio Solutions[M]. Len Workroom,Trans. Beijing:Beijing University Press,2002.
- [3] 西安交通大学,清华大学,等. 电力系统计算[M]. 北京:水利电力出版社,1978.
Xi'an Jiaotong University, Qinghua University,et al.

- Power System Computing[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press,1978.
- [4] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京:水利电力出版社,1985.
YU Er-keng. Power System State Estimation[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press,1985.
- [5] 龙启峰,陈岗,等. 基于面向对象技术的电力网络拓扑分析新方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2005,17(1):73-77.
LONG Qi-feng, CHEN Gang, et al. New Method of Power Network Topology Analysis Based on Object-Oriented Technology[J].Proceedings of the CSU-EPSA,2005,17(1):73-77.
- [6] 胡森,徐学军,等. 基于配电GIS动态拓扑关系生成电气接线图[J].继电器,2007,35(9):31-34.
HU Sen,XU Xue-jun, et al. GIS-based Dynamic Relationship of Topology to Generate Electrical Diagrams of Distribution Network[J].Relay,2007,35(9):31-34.

收稿日期: 2007-11-26; 修回日期: 2008-01-15

作者简介:

郭伟伟(1980-),男,硕士,工程师,主要从事电力系统运行和继电保护的工作; E-mail: haifenghello@163.com

孙强宇(1971-),男,本科,高级工程师,主要从事电力系统运行的工作。

(上接第27页 continued from page 27)

- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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 Hong-li,LIU Jian,WANG Sen,et al. Fault Diagnosis for Grounding Grids Based on Tabu Search[J]. High Voltage Engineering, 2007,33(5):139-142.
- [8] 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.
- [9] 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(1).
LIU Jian, WANG Shu-qi,LI Zhi-zhong, et al. Grounding Grids Corrosion Diagnosis Based on Hierarchical Simplification of Network Topology[J]. Proceedings of the CSEE,2008, 28(1).

收稿日期: 2007-11-26; 修回日期: 2008-01-28

作者简介:

倪云锋(1968-),男,副教授,博士研究生,研究领域为电气工程及其自动化; E-mail:nnyfeng@163.com

王树奇(1974-),男,讲师,博士研究生,研究领域为信号处理技术和安全技术工程;

李志忠(1975-),男,硕士研究生,研究领域为信号及信息处理技术。