

基于约束总体最小二乘算法的接地网 故障诊断新模型

张英娇¹, 罗先觉¹, 牛涛^{1,2}, 刘利强¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 江苏省电力设计院, 211102, 南京)

摘要: 针对变电站接地网实际敷设情况往往与施工图纸有所出入、可能造成诊断结果具有较大误差的情况, 在传统电路诊断模型的基础上考虑了接地网腐蚀特性, 即地理位置越接近的导体被腐蚀的程度越相近, 并提出局部差异性腐蚀指标表示支路电阻腐蚀倍数的相近程度, 从而建立了接地网故障诊断的增广线性模型, 同时运用基于奇异值分解法分解的最佳降秩逼近定理解决模型中方程组等式两端的不相容性. 为校正诊断模型中存在的扰动对诊断结果的影响, 采用了基于约束总体最小二乘算法的优化算法, 对明晰支路和模糊支路分别迭代, 在已知设计模型与实际支路敷设有偏差的情况下得出了较为满意的解. 仿真计算结果验证了所提方法的正确性和有效性.

关键词: 接地网; 故障诊断; 腐蚀; 最佳降秩逼近定理; 约束总体最小二乘算法

中图分类号: TM86 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)10-0110-06

New Model of Corrosion Diagnosis for Grounding Grids Based on Constrained Total Least Squares Algorithm

ZHANG Yingjiao¹, LUO Xianjue¹, NIU Tao^{1,2}, LIU Liqiang¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, China)

Abstract: A discrepancy between the actual installation of substation grounding grids and the design drawings often leads to bigger error in the diagnostic results. Based on the traditional circuit method, the corrosion diagnosis algorithm is improved to take the corrosion characteristics into account, which means that the branches connected to the same node have the similar corrosion extent range. Therefore, an augmented linear model is proposed with localized difference corrosion index. And the best reduced-rank approximation theorem is adopted to ensure the compatibility of the equations. To solve the novel model, the total least squares algorithm is chosen to reduce the deviation carried by the disturbance factors in the model. The simulation results show the validity of this approach.

Keywords: grounding grid; fault diagnosis; corrosion; best reduced-rank approximation theorem; constrained total least squares algorithm

变电站接地网是维护电力系统安全可靠运行的重要设施, 它不仅为变电站内各种电气设备提供一个公共的电位参考地, 而且在系统发生故障时还能迅速排泄故障电流并降低变电站的地电位升. 在接

地装置运行中, 接地线和接地体会因外力、电流电动力和土壤腐蚀作用而损伤, 严重时甚至断裂, 导致接地电阻增大. 因此, 必须对接地装置定期进行检查和试验, 及时发现隐患, 确保人身和设备安全.

文献[1-2]通过探测地面磁场和电势差,采用电磁场分析方法获取接地网支路的断裂位置信息,解决了接地网断裂故障支路的定位问题,但是这种方法难以诊断发生了腐蚀但尚未断裂的导体的腐蚀程度.文献[3]采用反向传输(BP)神经网络实现智能故障定位,但只能判定单根支路的断裂故障.文献[4]将能量最低原理引入接地网故障诊断,将接地网能量消耗最低作为目标函数,采用灵敏度分析方法,将建立起来的可及节点电压增量与支路电阻增量之间的线性关系作为约束条件,转化为数学优化问题.文献[5]基于特勒根定理,建立可及节点端口电阻变化量与所有支路电阻变化量间的线性关系.文献[6-7]建立了反映接地网支路导体电阻变化对可及节点电压影响的灵敏度矩阵,通过迭代进行求解,并利用网络拓扑分析的方法判断支路的可测性.

上述这些方法都假定接地网模型是准确的,但实际往往并非如此,通常有如下几种情况可能导致模型产生偏差:竣工图与施工实际情况不吻合;对于接地网已经改造过的变电站,新敷设的接地网可能与老接地网存在连接点;电缆支架和门型构架都是导体,也可能成为接地网中的支路.

约束总体最小二乘算法(TLS)可以有效地减小模型偏差的影响,在自动控制、人工智能、图像处理等方面具有广泛的应用.本文将约束总体最小二乘算法引入到接地网腐蚀诊断中,提供了一种解决上述问题的有效方法,提高了诊断的准确性.

1 考虑腐蚀特性的改进模型

1.1 传统线性模型

接地网在直流电流激励下可忽略其电感和电容的影响,近似等效成纯电阻网络.支路电阻的增量可以反映接地网各段导体的腐蚀程度.支路电阻无法直接测量,因此可以把接地网看成一个“黑匣子”,将诊断问题转化为一个参数辨识问题,通过对外部节点电压进行间接测量,构造适当算法计算内部支路

电阻.

设接地网各条支路电阻为 $R_i (i=1,2,\dots,b)$, b 为支路数,选择网络中的两个可及结点(通过接地引下线与地面上的电气设备相连接的结点)作为激励端口,考虑到节点到电源间的引线电阻的影响,在激励端口施加直流激励,激励电流为 I_s ,再在网络中选择另外两个可及结点 m 和 n 作为电压的测量端口,端口电压为 V_{mn} ,如图 1 所示.

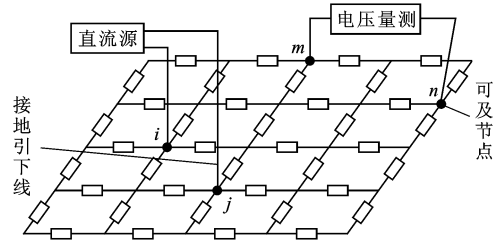


图 1 接地网腐蚀诊断测量示意图

设发生故障后各条支路的实际电阻为 R'_i , 端口电压的测量值为 V'_{mn} , 那么腐蚀前后电阻变化量和测量电压的变化量为

$$\left. \begin{aligned} \Delta R_i &= R'_i - R_i, \quad i = 1, 2, \dots, b \\ \Delta V_{mn} &= V'_{mn} - V_{mn} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

依据电路理论,当元件参数变化量很小的时候,可以把电路响应参数的变化量近似表示成元件参数的变化量及响应参数对各个元件参数灵敏度的线性关系.设 V_{mn} 对各条支路电阻的灵敏度为 $S_{K_i}^{V_{mn}} = \partial V_{mn} / \partial R_i$, 电压变化量 ΔV_{mn} 和电阻变化量 ΔR 之间可以表示成如下形式

$$\Delta V_{mn} = S_{K_1}^{V_{mn}} \Delta R_1 + S_{K_2}^{V_{mn}} \Delta R_2 + \dots + S_{K_b}^{V_{mn}} \Delta R_b \quad (2)$$

基于式(2),在相同的激励下测量多个端口的电压,并多次更换激励端口位置,形成完备测量方案.若共选择 L 次激励,其中第 k 次激励的测量端口为 $m_1 n_1, m_2 n_2, \dots, m_{Lk} n_{Lk}$ (k 为 $1 \sim L$),则可以建立如下形式的线性诊断模型

$$\left. \begin{aligned} \Delta V_{m_1 n_1 (1)} &= S_{K_1}^{V_{m_1 n_1 (1)}} \Delta R_1 + S_{K_2}^{V_{m_1 n_1 (1)}} \Delta R_2 + \dots + S_{K_b}^{V_{m_1 n_1 (1)}} \Delta R_b \\ \Delta V_{m_2 n_2 (1)} &= S_{K_1}^{V_{m_2 n_2 (1)}} \Delta R_1 + S_{K_2}^{V_{m_2 n_2 (1)}} \Delta R_2 + \dots + S_{K_b}^{V_{m_2 n_2 (1)}} \Delta R_b \\ &\vdots \\ \Delta V_{m_{a1} n_{a1} (1)} &= S_{K_1}^{V_{m_{a1} n_{a1} (1)}} \Delta R_1 + S_{K_2}^{V_{m_{a1} n_{a1} (1)}} \Delta R_2 + \dots + S_{K_b}^{V_{m_{a1} n_{a1} (1)}} \Delta R_b \\ &\vdots \\ \Delta V_{m_1 n_1 (L)} &= S_{K_1}^{V_{m_1 n_1 (L)}} \Delta R_1 + S_{K_2}^{V_{m_1 n_1 (L)}} \Delta R_2 + \dots + S_{K_b}^{V_{m_1 n_1 (L)}} \Delta R_b \\ &\vdots \\ \Delta V_{m_{aL} n_{aL} (L)} &= S_{K_1}^{V_{m_{aL} n_{aL} (L)}} \Delta R_1 + S_{K_2}^{V_{m_{aL} n_{aL} (L)}} \Delta R_2 + \dots + S_{K_b}^{V_{m_{aL} n_{aL} (L)}} \Delta R_b \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

简化成矩阵形式为

$$\mathbf{S}\Delta\mathbf{R} = \Delta\mathbf{V} \quad (4)$$

其中灵敏度矩阵 $\mathbf{S}$ 可以采用文献[8]所介绍的方法快速求得, $\Delta\mathbf{R}$ 为式(4)的最小二乘解

$$\Delta\mathbf{R} = (\mathbf{S}^T\mathbf{S})^{-1}\mathbf{S}^T\Delta\mathbf{V} \quad (5)$$

当接地导体腐蚀较严重时, $\Delta\mathbf{R}$ 较大, $\Delta\mathbf{R}$ 和 $\Delta\mathbf{V}$ 不再是线性关系, 因此上式求得的 $\Delta\mathbf{R}$ 仅仅是一个线性逼近解, 还需要进行反复迭代最后收敛到可行解。

根据式(5)直接求解的不足之处在于:

(1) 接地网中往往存在模糊支路, 造成灵敏度矩阵 $\mathbf{S}$ 不满秩, 无法按式(5)直接求解, 需要采用数学优化算法;

(2) 对测量误差、模型误差非常敏感, 适应性较差。

1.2 考虑腐蚀特性的增广线性模型

接地网中含有大量不可及节点, 难以在这些节点上施加激励或测量电压, 造成部分支路电阻理论上无法确诊, 这些支路称为模糊支路(或不可测支路), 反之为明晰支路(或可测支路)。文献[9-10]提供了一种利用矩阵分析方法找出所有模糊支路的算法。对于模糊支路, 本文在传统线性模型基础上提出了考虑腐蚀特性的增广线性模型, 给出符合接地导体在土壤中腐蚀情况的参考解。

土壤电阻率、pH 值、含水量和含盐量是导致接地网导体腐蚀的主要因素^[11], 土壤性质相近的区域, 接地导体的腐蚀程度也相近。设节点 k 连接有 b_k 条支路, 其中模糊支路有 b_{ka} ($b_{ka} > 0$) 条, 将各条模糊支路电阻增大倍数与 b_k 条支路电阻平均增大倍数的标准差定义为节点 k 的局部差异性腐蚀指标

$$s_k = \left(\frac{1}{b_{ka}} \sum_{i=1}^{b_{ka}} \left(\frac{\Delta R_{ki}}{R_{ki}} - \frac{1}{b_k} \sum_{j=1}^{b_k} \frac{\Delta R_{kj}}{R_{kj}} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (6)$$

显然, 希望 s_k 越小越好, 理想情况下为 0, 这样就可以把式(6)转化为与式(4)表达形式一致的线性方程组

$$S_{R_i}^{s_k} \Delta \bar{R}_k = 0, \quad i = 1, 2, \dots, b_{ka} \quad (7)$$

式中: $S_{R_i}^{s_k}$ 表示节点 k 的局部差异性腐蚀指标对与 k 连接的模糊支路电阻 R_i 的灵敏度; $\Delta \bar{R}_k$ 为与 k 连接的模糊支路电阻增量。

式(7)含有 b_{ka} 个方程, 第 i 个方程反映了第 i 条支路电阻 R_{ki} 的腐蚀倍数与平均腐蚀倍数的差

$$s_{ki} = \frac{1}{b_{ka}^{1/2}} \left(\frac{\Delta R_{ki}}{R_{ki}} - \frac{1}{b_k} \sum_{j=1}^{b_k} \frac{\Delta R_{kj}}{R_{kj}} \right) \quad (8)$$

式中: ΔR_{ki} 的系数可以看作是 s_{ki} 对 R_{ki} 的灵敏度

$$S_{R_{ki}}^{s_{ki}} = \partial s_{ki} / \partial R_{ki} = \frac{1}{b_{ka}^{1/2}} \left(1 - \frac{1}{b_k} \right) \frac{1}{R_{ki}} \quad (9)$$

同样, 其他支路电阻 ΔR_{kj} ($j=1, 2, \dots, b_{ka} | j \neq i$) 的系数可以看作是 s_{ki} 对 R_{kj} ($j \neq i$) 的灵敏度

$$S_{R_{kj}}^{s_{ki}} = \frac{\partial s_{ki}}{\partial R_{kj}} = \frac{1}{b_{ka}^{1/2}} \left(-\frac{1}{b_k} \right) \frac{1}{R_{ki}} \quad (10)$$

利用式(8)~式(10), 将式(7)展开

$$\sum_{j=1, j \neq i}^{b_{ka}} S_{R_{kj}}^{s_{ki}} \Delta R_{kj} + S_{R_{ki}}^{s_{ki}} \Delta R_{ki} = 0, \quad i = 1, \dots, b_{ka} \quad (11)$$

按照同样的方法, 对所有连接有模糊支路的节点均列出与式(11)类似的方程组, 共同组成反映腐蚀特性的线性方程组, 再与式(4)合并, 即构成考虑腐蚀特性的增广线性模型

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S} \\ \mathbf{S}' \end{bmatrix} \Delta \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{V} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (12)$$

2 基于约束总体最小二乘的诊断算法

2.1 最佳降秩逼近定理

在利用总体最小二乘算法求解式(4)时, 要求 $\text{rank}(\mathbf{S}, \Delta\mathbf{V}) = \text{rank}(\mathbf{S})$, 即方程组必须相容。因此, 为确保方程组的相容性, 这里先介绍基于奇异值分解法(SVD)分解的最佳降秩逼近定理^[12]。

矩阵 $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{m \times n}$, 不妨令 $m \geq n$, $\text{rank}(\mathbf{A}) = r$, 对 $\mathbf{A}$ 进行 SVD 分解, 得 $\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{W}\mathbf{V}^T$, 其中 $\mathbf{W}$ 为对角阵 $\text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)$ 。

对任意一个小于等于 r 的数 s , 若取 $\mathbf{W}_s = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_s)$, 则一定存在秩为 s 的矩阵

$$\mathbf{A}_s = \mathbf{U} \begin{bmatrix} \mathbf{W}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{V}^T = \sum_{i=1}^s \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T$$

满足 $\|\mathbf{A} - \mathbf{A}_s\|_F = \min_{\text{rank}(\mathbf{C})=s} \{\|\mathbf{A} - \mathbf{C}\|_F | \mathbf{C} \in \mathbf{R}^{m \times n}\}$, 那么在 Frobenius 范数意义下, $\mathbf{A}_s$ 是 $\mathbf{A}$ 在空间 $\mathbf{R}^{m \times n}$ 中秩为 s 的一个最佳逼近。

根据最佳降秩逼近定理计算步骤^[13], 最终得到与式(4)对应的相容方程

$$\tilde{\mathbf{S}}\Delta\mathbf{R} = \Delta\tilde{\mathbf{V}} \quad (13)$$

2.2 约束总体最小二乘算法

对于式(13), 当且仅当 $\tilde{\mathbf{S}}$ 无误差且 $\Delta\tilde{\mathbf{V}}$ 仅含有均值是 0 的白噪声时, 其最小二乘解才是无偏的。总体最小二乘的基本思想是用扰动向量 $\mathbf{e}$ 和扰动矩阵 $\mathbf{E}$ 同时干扰 $\Delta\tilde{\mathbf{V}}$ 和 $\tilde{\mathbf{S}}$, 以便校正 $\Delta\tilde{\mathbf{V}}$ 和 $\tilde{\mathbf{S}}$ 内存在的扰动。此时, 式(13)变为

$$(\tilde{\mathbf{S}} + \mathbf{E})\Delta\mathbf{R} = \Delta\tilde{\mathbf{V}} + \mathbf{e} \quad (14)$$

式(14)也可以改写作

$$([-\Delta\tilde{V},\tilde{S}]+[-e,E])\begin{bmatrix}1\\\Delta R\end{bmatrix}=0\quad(15)$$

令 $B=[-\Delta\tilde{V},\tilde{S}]$, $D=[-e,E]$, $z=\begin{bmatrix}1\\\Delta R\end{bmatrix}$, 则式(15)

可以简写为

$$(B+D)z=0\quad(16)$$

结束总体最小二乘问题的目标函数是使干扰矩阵 D 的 F 范数最小. 结合接地网实际情况, 发生故障后的阻值具有上下限, 带约束的总体最小二乘模型如下

$$\min_{D,z}\|D\|_{F^2};\quad s.t.\begin{cases}\Delta R\geq l_b\\\Delta R\leq u_b\end{cases}\quad(17)$$

式中: $l_b=R^0-R$; $u_b=M R^0$, R^0 为支路尚未腐蚀时的电阻值, M 为设置的增量倍数上限, 超过此倍数, 则认为该支路已经断裂.

约束 z 为单位范数的向量, 式(16)转换为

$$Bz=r=-Dz\quad(18)$$

则式(17)简化成

$$\min\|r\|_{F^2};\quad s.t.\begin{cases}\Delta R\geq l_b\\\Delta R\leq u_b\\z^Tz=1\end{cases}\quad(19)$$

其中 $\Delta R=\frac{1}{z(1)}[z(2),\cdots,z(n+1)]^T$, 式(19)为带非线性约束的非线性优化问题, 可以用序列二次规划法(SQP)来逼近原非线性规划进行求解.

2.3 接地网参数评估算法的步骤

诊断式(4)中灵敏度矩阵 S 的初次形成是由支路尚未腐蚀时的电阻值求出的, 因此第 1 次求解得到的 ΔR 仅仅是一个线性逼近解. 为了求出 R 的实际故障值, 可以进行迭代计算, 整个算法流程如下:

(1)按照完备测量方案进行测量, 得到测量端口电压数据 $V'_{m_j n_j(k)}$;

(2)进行可测性分析, 找出所有明晰支路, 令 $t=1$;

(3)迭代开始时, 令 $R_i^t=R_i(i=1,2,\cdots,b)$, 建立诊断式(4);

(4)若式(4)不相容, 对其进行降秩处理, 否则直接转步骤(5);

(5)利用总体最小二乘方法解式(19), 得到迭代第 t 步的电阻增量 ΔR_i^t ;

(6)若 $\|\Delta R_i^t\|<\epsilon(\epsilon$ 为一个很小的值), 转步骤

(7), 否则令 $R_i^{t+1}=R_i^t+\lambda\Delta R_i^t(\lambda<1$ 为步长因子), 利用 R_i^{t+1} 重新建立诊断方程组, 转步骤(4), 直至求出所有明晰支路;

(7)把所有明晰支路作为已知量, 所有模糊支路作为未知量, 采用增广线性模型(12), 重新进行步骤(4)~(6)的迭代计算, 得到模糊支路最符合腐蚀特性的参考解.

由此可知, 故障诊断的思想是先利用式(4)计算所有明晰支路, 再利用式(12)计算所有模糊支路.

3 算例分析

图 2 左边是设计图纸所示的接地网, 第 25 条支路在节点 6 和 11 之间, 而接地网的实际结构如图 2 右边所示.

首先, 根据文献[14], 选择合适的激励端口提供 50 A 的直流激励, 测量多个端口的电压并多次更换激励端口的位置, 从而得出表 1 的完备测量方案, 共 62 组测量.

改进前后的诊断结果及相对误差见表 2, 其中 R^0 表示设计电阻值, R 为被土壤腐蚀后的电阻值.

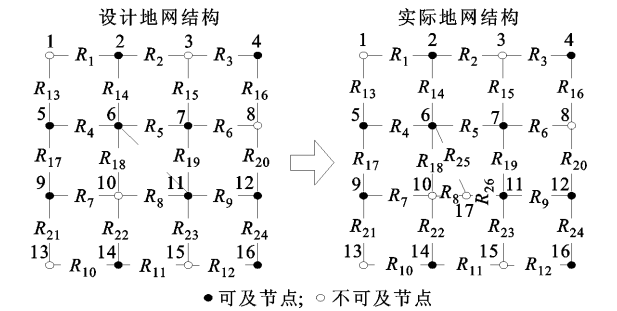


图 2 接地网拓扑图

表 1 完备测量方案

输入端口	多次测量端口	输入端口	多次测量端口
[6,7]	[4,5][4,9][5,12]	[6,14]	[2,16][2,9][7,16]
[2,5]	[4,9][7,9][4,14]	[9,11]	[5,12][5,16][5,7]
[2,4]	[5,7][5,12][5,16]	[7,12]	[2,16][6,16][4,16]
[4,7]	[2,6][2,11][2,14]	[9,14]	[5,16][5,12][2,16]
[5,6]	[7,9][9,11][9,12]	[4,12]	[2,16][7,16][5,16]
[2,6]	[4,9][4,11][4,14]	[11,16]	[6,12][7,12][2,12]
[5,9]	[2,14][6,14][4,14]	[11,12]	[9,16][6,16][5,16]
[2,7]	[5,12][5,11][5,16]	[12,16]	[4,14][7,14][2,14]
[6,9]	[2,14][7,14][4,14]	[14,16]	[9,12][5,12][6,12]
[7,11]	[4,16][4,14][4,12]	[11,14]	[9,12][7,9]
[6,11]	[5,12][5,16][2,12]		

表 2 支路故障诊断结果

类型	支路	$R^0/\text{m}\Omega$	$R/\text{m}\Omega$			相对误差	
			真值	原模型	改进模型	原模型	改进模型
明晰 支路	4	3	12.7	12.70	12.70	0	0
	5	3	3.4	3.40	3.40	0	0
	9	3	17.6	17.60	17.60	0	0
	11	3	6.9	6.90	6.90	0	0
	12	3	5.2	5.20	5.20	0	0
	14	4	14.6	14.60	14.60	0	0
	17	4	12.1	12.10	12.10	0	0
	19	4	18.5	18.50	18.50	0	0
	23	4	6.2	6.20	6.20	0	0
	24	4	5.5	5.50	5.50	0	0
模糊 支路	1	3	5.9	8.01	8.10	0.35	0.37
	2	3	11.1	12.66	10.87	0.14	0.02
	3	3	6.6	4.20	7.11	0.36	0.08
	6	3	3.8	5.76	3.81	0.51	0.00
	7	3	5.0	5.20	5.12	0.04	0.02
	8	3	5.7	14.73	14.84	0.29	0.30
	10	3	5.2	6.12	6.43	0.17	0.23
	13	4	12.8	10.69	10.51	0.16	0.18
	15	4	12.2	7.77	11.86	0.36	0.03
	16	4	7.4	11.21	7.80	0.51	0.05
	18	4	8.2	5.86	6.00	0.28	0.27
	20	4	5.3	4.01	5.28	0.24	0.00
	21	4	9.7	8.17	8.26	0.16	0.15
	22	4	8.5	8.84	8.62	0.04	0.01
	25	5	8.6	23.67	22.75	1.75	1.65
	26			5.7			

注:由于诊断是参照设计图纸进行的,因此没有支路 26 的诊断结果,支路 8 的诊断结果相当于实际结构中支路 8 和支路 26 之和,原模型和改进模型的平均误差分别为 0.214 和 0.134.

图 3 更直观地对改进前后诊断结果的误差进行了比较. 由图可见,采用本文改进的模型和算法,除了支路 25 这类拓扑结构发生变化的支路可能产生较大误差外,其余支路误差都在可允许范围内.

4 结 论

本文在传统电路诊断模型的基础上,提出了一种考虑接地网腐蚀特性的增广线性模型. 由于实际

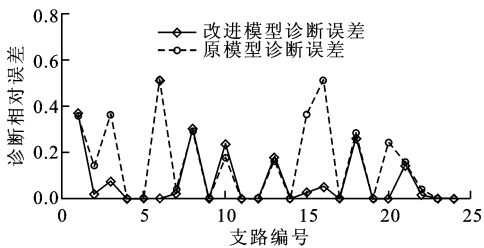


图 3 改进前后诊断结果比较(不含支路 25)

施工时焊接点位置往往出现偏差,与设计图纸有所出入,使模型中测量电压和灵敏度不可避免地存在误差.为了减小上述误差对诊断模型的影响,利用带约束的总体最小二乘算法进行迭代计算,从而得到与实际情况相符合的较为满意的可行解.仿真计算结果验证了模型的有效性和正确性.

参考文献:

- [1] DAWALIBI F. Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors; part 2 [J]. IEEE Trans Power Delivery, 1986, 1(4):112-119.
- [2] ZHANG Bo, ZHAO Zhibin, CUI Xiang, et al. Diagnosis of breaks in substation's grounding grid by using the electromagnetic method[J]. IEEE Trans on Magnetism, 2002, 38(2):473-476.
- [3] 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.
- [4] 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 grid's failure diagnosis[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(4):64-66.
- [5] ZENG Rong, HE Jinliang, HU Jun, et al. The theory and implementation of corrosion diagnosis for grounding system[C]// IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Pittsburgh, PA, USA;IEEE, 2002; 1120-1126.
- [6] 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 Jianxin, WANG Sen. An improved algorithm of corrosion diagnosis for grounding grid & its evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3):71-77.
- [7] 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 Jian, 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.
- [8] 罗先觉. 一种同时求解电路全部响应对全部参数灵敏度的算法[J]. 西安交通大学学报, 1997, 21(12):1-7.
- LUO Xianjue. An algorithm of evaluating simultaneously the sensitivities of all circuit responses with respect to all parameters[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1997, 21(12):1-7.
- [9] STARZYK J A, PANG J, MANETTI S, et al. Finding ambiguity groups in low testability analog circuits [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2000, 47(8): 1125- 1137.
- [10] LIU E, KAO W, FELT E, et al. Analog testability analysis and fault diagnosis using behavioral modeling [C]// Proceedings of the 1994 IEEE Conference on Custom Integrated Circuits. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 1994; 413-416.
- [11] ZHOU Mi, WANG Jianguo, LIU Yang, et al. Causes, forms and remedies of substation grounding grid corrosion[C]//International Conference on High Voltage Engineering and Application. New Orleans, USA; [s. n.], 2008:186-189.
- [12] GOLUB G H, VAN LOAN C F. Matrix computations [M]. Baltimore, Maryland, USA: The Johns Hopkins University Press, 1983: 16-19.
- [13] 魏木生. 广义最小二乘问题的理论和计算[M]. 北京: 科学出版社, 2006:107-115.
- [14] LIU Liqiang, LUO Xianjue, NIU Tao, et al. Grounding grids corrosion diagnosis based on large change sensitivity[C]//The Fifth International Conference on Information Assurance and Security. Atlanta, USA; [s. n.], 2009:71-74.

[本刊相关文献链接]

利用增量二次规划和启发式方法的电力系统动态无功优化. 西安交通大学学报, 2010, 44(8):106-111.

利用线路两端电压差的输电线路相位纵联保护. 西安交通大学学报, 2010, 44(8):83-89.

交直流混联系统对距离保护暂态超越的影响及解决措施. 西安交通大学学报, 2010, 44(4):57-61.

故障全量的分相复合阻抗输电线路纵联保护原理. 西安交通大学学报, 2010, 44(2):92-97.

基于模型识别的平行线路零序方向元件. 西安交通大学学报, 2010, 44(2):102-107.

双端带并联电抗器的输电线路纵联保护. 西安交通大学学报, 2009, 43(10):99-103.

继电保护装置信号端口电磁干扰传播通道的建模与仿真. 西安交通大学学报, 2009, 43(10):104-108.

(编辑 杜秀杰)