

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.01.002

基于二进制遗传算法的地网断裂导体诊断

刘渝根¹, 谢丽娜¹, 尚龙龙¹, 谢宇亮², 吴海涛²

(1. 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;

2. 国网重庆市电力公司江津供电公司, 重庆 402260)

摘要: 为了研究地网中腐蚀支路对断裂导体诊断结果的影响程度, 笔者基于二进制遗传算法编制了MATLAB地网导体断裂诊断程序。以重庆110 kV上桥变电站实际地网为例进行了8组仿真实验, 对比分析了各组实验中不同腐蚀情况下的诊断结果和各节点电位的变化, 计算了不同导体断裂情况下适应度函数 $fitness$ 值。利用支路灵敏度法分析了腐蚀支路存在对诊断结果的影响。结果表明: 当地网未发生腐蚀或者发生轻微腐蚀时, 诊断结果能准确找出断裂导体支路; 当地网发生轻度、中度乃至严重腐蚀时, 诊断结果中无漏诊、但会出现误诊的断裂导体支路。出现误诊的原因在于腐蚀支路位于不动点测量法中的不动点附近, 通过剔除22节点的测量数据, 4组仿真均能得到准确结果。

关键词: 旧地网; 断裂导体诊断; 二进制遗传算法; 腐蚀支路; 灵敏度法; 适应度

Conductor Breakage Diagnosis of Old Grounding Grid Based on Binary Genetic Algorithm

LIU Yugen¹, XIE Lina¹, SHANG Longlong¹, XIE Yuliang², WU Haitao²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Jiangjin Power Supply Branch Company, State Grid Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 402260, China)

Abstract: The difference between old grounding grid and new one is that the old grounding grid has some corroded branches in addition to the breakage of some conductors. In order to analyze the impacts of the corroded branches on diagnosis of the conductor breakage in grounding grid, this paper establishes a mathematical model of grounding grid conductor breakage diagnosis using MATLAB based on binary genetic algorithm. Taking the real grounding grid of Chongqing 110 kV Shangqiao substation as an example, eight groups of simulation experiments are conducted. The diagnostic results of the eight groups of simulation experiments and the potential variation of each node are analyzed, and the values of $fitness$ function under different cases of conductor breakage are calculated. The impacts of corroded branches on the diagnostic results are also analyzed by making use of branch sensitivity method. Experimental results show that: for the grounding grid without corrosion or with slight corrosion, the diagnoses can accurately find the branch containing broken conductor; for grounding grid with medium or severe corrosion, the diagnoses do not miss the branch containing broken conductor, but misdiagnosis may happen. The reason why misdiagnosis happens is that the corroded branch is located near the fixed point in the fixed point measurement method. By removing the measured data of node No.22, the diagnoses give accurate results.

Key words: old grounding grid; conductor breakage diagnosis; binary genetic algorithm; corroded branch; sensitivity method; fitness

0 引言

收稿日期:2014-08-28; 修回日期:2014-09-11

基金项目:国家创新研究群体基金(51021005)。

Project Supported by the Funds for Innovative Research Groups of China (51021005).

变电站的接地网是确保电力系统稳定运行、保

障运行人员和设备安全的重要设施。旧地网与新建地网的区别在于旧地网除可能有缺导体情况外,还可能因使用年限的增长部分支路发生腐蚀。缺导体和导体腐蚀将会严重影响接地网的完整性,使得接地网的散流特性变差,跨步电压接触电势升高,给电气设备和运行人员带来巨大的安全隐患^[1-3]。

传统的接地网故障诊断中,认为支路导体断裂为接地网支路腐蚀的极端情况,人为设定该支路电阻增大倍数为 10~20 倍。文[4~10]基于特勒根定理通过测量可及节点间的端口电阻回推支路导体电阻的变化量,实现对地网腐蚀支路的定位和腐蚀状况的判断;文[11~12]还对变电站构架、电缆沟接地导体、接地引下线偏移等影响故障腐蚀诊断准确性的因素做了深入的研究;文[13~15]建立了青藏铁路接地网设计的遗传优化神经网络,并对 BP 神经网络的训练过程进行了优化;文[16]提出了一种基于禁忌搜索算法的接地网故障诊断方法;文[17~18]提出了一种利用线性方程来逼近非线性方程的迭代最小二乘地网故障诊断算法等等。

上述思想虽然可以一定程度上简化问题,但某支路导体断裂,其电阻增大倍数应为无穷大倍,其准确反映是地网拓扑结构的改变。无论是将该支路电阻增大倍数设定为 10 倍还是 20 倍,都无法反映导体断裂,还会给腐蚀情况较轻的支路的诊断带来误差。其次,地网中导体断裂的情况普遍存在,而地网中支路腐蚀并不十分普遍。因此,很有必要将地网支路导体断裂和支路导体腐蚀分开诊断。

基于二进制遗传算法所编制的接地网缺导体诊断算法在新建地网中,诊断结果能准确无误地找出缺导体支路。而对存在腐蚀支路的旧地网,目前还缺少这方面的研究。

旧地网中的腐蚀支路会对缺导体诊断结果带来哪些影响、影响有多大、产生这些影响的原因以及有没有改进的方法可以在一定程度上减小这种影响,使得缺导体诊断能在旧地网存在不同腐蚀情况下中,依旧能准确无误找出断裂导体支路,这是笔者主要研究的内容。

笔者首先建立了地网断裂导体诊断的数学模型,并利用二进制遗传算法编写了 MATLAB 程序对模型进行求解。以重庆 110 kV 上桥变电站实际地网为例,共安排了 8 组仿真实验,对比分析了不同腐蚀情况下的诊断结果,各节点电位的变化以及不同导体断裂情况下适应度函数值 *fitness*。利用支路灵敏度的方法分析了腐蚀支路存在对诊断结果的影响。

1 导体断裂诊断数学模型

1.1 数学模型的建立

埋在地下的接地网均压导体彼此相连构成电路网络,忽略电感和电容的影响,接地网可以看成如图 1 所示的纯电阻网络。假设图 1 接地网的设计图中具有 B 条支路, N 个节点, M 个可及节点 (设备接地引下线与主地网的连接点)。定义: A 为选定参考节点后网络的关联矩阵; Y_b 为支路导纳矩阵; Y_n 为节点导纳矩阵; I_n 为节点电流的列向量; V_n 为节点电压的列向量; R_j 为支路电阻。

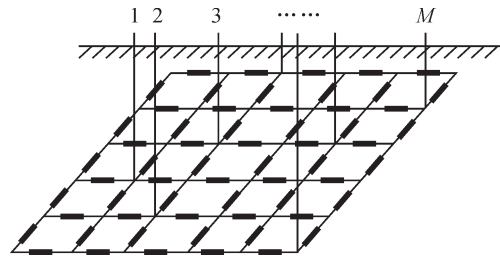


图 1 地网等效电阻网络

Fig. 1 Equivalent resistance network of grounding grid

导体断裂诊断中,各支路导体只有两种状态:存在或者断裂。可以分别用 1 和 0 来表示导体的两种状态,即导体存在为 1,断裂为 0。那么对于一个 B 条支路的接地网,其变量个数为 B ,样本空间为 2^B 。其中某个样本 X 的表达形式为

$$X=[b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_B] (b_i=1 \text{ 或 } 0, B \geq i \geq 1)。 \quad (1)$$

接地网敷设完毕后,可以选择两个可及节点注入电流激励 I_0 ,此时可选择多组可及节点进行端口电压的测量,得到端口电压测量值 VM 。

每一个样本 X 对应地网的一种拓扑结构,如果 X 中的所有变量都取 1,则代表标称地网拓扑结构,即实际地网的敷设情况与设计图纸完全吻合。对于每一个样本 X ,都有一种对应的地网拓扑结构存在,根据此时地网的拓扑结构和各支路的标称电阻值,可以生成相应的节点电压矩阵 Y_n 。根据样本 X 生成的 Y_n 以及注入电流激励的位置,可以计算得到相应的端口电压计算值 VC 。定义 *fitness* 为向量 VM 与向量 VC 的差矩阵中各个元素的平方和。那么方程组 3 的求解便转化为了求解 *fitness* 最小值的优化问题。

$$VC=[vc_1, vc_2, \dots, vc_k]; \quad (2)$$

$$fitness=(vm_1-vc_1)^2+(vm_2-vc_2)^2+\dots+(vm_k-vc_k)^2。 \quad (3)$$

至此,将接地网导体断裂诊断问题完全转化为一个 B (标称支路个数)维 0-1 背包问题。

1.2 支路灵敏度方程的建立

由电网络理论可得^[19-20]:

$$Y_n \cdot V_n = I_n; \quad (4)$$

$$Y_n = A \cdot Y_b \cdot A^T; \quad (5)$$

$$V_n = Y_n^{-1} \cdot I_n. \quad (6)$$

将式(4)–(6)变换可得:

$$\lim_{\nabla R_j \rightarrow 0} \frac{\nabla V_n}{\nabla R_j} = \frac{\partial V_n}{\partial R_j} = \frac{\partial Y_n^{-1}}{\partial R_j} \cdot I_n; \quad (7)$$

$$\frac{\partial Y_n^{-1} \cdot Y_n}{\partial R_j} = 0; \quad (8)$$

$$\frac{\partial Y_n^{-1}}{\partial R_j} = -Y_n^{-1} \cdot \frac{\partial Y_n}{\partial R_j} \cdot Y_n^{-1}; \quad (9)$$

$$\frac{\partial V_n}{\partial R_j} = -Y_n^{-1} \cdot A \cdot \frac{\partial Y_b}{\partial R_j} \cdot A^T \cdot V_n; \quad (10)$$

$$LMD = \frac{\partial Y_b}{\partial R_j} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_j^2} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (11)$$

$$\nabla V_n = LMD \cdot \nabla R. \quad (12)$$

式(7)–(12)中, ∇R 是 b 维列向量, R_j 表示第 j 段导体电阻增加值。

2 适应度函数 *fitness* 的求解

根据实际地网的拓扑结构, 适应度函数 *fitness* 有如下的求解方法及顺序。

1) 生成 Y 、 I 。读入电流激励注入位置, 形成注入电流列矩阵 $I_{N \times 1}$ 。读入端口电压的测量数据 VM 。对于每一个样本 X , 不管属于何种拓扑结构, 首先生成未降阶的节点导纳矩阵 $Y_{N \times N}$ 。

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \cdots & 11 & \cdots & N \\ \vdots & & & 0 & & \\ \vdots & & & 0 & & \\ 11 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \vdots & & \\ N & & & 0 & & \end{bmatrix}_{N \times N} \quad I = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ 11 \\ \vdots \\ N \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (13)$$

2) 判断孤立节点。若 Y 中有某一行(列)所有的元素全为零, 则该行的行数对应的节点为孤立节点。如式(13)所示, Y 中第 11 行(列)所有元素全部为 0, 则可判定 11 号节点为孤立节点。查找出 Y 中所有元素全为 0 的行(列)编号, 将其放入矩阵 IDY 中。

端口电压的测量节点以及激励电流的注入节点一定不会孤立, 将所有这些节点的编号放到矩阵 D_N , 若 IDY 中有一个元素出现在矩阵 D_N 中, 说明一个不可能被孤立的节点被孤立了, 样本 X 应该

舍弃。若 IDY 中没有元素出现在 D_N 中, 则将 Y 中全部为零的行和列删除, 形成修正节点导纳矩阵 RE_Y , 将注入电流列矩阵 I 对应的行删除, 形成修正电流矩阵 RE_I , 见式(14)。

$$RE_Y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \cdots & 11 & \cdots & N \\ \vdots & & & \vdots & & \\ 11 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \vdots & & \\ N & & & 0 & & \end{bmatrix}_{(N-1) \times (N-1)} \quad RE_I = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ 11 \\ \vdots \\ N \end{bmatrix}_{(N-1) \times 1} \quad (14)$$

3) 判断地网导通情况。由于接地导体断裂, 孤立节点是有可能存在的。但不管有没有孤立节点, 整个接地网一定是导通的, 从课题组对多达百余座变电站的测试结果来看, 整个接地网不导通的情况还未有发生。所以如果某个 X 对应的拓扑结构中地网不导通, 那样本 X 应被舍弃。

删除 RE_Y 中的任意一行和对应的列(电流激励注入节点除外, 相当于将行对应的节点设置为电位为 0 的参考节点), 形成降阶节点导纳修正矩阵 RE_{Y_n} , 与此同时将注入电流的修正列矩阵 RE_I 中对应的行删除, 形成降阶修正电流矩阵 RE_{I_n} 。若降阶节点导纳修正矩阵 RE_{Y_n} 的行列式为 0, 则说明地网不导通, 样本 X 应该舍弃。若不为 0, 说明地网导通。

4) 计算 *fitness*。降阶电流修正矩阵 RE_{I_n} 除以降阶节点导纳修正矩阵 RE_{Y_n} 得到除参考节点之外的节点电压。将与测量端口相对的节点电压相减得到端口电压计算值 VC 。根据式(2)计算 *fitness*。

对于程序中应舍弃的样本 X , 将其 *fitness* 直接设定为 10^{50} 。样本的 *fitness* 越大, 个体的适应性弱, 会在遗传算法的迭代中逐渐被舍弃。所以, *fitness* 为 10^{50} 的个体相当执行了舍弃操作。

综上所述, *fitness* 的计算流程见图 2。

3 旧地网中导体断裂诊断实验

3.1 实验过程及结果

该节以重庆 110 kV 上桥变电站为仿真对象。地网各支路标称电阻值见表 1, 拓扑结构见图 3。

为了全面判断腐蚀支路是否会给导体断裂诊断带来影响, 安排了两大组仿真实验, 分别是腐蚀支路位于不动点附近和远离不动点的情况, 每组实验又分为 4 小组, 检验不同腐蚀程度对导体断裂诊断的影响, 4 组仿真实验的假设故障依次为:

① 15、16、30、31 导体断裂, 29、35、36、42 支路

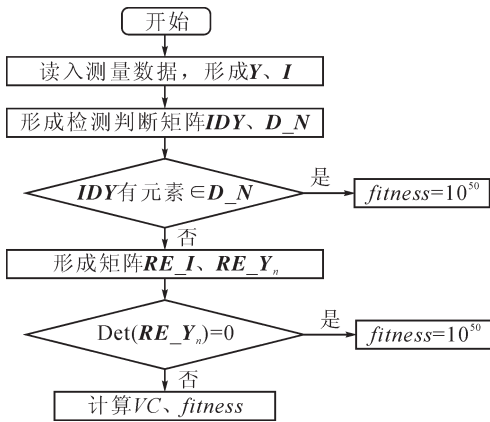


图2 fitness的求解流程图

Fig. 2 Flow chart of solving fitness

表1 重庆110 kV上桥变电站接地网支路标称电阻值

Table 1 Branch resistance value of Chongqing 110 kV

Shangqiao substation grounding gird										mΩ
支路号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
标称值	6.50	3.90	7.48	3.90	4.55	4.23	3.90	4.23	4.23	6.50
支路号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
标称值	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	7.48	3.90	4.55
支路号	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
标称值	4.23	3.90	4.23	4.23	13.33	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50
支路号	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
标称值	6.50	6.50	3.90	4.55	4.23	3.90	4.23	4.23	6.83	6.83
支路号	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
标称值	6.83	6.83	6.83	6.83	6.83	7.48	3.90	4.55	4.23	3.90
支路号	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
标称值	4.23	4.23	18.80	7.80	8.45	14.30	4.88	6.50	19.23	3.90
支路号	61	62	63	—	—	—	—	—	—	—
标称值	25.73	3.90	8.15	—	—	—	—	—	—	—

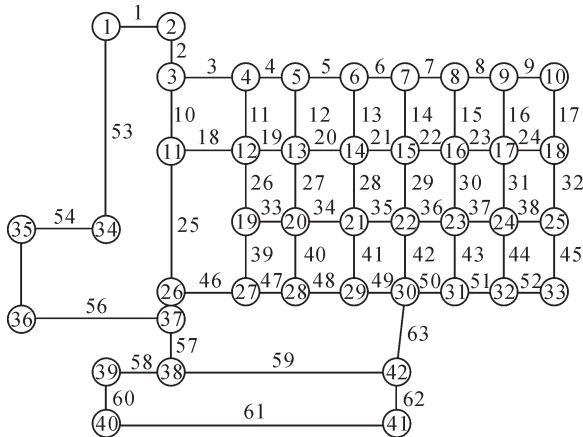


图3 重庆110 kV上桥变电站接地网拓扑图

Fig. 3 Topological graph of Chongqing 110 kV Shangqiao substation grounding gird

轻度腐蚀,其电阻增大倍数为 1.05 倍;

② 15、16、30、31 导体断裂,29、35、36、42 支路

轻度腐蚀,其电阻增大倍数为 1.25 倍;

③ 15、16、30、31 导体断裂,29、35、36、42 支路中度腐蚀,其电阻增大倍数为 1.5 倍;

④ 15、16、30、31 导体断裂,29、35、36、42 支路严重腐蚀,其电阻增大倍数为 2 倍;

①' 15、16、30、31 导体断裂,8、19、53、62 支路轻度腐蚀,其电阻增大倍数为 1.05 倍;

②' 15、16、30、31 导体断裂,8、19、53、62 支路轻度腐蚀,其电阻增大倍数为 1.25 倍;

③' 15、16、30、31 导体断裂,8、19、53、62 支路轻度腐蚀,其电阻增大倍数为 1.5 倍;

④' 15、16、30、31 导体断裂,8、19、53、62 支路轻度腐蚀,其电阻增大倍数为 2 倍。

旧地网端口电压的仿真测量腐蚀支路位于不动点附近和腐蚀支路远离不动点的结果见表 2、3。

表2 腐蚀支路位于不动点附近

Table 2 Corrosion branch near the fixed point

节点对	测量值				mV
	①	②	③	④	
35-3	171.53	171.37	170.84	170.20	
35-11	188.10	187.95	187.38	186.71	
35-20	210.79	210.76	209.97	209.20	
35-27	206.67	206.65	206.11	205.59	
35-39	130.14	130.30	130.81	131.44	
22-7	18.87	19.88	23.44	27.92	
22-14	19.61	20.46	24.25	28.77	
22-23	7.17	7.36	10.24	13.46	
22-29	19.85	20.21	23.45	26.97	
22-33	12.22	12.60	15.44	18.72	
22-41	61.11	61.41	63.83	66.52	
22-42	55.57	55.86	58.26	60.93	
4-39	64.38	64.01	62.90	61.50	
9-41	44.47	43.85	42.85	41.27	

将 8 组仿真实验的端口电压测量数据分别代入接地网导体断裂诊断程序进行诊断。最终的诊断结果见表 4。

从表 4 的诊断结果可以看出:

1)当腐蚀支路远离不动点时的诊断效果明显好于腐蚀支路位于不动点附近时,既无漏诊支路出现,误诊支路也更少;

2)当腐蚀支路位于不动点附近,接地网发生轻度腐蚀时,诊断结果既无漏诊支路也无误诊支路;地网腐蚀程度加深后,诊断结果中会出现误诊甚至漏诊支路;

3)当腐蚀支路远离不动点,接地网发生轻微和轻度腐蚀时,诊断结果既无漏诊支路也无误诊支

表3 腐蚀支路远离不动点

Table 3 Corrosion branch away from the

fixed point				mV
节点对	测量值			
	①'	②'	③'	④'
35-3	171.27	171.27	171.27	171.27
35-11	188.73	188.62	188.51	188.35
35-20	211.47	211.46	211.46	211.44
35-27	207.31	207.31	207.31	207.31
35-39	130.39	130.49	130.68	130.92
22-7	18.30	18.48	18.72	19.04
22-14	19.03	19.23	19.45	19.70
22-17	13.27	13.56	13.88	14.20
22-23	6.82	6.98	7.17	7.40
22-29	19.42	19.66	19.94	20.34
22-33	11.84	12.10	12.48	12.96
22-41	60.91	61.28	61.72	62.52
22-42	55.37	55.66	55.98	56.23
4-39	64.89	64.48	63.92	63.01
9-41	44.81	44.12	43.62	42.97

表4 旧地网仿真实验诊断结果

Table 4 Diagnosis results of old grounding grid simulation

实验 编号	导体断裂支路 诊断结果	适应度函数 值诊断结果	备注
①	15、16、30、31	1.58×10^{-4}	无漏诊、无误诊
②	1、15、16、30、31、38、45	64.30	无漏诊、误诊1、38、45
③	1、15、16、26、31、38、45	180.61	漏诊30、误诊1、38、45
④	1、14、16、22、31、39、44	545.96	漏诊15、30、误诊1、14、22、39、44
①'	15、16、30、31	2.01×10^{-4}	无漏诊、无误诊
②'	15、16、30、31	12.36	无漏诊、无误诊
③'	9、15、16、30、31、44	124.09	无漏诊、误诊9、44
④'	1、9、15、16、30、31、37	449.51	无漏诊、误诊1、9、37

路;地网腐蚀程度加深后,诊断结果中会出现少许误诊支路。

为了分析出现误诊的原因,计算了以下几种导体缺失情况下的个体适应度函数值,计算结果见表5。

对比表4、5的计算结果,可以得出以下结论:

1)纵向来看,若只有假设的断裂支路不存在,个体的适应度函数值随着导体腐蚀程度的加深而增加;

2)纵向来看,若假设的断裂支路及腐蚀支路均不存在,个体的适应度函数值均为 10^{50} ,因为此种导体断裂情况将一个不可能被孤立的节点(22)孤立;

表5 不同导体断裂情况下适应度函数的计算结果

Table 5 Results of fitness under different conductor

loss situation			
实验 编号	导体断裂支路编号	适应度 函数值	备注
①	15、16、30、31	15.38	假设的断裂支路不存在,腐蚀支路存在;
	15、16、30、31、29、 35、36、42	10^{50}	假设的断裂支路以及腐蚀支路均不存在。
②	15、16、30、31	435.96	假设的断裂支路不存在,腐蚀支路存在;
	15、16、30、31、29、 35、36、42	10^{50}	假设的断裂支路以及腐蚀支路均不存在。
③	15、16、30、31	1 826	假设的断裂支路不存在,腐蚀支路存在;
	15、16、30、31、29、 35、36、42	10^{50}	假设的断裂支路以及腐蚀支路均不存在。
④	15、16、30、31	7 234	假设的断裂支路不存在,腐蚀支路存在;
	15、16、30、31、29、 35、36、42	10^{50}	假设的断裂支路以及腐蚀支路均不存在。

3)横向对比,若只有假设的断裂支路不存在,个体的适应度函数值均比实际诊断结果的适应度函数值大。如果单纯从适应度函数值最小这个优化目标来看,程序的实际诊断结果是比较好的。

从以上的分析中可以看出,对于没有腐蚀支路的新地网,假设的导体断裂支路不存在时,其适应度函数值是最小的(几乎为0),导体断裂诊断程序能够准确找出这个适应度函数值最小的个体。对于有腐蚀支路的旧地网,算法也是向着适应度函数值最小的目标进行寻找,但若只有假设的导体断裂支路不存在,个体的适应度函数值并不是最小,因此诊断结果出现了一定的误诊支路。这些误诊支路的出现并不是算法本身的问题,要想使得诊断结果中既无漏诊支路也无误诊支路就必须设法使得此种情况下的适应度函数值最小。

3.2 实验数据分析及优化

表6中给出了29、35、36、42支路不同腐蚀情况下,测量节点的电位值(4号节点为参考节点)。从表6中可以看出,与正常情况①相比,当29、35、36、42支路发生腐蚀后,除22、23节点外其余测量节点的电位变化甚小。造成22号节点相关端口电压测量数据变化的原因是因为22号节点自身的电位发生了较大变化。

出现22、23号节点电位变化较大的情况,可以从地网支路灵敏度的角度来进行分析。根据式(11)

表 6 不同腐蚀情况下各节点电位变化情况
Table 6 Change of node potential under different corrosion condition

节点 编号	电位值				
	①	②	③	④	⑤
3	22.38	22.39	22.60	22.83	23.05
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	-20.52	-20.56	-20.68	-20.84	-21.03
9	-23.66	-23.72	-23.96	-24.18	-24.42
11	6.44	6.45	6.52	6.63	6.75
13	-11.68	-11.71	-11.83	-11.96	-12.12
14	-18.66	-18.70	-18.82	-18.96	-19.12
17	-24.64	-24.70	-24.82	-24.95	-25.10
20	-15.25	-15.36	-15.52	-15.68	-15.92
22	-36.21	-36.86	-40.20	-45.44	-56.70
23	-28.11	-28.94	-32.56	-37.08	-46.44
27	-11.10	-11.18	-11.36	-11.55	-11.80
28	-14.17	-14.22	-14.32	-14.44	-14.60
29	-17.04	-17.08	-17.16	-17.26	-17.44
31	-21.55	-21.60	-21.72	-21.86	-22.08
33	-23.93	-23.98	-24.10	-24.22	-24.36
34	163.60	163.70	163.80	163.90	164.10
35	206.10	206.70	207.30	207.90	208.80
37	102.40	102.50	102.60	102.70	102.90
39	70.60	70.64	70.71	70.79	70.92
41	26.79	26.84	26.95	27.07	27.19
42	21.02	21.06	21.12	21.20	21.32

注:①表示正常值;②、③、④、⑤分别表示 29、35、36、42 支路电阻增大 1.05、1.25、1.5、2 倍。

计算该 110 kV 变电站在 15、16、30、31 导体断裂情况下的灵敏度矩阵 LMD 。

图 4、5 分别为 36 支路对各节点电位变化的灵敏度值(绝对值)、各支路对 22 节点电位变化的灵敏度值(绝对值)。从图 4 可以看出,36 支路电阻变化对 21、22、23、24 节点的电位变化影响较大,而对其他节点的电位变化影响很小;从图 5 中可以看出,29、35、36、42 支路对 22 号节点的电位影响较大,而其余支路的影响很小。

综合图 4、5 可以看出,支路电阻的变化对支路附近节点的电位影响较大,对距离该支路较远的节点电位影响甚小。该节的 8 组仿真实验的前 4 组,当腐蚀支路位于 22 号节点附近时,与无腐蚀的情况相比,22 号节点的电位变化较为显著,而其余测量节点的电位变化均较小,导致 22 号节点相关端口电压测量数据的明显变化,并最终影响了算法的搜索方向,使诊断结果中出现了误诊支路。

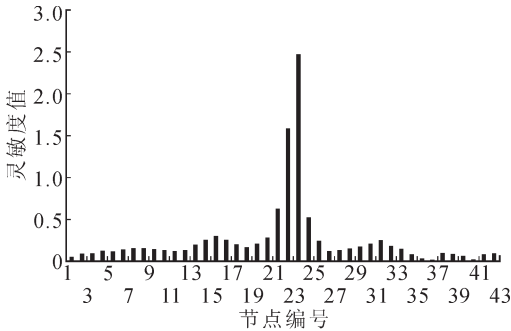


图 4 36 支路对各节点电位变化的灵敏度值
Fig. 4 Sensitivity value of No.36 branch to every node potential

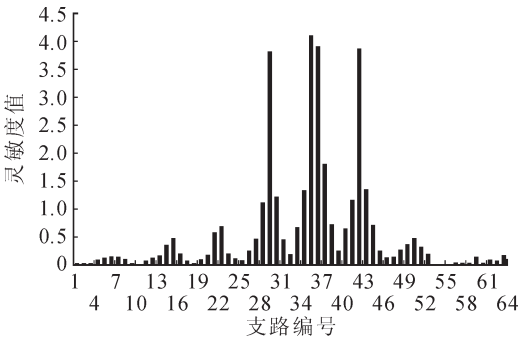


图 5 各支路对 22 节点电位变化的灵敏度值
Fig. 5 Sensitivity value of every branch to No.22 node potential

将测量节点中包含 22 号节点的端口电压测量数据剔除,其余的测量数据代入诊断程序,表 7 为此种情形下 4 组仿真实验的诊断结果。由表 7 可以看出,剔除 22 号节点相关测量数据后,虽然适应度函数值随着腐蚀程度的加深而增大,但不至于会增大到影响诊断结果的程度,4 次仿真实验均能得到准确结果。

表 7 剔除 22 号节点测量数据后旧地网仿真实验诊断结果
Table 7 Diagnosis results of old grounding grid simulation after eliminating measurement data related to 22 node

实验编号	导体断裂支路 诊断结果	适应度函数 值诊断结果	备注
①	15、16、30、31	0.109	无漏诊、无误诊
②	15、16、30、31	1.670	无漏诊、无误诊
③	15、16、30、31	5.890	无漏诊、无误诊
④	15、16、30、31	20.780	无漏诊、无误诊

4 结论

1) 基于二进制遗传算法编制了 MATLAB 接地网导体断裂诊断程序,以重庆 110 kV 上桥变电站实际地网为例进行了 8 组仿真实验,对比分析了不同腐蚀情况下的诊断结果,各节点电位的变化以及不同导体断裂情况下适应度函数值 $fitness$ 。利用支

路灵敏度的方法分析了腐蚀支路存在对诊断结果的影响。

2)当接地网未发生腐蚀或者发生轻微腐蚀时,诊断结果能准确找出断裂导体支路;当地网发生轻度、中度乃至严重腐蚀时,诊断结果中无漏诊、但会出现误诊的断裂导体支路。

3)经过分析计算,误诊的原因在于腐蚀支路位于不动点测量法中的不动点附近,通过剔除22节点的测量数据,4组仿真均能得到准确结果。

参考文献:

- [1] 刘健,倪云峰,王树奇,等. 接地网的分块模型及分块故障诊断[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1194-1202.
LIU Jian, NI Yunfeng, WANG Shuqi, et al. Grounding grids corrosion diagnosis using a block dividing approach[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1194-1202.
- [2] 陆培钧,黄松波,豆朋,等. 佛山地区变电站接地网腐蚀状况分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1996-1999.
LU Peijun, HUANG Songbo, DOU Peng, et al. The analysis of grounding grid corrosion at Foshan substation[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(9): 1996-1999.
- [3] 程红丽,杨燕娜,刘健,等. 接地网故障诊断自动测试系统及其关键技术[J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 2989-2994.
CHENG Hongli, YANG Yanna, LIU Jian, et al. Grounding grids corrosion diagnosis automation test system and its key techniques[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 2989-2994.
- [4] 刘渝根,徐峰,刘小二,等. 拓扑结构改变对接地网故障诊断的影响分析[J]. 高压电器, 2010, 46(12): 59-62.
LIU Yugen, XU Feng, LIU Xiao'er, et al. Analysis on the influence of change of topology on the erosion diagnosis of grounding grids[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 59-62.
- [5] 刘渝根,肖磊石,李谦,等. 接地网故障诊断平台的功能与构建研究[J]. 高压电器, 2011, 47(9): 78-83.
LIU Yugen, XIAO Leishi, LI Qian, et al. Research on the construction and function of grounding grid fault diagnosis platform[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(9): 78-83.
- [6] 鲁志伟,常树生,李越,等. 大型变电站接地网接地阻抗与接地电阻的差异[J]. 高电压技术, 2005, 31(1): 14-16.
LU Zhiwei, CHANG Shusheng, LI Yue, et al. Difference between the grounding impedance and grounding resistance of large substation grounding grids[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(1): 14-16.
- [7] 刘渝根,徐峰,刘小二,等. 拓扑结构改变对接地网故障诊断的影响分析[J]. 高压电器, 2010, 46(12): 59-62.
LIU Yugen, XU Feng, LIU Xiao'er, et al. Analysis on the influence of change of topology on the erosion diagnosis of grounding grids[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 59-62.
- [8] 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(自然科学版), 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 (Natural Science Edition), 2008, 31(4): 417-420.
- [9] 王硕,刘渝根,游建川,等. 大型接地网腐蚀优化诊断[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006, 29(8): 33-35.
WANG Shuo, LIU Yugen, YOU Jianchuan, et al. Erosion optimized diagnosis of brand grounding grid[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2006, 29(8): 33-35.
- [10] 刘渝根,滕永禧,陈先禄,等. 接地网腐蚀的诊断方法研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(6): 19-21.
LIU Yugen, TENG Yongxi, CHEN Xianlu, et al. A method for corrosion diagnosis of grounding grid[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(6): 19-21.
- [11] 刘渝根,冷迪,肖磊石,等. 变电站构架对接地网腐蚀诊断影响分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2013, 36(1): 92-97.
LIU Yugen, LENG Di, XIAO Leishi, et al. Analysis on the effect of substation structure on grounding grid corrosion diagnosis[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2013, 36(1): 92-97.
- [12] 饶章权,刘渝根,李谦,等. 基于灵敏度的接地引下线偏移对接地网故障诊断的影响研究[J]. 南方电网技术, 2010, 4(z1): 113-117.
RAO Zhangquan, LIU Yugen, LI Qian, et al. Research on the influence of grounding down line deviation to fault diagnosis of grounding grid based on sensitivity[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(z1): 113-117.
- [13] 付龙海,吴广宁,王颢,等. 青藏铁路变电站接地网设计规则的提取[J]. 电工技术学报, 2006, 21(4): 11-15.
FU Longhai, WU Guangning, WANG Hao, et al. Automatically produce fuzzy rules in Qinghai-Tibet railway grounding grid design[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(4): 11-15.
- [14] 付龙海,吴广宁,王颢,等. 青藏铁路接地网设计中的遗传优化神经网络[J]. 高电压技术, 2006, 32(5): 90-92.
FU Longhai, WU Guangning, WANG Hao, et al. Design for substation grounding grids in Qinghai-Tibet railway based on BP artificial neural network optimized by genetic algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(5): 90-92.
- [15] 付龙海. 青藏铁路输变电系统防雷及接地技术的研究[D]. 成都:西南交通大学, 2007.
FU Longhai. Research on lightning protection and grounding (下转第17页)

- UHV corona cage[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 244-249.
- [18] 王文兴, 丁国安. 中国降水酸度和离子浓度的时空分布[J]. 环境科学研究, 1997, 10(2): 4-10.
- WANG Wenxing, DING Guo'an. The geographical distribution of ion concentration in precipitation over China[J]. Research of Environmental Sciences, 1997, 10(2): 4-10.
- [19] 杨复沫, 贺克斌, 雷 宇, 等. 2001-2003 年间北京大气降水的化学特征[J]. 中国环境科学, 2004, 24(5): 538-541.
- YANG Fumo, HE Kebin, LEI Yu, et al. Chemical characters of atmospheric precipitation in Beijing in years of 2001-2003[J]. China Environmental Science, 2004, 24(5): 538-541.
- [20] 谢书勇, 刘 成, 李 政. 超高压输电导线起始电晕电压测量方法的探讨[J]. 高压电器, 1989, 25(6): 39-41.
- XIE Shuyong, LIU Cheng, LI Zheng. The method for measuring initial corona of super high voltage transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 1989, 25(6): 39-41.
- [21] 刘云鹏, 朱 雷, 律方成, 等. 特高压电晕笼直流分裂导线正极性电晕起始特性分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 73-79.
- LIU Yunpeng, ZHU Lei, LYU Fangcheng, et al. Analysis of the positive corona onset characteristic of the bundle conductors in the UHV corona cage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 73-79.
- [22] 任雷剑. 输电线路导线电晕特性及起晕电压的海拔校正研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2009.
- REN Leijian. The corona characteristics of transmission line and the correction of corona onset voltage elevation[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2009.

朱 军(1986—), 男, 工程师, 主要从事电力设备高压试验和带电检测工作。

刘云鹏(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事特高压输电技术、电气设备在线监测与故障诊断方面的研究。

(上接第 12 页)

- technique in Qinghai-Tibet railway transmission line and substation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [16] 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.
- [17] 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 grids & its evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 71-77.
- [18] 张爱莉, 王绍君, 刘 菁. 最小二乘法的应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(5): 55-57.
- ZHANG Aili, WANG Shaojun, LIU Qing. Application of least square method[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(5): 55-57.
- [19] 吴 宁. 电网络分析与综合[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- WU Ning. Analysis and synthesis of electric network[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [20] 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(自然科学版), 2010, 33(1): 73-77.
- LIU Yugen, MENG Xian, TIAN Jinhu, et al. Analysis on the method of selecting nodes on the erosion diagnosis of grounding grid[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2010, 33(1): 73-77.
- 刘渝根(1963—), 男, 硕士, 教授, 长期从事高电压工程、电力系统过电压与接地技术的教学和科研工作。
- 谢丽娜(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事接地技术与电力系统过电压研究。