

基于遗传算法的电压法和电阻法在地网导体 缺失诊断中的性能对比

刘渝根¹, 骆仁意¹, 尚龙龙², 冷迪², 王建南¹

(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. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518054)

摘要: 为准确检测新建地网导体缺失, 建立了地网导体缺失诊断的 0-1 背包模型, 基于二进制遗传算法编写了 MATLAB 地网导体缺失诊断程序, 分别建立了电阻法、电压法的适应度函数。以重庆 110 kV 徐家坪变电站实际地网为例进行了仿真实验。结果表明: 对于新建变电站地网的有、无孤立节点出现的导体缺失情况, 电压法和电阻法的诊断结果均无误诊和漏诊支路出现。前者单次运行时间约 4 min, 后者约 10 min, 对实际工程而言, 电压法要更优于电阻法。

关键词: 地网; 导体缺失诊断; 数学模型; 遗传算法; 电阻法; 电压法; 适应度

中图分类号: TM 862

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.10.020

0 引言

地网的施工属于隐蔽工程, 偷工减料致使导体缺失的情况在新建地网中普遍存在。虽然部分地网导体的缺失不会给地网的接地电阻带来太大的变化, 但会严重影响地网的完整性, 恶化地网局部地区的散流均压特性^[1-3]。因此对新建地网在投入运行前进行导体缺失诊断是十分必要的。

目前, 地网的验收常常以接地电阻值是否满足规程要求来衡量^[4-5]。地网接地电阻主要决定于地网面积和土壤电阻率。整个地网中局部均压导体的缺失并不能有效反映在接地电阻上。本文尝试将遗传算法应用于地网导体缺失诊断来对地网的完整性进行准确评估。

目前遗传算法在地网方面的应用相对较少, 虽然这些研究涉及到了地网的设计、优化与腐蚀诊断, 但已开展的研究其深度尚浅, 未系统化和深入化。文献[6-7]建立了青藏铁路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; 文献[8]提出了一种基于遗传算法的地网故障监测线最优布置方案生成方法; 文献[9]提出了一种基于禁忌搜索算法的地网故障诊断方法; 文献[10]提出了一种基于电磁场和电路结合的节点电压法, 用遗传算法对变电站地网进行优化; 文献[11]提出了一种改进的地网故障诊断算法及测试方案评价; 文献[12]提出了一种结合场的思想, 并给出了一种新的地网参数计算方法。

本文首先建立了地网导体缺失诊断的数学模

型, 利用二进制遗传算法(Binary GA)分别编制了适用于电压法和电阻法的地网导体缺失诊断程序。以重庆 110 kV 徐家坪变电站实际地网(25 个节点、39 条支路)为例, 进行了仿真实验, 并对 2 种方法的结果进行对比研究。

1 导体缺失诊断数学模型

1.1 数学模型的建立

埋在地下的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, 地网可以看成如图 1 所示的纯电阻网络。假设图 1 的地网设计图中具有 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)。

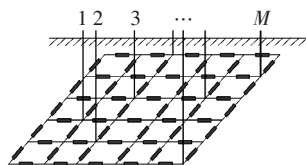


图 1 地网等效电阻网络

Fig.1 Equivalent resistance network of grounding grid

导体缺失诊断中, 各支路导体只有存在或者缺失 2 种状态, 可以分别用 1 和 0 来表示, 导体存在为 1, 缺失为 0。那么对于一个 B 条支路的地网, 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:

$$X=[b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_B] \quad b_i=1 \text{ 或 } 0; i=1, 2, \dots, B \quad (1)$$

虽然地网埋于地下, 但是地网的端口电压或者端口电阻却可以通过可及节点进行测量。图 2(a)为电压法测量, 其基本原理是: 选择 2 个可及节点(如节点对 a, b)为不动点, 注入电流激励 I_0 , 选择多组可及节点(如节点对 c, d)进行测量, 得到端口电压测量

收稿日期: 2013-11-11; 修回日期: 2014-06-06

基金项目: 国家创新研究群体基金资助项目(51021005)

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

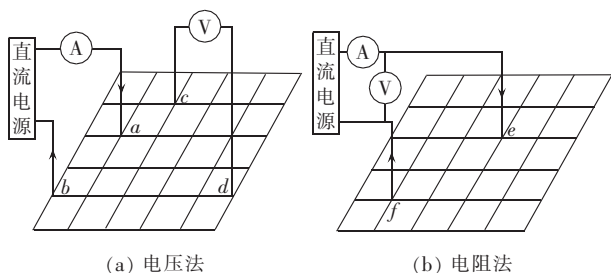


图 2 地网 2 种测量方法

Fig.2 Two measuring methods of grounding grid

值 U_M 。图 2(b)为电阻法测量,与电压法区别在于,电压法只需选取一组不动点注入一次电流,而电阻法则需根据端口电阻测量的次数,在不同端口(如节点对 e, f)注入电流激励,即电流的注入是一个循环注入的过程,测量得到端口电阻测量值 R_M 。

正常思路应该是根据端口电压的测量值 U_M 或者端口电阻测量值 R_M 以及激励电流的注入位置来推算地网的拓扑结构。即求解方程组(2),根据测量的端口电压 U_M 或者端口电阻 R_M 求解最优个体 X_{best} (地网的实际拓扑结构)。

$$f(b_1, b_2, \dots, b_B) = U_M(R_M) \quad (2)$$

$$U_M = [u_{m1}, u_{m2}, \dots, u_{mk}] \quad (3)$$

$$R_M = [r_{m1}, r_{m2}, \dots, r_{mk}] \quad (4)$$

其中, k 为测量次数。

但方程组(2)的求解十分困难甚至几乎不可能。又考虑到变量 b_i 的取值只能为 0 或者 1, 如果将方程组(2)的求解转化为一个优化问题, 那么地网导体缺失诊断就可以转化为一个多维 0-1 背包问题。

每一个个体 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图纸完全吻合, 无导体缺失现象。对于每一个个体 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导纳矩阵 Y_n 。

对于电压测量法, 根据 Y_n 及电流激励的注入位置, 可以计算得到与端口电压测量值 U_M 相对应的端口电压计算值 U_C 。定义电压法的适应度函数 costf 为向量 U_M 与向量 U_C 的差矩阵中各个元素的平方和。

$$U_C = [u_{c1}, u_{c2}, \dots, u_{ck}] \quad (5)$$

$$\text{costf} = \sum_{i=1}^k (u_{mi} - u_{ci})^2 \quad (6)$$

对于电阻测量法, 利用端口电压 U_M 除以注入电流可以得到与端口电阻测量值 R_M 相对应的端口电阻的计算值 R_C , 定义电阻法的适应度函数 costf 为向量 R_M 与向量 R_C 的差矩阵中各个元素的平方和。

$$R_C = [r_{c1}, r_{c2}, \dots, r_{ck}] \quad (7)$$

$$\text{costf} = \sum_{i=1}^k (r_{mi} - r_{ci})^2 \quad (8)$$

至此, 地网导体缺失诊断问题完全转化为了一

个 B (标称支路个数) 维 0-1 背包问题。

1.2 数学模型的求解

目前求解 0-1 背包问题有动态规划法、分支限界法、贪婪算法、蚁群算法、遗传算法等^[13]。地网的支路个数较多, 即变量的维数较多。实践表明, 对于多维 0-1 背包问题, 遗传算法是较为有效的求解方法^[14]。

遗传算法求解地网导体缺失诊断问题的基本流程如图 3 所示。

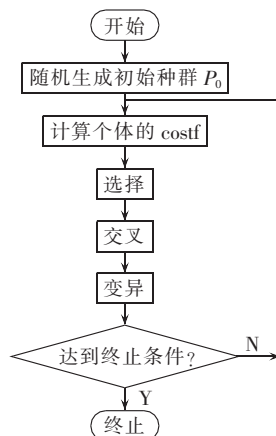


图 3 遗传算法的基本流程图

Fig.3 Basic flowchart of genetic algorithm

相比于经典的迭代优化方法, 遗传算法对初始值的要求不高, 是一种基于概率的群体搜索方法, 具有较强的全局搜索能力。遗传算法主要分为二进制遗传算法和连续型遗传算法 (continuous GA)。地网导体缺失诊断中的变量全部为离散型变量 (0 或者 1), 故采用二进制遗传算法来编写地网导体缺失诊断程序。

2 适应度函数的求解

2.1 拓扑结构的分类

每一个样本 X 对应一种地网的拓扑结构, 对于一个 B 条支路的地网而言, 共有 2^B 种可能的拓扑结构。如图 4 所示, 根据 costf 求解方法的不同, 可将这些可能的拓扑结构分为以下几类。

a. 有孤立节点, 地网不导通。

例如, 样本 X 中, 13、14、15、16、8、9、19、23 这 8 条支路缺失, 对应的拓扑结构如图 4(b) 所示。此时节点 11 孤立, 地网被分成上、下两部分, 地网不导通。

b. 有孤立节点, 地网导通。

例如, 样本 X 中, 8、9、19、23 这 4 条支路缺失, 对应的拓扑结构如图 4(c) 所示。此时节点 11 孤立, 但整个地网依旧导通。

c. 无孤立节点, 地网不导通。

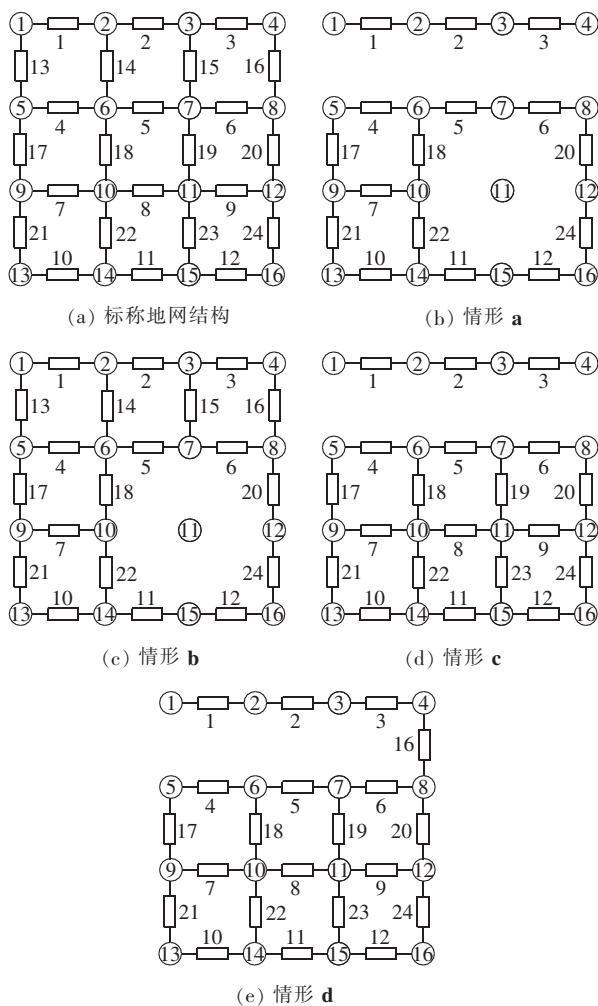


图 4 costf 求解中拓扑结构的分类

Fig.4 Topological classification for getting costf solution

例如,样本 X 中,13、14、15、16 这 4 条支路缺失,对应的拓扑结构如图 4(d)所示。此时虽然无孤立节点,但地网不导通。

d. 无孤立节点,地网导通。

例如,样本 X 中,13、14、15 这 3 条支路缺失,对应的拓扑结构如图 4(e)所示。此时无孤立节点,地网导通。

2.2 电压法 costf 的求解流程

根据不同拓扑结构的特征,针对不同的拓扑结构,电压法适应度函数 costf 有如下求解方法及顺序。

a. 生成 Y 、 I 。读入电流激励注入位置,形成注入电流列矩阵 $I(N \times 1 \text{ 维})$ 。读入端口电压的测量数据 U_M 。对于每一个个体 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 $Y(N \times N \text{ 维})$ 。

b. 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(9)所示, Y 中第 11 行(列)所有元素全部为 0,则可判定节点 11 为孤立节点。查找 Y 中所有元素全为 0 的行(列)编号,放入矩阵 Y_{ID} 中。

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \dots & 11 & \dots & N \\ 1 & & & 0 & & \\ 2 & & & 0 & & \\ \vdots & & & \vdots & & \\ 11 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \vdots & & \\ N & & & 0 & & \end{bmatrix}_{N \times N}, I = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ 11 \\ \vdots \\ N \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (9)$$

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 中。若 Y_{ID} 中有元素(不论几个)出现在矩阵 D_N 中,说明有不可能孤立的节点被孤立了,个体 X 应该舍弃;若 Y_{ID} 中没有元素出现在 D_N 中,则将 Y 中全部为 0 的行和列删除,形成修正节点导纳矩阵 Y_{RE} ,将注入电流列矩阵 I 对应的行删除,形成修正电流矩阵 I_{RE} ,如式(10)所示。

$$Y_{RE} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \dots & 11 & \dots & N \\ 1 & & & 0 & & \\ 2 & & & 0 & & \\ \vdots & & & \vdots & & \\ 11 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \vdots & & \\ N & & & 0 & & \end{bmatrix}_{(N-1) \times (N-1)}, I_{RE} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ 11 \\ \vdots \\ N \end{bmatrix}_{(N-1) \times 1} \quad (10)$$

c. 判断地网导通情况。删除 Y_{RE} 中的任意一行和对应的列(电流激励注入节点除外,将行对应的节点设置为电位为 0 的参考节点),形成降阶修正节点导纳矩阵 Y_{REN} ,与此同时将修正电流矩阵 I_{RE} 中对应的行删除,形成降阶修正电流矩阵 I_{REN} 。若降阶修正节点导纳矩阵 Y_{REN} 的行列式为 0,则说明地网不导通;否则,说明地网导通。

由于接地导体的缺失,孤立节点是有可能存在的。但不管有没有孤立节点,整个地网一定是导通的,从查阅文献及课题组对多达百余座变电站的测试开挖结果来看,整个地网不导通的情况还未有发生。所以如果个体 X 对应的地网拓扑结构不导通,那个体 X 应被舍弃。

d. 计算 costf。降阶修正电流矩阵 I_{REN} 除以降阶修正节点导纳矩阵 Y_{REN} 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 U_C 。根据式(6)计算 costf。

对于程序中应舍弃的个体 X ,将其 costf 直接设定为 10^{50} 。由于个体的适应度函数值 costf 极大,个体的适应性极弱,会在算法的迭代中逐渐被舍弃。

2.3 电阻法 costf 的求解流程

电阻法与电压法的最大区别在于,电压法只需选取一组不动点注入一次电流,而电阻法则需根据端口电阻测量的次数,在不同端口注入电流激励,即

电流的注入是一个循环注入的过程。

电阻法适应度函数 costf 有如下求解方法及顺序。

a. 生成 Y 。读入端口电压的测量数据 U_M 。对于每一个个体 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 $Y(N \times N \text{ 维})$ 。

b. 判断孤立节点。此步骤与电压法相同。

c. 判断地网导通情况。此步骤与电压法完全相同。

d. 求取端口计算电阻 R_C 。根据测量, 可形成端口测量电阻矩阵 R_S , 如式 (11) 所示。为了简化程序和计算, 令每次电流激励均为单位激励。

假设第 i 次电流注入 ($i=1, 2, \dots, m$), 注入端口为 s , 流出端口为 t 。读入电流激励注入位置, 形成注入电流矩阵 $I(N \times 1 \text{ 维})$, 然后删除 I 中 Y_{REN} 没有的对应行, 形成降阶修正电流矩阵 I_{REN} , 降阶修正电流矩阵 I_{REN} 除以降阶修正节点导纳矩阵 Y_{REN} 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计算电压矩阵 U_C , 将 U_C 中测量端口 s 和 t 的值相减, 得到端口计算电压值 U_c , 由于注入的是单位激励, U_c 的值即为 s 和 t 2 个端口之间的计算电阻值, 将其放入端口计算电阻矩阵 R_C 的对应位置, 将上述操作重复 m 次, 可得到最终的 $m \times 1$ 维的端口计算电阻矩阵, 如式 (11) 所示。

$$R_S = \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ i \\ \vdots \\ m \end{matrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}_{m \times 1}, R_C = \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ i \\ \vdots \\ m \end{matrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}_{m \times 1} U_c \quad (11)$$

e. 计算 costf 。根据式 (8) 计算 costf 。同理, 对于程序中应舍弃的个体 X , 将其 costf 直接设定为 10^{50} 。

3 导体缺失诊断仿真实验

重庆 110 kV 徐家坪变电站地网为一 25 个节点、39 条支路的小型地网, 其拓扑结构图如图 5 所示。根据变电站的实际情况, 徐家坪变电站地网各

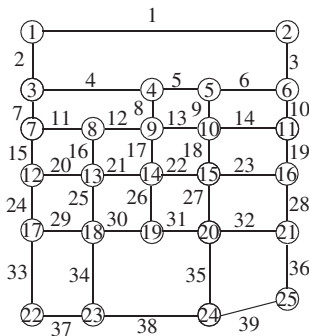


图 5 徐家坪变电站地网拓扑图

Fig.5 Topology of Xujiaping substation grounding grid

支路的标称电阻值如表 1 所示。

表 1 徐家坪变电站地网支路标称电阻值
Table 1 Branch nominal resistances of Xujiaping substation grounding grid

支路	标称电阻/mΩ	支路	标称电阻/mΩ	支路	标称电阻/mΩ
1	53.21	14	15.43	27	10.91
2	10.11	15	7.45	28	10.91
3	10.11	16	7.45	29	13.30
4	25.54	17	7.45	30	12.24
5	12.24	18	7.45	31	12.24
6	15.43	19	7.45	32	15.43
7	7.18	20	13.30	33	18.10
8	7.18	21	12.24	34	18.10
9	7.18	22	12.24	35	18.10
10	7.18	23	15.43	36	14.37
11	13.30	24	10.91	37	13.30
12	12.24	25	10.91	38	24.48
13	12.24	26	10.91	39	15.96

规定凡是地网拓扑结构图中节点数在 80 个以下的, 称为中小型地网, 其对应的地网占地面积约为 3 500~8 000 m², 工程上一般为 110 kV 及以下等级变电站地网, 此类地网测量取采用不动点原则, 尽量利用有限的引下线节点; 节点总数在 80 个以上的, 称为大型地网, 对应的地网占地面积一般大于 8 000 m², 工程上一般为 220 kV 及以上等级的地网。测量此种类型的地网时, 节点对的选择应采用大分块结合不动点的方法。

为了保证算法的有效性 & 诊断结果的准确性, 经过反复试验可知: 测量端口电压/电阻的测量点个数一般为地网的支路数的 30% 左右, 即可满足工程实际要求。重庆 110 kV 徐家坪变电站有 25 个节点、39 条支路, 属于中小型地网。测量中以节点 14 为不动点, 选取 11 组端口电压/电阻的测量点进行测试。

为了对比电压法和电阻法的诊断效果, 分别对端口电压和端口电阻进行了相应的测量, 测量方法如图 2(a)、(b) 所示。另外, 为了更为有效地检验程序的诊断效果, 围绕徐家坪变电站地网进行了 2 组仿真实验。第 1 组假设 8、9、23 这 3 条支路导体缺失, 此种故障情况下地网无孤立节点出现; 第 2 组假设 25、29、30、34 这 4 条支路导体缺失, 此种故障情况下, 节点 18 被孤立。2 组实验分别对有无孤立节点出现的情况进行了模拟仿真, 更加全面地对所编程序的诊断效果进行检验。

利用 ATPDraw 提供的直流电流源为地网施加 10 A 直流电流激励。利用电压探针测量 2 个可及节点的电位, 将 2 个节点的电位相减得到端口电压的测量值。端口电压的测量中只施加了一次电流激励, 节点 14 注入、节点 20 流出。共选择 20 组可及节点对进行端口电压的测量, 测量采用不动点的方法,

即固定其中某一节点,只移动另外一个节点。表 2 为 2 组仿真实验端口电压的测量结果。表 3 为 2 组仿真实验端口电阻的测量结果。

表 2 端口电压的测量结果
Table 2 Measurements of port voltage

节点对	测量值/mV	
	第 1 组	第 2 组
14-4	34.24	20.38
14-5	37.31	29.25
14-7	24.72	19.00
14-8	19.07	14.66
14-10	33.18	31.70
14-13	18.77	11.91
14-16	52.88	47.42
14-17	29.43	27.95
14-19	36.35	40.08
14-20	83.25	85.04
14-25	65.43	66.32

表 3 端口电阻的测量结果
Table 3 Measurements of port resistance

节点对	测量值/mΩ	
	第 1 组	第 2 组
14-4	24.94	8.30
14-5	23.71	9.25
14-7	11.04	10.89
14-8	7.66	8.13
14-10	7.68	6.98
14-13	6.10	7.20
14-16	15.05	10.40
14-17	11.99	18.57
14-19	6.24	7.66
14-20	8.32	8.50
14-25	18.63	18.57

4 实验结果及其分析

将表 2、3 的测量数据分别输入电压法、电阻法地网导体缺失诊断程序,分别对 2 组不同地网导体缺失情况进行诊断。参数设置:种群规模为 900,选择率为 0.5,变异率为 0.01,遗传代数为 100。

表 4 是地网导体缺失诊断程序第 1 次运行的结果。可以看出,对于新建变电站地网(无腐蚀),不论是无孤立节点出现的导体缺失情况(第 1 组仿真实验)还是有孤立节点出现的导体缺失情况(第 2 组仿真实验),电压法和电阻法的诊断结果均与假设的地网故

表 4 第 1 次程序运行诊断结果
Table 4 Diagnostic results of first operation

实验编号	导体缺失支路 诊断结果	适应度 函数值	备注
电压法(1)	8、9、23	1.00×10^{-4}	无误诊、无漏诊
电压法(2)	25、29、30、34	1.13×10^{-4}	无误诊、无漏诊
电阻法(1)	8、9、23	9.72×10^{-5}	无误诊、无漏诊
电阻法(2)	25、29、30、34	6.45×10^{-5}	无误诊、无漏诊

注:(1)、(2)分别表示第 1 组、第 2 组仿真实验。

障完全相符,无误诊和漏诊支路出现。
4.1 电压法结果分析
为了更清楚地看到电压法的迭代过程,图 6 及图 7 分别描述了各代平均适应度函数值以及最优个体适应度函数值与遗传代数的关系。

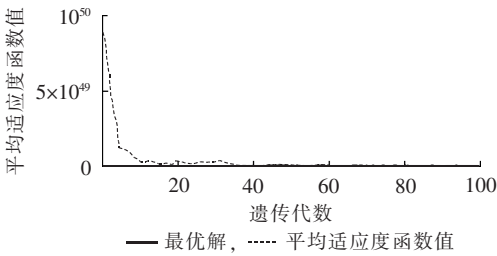


图 6 平均适应度函数值与遗传代数的关系曲线
Fig.6 Relationship between average costf and generation number

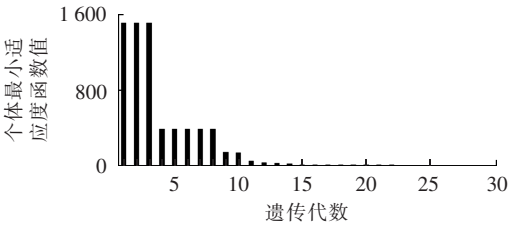


图 7 各代(1~29)个体最小适应度函数值柱状图
Fig.7 Histogram of minimal costf for 29 generations

从图 6、7 中可以看出:

- a. 随着遗传代数的增加,各代的平均适应度函数值以及最优个体适应度函数值总体呈下降趋势,说明迭代是朝着不断优化搜索的方向进行的;
- b. 由于个体变异率的存在,各代平均适应度函数值并不是逐代下降,甚至在某些时候会出现上扬的趋势,呈现出波动,最优个体的适应度函数值在某些遗传代数上会与上代持平,但不会出现上扬的情况。

遗传算法迭代的第 1 代,种群中个体的最小适应度函数值为 1.5×10^3 ,小于 10^{30} ,说明从第 1 代开始种群中就出现了可行个体,但平均适应度函数值仍为 10^{30} 数量级,说明因地网不导通或者其他原因而应该舍弃的不可行个体仍占大多数。此后种群中个体的最小适应度函数值一直呈现下降趋势,直到第 23 代,种群中出现了与假设的地网导体缺失情况相符的个体。由于该个体的适应度函数值最小,适应性最强,得到了更多的交配机会,因此种群中与该个体相同的个体数目越来越多。

表 5 为算法最后一代(即算法迭代完成后)的个体适应度函数值分布情况。可以看出,到了算法的最

表 5 最后一代个体适应度函数值分布情况
Table 5 costf distribution of last generation

适应度函数值	个数	适应度函数值	个数
10^{-4}	622	$[10^3, 10^5)$	74
$(10^{-4}, 10^3)$	203	10^{30}	1

后一代,与假设的地网导体缺失情况相符的个体数目已达到 622 个,超出了群体总数的一半(450)。由于算法中的选择率为 0.5,算法继续迭代下去,被选中参与交配的个体(前 450 个)已经全部为与假设的地网导体缺失情况相符的个体,这样的迭代也是毫无意义的。

遗传算法的计算结果具有一定的波动性,所以对上述 2 组实验分别进行了 10 次诊断。诊断结果显示,10 次诊断结果的波动性极小。第 1 组实验 10 次运行结果中有 9 次找到了假设的导体缺失支路;第 2 组实验 10 次运行结果均找到了假设的导体缺失支路。

4.2 电阻法结果分析

电阻法平均适应度函数值与遗传代数的关系曲线与电压法类似,限于篇幅,就不再赘述。图 8 为最优个体适应度函数值与遗传代数的关系。与电压法的区别在于:电阻法直到第 20 代,种群中出现了与假设的地网导体缺失情况相符的个体。

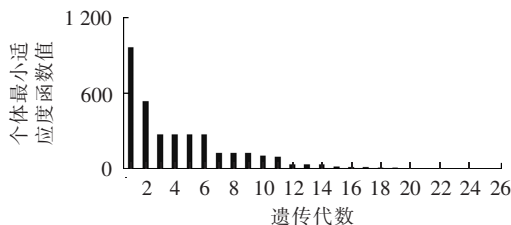


图 8 各代(1~25)个体最小适应度函数值柱状图
Fig.8 Histogram of minimal costf for 25 generations

表 6 为算法最后一代的个体适应度函数值分布情况。可以看出,到了算法的最后一代,与假设的地网导体缺失情况相符的个体数目已达到 617 个,超出了群体总数的一半(450)。

表 6 最后一代个体适应度函数值分布情况
Table 6 costf distribution of last generation

适应度函数值	个数	适应度函数值	个数
10^{-4}	617	$[10^3, 10^5]$	13
$(10^{-4} \sim 10^3)$	269	10^{50}	1

同电压法一样,电阻法 2 组实验分别进行 10 次试验。结果显示,10 次诊断结果的波动性极小。第 1 组实验和第 2 组实验 10 次运行结果中均有 9 次找到了假设的导体缺失支路。

徐家坪变电站标称地网有支路 39 条,算法的优化变量有 39 维,样本空间为 2^{39} ,达到 10^{11} 数量级。电压法和电阻法得到的诊断结果均只进行了 100 代遗传算法迭代,最大计算样本数量约为 45 900,不足整体样本空间(2^{39})的 $(8 \times 10^{-8})\%$,可见,将二进制遗传算法应用于地网缺导体诊断中全局寻优是可行的。但就运行时间而言,电压法的单次运行时间约为 4 min,而电阻法则需要 10 min。对实际工程而

言,显然电压法要更优于电阻法。

5 结论

a. 本文建立了地网导体缺失诊断的 0-1 背包模型,基于二进制遗传算法编写了 MATLAB 地网导体缺失诊断程序,分别建立了电阻法、电压法的适应度函数。以重庆 110 kV 徐家坪变电站实际地网(25 个节点、39 条支路)为例进行了仿真实验。

b. 对于新建变电站地网,不论是无孤立节点出现的导体缺失情况,还是有孤立节点出现的导体缺失情况,电压法和电阻法的诊断结果均与假设的地网故障完全相符,无误诊和漏诊支路出现。但就运行时间而言,电压法的单次运行时间约为 4 min,而电阻法则需要 10 min。对实际工程而言,显然电压法要更优于电阻法。

c. 电压法和电阻法均只进行了 100 次迭代,最大计算样本数量约为 45 900,不足整体样本空间(2^{39})的 $(8 \times 10^{-8})\%$,但诊断结果均与假设的地网故障几乎完全相符。可见,将二进制遗传算法应用于地网缺导体诊断中全局寻优具有可行性。

参考文献:

[1] 雷将锋,彭敏放,沈美娥,等. 基于云遗传算法的接地网优化设计[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):119-123.
LEI Jiangfeng,PENG Minfang,SHEN Meie,et al. Optimal design of grounding grid based on cloud genetic algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):119-123.

[2] 罗隆福,向博,许加柱,等. 10 kV 小电阻接地系统单相接地故障时的跨步电压仿真与实验研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):22-26.
LUO Longfu,XIANG Bo,XU Jiazhu,et al. Simulation and test of step voltage caused by single-phase grounding fault of 10 kV system earthed with low resistance[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(6):22-26.

[3] 杨鑫,李卫国,李景禄,等. 变电站内短路时架空地线分流系数的计算方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):107-110.
YANG Xin,LI Weiguo,LI Jinglu,et al. Calculation of overhead ground line shunt coefficient for substation grounding fault[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):107-110.

[4] 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,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,2006,29(8):33-35.

[5] 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.

[6] 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):25-30.

- 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): 25-30.
- [7] 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.
- [8] 刘健, 王建新, 王森, 等. 一种补充可及节点的接地网腐蚀故障诊断改进方法[J]. 高压电器, 2009, 45(4): 122-124.
- LIU Jian, WANG Jianxin, WANG Sen, et al. An improved approach of grounding grid corrosion diagnosis by adding touchable nodes[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4): 122-124.
- [9] 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.
- [10] 何智强, 文习山, 张科, 等. 基于遗传算法的变电站接地网优化[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(6): 27-31.
- HE Zhiqiang, WEN Xishan, ZHANG Ke, et al. Optimization of substation grounding grid design based on genetic algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(6): 27-31.
- [11] 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 and its evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 71-77.
- [12] 鲁志伟, 文习山, 史艳玲, 等. 大型变电站接地网工频接地网参数的数值计算[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 89-93.
- LU Zhiwei, WEN Xishan, SHI Yanling, et al. Numerical calculation of large substation grounding grids in industry frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 89-93.
- [13] 王瑞琪, 张承慧, 李珂, 等. 基于小生境遗传算法的微电网控制与优化[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 7-14.
- WANG Ruiqi, ZHANG Chenghui, LI Ke, et al. Control and optimization based on niche genetic algorithm for micro-grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 7-14.
- [14] 王莉, 绍定宏, 陆金桂. 基于遗传算法的 0/1 背包问题求解[J]. 计算机仿真, 2006, 23(3): 154-156.
- WANG Li, SHAO Dinghong, LU Jingui. The genetic algorithm of solving 0/1 knapsack problem[J]. Computer Simulation, 2006, 23(3): 154-156.

作者简介:



刘渝根

刘渝根(1963—),男,四川达州人,教授,长期从事高电压工程、电力系统过电压与接地技术方面的教学和科研工作;

尚龙龙(1988—),男,河南焦作人,硕士研究生,长期从事接地技术与电力系统过电压方面的研究工作(E-mail:cd_longlong_shang@163.com)。

Comparison of performance between voltage and resistance methods in GA-based diagnosis for conductor loss in grounding grid

LIU Yugen¹, LUO Renyi¹, SHANG Longlong², LENG Di², WANG Jiannan¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,

Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518054, China)

Abstract: A 0-1 knapsack model is built for the accurate diagnosis of conductor loss in grounding grid, a corresponding program is written in MATLAB based on the binary genetic algorithm and the fitness functions are established for the voltage and resistance methods respectively. Simulation is carried out for an actual grounding grid of 110 kV substation and results show that, for a new-built substation grounding grid, no matter there is isolated node or not, the diagnostic results of both methods are correct and without any branch missed. Their time consumptions per an operation are 4 min and 10 min respectively, showing the voltage method is superior to the resistance method in practical application.

Key words: grounding grid; conductor loss diagnosis; mathematical models; genetic algorithms; resistance method; voltage method; fitness