测试点偏移时的接地网腐蚀故障诊断方法

吕 超,刘利强,胡凯旋,王 姣,孙 骞
(内蒙古工业大学 电力学院,内蒙古 呼和浩特 010080)

摘要:为减小测试点偏移对接地网腐蚀故障诊断结果造成的影响,利用 PSCAD 模拟偏移状况,对 2 种偏移程度下的完全可测支路故障诊断结果进行对比分析,基于分析结果提出一种测试点在不同偏移程度下的归算处理方法。根据该方法对原有非线性故障诊断数学模型及混合粒子群优化算法进行改进,仿真结果表明改进的接地网腐蚀诊断算法在测试点偏移情况下仍然准确有效。

关键词:接地网;腐蚀;诊断;测试点偏移;故障分析
中图分类号:TM 13;TM 72 **文献标识码**:A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2016.01.023

0 引言

变电站接地网的安全可靠是保证电力系统稳定运行的重要保障之一,为确保人身及设备安全,在不停电和不开挖的情况下,对接地网的支路腐蚀状况进行检测和诊断是十分有必要的。

目前对接地网的研究主要是从 3 个方面进行的:一是电化学腐蚀检测法;二是地网实际工程应用类研究;三是电磁场检测法和电网络诊断法。文献[1-3]使用电化学腐蚀检测法虽然可以定性指示地网的局部腐蚀情况,但无法确定地网整体腐蚀状况以及导体腐蚀程度。文献[4-7]使用电磁场检测法解决了接地网断裂故障的定位问题,但难以诊断某些发生轻微腐蚀或尚未断裂的地网支路。文献[8-20]使用多种电网络诊断方法,通过对诊断方程的建立、检测方法、网络拓扑结构、智能优化算法等方面的研究,以提高诊断结果的准确率。考虑到实际因素对诊断准确率的影响,文献[21-23]研究了测试点发生偏移对地网腐蚀诊断结果的影响,并利用遗传算法、蒙特卡罗算法等对测试点偏移位置进行修正。

目前针对测试点偏移问题,从理论算法上切入较多,但对如何应用到现场诊断的方法研究较少,为此本文对现场测试点发生不同程度偏移下的诊断结果进行分析,找到隐含其中的规律并提出改进处理方法,最终对原故障诊断模型及算法进行改进,通过对 54 支路接地网系统的仿真试验,验证了本文所提算法的正确性和可行性。

1 接地网腐蚀诊断基础理论

对于一个含有 n 个独立节点、b 条支路、m 个可及节点的接地网,支路电阻设计值为 $R_i^0(i=1,2,\cdots,b)$,支路电阻实际值为 $R_i'(i=1,2,\cdots,b)$,在直流或工频电流作用下,可以忽略接地网导体间的电感和电容效应,根据电网络理论可知:

$$\boldsymbol{Y}_n=\boldsymbol{A}\mathrm{diag}(\boldsymbol{Y}_b)\boldsymbol{A}^T \tag{1}$$

$$\boldsymbol{Y}_n\boldsymbol{V}_{n0}=\boldsymbol{I}_s \tag{2}$$

其中,$\boldsymbol{Y}_n$ 为节点导纳矩阵;$\boldsymbol{A}$ 为节点关联矩阵;$\boldsymbol{Y}_b$ 为支路导纳矩阵;$\mathrm{diag}(\cdot)$为对角矩阵;$\boldsymbol{V}_{n0}$ 为原始网络节点电压列向量;$\boldsymbol{I}_s$ 为节点注入激励列向量。

假设腐蚀后的接地网支路导纳变为 $\boldsymbol{Y}_b+\Delta\boldsymbol{Y}_b$,节点电压变为 $\boldsymbol{V}_{n0}+\Delta\boldsymbol{V}_n$,依然满足节点电压方程,同时引入有 N 个测试端口的端口选择矩阵 $\boldsymbol{P}=[P_1,P_2,\cdots,P_N]^T$,由此可以得到反映腐蚀前后接地网被测端口电压变化量 $\Delta\boldsymbol{V}_P$ 与支路腐蚀程度 $\Delta\boldsymbol{Y}_b$ 的关系为:

$$\Delta\boldsymbol{V}_P=\boldsymbol{P}\Delta\boldsymbol{V}_n=-\boldsymbol{P}\boldsymbol{Y}_n^{-1}\boldsymbol{A}[\mathrm{diag}(\Delta\boldsymbol{Y}_b)^{-1}+\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{Y}_n^{-1}\boldsymbol{A}]^{-1}\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{Y}_n^{-1}\boldsymbol{I}_s \tag{3}$$

在施加 L 次激励的情况下,可以得到一组关于 $\Delta\boldsymbol{V}_P$ 和 $\Delta\boldsymbol{Y}_b$ 关系的非线性方程组,为求出支路电阻实际值 $R_i'(i=1,2,\cdots,b)$,构建 L_1 范数优化模型[24-25]:

$$\begin{aligned}&\min\ \|\boldsymbol{F}\|_1\\&\text{s.t. } R_i'\geqslant R_i^0\quad i=1,2,\cdots,b\end{aligned} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{F}=\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{V}_{P(1)}+\boldsymbol{P}_{(1)}\boldsymbol{Y}_n^{-1}\boldsymbol{A}[\mathrm{diag}(\Delta\boldsymbol{Y}_b)^{-1}+\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{Y}_n^{-1}\boldsymbol{A}]^{-1}\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{Y}_n^{-1}\boldsymbol{I}_{s(1)}\\\Delta\boldsymbol{V}_{P(2)}+\boldsymbol{P}_{(2)}\boldsymbol{Y}_n^{-1}\boldsymbol{A}[\mathrm{diag}(\Delta\boldsymbol{Y}_b)^{-1}+\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{Y}_n^{-1}\boldsymbol{A}]^{-1}\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{Y}_n^{-1}\boldsymbol{I}_{s(2)}\\\vdots\\\Delta\boldsymbol{V}_{P(L)}+\boldsymbol{P}_{(L)}\boldsymbol{Y}_n^{-1}\boldsymbol{A}[\mathrm{diag}(\Delta\boldsymbol{Y}_b)^{-1}+\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{Y}_n^{-1}\boldsymbol{A}]^{-1}\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{Y}_n^{-1}\boldsymbol{I}_{s(L)}\end{bmatrix}$$

为获得满足优化模型的全局最优解,本文采用了混合粒子群优化算法进行求解[26]。同时为提高诊断结果的可信度,采用文献[24]所提方法获取全局支路模糊组集合和完全可测支路组集合,为后续测试点偏移规律的找寻奠定基础。

2 测试点偏移接地网腐蚀诊断

2.1 测试点偏移的影响

在实际接地网中,所有引下线与地网的连接点总会存在不同程度的偏离,在地网腐蚀诊断中一般按

收稿日期:2014-12-03;修回日期:2015-09-10
基金项目:内蒙古自治区高等学校科研项目(NJZY12057)
Project supported by the Science Research Project of the Higher Institutions in Inner Mongolia Automations Region(NJZY12057)

“就近原则”将偏离测试点近似归算到最近的网络节点上，如图1所示。图中，L_1和L_2表示实际地网中接地引下线位置，L_1'和L_2'表示理想接地网中接地引下线位置；空心圆点表示不可及节点；实心圆点表示可及节点(即测试点)；实心方框表示测试点偏移位置；a点和b点是实际地网中接地引下线与接地导体的连接位置，即“偏移测试点”，而a'点和b'点是理想接地网中近似归算的网络节点。

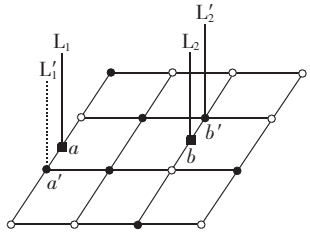


图1 接地网测试点偏移示意图

Fig.1 Schematic diagram of offset test points of grounding grid

在已有的诊断方法的研究中，总是对“近似归算”后的理想接地网拓扑结构进行分析计算，忽略了测试点的偏移影响。由于接地网支路电阻值一般为mΩ级，一个较小的偏移量就会对整体腐蚀诊断结果造成很大影响，下面将对测试点发生不同程度偏移情况下的诊断结果进行分析。

本文选用PSCAD电磁暂态仿真软件搭建25支路、16节点的接地网等效模型，模拟测试点偏移情况，如图2所示。图中，实心圆点和空心圆点分别表示可及节点和不可及节点；按照文献[29]的方法对该网络进行支路可测性分析得出：虚线部分为全局模糊组支路，实线部分为完全可测支路。

设地网每条支路长度为L_B，测试点偏离最近网络节点距离为L_X，则测试点偏移量$\eta=(L_X/L_B)\times100\%$；设某支路电阻实际腐蚀倍数为$M_A$，诊断倍数为$M_D$，则对等相对误差$E=|M_D-M_A|/\max(M_D,M_A)\times100\%$。

接地网各支路电阻设计值为1 mΩ，随机设置各

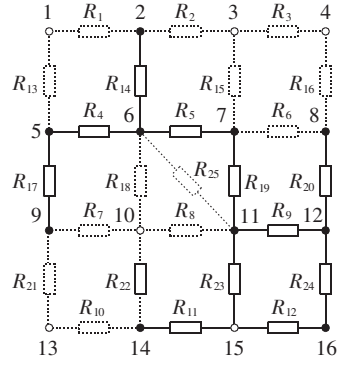


图2 25支路接地网等效模型

Fig.2 Equivalent model of 25-branch grounding grid

支路的实际值，根据节点连接支路数、节点所处网络结构位置、节点偏移方向等要素，分别模拟5种偏移类型(即节点7向R_5侧、节点12向R_9侧、节点6向R_{14}侧、节点5向R_{17}侧、节点16向R_{12}侧偏移的情况)，且偏移量η从0逐渐增大到50%。选用50组电压测试与激励端口组合，施加5 A直流激励，取值上限定义为45倍设计值。分别对不同偏移量下的接地网模型进行仿真试验，测量选定测试端口的电压值，代入理想接地网所适用的MATLAB接地网腐蚀诊断程序进行计算。同时考虑诊断结果的可比性，对每条支路电阻实际值随机设置3组(即Ⅰ组、Ⅱ组、Ⅲ组)，使用上述方法对每组电阻值进行3次计算，并选取3次诊断结果平均值作为最终诊断结果。

本文选取2种典型偏移类型诊断结果数据：一种为连接支路数最多且处于网络结构中心的节点6向R_{14}侧偏移；另一种为连接支路数最少且处于网络结构边缘的节点16向R_{12}侧偏移。2种偏移类型的3组诊断结果数据分别列于表1—3和表4—6中。

从表中数据可以得到以下4点结论。

a. 总体诊断结果对等相对误差随着偏移量的增加而增大。

b. 在偏移量相同的情况下，偏移测试点所在支路的腐蚀程度越严重，该条支路相应诊断误差越大，

表1 节点6向R_{14}侧偏移时，Ⅰ组故障诊断结果

Table 1 Fault diagnosis results of Group Ⅰ when test point deviates from node 6 to R_{14}

完全可测支路电阻	实际值/mΩ	诊断结果对等相对误差E/%							
		η=0	η=2%	η=5%	η=10%	η=20%	η=30%	η=40%	η=50%
R_4	1.6	0.01	3.96	9.63	14.53	5.84	13.70	67.31	30.83
R_5	2.5	0.02	4.42	5.92	17.21	1.61	25.09	37.03	36.92
R_9	4.5	0	0.53	1.37	3.57	11.88	15.64	15.84	20.14
R_{11}	3.8	0.02	0.54	1.94	2.88	1.02	21.35	31.61	53.78
R_{12}	4.8	0.01	0.20	0.26	0.59	14.23	27.49	31.56	9.56
R_{14}	**1.5**	**0.01**	**9.21**	**21.40**	**33.33**	**33.33**	**33.33**	**33.33**	**33.33**
R_{17}	1.7	0.01	0.60	1.58	2.76	8.33	28.29	75.00	12.34
R_{19}	3.0	0.01	0.20	0.55	1.69	17.97	26.94	31.90	38.82
R_{20}	4.2	0	0.51	1.29	3.50	12.72	16.81	16.90	23.26
R_{23}	4.1	0.02	0.06	0.52	0.64	10.48	33.12	42.87	38.77
R_{24}	5.0	0.01	0.18	0.41	0.56	11.61	19.40	22.13	30.55
均值		0.01	1.85	4.08	6.30	11.73	23.75	36.86	29.85

表 2 节点 6 向 R_{14} 侧偏移时,Ⅱ组故障诊断结果

Table 2 Fault diagnosis results of Group Ⅱ when test point deviates from node 6 to R_{14}

完全可测支路电阻	实际值/mΩ	诊断结果对等相对误差 E/%							
		η=0	η=2%	η=5%	η=10%	η=20%	η=30%	η=40%	η=50%
R_4	3.2	0.01	3.31	5.67	21.75	76.32	62.89	33.50	19.53
R_5	2.2	0.02	4.46	6.51	22.73	70.83	95.11	7.02	3.08
R_9	2.8	0.02	1.91	4.31	7.28	10.18	3.19	28.98	28.85
R_{11}	1.5	0.01	1.31	2.72	3.78	2.27	4.07	1.14	0.38
R_{12}	1.7	0.01	0.05	0.10	0.09	0.56	1.53	36.76	43.21
R_{14}	**4.2**	**0**	**4.14**	**5.26**	**28.73**	**51.19**	**76.19**	**76.19**	**76.19**
R_{17}	4.2	0.02	0.79	1.79	3.78	8.24	7.40	23.65	16.06
R_{19}	2.5	0.01	1.72	3.53	4.86	8.83	30.15	35.95	43.93
R_{20}	1.5	0.01	1.10	2.43	3.81	3.98	0.62	19.42	18.31
R_{23}	1.2	0	0.42	1.13	2.09	2.90	1.60	16.67	20.00
R_{24}	1.8	0	0.10	0.05	1.24	4.18	0.12	35.30	41.69
均值		0.01	1.76	3.04	9.10	21.77	25.71	28.60	28.29

表 3 节点 6 向 R_{14} 侧偏移时,Ⅲ组故障诊断结果

Table 3 Fault diagnosis results of Group Ⅲ when test point deviates from node 6 to R_{14}

完全可测支路电阻	实际值/mΩ	诊断结果对等相对误差 E/%							
		η=0	η=2%	η=5%	η=10%	η=20%	η=30%	η=40%	η=50%
R_4	2.8	0.01	3.99	5.57	18.50	33.10	32.04	66.06	9.98
R_5	4.2	0.02	4.05	4.81	21.78	60.80	28.16	7.91	12.88
R_9	1.7	0.02	0.37	0.83	1.35	5.91	15.80	18.61	21.46
R_{11}	2.6	0.01	2.76	3.36	10.01	25.42	15.19	32.57	80.78
R_{12}	2.5	0.01	1.79	4.59	8.99	9.33	37.01	48.34	51.43
R_{14}	**2.4**	**0**	**12.92**	**22.65**	**47.80**	**58.33**	**58.33**	**58.33**	**58.33**
R_{17}	3.1	0.02	0.77	1.75	2.55	4.05	17.21	66.52	12.05
R_{19}	4.8	0.01	1.02	1.90	1.76	14.44	27.31	32.43	38.30
R_{20}	3.2	0.01	0.31	0.62	0.66	5.49	15.90	18.40	23.33
R_{23}	1.8	0	2.38	4.63	9.41	23.19	20.00	35.66	78.46
R_{24}	2.9	0	0.85	2.32	5.39	0.90	26.28	36.16	45.73
均值		0.01	2.84	4.82	11.65	21.91	26.66	38.27	39.34

表 4 节点 16 向 R_{12} 侧偏移时,Ⅰ组的故障诊断结果

Table 4 Fault diagnosis results of Group Ⅰ when test point deviates from node 16 to R_{12}

完全可测支路电阻	实际值/mΩ	诊断结果对等相对误差 E/%							
		η=0	η=2%	η=5%	η=10%	η=20%	η=30%	η=40%	η=50%
R_4	1.6	0.01	0.01	0.01	0.01	0.11	1.69	3.62	11.00
R_5	2.5	0.02	0.02	0.02	0.02	0.99	1.67	0.71	2.10
R_9	4.5	0	0	0	0	0.05	0.15	1.34	4.22
R_{11}	3.8	0.02	0.02	0.02	0.02	0.08	1.16	1.83	6.76
R_{12}	**4.8**	**0.01**	**2.00**	**4.99**	**9.99**	**20.00**	**30.45**	**41.03**	**52.62**
R_{14}	1.5	0.01	0.01	0.01	0.01	1.02	2.50	3.07	10.10
R_{17}	1.7	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.43	0.91	3.17
R_{19}	3.0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.22	0.34	3.88	12.33
R_{20}	4.2	0	0	0	0	0	0	2.21	8.08
R_{23}	4.1	0.02	0.02	0.02	0.02	0.46	0.97	4.06	10.96
R_{24}	5.0	0.01	1.88	4.59	8.76	16.11	22.52	27.40	32.49
均值		0.01	0.36	0.88	1.71	3.55	5.62	8.19	13.98

即诊断准确率降低。

c. 偏移测试点所处支路越靠近网络结构中心且连接支路数量越多,对全局的诊断准确率影响越大,反之越小。

d. 由于所分析网络的规模小、拓扑结构简单、支路参数变化范围小,而且都是单一测试点发生偏移,在正常情况下完全可测支路的诊断误差率应很小,所以对等相对误差超过 5% 即认为该支路可能发生了误诊。图 3 为 5 种偏移类型完全可测支路诊断误差对比。观察表 1—6 中数据以及图 3 可知,无论支路腐蚀程度如何变化,绝大多数支路在偏移量小于等于 5% 时,其对等相对误差及其平均值都小于或接近 5%,但是偏移量大于 5% 时的诊断误差明显增大,应采取更加有效的处理方法以提高诊断准确率。

为全面反映测试点偏移所带来的诊断误差效应,模拟上文相同测试点向全局模糊组支路方向偏

表5 节点16向R_{12}侧偏移时,Ⅱ组的故障诊断结果

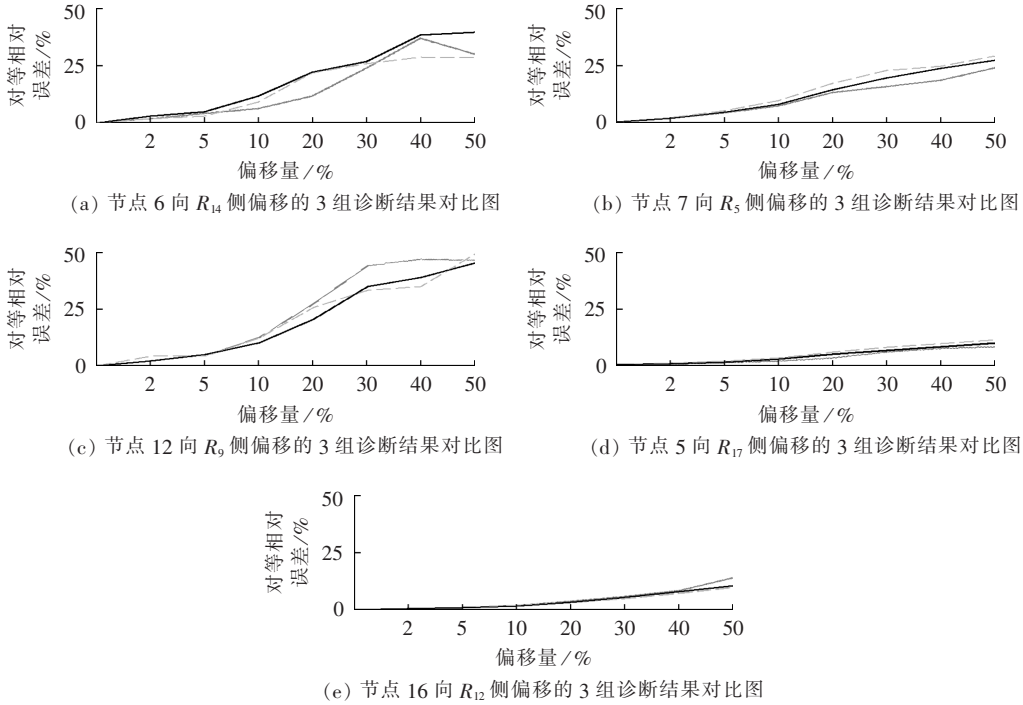
Table 5 Fault diagnosis results of Group Ⅱ when test point deviates from node 16 to R_{12}

完全可测支路电阻	实际值/mΩ	诊断结果对等相对误差 E/%							
		η=0	η=2%	η=5%	η=10%	η=20%	η=30%	η=40%	η=50%
R_4	3.2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
R_5	2.2	0	0	0	0	0	0	0.33	0.95
R_9	2.8	0	0	0	0	0	0	1.83	6.93
R_{11}	1.5	0	0	0	0	0	0	2.14	3.04
R_{12}	**1.7**	**0.01**	**2.00**	**5.00**	**10.00**	**20.00**	**30.00**	**40.00**	**41.18**
R_{14}	4.2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.14	1.87
R_{17}	4.2	0	0	0	0	0	0	0.56	2.47
R_{19}	2.5	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	3.24	4.67
R_{20}	1.5	0	0	0	0	0	0	2.09	3.25
R_{23}	1.2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	4.11
R_{24}	1.8	0	1.85	4.51	8.16	15.89	22.08	27.42	37.80
均值		0.01	0.35	0.87	1.66	3.27	4.74	7.07	9.66

表6 节点16向R_{12}侧偏移时,Ⅲ组的故障诊断结果

Table 6 Fault diagnosis results of Group Ⅲ when test point deviates from node 16 to R_{12}

完全可测支路电阻	实际值/mΩ	诊断结果对等相对误差 E/%							
		η=0	η=2%	η=5%	η=10%	η=20%	η=30%	η=40%	η=50%
R_4	2.8	0	0	0	0	0	0.12	1.45	1.90
R_5	4.2	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	3.28	4.32
R_9	1.7	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	1.22	5.21	6.85
R_{11}	2.6	0	0	0	0	0	0	2.09	3.65
R_{12}	**2.5**	**0**	**2.00**	**5.00**	**10.00**	**20.00**	**30.00**	**40.00**	**50.00**
R_{14}	2.4	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0.87	1.24
R_{17}	3.1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	3.12	4.65	5.18
R_{19}	4.8	0	0	0	0	0	2.46	3.68	4.98
R_{20}	3.2	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0	0	1.25
R_{23}	1.8	0	0	0	0	0	0	0.23	3.78
R_{24}	2.9	0	1.69	4.13	7.94	14.71	20.55	25.64	30.12
均值		0.01	0.34	0.84	1.64	3.16	5.23	7.92	10.30



(a) 节点6向R_{14}侧偏移的3组诊断结果对比图

(b) 节点7向R_5侧偏移的3组诊断结果对比图

(c) 节点12向R_9侧偏移的3组诊断结果对比图

(d) 节点5向R_{17}侧偏移的3组诊断结果对比图

(e) 节点16向R_{12}侧偏移的3组诊断结果对比图

—— Ⅰ组, -- Ⅱ组, —— Ⅲ组

图3 5种偏移类型下完全可测支路诊断误差对比

Fig.3 Comparison of fully-measurable branch diagnose error for five offset types

移的情况,由于模糊组支路诊断结果受自身阻值和端口电压作用的影响而无法确定唯一解,所以依然以可信度较高的完全可测支路诊断结果为依据,经分析:除了因模糊组支路诊断结果可信度较低而无法找到测试点所在支路腐蚀程度与诊断误差的线性关系之外,其他情况均符合测试点向完全可测支路偏移的结论。

2.2　测试点偏移的分类及归算处理方法

通过以上数据分析,按照实际接地网中引下线连接点与网络节点的偏离程度,将测试点分为 3 类:

a. 没有偏移或者偏移量小于 5% 的测试点称为第 1 类测试点,该测试点按"就近原则"直接归算到最近网络节点,并设置为可及节点;

b. 偏移量介于 5%~30% 之间的测试点称为第 2 类测试点,该测试点作为原网络新增的可及节点,并将所在支路分割成 2 条阻值不确定的新支路,同时保持原本应归算的网络节点为不可及节点;

c. 偏移量进一步增大,接近 50% 的测试点称为第 3 类测试点,该测试点作为原网络新增的可及节点,并将所在支路分割成 2 条阻值可以确定的新支路,一条支路的阻值为原阻值的 40%~50%,另一条为两者之差,同时保持原本应归算处理的网络节点为不可及节点。

2.3　故障诊断模型的改进

故障诊断前,需要根据设计图纸和实际现场的地下导体探测情况确定接地引下线与水平导体连接的大致位置,进而确定测试点类型,创建与原等效接地网 N^0 拓扑结构相同、可及节点数和支路数有所增加的新等效地网拓扑结构 N,同时对新增测试点进行编号。

将地网结构中的所有支路分为 3 类,其中含有第 1 类测试点的所有支路构成集合 R_a,含有第 2 类偏移测试点的所有支路构成 R_b,含有第 3 类偏移测试点的所有支路构成集合 R_c。由于第 2、3 类测试点将原有支路分为 2 段,则定义新增测试点与本应就近归算的网络节点所连接的部分构成原支路集合 R_b、R_c 中的子集 R_{b1} 和 R_{c1},而另一部分构成子集 R_{b2} 和 R_{c2}。具体非线性优化模型修改如下。

$$\begin{aligned}&\min \| \boldsymbol{F}(R_a,R_{b1},R_{b2},R_{c1},R_{c2}) \|_1\\&\text{s.t.}\quad R_a \geqslant R_a^0\\&\qquad R_{b1}+R_{b2} \geqslant R_b^0\\&\qquad R_{c1}+R_{c2} \geqslant R_c^0\end{aligned} \tag{5}$$

其中,R_a^0、R_b^0、R_c^0 分别为各类支路集合的设计值。

2.4　混合粒子群算法的改进

混合粒子群算法的求解中,需将不等式约束条件转变成参数的寻优范围。以往计算中参数取值下限定义为原支路电阻设计值,参数取值上限定义为 45 倍的原支路电阻设计值。而新地网等效拓扑结构中的部分支路电阻的设计值已发生改变,需按测试点分类标准对参数寻优范围进行修改,但是为了保证优化求解时尽可能地找到所有支路的可能解,设置 R_{c1} 中的各支路电阻取值为原支路电阻设计值的 40%,R_{c2} 中各支路电阻取值为原支路电阻实际值的 50%,同时将不等式约束条件通过罚函数法转变为适应度函数。具体适应度函数及参数寻优范围表达如下。

$$\min \left\| \begin{matrix} \boldsymbol{F}(R_a,R_{b1},R_{b2},R_{c1},R_{c2}) \\ Mf_1(R_{b1},R_{b2},R_b^0) \\ Mf_2(R_{b1},R_{b2},R_b^0) \\ Mf_3(R_{c1},R_{c2},R_c^0) \\ Mf_4(R_{c1},R_{c2},R_c^0) \end{matrix} \right\|_1 \tag{6}$$

$$R_a^0 \leqslant R_a \leqslant 45R_a^0$$

$$0.05R_b^0 \leqslant R_{b1} \leqslant 45\times 0.3\times R_b^0$$

$$0.7R_b^0 \leqslant R_{b2} \leqslant 45\times 0.95\times R_b^0$$

$$0.4R_c^0 \leqslant R_{c1} \leqslant 45\times 0.4\times R_c^0$$

$$0.5R_c^0 \leqslant R_{c2} \leqslant 45\times 0.5\times R_c^0$$

$$M=10^6$$

$$f_1(R_{b1},R_{b2},R_b^0)=[\min(0,R_{b1}+R_{b2}-R_b^0)]^2$$

$$f_2(R_{b1},R_{b2},R_b^0)=[\min(0,45R_b^0-R_{b1}-R_{b2})]^2$$

$$f_3(R_{c1},R_{c2},R_c^0)=[\min(0,R_{c1}+R_{c2}-R_c^0)]^2$$

$$f_4(R_{c1},R_{c2},R_c^0)=[\min(0,45R_c^0-R_{c1}-R_{c2})]^2$$

3　算例仿真

用 PSCAD 电磁暂态软件搭建陕西蒲城 110 kV 变电站 54 支路 35 节点接地网等效模型[26],模拟多个测试点发生不同程度偏移情况,如图 4 所示。

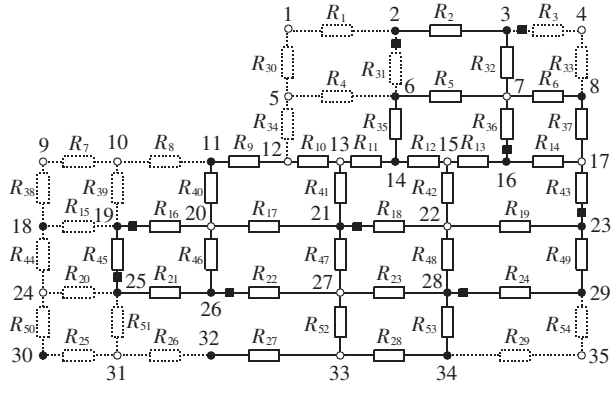


图 4 蒲城 110 kV 变电站地网拓扑结构

Fig.4 Topological structure of Pucheng 110 kV substation grounding grid

图 4 中,节点 6、8、11、14、18、29、30、34 视为第 1 类偏移测试点,节点 2、3、16、19、21、23、25、26、28 视为第 2 类测试点,节点 32 视为第 3 类测试点。选用 140 组激励端口和测试电压端口组合,施加 30 A 直流激励电流。根据测试点分类原则对 3 类测试点进行归算处理:忽略第 1 类测试点偏移量;在 5%~30%

的范围内随机设置第2类测试点偏移量;第3类测试点32将所在支路分割为2条阻值确定的新支路R_{26}和R_{27}。考虑实际测量时无法避免的误差效应,在端口测试电压数据中加设5%的扰动量,经MATLAB原故障诊断程序和改进故障诊断程序的计算结果列于表7。

表7 接地网腐蚀故障诊断结果

Table 7 Results of grounding grid corrosion diagnosis

支路电阻	设计值/Ω	实际值/Ω	E/%		支路电阻	设计值/Ω	实际值/Ω	E/%	
			原模型	改进模型				原模型	改进模型
R_2	**17.10**	**18.00**	**16.34**	**0.04**	**R_{27}**	**6.08**	**6.08**	**0.24**	**1.25**
R_5	**17.10**	**45.20**	**62.17**	**0.23**	**R_{28}**	**12.54**	**212.54**	**94.10**	**8.87**
R_6	**7.22**	**10.22**	**29.35**	**3.55**	**R_{32}**	**3.04**	**3.04**	**0.11**	**2.20**
R_9	**3.42**	**4.02**	**14.93**	**0.52**	**R_{35}**	**1.52**	**6.52**	**76.69**	**5.89**
R_{10}	**4.56**	**5.06**	**97.53**	**1.78**	**R_{36}**	**1.52**	**1.52**	**0.02**	**1.23**
R_{11}	**4.94**	**4.94**	**0.11**	**3.69**	**R_{37}**	**1.52**	**1.52**	**0.33**	**1.10**
R_{12}	**6.84**	**6.84**	**97.78**	**8.78**	**R_{40}**	**2.28**	**5.28**	**56.82**	**3.56**
R_{13}	**5.70**	**5.70**	**89.82**	**9.63**	**R_{41}**	**2.28**	**2.28**	**1.87**	**2.21**
R_{14}	**6.08**	**25.08**	**49.14**	**5.21**	**R_{42}**	**2.28**	**3.98**	**42.71**	**4.23**
R_{16}	**6.84**	**9.84**	**96.80**	**3.21**	**R_{43}**	**3.28**	**5.08**	**35.43**	**0.58**
R_{17}	**8.36**	**8.86**	**97.64**	**7.32**	**R_{45}**	**1.90**	**26.90**	**92.94**	**8.22**
R_{18}	**12.16**	**82.66**	**2.72**	**2.21**	**R_{46}**	**1.90**	**1.90**	**0.89**	**0.23**
R_{19}	**11.78**	**11.78**	**0.02**	**0.02**	**R_{47}**	**1.90**	**1.90**	**2.59**	**0.14**
R_{21}	**6.84**	**6.84**	**64.40**	**4.52**	**R_{48}**	**1.90**	**1.90**	**1.56**	**1.23**
R_{22}	**8.36**	**88.36**	**77.56**	**6.89**	**R_{49}**	**1.90**	**31.90**	**94.04**	**1.55**
R_{23}	**12.54**	**21.54**	**96.18**	**7.55**	**R_{52}**	**1.52**	**62.02**	**97.55**	**0.15**
R_{24}	**12.16**	**12.16**	**0.01**	**0.25**	**R_{53}**	**1.90**	**1.90**	**6.57**	**0.01**
R_1	7.60	13.20	67.66	14.93	R_{30}	3.04	3.04	0.01	18.73
R_3	6.08	8.08	24.75	15.37	R_{31}	3.04	21.04	85.55	7.18
R_4	7.60	8.60	11.63	7.82	R_{33}	3.04	3.04	30.25	29.00
R_7	4.94	15.44	68.01	10.84	R_{34}	1.52	1.52	44.22	22.43
R_8	6.84	17.64	61.22	2.38	R_{38}	2.28	2.28	3.28	64.10
R_{15}	4.94	6.94	28.82	3.70	R_{39}	2.28	3.78	39.68	11.90
R_{20}	4.94	20.74	90.67	15.22	R_{44}	1.90	1.90	0.01	0.04
R_{25}	4.94	5.84	15.69	1.52	R_{50}	1.52	2.52	39.68	25.11
R_{26}	7.89	7.89	0.11	0.98	R_{51}	2.28	2.28	0	0
R_{29}	10.64	20.64	48.45	13.30	R_{54}	2.28	8.28	72.46	38.34
完全可测支路电阻均值			42.8 Ω	3.28 Ω	模糊组支路电阻均值			33.55 Ω	14.4 Ω

表7中字体加粗部分为完全可测支路诊断结果,其余为模糊组支路诊断结果。从中可以看出,改进模型的故障诊断准确率明显高于原模型,而且无论是完全可测支路还是模糊组支路,原模型都存在很多误诊(即对等相对误差大于50%)。总体而言,使用原模型诊断的平均对等相对误差为41.28%,而改进模型的平均对等相对误差仅为7.69%,诊断准确率提高了33.59%。

完全可测支路组中,原模型的平均对等相对误差为43.84%,其中有15条完全可测支路出现误诊;而改进模型的平均对等相对误差为3.31%,没有1条支路发生误诊。

模糊组支路中,原模型的平均对等相对误差为36.94%,其中有6条模糊组支路出现误诊;而改进模型的平均对等相对误差为15.15%,仅有1条支路发生误诊,且模糊组支路诊断结果可信度有所提升。

4 结论

本文结合支路可测性分析,通过对测试点偏移情况下故障诊断结果的分析对比,一方面证实了测试点偏移势必对原有故障诊断结果造成影响,另一方面找到了隐含其中的规律并提出了一种测试点偏移分类处理方法以及模型、算法改进方法。

通过算例仿真表明:改进故障程序的诊断准确率明显优于原故障诊断程序,与测试点未偏移情况下的故障诊断结果较为贴切,而且诊断模型具有一定的抗干扰性,该方法对于解决测试点偏移接地网腐蚀诊断问题是有效可行的。

参考文献:

[1] LAWSON V R. Problems and detection of line anchor and substation ground grid corrosion[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1988,24(1):25-32.

[2] LIU C,PENG M. A new approach for monitoring grounding grid of electrical power system[C]//The 8th International Conference on Electronic Measurement & Instruments ICEMI 2007. Xi'an,China:[s.n.],2007:419-422.

[3] 张秀丽,骆平,莫逆,等. 接地网腐蚀状态电化学检测系统的开发与应用[J]. 中国电机工程学报,2008,28(19):152-156.
ZHANG Xiuli,LUO Ping,MO Ni,et al. Development and

application of electrochemical detection system for grounding grid corrosion state[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(19):152-156.

[4] DAWALIBI F. Electromagnetic-fields generated by overhead and buried short conductors to ground networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1986,1(4):112-119.

[5] BO Z,ZHAO Zhibin,CUI Xiang,et al. Diagnosis of breaks in substation's grounding grid by using the electromagnetic method [J]. IEEE Transactions on Magnetics,2002,38(1):473-476.

[6] 刘洋,崔翔,赵志斌. 测量磁感应强度诊断变电站接地网断点[J]. 高电压技术,2008,34(7):1389-1394.
LIU Yang,CUI Xiang,ZHAO Zhibin. Method for diagnosing the conductor broken point of grounding grids in substation based on measuring the magnetic induction intensity[J]. High Voltage Enginnering,2008,34(7):1389-1394.

[7] 刘洋,崔翔,赵志斌,等. 基于电磁感应原理的变电站接地网腐蚀诊断方法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(4):97-103.
LIU Yang,CUI Xiang,ZHAO Zhibin,et al. Method of corrosion diagnosis of substations' grounding grids based on electromagnetic induction theory[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(4):97-103.

[8] 许磊,李琳. 基于电网络理论的变电站接地网腐蚀及断点诊断方法[J]. 电工技术学报,2012,27(10):270-276.
XU Lei,LI Lin. Fault diagnosis for grounding grids based on electric network theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(10):270-276.

[9] 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报,2002,14(1):48-51.
ZHANG Xiaoling,HUANG Qingyang. Fault diagnosis of grounding grid of electric power plants and substations[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2002,14(1):48-51.

[10] 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 in the grounding grid's failure diagnosis of the power plant and substation[J]. High Voltage Enginnering,2000,26(4):64-66.

[11] 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.

[12] 刘渝根,田资,钱国超,等. 基于遗传算法的接地网腐蚀故障诊断研究[J]. 高电压技术,2013,7(7):18-24.
LIU Yugen,TIAN Zi,QIAN Guochao,et al. Corrosion of grounding network fault diagnosis based on genetic algorithm[J]. High Voltage Enginnering,2013,7(7):18-24.

[13] 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.

[14] HU Jun,ZENG Rong,HE Jinliang,et al. Novel method of corrosion diagnosis for grounding grid[C]// Proceedings of Power Conference. Perth,Australia:IEEE,2000:1365-1370.

[15] ZENG Rong,HE Jinliang,HU Jun,et al. The theory and implementation of corrosion diagnosis for grounding system[C]//37th IAS Annual Meeting. Pittsburgh,PA,USA:IEEE,2002:1120-1126.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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):122-125.
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):122-125.

[19] 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.

[20] 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.

[21] 刘健,倪云峰,卢伟,等. 可及节点偏移对接地网故障诊断影响及修正[J]. 高电压技术,2008,34(11):2349-2354.
LIU Jian,NI Yunfeng,LU Wei,et al. Influence of touchable nodes deviation on grounding grids corrosion diagnosis and its correction [J]. High Voltage Engineering,2008,34(11):2349-2354.

[22] 刘健,倪云峰,卢伟,等. 可及节点位置偏移条件下接地网故障诊断的研究[J]. 高压电器,2009,45(5):67-72.
LIU Jian,NI Yunfeng,LU Wei,et al. Grounding grids corrosion diagnosis with touchable nodes deviation[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(5):67-72.

[23] 刘利强,罗先觉,王森,等. 接地网腐蚀诊断的可信度分析[J]. 中国电机工程学报,2010,30(5):98-103.
LIU Liqiang,LUO Xianjue,WANG Sen,et al. Credibility analysis of corrosion diagnosis for grounding grids[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(5):98-103.

[24] 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,1997,31(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,1997,31(12):1-7.

[25] 刘利强,罗先觉,王森,等. 接地网腐蚀分块诊断的混合优化算法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(7):71-77.
LIU Liqiang,LUO Xianjue,WANG Sen,et al. Hybrid optimal algorithm for corrosion diagnosis for grounding grids [J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(7):71-77.

作者简介:

吕　超

吕　超(1985—),男,内蒙古呼和浩特人,硕士研究生,主要研究方向为高电压与绝缘技术(**E-mail**:1477481@qq.com);

刘利强(1975—),男,内蒙古呼和浩特人,副教授,博士,从事高电压与绝缘技术的研究。

(下转第 168 页 continued on page 168)

[16] SUN J,LIU Y,DONG J S,et al. Verifying stateful timed CSP using implicit clocks and zone abstraction[C]//Proceedings of the 11th International Conference on Formal Engineering Methods: Formal Methods and Software Engineering. Berlin,Germany: Springer-Verlag,2009:581-600.

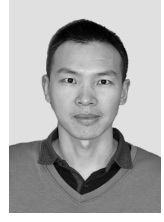
[17] SWIGART J. Omni-Bot:building flexible AI for enemy territory and multiplayer action games[EB/OL]. (2010-10-22)[2013-07-12]. http://aigamedev.com/plus/interview/omnibot-enemy-territory.

[18] LINDSAY P A,WINTER,K,YATAPANAGE N. Safety assessment using behavior trees and model checking[C]//2010 8th IEEE International Conference on Software Engineering and Formal Methods(SEFM). [S.l.]:IEEE,2010:181-190.

[19] 熊海军,朱永利,张凡,等. 基于行为树的IEC61850智能电子设备互操作性描述与验证[J]. 电力系统自动化,2013,37(24):66-71.
XIONG Haijun,ZHU Yongli,ZHANG Fan,et al. Formal specification and verification of IEC61850 IED interoperability based on behavior tree[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(24):66-71.

[20] 熊海军,王晓辉,朱永利,等. IEC61850智能电子设备交互实时性建模与验证[J]. 电力系统自动化,2014,38(19):90-95.
XIONG Haijun,WANG Xiaohui,ZHU Yongli,et al. A specification and verification method of real-time interoperability for IEC61850 IED[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(19):90-95.

作者简介:



熊海军

熊海军(1980—),男,湖北荆州人,讲师,博士,主要研究方向为网络协议工程、变电站自动化系统(**E-mail**:xionghaijun@163.com);

朱永利(1963—),男,河北冀州人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为变电站自动化系统、智能信息处理(**E-mail**:yonglipw@126.com);

张 琦(1980—),女,河北肃宁人,讲师,硕士,主要研究方向为网络协议工程(**E-mail**:superland_163@163.com)。

Protection system modeling based on probabilistic behavior trees and quantitative evaluation of its reliability

XIONG Haijun[1],ZHU Yongli[1],ZHANG Qi[2],WANG Dewen[1]

(1. School of Control and Computer Engineering,North China Electric Power University,Baoding 071003,China;
2. School of Science and Technology,North China Electric Power University,Baoding 071003,China)

Abstract: According to the functions and characteristics of digital relay protection system,the model of its behavior trees and the quantitative evaluation of its reliability are proposed. The reliability models are given for its hardware components,software behavior,sequence relation and selection relation. The existing behavior tree model is probabilistically extended,based on which the relay protection system is modeled. The calculative formula of behavior reliability is given,based on which the protection system reliability is quantitatively evaluated. The simulative results of case study show that,the proposed method can correctly evaluate the reliability of relay protection system and identify its weak parts.

Key words: relay protection; reliability; model buildings; quantitative evaluation; probabilistic behavior trees

(上接第161页 continued from page 161)

Grounding grid corrosion diagnosis with offset test point

LÜ Chao,LIU Liqiang,HU Kaixuan,WANG Jiao,SUN Qian

(Inner Mongolia University of Technology,Huhhot 010080,China)

Abstract: Two levels of test point offset are simulated in PSCAD for the fully-measurable branch and their fault diagnosis results are compared to analyze the influence of test point offset on the corrosion diagnosis of grounding grid,based on which,a reducing method is proposed for different levels of test point offset. According to the proposed method,the mathematical model of non-linear fault diagnosis and the hybrid particle swarm algorithm are improved. The simulative results show that the improved grounding grid corrosion diagnosis algorithm is correct and effective in the condition of offset test point.

Key words: grounding grid; corrosion; diagnosis; offset test point; failure analysis