

DOI: 10.7667/PSPC160132

基于DT法和粗糙集理论的接地网安全性状态评定

王思华, 杨桐, 段启凡, 赵峰

(兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 接地网是维护电力系统安全可靠运行的重要环节, 对接地网安全状态的准确评估关系到电力系统能否安全稳定运行。针对接地网安全性分级仅凭经验确定, 安全性评估只考虑单一特性参数是否满足规定限值的问题, 提出了基于动态分级(DT)法和粗糙集理论的接地网安全状态综合评估方法。将DT法应用于接地网安全性分级评定, 再根据相关导则规程等要求的安全限值对实测数据进行离散化处理, 应用粗糙集理论计算出各个特性参数的综合权重, 最后利用线性加权法得出接地网状态的综合评估结果。对工程实例的应用结果表明, 该评估方法简单易行且合理有效。

关键词: 接地网; DT法; 粗糙集理论; 权重确定; 综合评估

Evaluation of security state in grounding grid based on DT method and rough set

WANG Sihua, YANG Tong, DUAN Qifan, ZHAO Feng

(School of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Grounding grid is an important part to maintain the safety and reliability of power system, thus the accurate assessment of the grounding state is related to the safe and stable operation of power system directly. In view of the problem that the security classification is only based on experience and considering whether the single characteristic parameter satisfies the limit, this paper proposes a comprehensive evaluation method based on dynamic trend (DT) method and rough set theory. The data are classified reasonably using the DT method. According to the acquired safety limit value from the guidelines and procedures, the discrete processing of the measured data are conducted. Besides, the best comprehensive weight of each characteristic parameter is calculated by the application of rough set theory. Finally, the comprehensive assessment results of grounding grid state are gained with the linear weighted method. The rationality and validity of the proposed evaluation method is demonstrated by the results of application on an engineering example.

This work is supported by Research and Development Plan of Science and Technology in China Railway Corporation (No. 2013J010-E) and Natural Science Foundation of Gansu Province (No. 148RJZA053).

Key words: grounding grid; DT method; rough set theory; determining the weights; comprehensive evaluation

0 引言

在电力系统中, 接地网对设备安全和人身安全起到重要作用, 接地网的安全性状态直接关系到电力系统的运行状态^[1]。目前, 已经发生了多起因接地网造成事故的事例, 对接地网安全状态进行合理的评估, 可以避免一些类似事故的发生, 为电力系统安全稳定地运行提供保障^[2]。

目前, 人们对接地网的认识主要局限在接地阻

抗上, 对接地网的安全评估, 也仅考虑了每项特性参数指标是否满足各自的规定限值, 对接地网的安全分级评定, 也都是仅凭工程经验设定分级^[3]。这些远不够准确地反映出接地网的安全状态。因此对接地网的安全评估, 就应考虑接地网多方面的特性参数的综合性影响, 并应通过科学的方法, 对接地网安全性状态做出明确合理的分级评定。

由于接地网为隐蔽工程, 在运行维护及给安全评估工作带来很大的难度。接地网状态的评估参数指标均由现场实测得来, 而从测量学角度来看, 由于测量方法和站址土壤湿度等原因, 会产生误差且无法避免。而粗糙集理论相比于目前用于解决类似

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划课题(2013J010-E); 甘肃省自然科学基金(148RJZA053)

问题常用的神经网络、层次分析、模糊理论等方法, 具有处理不确定、不一致、不完整的数据, 数学基础成熟且易用性强的特点^[4-5]。尤其是近几年在变压器故障诊断以及决策管理、风险预测等不确定参数评估领域得到广泛应用^[6-7], 参考这些已有的评估运用经验, 将粗糙集理论应用于接地网评估的实测数据处理, 可以更好地反映出接地网的特性参数指标与接地网状态之间的关系, 使得评估更合理有效。

针对上述问题, 文章提出基于动态分级(DT)法的接地网安全性分级并采用粗糙集理论对接地网状态进行综合评估, 在充分考虑接地网特性参数的同时, 建立了接地网状态综合评估模型, 通过现有的工程实例的应用, 验证了该评估方法可行性。

1 评估关系数据模型的建立

接地阻抗是接地网最基本的特征参数, 通常对于 110 kV 及以上发、变电站, 其接地网阻抗应符合式(1)。

$$R \leq \frac{2000}{I_R} \quad (1)$$

式中: R 为考虑环境因素所能影响的最大阻抗; I_R 为经接地网入地的最大接地故障不对称电流有效值。

在电力系统中, 每个运行的电气设备都有一条或多条与接地网相连接的接地引下线。接地网电气完整性, 即回路电阻的大小的测试结果评判标准, 根据《接地装置特性参数测量导则》(DL/T 475-2006)^[8]分为: 回路电阻测试值在 50 mΩ 以下, 表明导通状况良好; 在 50~200 mΩ, 表明导通状况一般且应在以后的例检测试中重点关注其变化; 在 200 mΩ~1 Ω, 表明导通状况较差且应对重要设备尽快检查处理; 超过 1 Ω, 表明导通状况危险, 该设备与接地网未连接, 应立即检查处理。

当发、变电站发生故障短路时, 实际短路电流经接地网散流时, 接地网边缘等部位将产生相对较高的跨步电压和接触电压, 对站内外人员造成潜在的安全危险。在《电力设备实验预防性试验规程》(DL/T 596—1996)^[9]中, 跨步电压和接触电压的安全限值分别为

$$U_s = \frac{174 + 0.7\rho}{\sqrt{t}} \quad (2)$$

$$U_t = \frac{174 + 0.17\rho}{\sqrt{t}} \quad (3)$$

式中: ρ 为地表面的土壤电阻率; t 为接地短路电流持续时间。一般 110 kV 和 220 kV 场区接地短路电流持续时间取 $t=0.7$ s。

该指标分级标准根据核算后要求的安全限值的百分比来确定, 即实际运行短路故障时的接地网入地的最大短路电流值为 I_{\max} 时, 对应的跨步电压和接触电压的最大值分别为

$$U_{s\max} = \frac{U_s I_{\max}}{I} \quad (4)$$

$$U_{t\max} = \frac{U_t I_{\max}}{I} \quad (5)$$

式中, I 为测试电流。

考虑上述内容, 选取接地阻抗、电气完整性(回路电阻)、跨步电压以及接触电压四个特性参数作为评估指标并构成评估的信息系统, 通过对各个评估指标的实测数据进行核算处理, 分别经 DT 分级法进行安全性分级和经粗糙集理论进行安全性评估, 从而准确得到接地网的安全状态。具体评估方案如图 1。

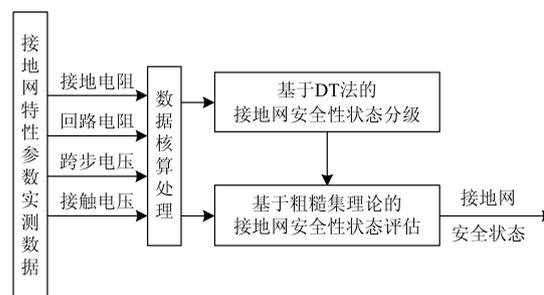


图 1 接地网安全性状态评估方案

Fig. 1 Evaluation scheme of grounding grid safety state

2 基于 DT 法的接地网安全性分级评定

DT法多用于岩体稳定性分级评价中, 是由实测数据利用“聚类分析”原理进行运算分析的分级方法, 其优点是对所需分级的原始数据没有量纲需求, 样本数目较少的情况下也能够准确分级^[10-11]。根据接地网评估关系数据的特点, 采用该方法对接地网的综合评估进行安全分级, 简便且合理。

按照实测出的接地网评估特征参数实测数据值, 求出每个特征参数的平均值和标准差, 使用 z-score 法并结合参数属性权重对实测数据值进行标准化处理。

$$s_k = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(x_{ik} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ik} \right)^2} \quad (6)$$

式中: s_k 是第 k 个指标的标准差; x_{ik} 是第 i 个特性参数的第 k 个指标的实测值; n 为指标个数。

由于接地网不同特性参数指标对接地网安全性状态的影响程度不同, 因此添加属性权重因子 α , 来表达该属性对接地网安全性状态的影响程度, 有

$$x'_{ik} = \alpha \times \frac{x_{ik} - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{ik}}{s_k} \quad (7)$$

式中: x'_{ik} 为标准化处理后的第 i 个特性指标的第 k 个指标值; α 为按工程经验确定的权重因子。

设 $s(i) = \sum_{k=1}^m x'_{ik}$, m 为特性参数的个数。当划分等级为 K 类时, 有公式(8)成立。

$$\text{Nc}(i) = \text{IFLX} \left\{ \frac{(K-1)[s(i)_{\max} - s(i)]}{s(i)_{\max} - s(i)_{\min}} + 0.5 \right\} + 1 \quad (8)$$

式中: $\text{Nc}(i)$ 为第 i 个指标所属的分类; IFLX 为取整函数。

再由实测数据计算接地网每种特性参数的重心, 如式(9)。

$$C_{(r,k)} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p x'_{ik} \quad (9)$$

式中: $C_{(r,k)}$ 为第 r 类指标到第 k 个属性的重心; p 为第 r 类指标包含的指标个数。

以欧式距离为原则将该指标划分到最近的一个类别, 计算每个指标到各类重心的距离。

$$d_{(i,k)} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{ik} - C_{(r,k)})^2} \quad (10)$$

当 $\text{Nc}^*(i) = p$, $p \in \{1, 2, \dots, r\}$ 时, 有

$$d_{(i,p)} = \min(d_{(i,r)}) \quad (11)$$

式中: $d_{(i,r)}$ 为第 i 个样品到第 r 类指标集重心的距离; $\text{Nc}^*(i)$ 为第 i 个指标所属的新类。

根据上述内容反复迭代, 调整每个指标的所属类别, 计算新重心, 以此调整分级, 在此过程中使用分类函数值 DS 来衡量所分级别的合理性。

$$\text{DS} = \sum_{i=1}^n d_{(i,r)} \quad (12)$$

如果前后两次分级所得 DS 差的绝对值小于误差限值 $\varepsilon=0.1$, 则前后两次分类重心重合, 分级达到合理, 所得结果为最终分级结果。DT 法在 Matlab 环境下分析计算的流程图如图 2。其初始设定中: n 为样本数目; m 为指标数目; K_{\max} 为设定的不得超过 n 的最大分级数目。

3 基于粗糙集理论的接地网安全性状态评估

3.1 基于粗糙集理论的指标权重确定

粗糙集理论^[12-13]是用以处理不完整和不确定性问题的数学分析理论, 它能有效地分析各种不完备的信息, 并从中找出潜在的数据规律。

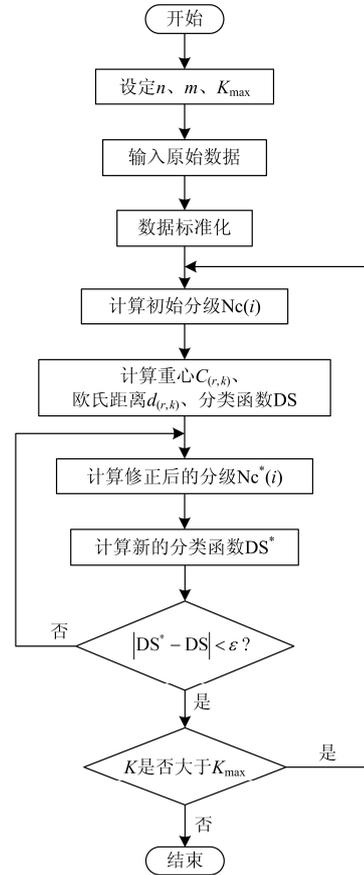


图 2 DT 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of DT method

由于粗糙集权重确定是完全通过数据决定的, 有一定的片面性, 因此需要结合定性分析。将由大量的实测数据所确定的客观属性重要度同由专家先验知识所确定的主观属性重要度结合起来, 最终所确定的综合权重作为接地网状态评估的评估指标权重, 分为客观权重和主观权重两部分。

客观权重的确定是将评估指标分为条件属性和决策属性两大类, 对条件属性分别进行重要度计算。

对于指标体系中的指标 $c \in C$, 考虑指标 c 对于体系 C 的重要度, 即 C 中增加指标 c 后分辨度的提高程度, 提高程度越大, 则认为指标体系 C 越重要^[14]。记指标 c 对于指标体系 C 的属性重要度为 $\text{Sig}_c(C_i)$, 其定义为

$$\text{Sig}(C_i) = 1 - \frac{|CU\{c_i\}|}{\sum_{i=1}^n |c_i|^2} \quad (13)$$

式中, $|C_i|$ 代表评估指标集合 C 的基数。

将求得的属性重要度, 进行归一化处理, 作为每个评估指标 c 的客观权重。即

$$P_i = \frac{\text{Sig}(C_i)}{\sum_{i=1}^n \text{Sig}(C_i)} \quad (14)$$

体系指标 $C_i (i=1,2,\dots,n)$ 中的主客观权重 $Q_i (i=1,2,\dots,n)$ 由专家经验知识给出:

$$Q_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}} \quad (15)$$

且必须满足 $\sum_{j=1}^n Q_i = 1$ 。

采用粗糙集从大量实测数据中挖掘而得到的客观权重 P_i 和由专家经验知识直接确定的主客观权重 Q_i , 共同得到综合权重为

$$I_i = (1 - \beta)P_i + \beta Q_i \quad (16)$$

式中, β 称为经验因子, $1 \geq \beta \geq 0$, 反映评估过程中评估者对主观权重和客观权重的重视程度: β 越大, 表明评价者越重视专家的经验知识; β 越小, 表明评价者越重视客观权重。

3.2 接地网安全性状态的综合评估

根据上述计算出的权重, 采用线性加权法^[15]对各个评估指标计算相应得分, 即

$$T_i = \sum_{i=1}^n I_i \cdot C_i \quad (17)$$

式中, T_i 为第 i 个接地网分块的状态评估得分。

该得分情况即为待评估接地网安全性状态综合评估结果, 且得分越大, 表示该接地网分块越危险。

综上所述, 基于粗糙集理论的接地网状态综合评估过程流程图如图 3。

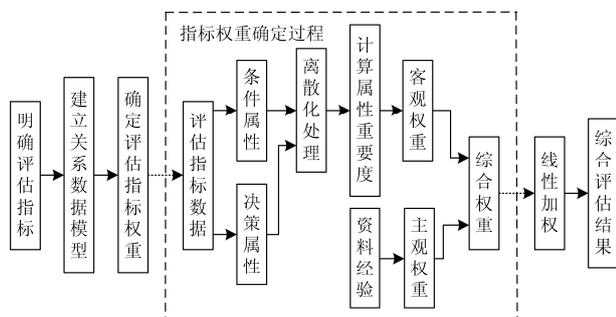


图 3 接地网状态综合评估流程图

Fig. 3 Flow chart of comprehensive evaluation for grounding grid

4 应用工程实例分析

选取某地域为 $67 \text{ m} \times 57.7 \text{ m}$ 的 110 kV 变电站主接地网进行安全状态评估分析。该变电站站址土壤的电阻率 $\rho = 150 \Omega \cdot \text{m}$ 。

4.1 评估指标的测量

将待评估接地网大致均等分成 16 个区域, 并按照不同电压等级的场区之间、各个高压和低压设备之间、场区内和主控及内部各接地干线之间、独立避雷针与主地网之间等的接地网影响测量原则选取合适的测量点, 对每个区域内的各个评估指标数据进行测量。

根据式(2)和式(3)得到跨步电压和接触电压的安全限值分别为 333.47 V 和 238.45 V , 再根据式(4)和式(5)得到其换算结果。跨步电压和接触电压的测量值、换算值及接地电阻和表征电气完整性的回路电阻测量结果见表 1。

4.2 接地网状态综合评估安全性分级表

应用 DT 法对待评估接地网的安全性进行分级, 使用 Matlab 编写相应程序, 根据式(6)、式(7)对表 1 中实测数据进行标准化处理, 处理结果见表 2。

再根据式(8)一式(12)得到分级函数 DS 值, 得到的 DS 函数随最大分级数 K 的变化曲线如图 4。

将 DS-K 曲线进行多项式曲线拟合, 得到平滑的 DS 函数值, 如图 5。图示表明, 分类函数 DS 值随着划分类数目 K 的增大而减小, 即曲线逐渐平滑。DS-K 曲线的平滑代表分级得到进一步合理调整。DS 值在划分级数 $2 < K < 4$ 时, 曲线变得较为平滑, 变化率较小。

通过分级函数 DS 值随着分类数 K 变化的情况图, 结合工程实际经验取整, 根据计算后的分级结果, 将构成信息系统评估指标划分为: 危险、一般、良好 3 个等级。对评估指标进行 $n=3$ 的等距离散化, 来划分评分分别为 1、2、3 分的评估分级, 具体分级情况参见表 3。

4.3 评估指标数据的离散化处理

根据待评估接地网按照合适测量点分成的 16 个区域, 每个区域为 u_i , 其中 $i = \{1, 2, \dots, 16\}$ 。由接地网状态综合评估指标分级表对评估指标的实测数据进行离散化处理, 得到的知识表达系统简化表见表 4。

表 1 评估指标的测量及核算结果

Table 1 Measurement and accounting result of evaluation index

测量点	跨步电压		测量点	接触电压		接地电阻	回路电阻
	跨步电压 c_1	测量值/mV 换算值/V		接触电压 c_2	测量值/mV 换算值/V		
站前道路	32.73	160.34	主变压器高 MOA A 相	39.37	192.91	0.288	68.12
站前左侧空地	40.56	198.53	110 kV 线路隔离开关	45.16	221.28	0.727	25.32
站前右侧空地	48.31	236.80	主变压器进线隔离开关	38.57	189.03	0.303	25.17
控制楼门前	9.66	47.16	110 kV 旁路开关 C 相	43.85	214.96	0.296	46.25
27.5 kV 高压室外空地	12.25	60.03	110 kV 线路 MOA A 相	33.67	164.98	0.732	50.06
主变压器	19.23	94.19	27.5 kV 线路开关	42.24	200.98	0.730	93.64
断路器母侧隔离开关外	15.43	75.62	110 kV 线路管套	43.27	211.97	0.297	12.08
110 kV 线路 TYD 外围墙边	14.65	71.79	断路器母侧隔离开关外	48.46	97.23	0.731	97.51
110 kV 线路开关	43.34	212.42	主变压器高开关 B 相	54.61	109.70	0.412	29.48
主变压器开关 A 相	12.86	63.05	主变压器中 MOA A 相	55.17	110.78	0.326	23.46
110 kV 线旁路隔离开关	31.17	152.72	110 kV 线路隔离开关	42.67	84.45	0.366	10.28
110 kV 场地与 27.5 kV 场间路	13.42	65.76	110 kV 线路 TYD	48.73	97.83	0.387	15.17
主变压器与围墙间空地	23.77	116.51	27.5 kV 线路管套	60.62	121.71	0.435	14.38
站前道路	32.73	160.34	主变压器高 MOA A 相	39.37	192.91	0.288	68.12
支线构架南侧	28.24	138.38	支线构架南侧	38.41	141.81	0.412	17.06
南侧避雷针旁	25.26	125.24	避雷针旁空地	21.01	75.61	0.423	26.53

表 2 评估指标实测数据标准化处理结果

Table 2 Standardized data on the evaluation indicators

跨步电压 c_1	接触电压 c_2	接地电阻 c_3	回路电阻 c_4	DS
0.050 6	0.097 4	-0.415 6	0.277 4	3.514
0.134 3	0.171 9	0.565 4	-0.168 1	2.079
0.218 1	0.087 2	-0.382 1	-0.169 7	1.981
-0.197 2	0.155 3	-0.397 8	0.049 8	1.882
-0.169 0	0.024 1	0.576 5	0.089 4	1.611
-0.094 2	0.118 6	0.572 1	0.543 1	1.791
-0.137 9	0.147 4	-0.395 5	-0.409 7	1.162
-0.143 3	-0.153 8	0.574 3	0.583 3	1.321
0.164 7	-0.121 1	-0.138 5	-0.124 8	1.289
-0.162 4	-0.118 3	-0.330 7	-0.187 4	0.978
0.034 0	-0.187 4	-0.241 3	-0.324 7	1.013
-0.156 5	-0.152 3	-0.194 4	-0.273 8	0.846
-0.045 3	-0.089 6	-0.087 2	-0.282 0	0.897
0.050 6	0.097 4	-0.415 6	0.277 4	0.736
0.002 6	-0.036 8	-0.138 5	-0.254 1	0.574
-0.026 2	-0.210 6	-0.114 6	-0.155 5	0.665

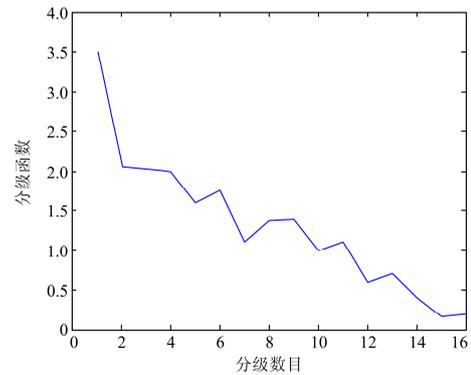


图 4 DS 函数值随分级数目 K 的变化情况

Fig. 4 DS values vs K

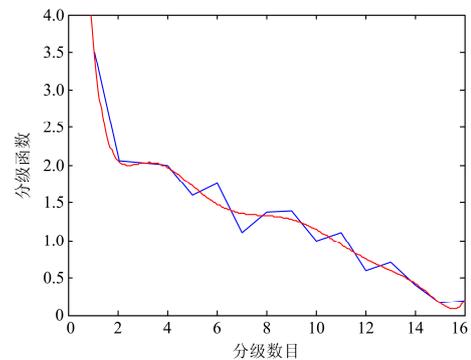


图 5 DS-K 曲线的多项式曲线拟合图

Fig. 5 Polynomial curve figure on DS-K

表 3 接地网状态综合评估指标分级表

Table 3 Classification of comprehensive evaluation on grounding grid

指标名称	编号	危险 3	一般 2	良好 1
跨步电压	c_1	$U_s \geq \frac{2}{3} U_s$	$\frac{1}{3} U_s \sim \frac{2}{3} U_s$	$0 \sim \frac{1}{3} U_s$
接触电压	c_2	$U_t \geq \frac{2}{3} U_t$	$\frac{1}{3} U_t \sim \frac{2}{3} U_t$	$0 \sim \frac{1}{3} U_t$
接地电阻	c_3	$3R_0$ 以上	$3R_0 \sim R_0$	R_0 以下
回路电阻	c_4	$0.2 \sim 1 \Omega$	$50 \sim 200 \text{ m}\Omega$	$50 \text{ m}\Omega$ 以下

表 4 知识表达系统简化表

Table 4 Simplified table of knowledge expressive system

u_i	c_1	c_2	c_3	c_4	d
u_1	1	2	1	1	2
u_2	1	1	2	2	2
u_3	1	1	1	2	3
u_4	2	2	1	1	2
u_5	1	2	1	1	3
u_6	2	2	1	2	1
u_7	1	2	1	1	3
u_8	1	1	2	2	1
u_9	2	2	1	1	3
u_{10}	1	1	1	1	1
u_{11}	1	1	1	2	1
u_{12}	1	1	1	1	2
u_{13}	1	2	1	2	2
u_{14}	2	2	1	1	1
u_{15}	1	2	1	1	2
u_{16}	1	1	1	1	1

4.4 评估结果

综上, 得到该接地网安全性状态评估得分, 分别是:

$$T_i = \{1.303, 1.381, 1.197, 1.619, 1.303, 1.816, 1.303, 1.381, 1.619, 1, 1.197, 1, 1.501, 1.619, 1.303, 1\};$$

其中, $i = \{1, 2, \dots, 16\}$ 。

根据接地网得分的评估等级, 由计算结果得出的评分结果, 16 个区域中有 4 个区域属于危险区域, 因此目前该 110 kV 变电站接地网状态的综合评估结果为: 较危险。并由此可以看出, u_4, u_6, u_9, u_{14} 是得分较高的四个危险区域, 尤其是 u_6 , 可以从这些部分进行开挖检查。

实例接地网扩能改造工程前开挖结果工程图如图 6 所示, 图示中一块紫色网格区域为危险区域, 三块黄色区域为较危险区域, 与文章提出方法得到

的评估状态结果一致。

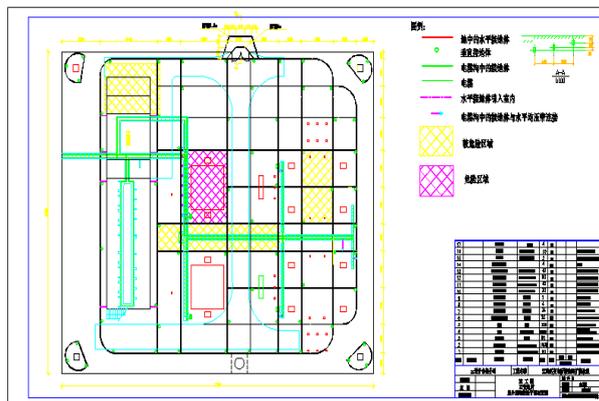


图 6 变电站接地防雷平面布置图

Fig. 6 Plane arrangement chart of lightning protection and grounding

5 结论

(1) 接地网状态的准确评估, 不应只考虑单一特性参数是否满足规定阈值, 还应考虑接地网多方面特性参数的综合性影响, 才能得到准确合理的评估结果。

(2) 评估中采用 DT 法对接地网安全性状态明确分级, 弥补了过去仅靠经验设定分级的不足。且应用粗糙集理论很好地处理了由于测量方法和站址土壤湿度等原因产生误差的实测数据, 更好地实现了多指标评价信息的整合。

(3) 对工程实例的应用分析可知, 基于粗糙集理论的接地网状态评估效果与接地网实际状态一致, 该方法简单易行, 且无需考虑接地网建设初期的拓扑结构及数值, 是合理有效评估接地网状态的方法, 具有一定的工程实用价值。

参考文献

- [1] 何金良, 曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] 王晓宇, 何为, 杨帆, 等. 基于微分法的接地网拓扑结构检测[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 73-89.
WANG Xiaoyu, HE Wei, YANG Fan, et al. Topology detection of grounding grids based on derivative method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 73-89.
- [3] 王东焯, 董刚. 大型变电所地网评估若干问题的探讨[J]. 高电压技术, 2001, 27(2): 1-2.
WANG Donghua, DONG Gang. Discussion of several problems about evaluation for large grounding grid[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(2): 1-2.

[4] 蒋亚坤, 李文云, 赵莹, 等. 粗糙集与证据理论结合的电网运行优质性综合评价[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 1-7.
JIANG Yakun, LI Wenyun, ZHAO Ying, et al. Evaluation of power quality performance based on rough set and evidence theory[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 1-7.

[5] 夏非, 范莉, 苏浩益. 基于粗糙集理论和启发式径向基函数神经网络的中长期电力负荷预测模型[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 21-26.
XIA Fei, FAN Li, SU Haoyi. A model for medium and long term load forecasting based on rough set theory and heuristic radial basic function neural network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 21-26.

[6] 马丽叶, 贾彬, 卢志刚, 等. 基于静态安全性和实时供电能力的输电网络安全等级研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 229-237.
MA Liye, JIA Bin, LU Zhigang, et al. Research on security classification of transmission network considering static security and real-time power supply capability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 229-237.

[7] 刘兴杰, 岑添云, 郑文书, 等. 基于模糊粗糙集与改进聚类的神经网络风速预测[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 62-69.
LIU Xingjie, CEN Tianyun, ZHENG Wenshu, et al. Neural network wind speed prediction based on fuzzy rough set and improved clustering[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 62-69.

[8] DL/T 596-1996 电力设备实验预防性试验规程[S].
DL/T 596-1996 the discipline of the preventive test on electric power equipment experiment[S].

[9] DL/T 475-2006 接地装置特性参数测量导则[S].
DL/T 475-2006 the rules of characteristic parameters on grounding device[S].

[10] 李玲玲, 曹丽鹏, 刘伯颖, 等. 多属性系统中的属性权重分配方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 422-427.
LI Lingling, CAO Lipeng, LIU Boying, et al. The method of attribute weight distribution in multi-attribute system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 30(1): 422-427.

[11] 张文字, 贾嵘. 数据挖掘与粗糙集方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.

[12] 李娟, 薛永端, 徐丙垠, 等. 基于层次分析的电力系统暂态模型评价方法[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2207-2211.
LI Juan, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. An analytic hierarchy process based assessment method for power system transient models[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2207-2211.

[13] 李远远. 基于粗糙集的指标体系构建及综合评价方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
LI Yuanyuan. Research on the construction of indicator system and comprehensive evaluation method based on rough set[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.

[14] 吴奕, 朱海兵, 周志成, 等. 基于熵权模糊物元和主元分析的变压器状态评价[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 1-7.
WU Yi, ZHU Haibing, ZHOU Zhicheng, et al. Transformer condition assessment based on entropy fuzzy matter-element and principal component analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 1-7.

[15] 胡文平, 于腾凯, 巫伟南. 一种基于云预测模型的电网综合风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 35-42.
HU Wenping, YU Teng kai, WU Weinan. A comprehensive power grid risk assessment method based on cloud prediction model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 35-42.

收稿日期: 2016-01-23; 修回日期: 2016-07-26

作者简介:

王思华(1968-), 男, 教授, 研究方向为牵引供电防雷与接地保护工作; E-mail: 1399228418@qq.com

杨桐(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为接地网评估与诊断。

(编辑 魏小丽)