

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181569

基于多维度检测与 Petri 网的变电站接地故障风险评估

陈伟伟¹, 吕盼¹, 纪凤坤¹, 边家瑜¹, 任娟¹, 吴伟丽^{2,3}

(1. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 西安科技大学, 陕西 西安 710054;
3. 安徽正广电电力技术有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘要: 为了能够及时发现接地网潜在故障危害, 针对变电站接地安全提出基于多维度检测的故障风险评估。利用模糊推理 Petri 网推理算法和事故树思想, 在接地网参数多维度检测数据基础上, 考虑空间域、时间域和频率域参数的影响因素及其不确定性, 提出了变电站接地故障风险评估模型。首先, 分析变电站接地网多维度检测参数与接地故障之间的关联性, 利用 Petri 网图形特性描述基本事件故障概率及其不确定逻辑关系, 得出故障风险概率。接着, 结合 Petri 算法和事故树计算各影响因素的贡献度, 以确定导致接地装置故障风险基本事件中的贡献情况。最后, 以实际变电站接地网为例, 对其接地故障风险进行评估, 以验证方法的可行性。研究结果能够为变电站设计提供依据, 也可为电力设备安全预警提供参考, 具有工程应用价值。

关键词: 多维度检测; 事故树; 模糊推理 Petri 网; 安全性评价

Risk assessment of substation grounding fault based on multidimensional detection and Petri net

CHEN Weiwei¹, LÜ Pan¹, JI Fengkun¹, BIAN Jiayu¹, REN Juan¹, WU Weili^{2,3}

(1. Institute of Economics and Technology, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830000, China;
2. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Anhui Zheng-Guang-TV
Electric Power Technology Co., Ltd., Hefei 230000, China)

Abstract: In order to detect potential fault hazards of grounding grid in time, a multi-dimensional fault risk assessment based on grounding safety detection is proposed. Based on the inference algorithm of fuzzy inference Petri net and fault tree, considering the influence factors and uncertainty of parameters in the space domain, time domain and frequency domain, a risk assessment model of substation grounding fault is proposed. Firstly, the relationship between multi-dimensional detection parameters of substation grounding network and grounding fault is analyzed. The basic event failure probability and its uncertain logic relationship are described by using graphical characteristics of a Petri net, and the failure risk probability is obtained. Then, the contribution degree of each influencing factor is calculated on the basis of Petri algorithm and fault tree to determine the contribution of the elementary event leading to the grounding device failure risk. Finally, grounding fault risk of the actual substation grounding grid is evaluated to verify the feasibility of the method. The research results can provide a basis for substation design and supply a reference for safety early warning of power equipment, which has engineering application value.

This work is supported by Project of Xinjiang Uygur Autonomous Region Science and Technology Department (No. 2017D01C417) and Doctoral Initial Fund of Xi'an University of Science and Technology (No. 2017QDJ033).

Key words: multidimensional detection; fault tree; fuzzy reasoning Petri net; safety evaluation

0 引言

接地网是变电站的重要组成部分, 其不仅能够

为各种电气设备提供一个公共参考地, 而且在电力系统故障时能迅速排泄故障电流、减小地电位的升高, 对电力系统的稳定运行、站内工作人员和电力设备的安全起着至关重要的作用。由于电网的发展及其伴随的短路电流水平增高, 对接地网提出了更严格的要求, 同时设备、事故来源的多样化对接地

基金项目: 新疆维吾尔自治区科技厅面上项目资助 (2017D01C417); 西安科技大学博士启动金 (2017QDJ033)

网的要求也不断提高。接地网参数决定了变电站场区设备和人员的安全性, 对其进行安全性评价将有助于提前发现变电站接地网缺陷及其潜在的故障风险。

接地网存在缺陷会造成接地性能下降, 其后果是系统发生接地短路导致地电位异常或分布不均、电力系统中性点的偏移以及电力设备机壳上的危险电压等^[1]。因此对接地网缺陷诊断方法的研究一直是学者们关注的问题^[2], 目前无损评价方法因为具有能够及时了解接地网的现状, 避免事故的发生, 大大减少了停役时间和开挖维修的工作量等优点而受到广泛关注, 常用的无损评价法有 DL/T 标准检测法^[3]、电阻网络节点法^[4-5]、磁感应强度法^[6]、电化学分析法^[7-8]和超声导波检测法等^[9-10], 上述研究大多仅针对某一方面的特性进行检测或评估, 但对于接地网的综合评价具有参考价值。

综合类的变电站接地网检测研究也在逐步展开, 如基于信号输入和输出的接地网状态响应检测方法, 其思路是将变电站接地网不同接地点引下线路间的导体布置和连接等效成系统, 利用历史数据进行趋势分析和比较, 从而对接地网状态进行评估和缺陷诊断^[11-12]。再如, 智能算法的应用类接地网诊断方法有: 集数据采集与监测分析软硬件于一体的接地网智能监测系统^[13]、基于遗传算法的接地网导体缺失诊断方法^[14-15]等。然而由于存在一些引发故障的不确定和随机因素, 采用规范性和标准化数据进行衡量会使评价结果难以反映接地网的真实状况。为此, 文献[16]在考虑人体电阻、土壤电阻率和短路电流持续时间随机特性的基础上, 通过数学概率统计原理, 利用 ALARP 准则评估了接地网人身安全性, 不过对接地装置的故障风险没有做讨论, 而接地网故障除了对人身安全造成威胁外, 对电力设备也危害极大, 综合考虑各种潜在威胁对全面把握接地网安全性十分必要^[17]。

引发接地网故障的因素涉及空间分布、频率分布和时间分布, 具有随机性且缺乏有效的数学表达方法, 处理思路是在检测数据基础上对其分布概率进行初步刻画, 再借助模糊推理 Petri 网特性对离散故障事件概率进行动态分析, 最后结合事故树 (Fault Tree Analysis, FTA) 思想, 对造成变电站接地网故障的影响因素重要度进行排序, 可以提前预防风险。

近年来, Petri 网因为可以对离散事件动态系统进行建模, 对并发事件描述方面具有独特优势, 也可以很好地描述故障的产生和传播过程, 常被用于

电力系统继电保护故障诊断方面的研究^[17-18], 模糊推理 Petri 网 (Fuzzy Reasoning Petri Net, FRPN) 是在 Petri 网基础上扩展的图形化数学建模工具^[18-19], 适合人类知识的表示和人工智能领域的求解, 将其与 FTA 相结合具有推理简单、易于实现的优点。

本文尝试将 FRPN 与 FTA 结合, 构建接地网故障风险评估模型。结合变电站接地网多维实测数据, 提出基于 FRPN 的变电站接地网风险评估方法。分析空间分布、频率分布和时间分布与变电站接地故障的关联性, 考虑多维度检测的影响因素, 利用 Petri 网 (PN) 的图形特性构建可能性故障模型。并利用 PN 模糊推理算法和故障树思想计算了影响因素重要度指标, 利用案例加以分析和验证, 以期及时发现影响变电站接地网故障缺陷的关键因素提供参考。

1 多维度检测与接地故障

1.1 变电站地网多维度检测

接地参数多维度检测涉及空间分布、频率分布和时间分布等多领域, 其中: 空间分布中包括土壤的三维电阻率分布和接地装置的冲击特性 (地电位分布); 频率分布值包括接地装置的工频特性、冲击特性、直流导通性; 时间分布则主要指接地装置的腐蚀度。各关键特征参数的关系及影响如图 1 所示。

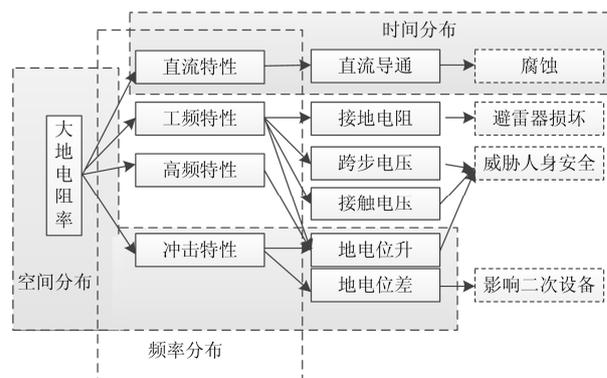


图 1 接地装置的多维度检测体系

Fig. 1 Multidimensional detection system of grounding device

图 1 表明, 大地电阻率参数测量是频率分布和时间分布测试参数的基础。其中, 频率分布特性参数可以反映接地网的导通性、接地电阻的异常、跨步电压、接触电压和地电位升等信息, 进而反映接地电阻腐蚀情况, 以及接地网对避雷器、运行人员人身和二次设备运行安全的影响。腐蚀性又反映了接地网导通性随时间变化的分布。

1.2 接地网故障事故树模型

多维度分布检测可以反映地电网异常、缺陷以

及带来的故障风险，具体用接地网的接地电阻、跨步电压、接触电压、地电位升、地网均压和地电位差等超限参数表示，可以将上述参数精简为接地电阻、地电位差和地电位升。影响上述参数的因素有冲击电流波形与幅值、回路布置、冲击电流位置等，具体关系可用图 2 表示。

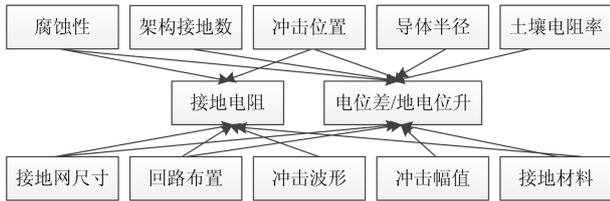


图 2 接地网故障及其影响因素

Fig. 2 Grounding grid fault and its influencing factors

图 2 表明了影响接地网接地电阻和地电位差异常的因素。其中：接地网尺寸、回路布置、冲击波形、接地材料和腐蚀性等因素会对变电站接地电阻产生影响；而接地网架构接地数、腐蚀性、冲击位置、导体半径、土壤电阻率、接地网尺寸材料、回路布置和冲击波形幅值等对变电站接地网地电位差具有明显的影响作用。因此可以将上述因素确定为基本事件。

接地网尺寸、回路布置、接地材料、架构接地数、导体半径等影响因素，在变电站接地网建设规划期间已经确定，冲击信号波形、幅值和冲击位置在运行过程中具有不确定性。冲击信号一般来自接地故障或者雷电冲击，具体有工频接地事故、冲击接地故障、换流站直流侧的接地事故和 GIS 设备的接地装置在 VFTO 过程中的接地事故等。

接地网电阻、电位差和地电位升分布异常又会对避雷器、人身安全和二次保护、控制以及测量系统等造成威胁。高接地电阻会导致高对地电位，也会导致高接触电位差，进而危及人身安全；变电站接地网地电位差异常还会造成二次系统、雷电冲击故障的风险、操作冲击和累积冲击事故风险，上述因素可以作为中间事件。

接地网故障风险引起变电站事故，还需要从限制雷电侵入波的入侵途径来考虑。其中，变电站雷电防护中作为一次、二次系统联系途径的二次电缆更应受到关注。受地网地电位差异常的影响，二次电缆芯线上耦合出感应电压，可能造成电缆末端设备的误动甚至烧毁二次电缆屏蔽层，引发严重事故，最终成为故障树顶事件。

根据上述分析，构建接地故障事故树模型见图 3。对应的中间事件和基本事件也标注在图中。

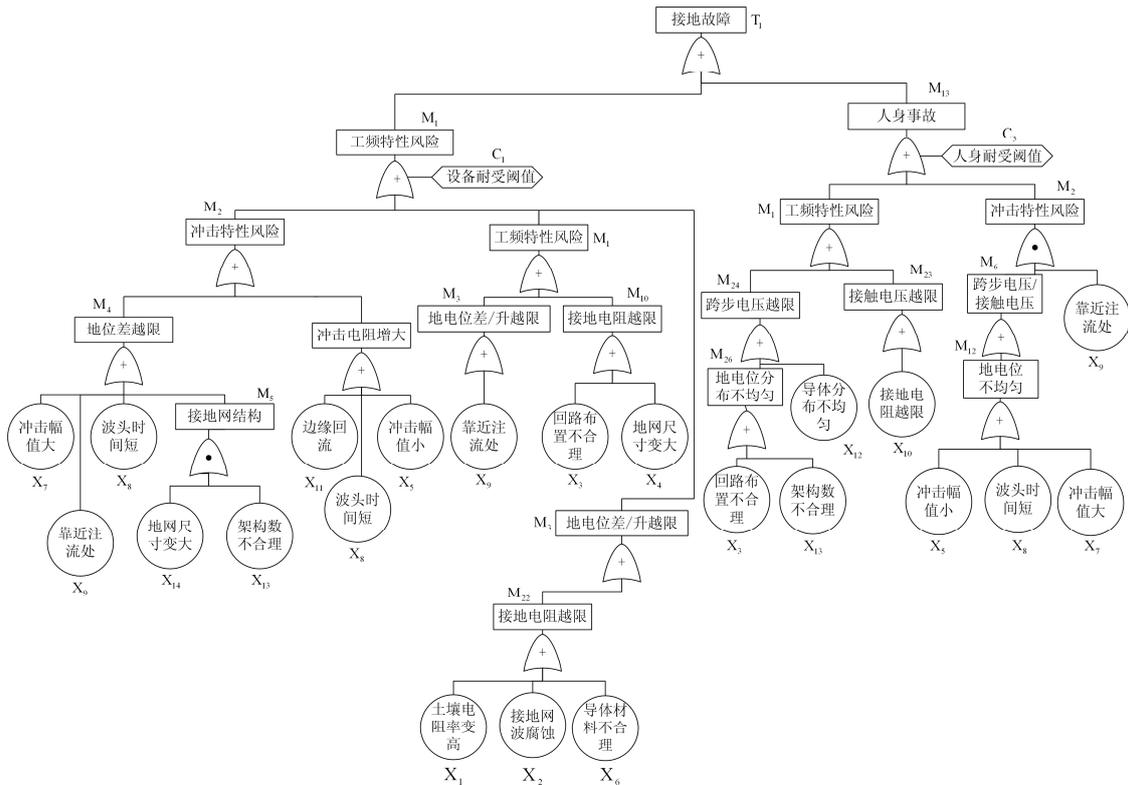


图 3 接地网事故树模型

Fig. 3 Grounding grid fault tree model

1.3 基于多维度检测的接地故障风险 Petri 网

考虑接地参数多维度测量参数不确定性的模糊推理 Petri 网可以定义为

$$FRPN = \{P, T, C, A, O, Q^0\} \quad (1)$$

式中, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 代表库所, 一部分表征影响接地故障风险的参量, 包括接地网尺寸、冲击波形、接地网架构接地数、回路布置、土壤电阻率、接地材料、腐蚀性、冲击位置、导体半径和冲击波形幅值等多维度检测信息, 为初级库所, 另一部分表征接地电阻和地电位差/升等故障状态, 为目标库所; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ 代表变迁状态或者规则集合, 表征各个影响因素参数变化对目标库所的触发; $C = \text{diag}(c_1, c_2, \dots, c_m)$ 代表变迁或者规则的置信度, 即各因素参数变化置信度, 取值在 0 到 1 之间, 值越大表明初级库所导致接地电阻或者接地网地电位差/升异常或故障的可能性越大; $A = \{\delta_{ij}\}$ 为输入矩阵, 表征库所到变迁状态的有向弧, 矩阵元素 $\delta_{ij} \in \{0, 1\}$ 代表库所节点到变迁节点的模糊关系和权重, 表征初始库所过渡到接地故障风险状态的可信度, 即变迁状态的权系数, 当 p_i 是 t_j 的输入时, $\delta_{ij} = 1$, 否则 $\delta_{ij} = 0$; $O = \{o_{ij}\}$ 为规则的输出矩阵 ($n \times m$), $o_{ij} \in \{0, 1\}$ 表示变迁到库所的输出关系和结论可信度, 意义与输入矩阵类似, 表征影响因素达到导致故障风险程度, 即目标库所达到故障风险阈值的概率; $Q^0 = \{\theta_1^0, \theta_2^0, \dots, \theta_n^0\}$ 为库所的初始状态, $\theta^0 \in [0, 1]$ 。

事故树模型中的因果关系事件可以转换为 Petri 网络中库所的变迁, 转换规则对应如下。

表 1 中, x_1 、 x_2 为事故树中的事件, 且在 Petri 网中为库所, c_1 、 c_2 为变迁的置信度, 置信度需要结合变电站接地网的具体情况来确定。

表 1 事故树与 Petri 推理规则对应表

Table 1 Correspondence table of fault tree and Petri reasoning rules

故障树规则	Petri 网络推演算法
逻辑或: $M = x_1 + x_2$	$M = \max\{x_1 \times c_1, x_2 \times c_2\}$
逻辑与: $M = x_1 \cdot x_2$	$M = \min\{x_1, x_2\} \times c$

1.4 接地网故障模糊 Petri 推理算法

为了更好地推理接地故障概率, 采用 t -范数和 s -范数代替传统模糊推理中的最大值和最小值概念^[20], 则有下述规则。

t -范数定义为 $t: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$, 则对于每一个 $a, b, c \in [0, 1]$:

(1) 以 1 作为单位元素, 即 $t(a, 1) = a$;

(2) 是单调的, 即如果 $a \leq b$, 则有 $t(a, c) \leq t(b, c)$;

(3) 服从交换律, 即 $t(a, b) = t(b, a)$;

(4) 服从关联律, 即 $t(t(a, b), c) = t(a, t(b, c))$ 。

s -范数定义为 $s: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$, 则对于每一个 $a, b, c \in [0, 1]$:

(1) 以 0 作为单位元素, 即 $s(a, 0) = a$;

(2) 是单调的, 即如果 $a \leq b$, 则 $s(a, c) \leq s(b, c)$;

(3) 服从交换律, 即 $s(a, b) = s(b, a)$;

(4) 服从关联性, 即 $s(s(a, b), c) = s(a, s(b, c))$ 。

在上述规则基础上, 利用 neg 算子进行下述模糊推理^[21]。

$$\left. \begin{aligned} \overline{\text{neg} Q^k} &= I_{1 \times m} - \overline{Q^k} = \overline{Q^k} \\ v^k &= A^T \otimes (\overline{\text{neg} Q^k}) = A^T \otimes \overline{Q^k} \\ \rho^k &= \text{neg} v^k = \text{neg}(A^T \otimes (\overline{\text{neg} Q^k})) = \overline{A^T \otimes \overline{Q^k}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: neg 算子代表将命题取反, 类似于逻辑非; $I_{1 \times m}$ 代表 m 列 1 向量; k 代表推理阶次; v^k 表示规则前提为假的可信度; ρ^k 表示规则前提为真的可信度; 则有

$$Q^{k+1} = Q^k \oplus \left[(O \cdot C) \otimes \overline{(A^T \otimes Q^k)} \right] \quad (3)$$

Q^k 代表库所 k 阶推理后的状态属性, 其数值表示可信度。根据式(3)推理可以得到第 k 步库所的状态, 推理终止的条件是 $\theta^{k+1} = \theta^k$ 。

2 接地故障风险评估

2.1 人身安全风险

风险是事故概率与事故后果的综合度量, 对于变电站因接触电压导致的人身安全风险, 可定义为接地故障发生概率 P_G 、人员在场概率 P_r 以及危险事故程度 F_r 的乘积。

$$R_1 = P_G \times P_r \times F_r \quad (4)$$

接地事故发生概率可由线路、电缆和开关装置等的年平均故障率计算, 有

$$P_G = (p_L + p_C + p_B) / 2 \quad (5)$$

式中, p_L 、 p_C 、 p_B 表示输电线路、电缆和开关柜的故障率^[22]。

人员在场概率 P_r 可以根据第 1 节所述 Petri 网模糊推理得到。

采用 Dalziel 经验方程中的人体耐受电流限值, 得到

$$I = \frac{k_w}{\sqrt{t_s}} \quad (6)$$

式中: I 是心室纤颤电流(A); k_w 表示人员体重(kg), 当体重为 50 kg 时, 取 0.116, 当体重为 70 kg 时, 取 0.157; t_s 表示电流持续时间(s), 通常分布在 0.03 s 至 3 s 内。

则危险事故程度 F_r 可用式(7)进行计算。

$$F_r = I_r / I \quad (7)$$

式中, I_r 为实际流过人体的电流(A), 式(7)表明, 人体触电后果与流过人体的电流及其持续时间有关, 当使用快速操作保护装置限制故障持续时间时, 人体能承受的电流要高得多, 后果严重程度可以降低。

根据式(2)可推导接触电压 V_t , 有

$$V_t = (R_b + \frac{\rho}{8b})I \quad (8)$$

式中: R_b 为人体电阻参数(Ω); ρ 为大地土壤率($\Omega \cdot m$); b 代表一只脚的接触半径(m), 根据上述参数可计算出接触电压限值。

依据接地网故障对人身伤害特性, 参考文献[23]将对人体伤害风险等级分为完全可接受、完全不可接受和中间 3 个水平: 中间水平指的是当人体风险概率水平在每年 1×10^{-4} 到每年 1×10^{-6} 之间, 此时考虑经济与安全平衡原则, 当改造成本与改造效果不平衡时, 是可以接受不改造的; 而风险概率低于 1×10^{-6} 时, 认为是完全可接受水平, 只要保持目前的状态, 不需要对接地装置进行改造; 而风险概率大于 1×10^{-4} 时, 为完全不可接受范围的水平, 则必须对现有条件下的接地装置进行改造或者重新配置。

2.2 接地装置故障风险

变电站接地装置故障风险 R_2 可以用接地网电位差超过设备耐受电压的事故概率 P_v 、接地故障发生概率 P_G 和接地装置损坏程度 F_d 的乘积进行计算, 如式(9)所示。

$$R_2 = P_G \times \sum_{i=1}^n P_{Vi} \times F_{di} \quad (9)$$

式中, i 代表接地装置顺序。接地网地电位差成因包括入地短路电流和雷击入地电流, 可根据多维检测数据和 Peri 网络推演算法, 计算其作用位置、幅值和频率等概率分布, 进而求得地电位差概率分布, 装置损坏程度则用地电位差与接地装置耐受地电位差相比较得到。

事故概率 P_v 、接地故障发生概率 P_G 可以根据第 1 节所述的 Petri 网模糊推理得到。

依据接地网故障风险造成的经济损失, 将电力设备损坏故障风险也分为三个水平: 当设备损坏的风险概率在 1.6×10^{-4} 到 1.6×10^{-2} 时, 认为是位于中

间水平的; 风险概率低于 1.6×10^{-4} 时, 认为是完全可接受水平; 风险概率高于 1.6×10^{-2} 时, 位于完全不可接受范围的水平。风险水平对应的变电站接地网改造方法参照 2.1 节。

2.3 接地故障风险评估流程

第 1 步, 针对某一变电站接地网, 根据检测结果和近年来的接地故障案例并进行参数阈值确定, 建立基于多维度特性参数的接地装置风险评估模型;

第 2 步, 整合三维土壤电阻率、接地装置腐蚀状态、直流、工频到高频下的地网特征参数, 构建接地装置的多维度评价体系, 整理历史参数, 初步确定各种基本事件的发生概率;

第 3 步, 构建 Peri 网络模型, 利用 Petri 网模糊推理功能, 确定相关影响因素阈值与导致故障的模糊概率, 构建接地网模糊故障树模型;

第 4 步, 确定接地网故障割集, 计算故障风险指标;

第 5 步, 根据 Petri 网, 确定各影响因素对接地故障风险贡献。

故障风险流程参见图 4。

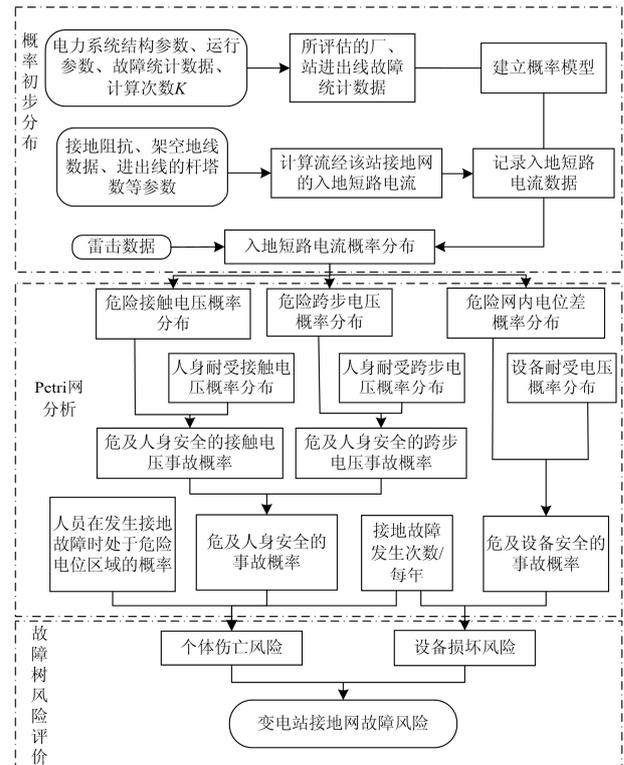


图 4 接地网故障事件风险发展流程

Fig. 4 Grounding grid fault event risk development process

3 算例分析

以特高压直流附近某一换流站为例, 对其进行接地故障风险评估。首先, 用南方测绘高精度手持

GPS S750 定位仪布点, 测点的放样以 E 级 GPS 点为控制点, 使用 S750 接收, 换流站接地网土壤电阻率测点布置参见图 5。

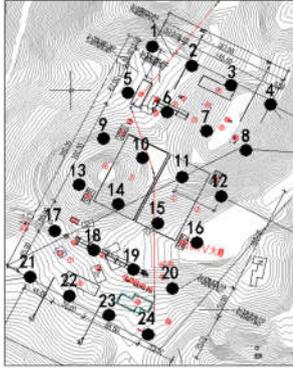


图 5 直流输电工程附近换流站土壤电阻率测点分布图
Fig. 5 Distribution of soil resistivity measurement points at converter station near HVDC transmission project

第 1 步, 根据大地电磁测深得到土壤电阻率分布, 见表 2。

表 2 土壤电阻率

Table 2 Soil resistivity

分层	土层厚度/m	大地电阻率/ $\Omega \cdot m$
1	0.506	2 483.395
2	79.53	3 919.594
3	∞	1 546.943

第 2 步, 梳理变电站接地参数多维度检测数据, 结合历史运维数据及工程经验, 以年为单位确定各影响因素初始状态 $Q^0 = [0, 0, 0.01, 0.02, 0.02, 0.1, 0.7, 0.8, 0.5, 0.06, 0.5, 0.06, 0]^T$ 。结合接地网故障特性和图 3 所示的事故树模型, 构建简化 Petri 网, 如图 6 所示。

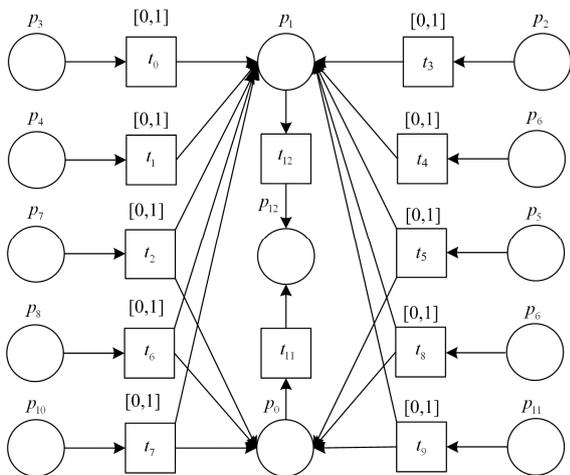


图 6 变电站接地故障 Petri 网

Fig. 6 Petri net for substation grounding fault

图 6 中, $p_i (i = 2, 3, \dots, 11)$ 分别代表接地网尺寸 (p_2)、冲击波形 (p_3)、接地网架构接地数 (p_4)、回路布置 (p_5)、土壤电阻率 (p_6)、接地材料 (p_7)、腐蚀性 (p_8)、冲击位置 (p_9)、导体半径 (p_{10}) 和冲击波形幅值 (p_{11}) 等因素, 为初级库所; p_0 和 p_1 分别代表接地网地电位差和接地电阻, 为中级库所; p_{12} 表示接地故障, 为高级库所。

图 6 中, 有向箭头所指表征库所变迁的方向, $t_i (i = 0, 1, 2, \dots, 9, 11, 12)$ 代表各库所的变迁, 给定其可信度为 $t = \{t_i (i = 0, 1, 2, \dots, 9, 11, 12) | 0.7, 0.95, 0.7, 0.9, 0.95, 0.8, 0.8, 0.9, 0.85, 0.9, 0.85, 0, 7\}$ 。图 6 中, 各低级库所到达阈值后, 以一定的可信度 (t_i) 变迁, 对有向箭头所指的高一级库所产生不利影响。

第 3 步, Petri 网推理过程如下。

根据 **t**-范数、**s**-范数和式(1)规则, 分别得到输入矩阵 $A_{13 \times 12}$ 和输出矩阵 $O_{13 \times 12}$ 。

$$A_{13 \times 12} = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.7 & 0 & 0.7 & 0 & 0 & 0.8 & 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0 & 0 & 0.7 & 0.7 & 0.7 \\ 0.8 & 0 & 0.7 & 0.7 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0.7 & 0 & 0.7 \\ 0.8 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0 & 0.7 & 0 & 0.7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0.8 & 0 & 0 & 0.8 \\ 0 & 0 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$O_{13 \times 12} = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.7 & 0.8 & 0.7 & 0 & 0 & 0.8 & 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0.7 \\ 0.7 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0.7 \\ 0.7 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0 & 0 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0 & 0.7 & 0.7 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0.7 & 0 & 0.7 \\ 0.8 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8 & 0.8 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7 & 0.8 & 0.8 & 0 & 0.8 & 0.8 & 0 & 0 & 0.8 & 0.7 & 0.7 \\ 0.8 & 0.7 & 0.8 & 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0.7 \\ 0 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0.7 \\ 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7 \end{bmatrix}$$

取 $C_{12 \times 12} = \text{diag}(0.8, 0.3, 0.5, 0.2, 0.3, 0.8, 0.9, 0.6, 0.4, 0.7, 0.2, 0.1)$ 为变迁或者规则的置信度, 经推理, 得到库所状态如表 3 所示。

$$Q^0 = [0, 0, 0.01, 0.02, 0.02, 0.1, 0.7, 0.8, 0.5, 0.06, 0.5, 0.06, 0]^T$$

由表 3 可见, 接地故障发生的概率为 0.001, 对应的人身安全风险概率为 0.000 115 5, 设备故障风险概率为 0.000 884 5, 对应的风险分别为 $R_1 = 0.00231$ 、 $R_2 = 0.00412$, 虽然风险值不大, 但

是根据第 2 节划分的人身安全风险概率和电力设备故障概率风险水平可知, 该站的接地网状况对人体安全风险极大, 位于完全不可接受范围的区域, 必

须进行改造。电力设备故障风险位于中间水平, 改造时可以考虑经济与安全相平衡的原则。综合起来, 该变电站接地网改造需以考虑人身安全为主。

表 3 模糊 Petri 网推理过程

Table 3 Reasoning process of fuzzy Petri nets

推理过程	元素												
Q^1	0	0	0.01	0.02	0.02	0.10	0.7	0.8	0.5	0.06	0.5	0.06	0
Q^2	0	0	0.01	0.02	0.02	0.10	0.7	0.8	0.5	0.06	0.5	0.06	0
Q^3	0.001	0.013	0.01	0.02	0.02	0.10	0.7	0.8	0.5	0.06	0.5	0.06	0
Q^4	0.005	0.013	0.01	0.02	0.02	0.10	0.7	0.8	0.5	0.06	0.5	0.06	0.001
Q^5	0.005	0.013	0.01	0.02	0.02	0.10	0.7	0.8	0.5	0.06	0.5	0.06	0.001

为了评价基本事件对接地网风险的贡献度, 定义仅有一个基本事件为真时, 故障发生的可信度作为其对故障的贡献度 C_{on} , 计算结果见表 4。

表 4 库所的重要度指标

Table 4 Importance indicators of repositories

库所	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9	p_{10}	p_{11}
C_{on}	0.17	0.45	0.23	0.19	0.37	0.52	0.32	0.61	0.22	0.54

由表 4 可知基本事件对故障风险的贡献重要度, 其中 p_9 、 p_{11} 和 p_7 的贡献度最大, 表明该站接地网受到冲击电流的冲击位置、冲击波幅值和接地材料的影响较大。因此在维护该变电站接地网时, 工程人员需重点加强这些薄弱环节的防护。

4 结论

论文提出了基于多维度检测与模糊 Petri 网的变电站接地网故障风险评估方法, 首先对影响接地网故障的因素进行分析, 指出了影响因素涉及时域、频域和空间领域, 在分析各因素的作用机理后, 利用 Petri 网络特性模糊推理了故障概率, 计算接地网故障风险评估指标, 利用实际变电站接地网作为研究算例, 结果表明了该方法的可行性。

此外, 为了评估各因素的作用程度, 定义了贡献重要度指标, 并加以计算, 结果展示了各因素对接地网故障风险贡献的重要程度, 可为电力工程人员维护接地网安全提供有效的参考。

参考文献

[1] 周楠. 变电站接地技术研究综述[J]. 工程技术(文摘版), 2016(10): 00151-00151.
ZHOU Nan. Review of research on substation grounding technology[J]. Engineering Technology (Abstract Edition), 2016(10): 00151-00151.

[2] 张波, 何金良, 曾嵘. 电力系统接地技术现状及展望[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2569-2582.

ZHANG Bo, HE Jinliang, ZENG Rong. State of art and prospect of grounding technology in power system[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2569-2582.

[3] 接地装置特性参数测量导则: DL/T475—2006[S]. Guide for measurement of grounding connection parameter: DL/T475—2006[S].

[4] 刘健, 倪云峰, 王森, 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, WANG Sen, et al. Grounding grids corrosion diagnosis with touchable nodes deviation[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 67-72.

[5] 冯南战, 李志忠, 李亨特, 等. 高压变电站接地网的腐蚀防护与监测技术研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30(3): 331-338.
FENG Nanzhan, LI Zhizhong, LI Hengte, et al. Review on research progress of technologies for corrosion protection and monitoring of grounding grid of high voltage transformer substation[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2018, 30(3): 331-338.

[6] 刘洋, 崔翔, 齐磊, 等. 基于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, QI Lei, 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.

[7] YANG H, PAN D. A numerical calculation method of substation grounding grids based on a new mathematical model[C] // 2008 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, IEEE, November 2-5, 2008, Kunming, China: 807-810.

[8] ZHANG B, ZHAO Z, CUI X, et al. Diagnosis of breaks in substation's grounding grid by using the electromagnetic method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2): 473-476.

[9] 焦敬品, 钟茜, 吴斌, 等. 窄板中超声导波传播特性试

- 验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(7): 255-275.
- JIAO Jingpin, ZHONG Qian, WU Bin, et al. On propagation characteristics of guided waves in narrowband[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(7): 255-275.
- [10] 陈振华, 谢飞鸣, 卢超, 等. 基于虚拟仪器的扁钢内部缺陷超声三维成像方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(1): 181-184.
- CHEN Zhenhua, XIE Feiming, LU Chao, et al. Ultrasonic three dimensional imaging method for inner defect of spring flat steel sheet based on virtual instrument technology[J]. Computer Measurement & Control, 2017, 25 (1): 181-184.
- [11] DICK E P, ERVEN C C. Transformer diagnostic testing by frequency response analysis[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1978, 97(6): 2144-2153.
- [12] NARAYANA G S, BADGUJAR K P, KULKARNI S V. Factorisation-based transfer function estimation technique for deformation diagnostics of windings in transformers[J]. IET Electric Power Applications, 2013, 7(1): 39-46.
- [13] 刘健, 芮骏, 张志华, 等. 智能接地配电系统[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 130-134.
- LIU Jian, RUI Jun, ZHANG Zhihua, et al. Smart grounding power distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 130-134.
- [14] 马晋佩. 基于协同进化遗传算法的接地网导体缺失诊断研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- MA Jinpei. Study on conductor missing diagnosis of grounding grid based on co-evolutionary genetic algorithm[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [15] 史庆岩, 何为, 杨帆. 基于模拟退火遗传算法的接地网故障磁场诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 52-55.
- SHI Qingyan, HE Wei, YANG Fan. Magnetic fault diagnosis of grounding grid based on simulated annealing genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 52-55.
- [16] 潘文霞, 柴守江, 周建文, 等. 基于最低合理可行准则的接地网安全风险评估[J]. 电工技术学报, 2017, 32(21): 128-134.
- PAN Wenxia, CHAI Shoujiang, ZHOU Jianwen, et al. Risk assessment research based on as low as reasonably practicable principle for grounding grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21): 128-134.
- [17] 刘文军, 仇彦军, 孙立臣. 500 kV 输电线路杆塔接地网不同环境下优化降阻方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 98-106.
- LIU Wenjun, QIU Yanjun, SUN Lichen. Research on resistance reducing scheme optimization of 500 kV transmission line tower grounding grid in different environments[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 98-106.
- [18] 董海鹰, 刘玲. 基于 Petri 网和故障树的变电站故障诊断方法[J]. 测试技术学报, 2007, 21(2): 176-182.
- DONG Haiying, LIU Ling. An approach to substation fault diagnosis based on Petri Net and fault tree[J]. Measurement & Control Technology, 2007, 21(2): 176-182.
- [19] 孙月琴, 胡晓飞, 王海港, 等. 基于 Petri 网理论的智能签票系统防误算法的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 110-115.
- SUN Yueqin, HU Xiaofei, WANG Haigang, et al. Design and implementation of protection scheme intelligent anti-misoperation algorithm based on Petri net theory[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 110-115.
- [20] SURAJ Z. Parameterised fuzzy Petri nets for approximate reasoning in decision support systems[J]. Communications in Computer & Information Science, 2012: 928.
- [21] XU Z, SHUAI Y, ZHA X. Method of power grid fault diagnosis using intuitionistic fuzzy Petri nets[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2018, 12(2): 295-302.
- [22] RAJARAMAN P, SUNDARAVARADAN N A, MALLIKARJUNA B, et al. Robust fault analysis in transmission lines using synchrophasor measurements[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 108-110. DOI: 10.1186/s41601-018-0082-4
- [22] DIMOPOULOS A, GRIFFITHS H, HARID N, et al. Proposal for probabilistic risk assessment in grounding systems and its application to transmission substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2219-2226.

收稿日期: 2018-12-18; 修回日期: 2019-03-19

作者简介:

陈伟伟(1989—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向电力系统运行控制及规划设计;

吕盼(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向电力系统分析与规划;

纪凤坤(1987—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向电力系统分析。

(编辑 许威)