

基于合作博弈和云模型的小型变电站故障诊断模型研究

柯挺,田松林,周海

(南方电网深圳数字电网研究院有限公司,广东 深圳 518000)

摘要:为解决小型变电站故障准确度较低的问题,提出构建基于合作博弈和云模型的小型变电站故障诊断模型。通过分析故障发生特点和原因,确立诊断指标体系;选用熵值法和专家赋权法分别得出指标权重,利用合作博弈方法,计算组合权重一致性系数和组合权值,经过归一化处理得到最终拟合权重;通过云模型实现各指标的定量表示,得出加权偏离度,根据加权偏离度确定最终诊断结果。实验结果表明,所建模型的指标权重分配满足一致性要求,故障位置和程度的诊断准确度高,可为变电站安全运行提供更多保障。

关键词:合作博弈;云模型;小型变电站;故障诊断模型;熵值法

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed24783

Research on Fault Diagnosis Model of Small Substation Based on Cooperative Game and Cloud Model

KE Ting, TIAN Songlin, ZHOU Hai

(Southern Power Grid Shenzhen Digital Power Grid Research Institute Co., Ltd.,
Shenzhen 518000, Guangdong, China)

Abstract: In order to solve the problem of low accuracy of small substation fault diagnosis, a small substation fault diagnosis model based on cooperative game and cloud model was proposed. By analyzing the characteristics and causes of faults, the diagnosis index system was established. Entropy method and expert weighting method were used to obtain index weight, cooperative game method was used to calculate consistency coefficient and combination weight, and the final fitting weight was obtained through normalization. Through the cloud model, the quantitative expression of each index was realized, and the weighted deviation degree was obtained. According to the weighted deviation degree, the final diagnosis result was determined. The experimental results show that the index weight distribution of the established model meets the consistency requirements, and the diagnostic accuracy of fault location and degree is high, which can provide more guarantee for the safe operation of substation.

Key words: cooperative game; cloud model; small substation; fault diagnosis model; entropy method

随着电网规模的不断扩大,其设备种类也日渐多元化,增加了电网结构的复杂性,给电网安全运行带来了更多挑战^[1]。小型变电站作为电网和用户之间的连接纽带,能够确保电能安全传输,但小型变电站由于占地面积小,电气设备的集中化程度高,内部设备布置复杂度高,对于故障的诊断难度更大。故障诊断的方法有很多,不同方法所表现出的结果也会有差异,因此,对小型变电站采用科学合理的方法进行故障诊断具有重要的意义。

国内大量学者对此展开了研究,如梁文武等人^[2]利用粗糙集方法完成变电站设备故障诊断。使用子区域分割与粗糙集约简的方式确定所有子区域故障生成的规则集合,简化诊断的复杂性,去除不确定信息;通过二元推理脉冲神经网络系统分析和显示故障信息,得出故障诊断结果。张雪霏等人^[3]研究了基于改进形态梯度法的故障诊断策略。利用形态梯度算法对设备的进出电流信号进行处理,无需故障检测器,也不需要故障分类器,还能通过降噪处理提高电流信号质

基金项目:南方电网深圳数字电网研究院有限公司科技创新项目(2100000292021030102DW00017)

作者简介:柯挺(1983—),男,硕士,工程师,主要研究方向为配电网规划运维,Email:ktkt518@163.com

量,改善诊断结果的可靠性。Ajagekar Akshay 等人^[4]提出了一种基于混合量子计算的电力系统故障诊断深度学习框架。将条件受限玻尔兹曼机的特征提取能力与深度网络的高效分类相结合,能够有效检测变电站设备的故障。上述方法虽然可以对电力设备进行故障检测,但由于没有考虑权重计算问题,导致诊断结果的准确度不高。程方明等人^[5]提出变电站火灾风险评价指标体系及云模型分析。采用序关系分析法和熵权法确定指标权重,云模型作为评价模型,实现变电站火灾检测。但该方法采用的熵权法使用范围有限,导致检测精准度不高。

为解决以上方法存在的问题,提出一种基于合作博弈和云模型的小型变电站故障诊断模型。与上述方法相比,利用合作博弈论确定指标权重,能够有效改善权重设置不合理的问题;而云模型可以综合分析信息的随机性与模糊性,通过两种算法的结合有效提高故障诊断结果的准确度。

1 故障诊断模型

1.1 指标体系构建

针对上述故障类型,建立小型变电站故障诊断指标体系,分别从以下几方面确定造成故障的因素。

1)设备因素:电气设备决定了小型变电站是否能正常运行,若电气设备出现故障会为小型变电站运行造成极大风险,导致严重后果。

2)人为因素:操作人员的精力不集中或身体不适,会导致小型变电站出现运行故障。因此,人为风险也是导致故障的重要因素。

3)管理因素:若缺乏管理,工作没有落实到位,也可能会导致故障的发生。

4)环境因素:一些电气设备由于常年暴露在室外,受天气影响较大,设备质量逐年下降,因此环境因素也是造成故障出现的重要因素。

对于上述影响小型变电站故障的一级指标,建立二级指标体系,小型变电站故障诊断指标体系如表1所示。

1.2 基于合作博弈算法的指标权重确定

由上述分析可知,导致小型变电站出现故障的因素很多,因此指标权重确定是小型变电站故障诊断过程中的难题。单一的赋权法已经难以满足故障诊断需求。为此,本文利用组合博弈论

解决赋权问题^[6]。

表1 小型变电站故障诊断指标体系

Tab.1 Fault diagnosis index system of small substation

总目标	一级指标	二级指标
变电站故障诊断 指标体系	设备因素	设备负荷率
		操作熟练度
		电网负荷率
		设备老化度
		设备清洁度
		超负荷作业
	人为因素	质量问题
		设计缺陷
		设备选型
		带病工作
		心态异常
		辨识能力差
管理因素	指挥失误	
	违规作业	
	监护失误	
	责任机制	
环境因素	隐患整改	
	日常监督	
	火灾	
	雷电	
		覆冰
		大风

小型变电站的故障指标具有明显的分布式和层次化特点,基于不同的故障指标调用不同的层次灵活处理。将每个故障指标层次分别求解的结果组合,得到小型变电站故障诊断组合方案合集,在博弈规则下求解小型变电站故障恢复的均衡解。

1.2.1 合作博弈在权重分配问题上的数学描述

假设在小型变电站故障诊断过程中,待诊断目标的数量为 n ,利用 m 种单一诊断方法,则诊断算法集合表示为 $M = \{1, 2, \dots, m\}$ 。假设所有诊断方法集合的子集表示为 2^M ,则任意子集就形成了该问题的联盟,若单一诊断方法结成同盟后,将最小误差作为目标,就可以作为整体来诊断某一问题。

若 X_{ik} 为方法 i 针对目标 k 的诊断结果,则有 $e_{ik} = X_k - X_{ik}$, X_k 为多个单一诊断方法对于此目标诊断的平均值; e_{ik} 为某单一方法误差, $i = 1, 2, \dots, m, k = 1, 2, \dots, n$ 。利用 $X_k = l_1 X_{1k} + l_2 X_{2k} + \dots + l_m X_{mk}$ 描述多个诊断方法的组合诊断值, l_1, l_2, \dots, l_m 为 m 个算法的权重系数,且 $\sum_{i=1}^m l_i = 1, l_i \geq 0$ 。

因此,能够获得 k 个待诊断目标的组合误差:

$$e_k = \sum_{i=1}^m l_i (X_k - X_{ik}) = \sum_{i=1}^m l_i e_{ik} \quad (1)$$

则合作诊断的误差平方和计算公式如下:

$$e(M) = \sum_{k=1}^n (e_k)^2 = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n l_i e_{ik} \quad (2)$$

通过构建合作博弈模型,将多目标决策问题转换成线性的数学问题^[7],降低了问题的复杂性。

1.2.2 诊断指标权重确定

本文所选的两种组合赋权方法为熵值法和专家赋值法,其中专家赋值法较为简单,即为通过相关领域专家对上述诊断指标进行直接打分,而熵值法的实现过程相对复杂,本文将重点分析该方法权重计算过程。

熵值赋权法属于较为客观的方式,能够分析出事物的离散度^[8]。假设诊断需要利用 a 组数据和 j 个诊断指标,构成状态矩阵 Y_{aj} :

$$Y_{aj} = \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1j} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ y_{a1} & \cdots & y_{aj} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: y_{aj} 为模糊后的变电站状态数据。

利用信息熵描述指标 j 的无序性^[9]:

$$l_j = K \sum_{d=1}^D p(y_d) \ln p(y_d) \quad (4)$$

$$p(y_d) = y_d / \sum_{d=1}^D y_d \quad (5)$$

式中: y_d 为第 d 个状态值; D 为所有状态类型; $p(y_d)$ 为 y_d 发生的几率。

常数 K 的计算公式如下:

$$K = 1 / \ln D \quad K > 1 \quad (6)$$

利用上述组合博弈策略确定权重的核心,多种单一权重计算方法形成联盟后,视其为整体,利用组合博弈方式计算权重,提高组合权重的合理性^[10]。即以各类方法 $i(i = 1, 2, \dots, m)$ 的权重向量 $q(i)$ 为激励,得到 m 种组合权重。

1) 计算组合权重一致性系数。利用 L_i 表示一致性系数,该系数是通过组合评价方法得到的,计算公式如下^[11-12]:

$$L_i = \frac{\sum_{j=1}^n [W_j(i) - \overline{W(i)}] \cdot [W_j(m-1) - \overline{W(m-1)}]}{\sum_{j=1}^n [W_j(i) - \overline{W(i)}]^2 \cdot [\sum_{j=1}^n W_j(m-1) - \overline{W(i)}]^2} \quad (7)$$

式中: $W_j(i)$ 为指标 j 通过方法 i 得到的权重值; $\overline{W(i)}$ 为通过方法 i 得到的平均权重值; $W_j(m-1)$ 为第 $m-1$ 种组合权重值; $\overline{W(m-1)}$ 为第 $m-1$ 种组合的平均权重值; n' 为指标数量。

2) 计算组合权值。组合权重值的计算公式

表示为

$$W' = \sum_{i=1}^m W(i) L_i \quad (8)$$

式中: $W(i)$ 为方法 i 的权重值。

3) 归一化处理。通过上述公式计算出组合权值后,对其进行归一化处理即可获得最后的拟合权重 W 。

1.3 云诊断模型

云模型是一种有效集成信息随机性和模糊性,并实现定性概念与定量数值之间的不确定性转换的模型。确定诊断指标权重后,通过构建云模型实现小型变电站故障诊断,具体诊断步骤如下:

步骤1:将确定的诊断指标表示为集合形式,一级与二级指标分别表示为 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$, $U_i = \{U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{in}\}$ 。

步骤2:根据一级和二级指标集合,设置评语集合 S ,规定 S 值的范围是 $[0, 1]$,则定性评语的期望值和熵值公式如下:

$$\begin{cases} E_{sj} = (c_{\min} + c_{\max}) / 2 \\ E_{vj} = (c_{\max} - c_{\min}) / 2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: E_{sj} , E_{vj} 分别为期望值与熵值; c_{\min} , c_{\max} 分别为最小和最大期望值。

步骤3:通过计算期望值与熵值构建云模型,获取 t 组数据构成决策矩阵^[13],则 t 组数值明确的数据即可建立起一个云模型:

$$F_j = (F_{j1} + F_{j2} + \dots + F_{jt}) / t \quad (10)$$

$$F_i = \frac{\max(F_{j1} + F_{j2} + \dots + F_{jt}) - \min(F_{j1} + F_{j2} + \dots + F_{jt})}{t} \quad (11)$$

式中: F_j , F_i 分别为指标值和所有数据组的数值; F_{j1} 为指标 j 在指标数量为 1 下的指标值; F_{jt} 为指标 j 在不同指标数量下的指标值。

利用上述的期望值与熵值即可形成云模型的数字特征量^[14-15]。

步骤4:根据构建的云模型,计算综合云的重心矢量。 n_0 维云模型的重心可利用矢量描述:

$$T = (T_1, T_2, \dots, T_{n_0}) = \zeta \times \eta \quad (12)$$

式中: ζ , η 分别为云重心位置与高度矢量。

步骤5:运算综合云重心矢量,获取位置和高度矢量的综合加权偏离度 θ 为

$$\theta = \sum_{j=1}^{n'} T_j \cdot w_j \quad (13)$$

式中: w_j 为第 j 个指标权重。

步骤6:利用云模型确定小型变电站故障诊断的4种状态,并通过评语集合的形式表示:

$$S = \{s_1, s_2, s_3, s_4\} \quad (14)$$

评语值与区间对应关系为:[0, 0.25]为正常,[0.25, 0.5]为注意,[0.5, 0.75]为异常,[0.75, 1]为严重。

加权偏离度 θ 越小,表明变电站状态越好,不同数值对应不同的评语集合。通过上述模型即可完成小型变电站的故障诊断。

2 实验与分析

为验证所建模型的有效性,将某小型变电站作为实验对象。该小型变电站总占地面积为1 245.5 m²,将主变的中心线作为整体布置的轴线。该小型变电站智能化程度较高,采用多种数字化技术,提高了通信速度。同时利用层次化思想确定小型变电站处理逻辑,小型变电站整体架构如图1所示。

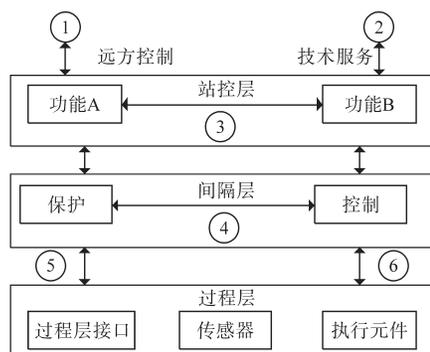


图1 小型变电站整体架构示意图

Fig.1 Schematic diagram of overall structure of small substation

图1中,各数字表示接口名称,每个接口的作用分别如下:接口1和接口2负责传输站控层与交换中心之间的数据;接口3和接口4分别负责站控层、间隔层内所有数据的传输;接口5和接口6实现间隔层与过程层之间全部数据的传输。

实验中所用的数据是2020—2021年该变电站所有运维数据,主要包括逆变器监控信息,例如电压、电流等;环境数据,如组件温度、辐射、风速等;故障数据,如故障出现时间、编码等。

2.1 权重一致性检测

利用本文提出的合作博弈算法对各诊断指标进行赋权,得到指标最终权重如表2所示。

针对上述赋权结果,利用权重一致性检验公式测试权重设定是否合理:

表2 指标权重表

Tab.2 Index weight table

一级指标	一级指标对应权重	二级指标	二级指标对应权重
设备因素	0.4	设备负荷率	0.05
		操作熟练度	0.01
		电网负荷率	0.05
		设备老化度	0.17
		设备清洁度	0.02
		超负荷作业	0.06
		质量问题	0.01
		设计缺陷	0.02
		设备选型	0.01
		人为因素	0.24
心态异常	0.02		
辨识能力差	0.02		
指挥失误	0.05		
违规作业	0.08		
监护失误	0.03		
管理机制	0.08		
隐患整改	0.12		
管理因素	0.3	日常监督	0.10
		火灾	0.03
		雷电	0.04
环境因素	0.1	覆冰	0.01
		大风	0.02

$$CI = \sum_{j=1}^n w_j CI_j \quad (15)$$

式中: CI 为整体权重一致性; CI_j 为指标 j 的权重一致性。

若每个一级指标的验证结果为 $CI < 0.1$,则表明指标权重设置合理。经过计算,本文4个一级指标的计算结果分别为:设备风险故障 $CI = 0.017$,人为风险故障 $CI = 0.045$,管理风险故障 $CI = 0.06$,环境风险故障 $CI = 0.024$ 。

综上所述,所有一级指标都能满足 $CI < 0.1$ 的要求,说明本文方法的诊断指标权重设置合理。这是因为合作博弈方法在拟合各项指标权重时,符合统一约束力要求,能够准确分配指标向量的实际权重。

2.2 故障诊断准确度检测

为验证所提方法在小型变电站不同距离下的故障诊断准确度,采用所提方法与文献[2]方法、文献[3]方法、文献[4]方法、文献[5]方法进行实验对比,采用Matlab仿真软件构建变电站仿真图,其中黑色点代表的是故障点, $L_1 \sim L_5$ 表示不同距离。分别测试不同方法在小型变电站不同距离下的故障诊断准确度,测试结果如图2所示。

由图2可知,所提方法在不同距离下能够将小型变电站的5处故障均诊断出来,而文献[2]~文献[5]方法则存在漏诊的现象,由此得出,所提方

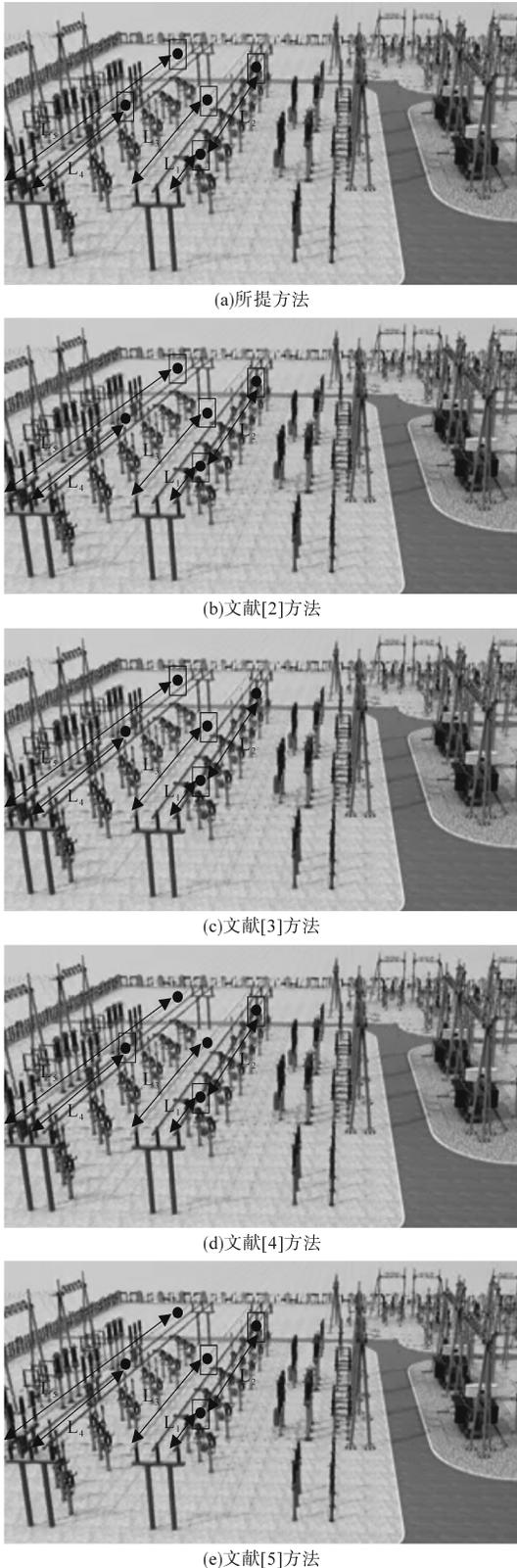


图2 不同方法的故障诊断结果

Fig.2 Fault diagnosis results of different methods

法在不同距离下对小型变电站的故障诊断准确度高于其他方法,主要是由于所提方法构建的模型利用组合博弈论解决赋权问题,确定诊断指标权重后,将多目标决策问题转换成线性的数学问

题,使算法变得更为简单,故障检测准确度更高。

上文说明了所提方法对故障位置的诊断准确度高,能够找到故障所在位置,对于故障的程度诊断需要进一步检验。该小型变电站的某变压器、电容器和母线本身存在故障,根据诊断指标,利用所建模型分别对小型变电站中某变压器、电容器和母线进行故障诊断,诊断结果如图3~图5所示。

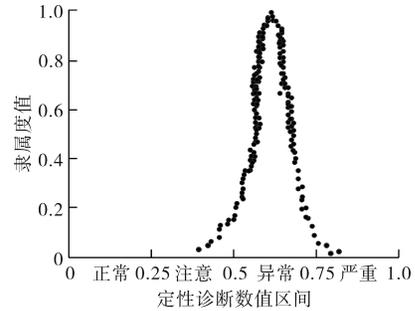


图3 变压器故障诊断结果

Fig.3 Fault diagnosis results of transformer

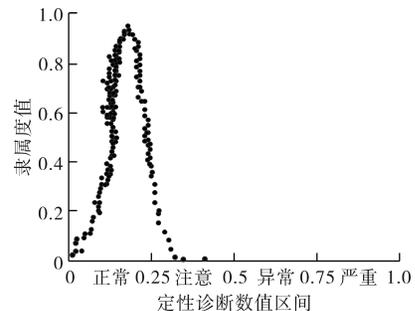


图4 电容器故障诊断结果

Fig.4 Fault diagnosis results of capacitor

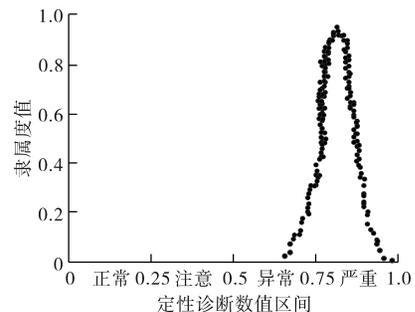


图5 母线故障诊断结果

Fig.5 Fault diagnosis results of bus

由图3~图5可以看出,该小型变电站中,变压器的诊断结果为异常,电容器为正常,母线故障非常严重。将所提方法的诊断结果与实际结果进行对比分析,此结果和三种设备的实际运维结果相同,说明所提方法模型的故障程度诊断准确度高,这主要是由于云模型可以综合分析信息的随机性与模糊性,计算综合云的重心矢量,获取位置和高度矢量的综合加权偏离度,使得对故

障程度的诊断准确度更高。

3 结论

为了解决小型变电站故障诊断准确度较低的问题,提出基于合作博弈和云模型的小型变电站故障诊断模型。通过合作博弈算法确定诊断指标的权重,综合分析指标异常波动现象;采用云模型对指标进行定性定量计算,生成诊断集合,获得诊断结果。实验表明,所提方法模型的权重一致性检验值低于0.1,且能够有效诊断出小型变电站中各类电气设备的故障所在位置和故障程度,说明所提方法具有可行性,可为变电站安全运行提供更多保障。

参考文献

- [1] 吴国强,姚建锋,管敏渊,等.基于DBSCAN的电力变压器故障诊断[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(12): 1172-1179.
WU Guoqiang, YAO Jianfeng, GUAN Minyuan, et al. Fault diagnosis of power transformer based on DBSCAN[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(12): 1172-1179.
- [2] 梁文武,朱维钧,李辉,等.基于粗糙集的智能变电站保护设备仿生故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 132-140.
LIANG Wenwu, ZHU Weijun, LI Hui, et al. A rough set-based bio-inspired fault diagnosis method for smart substation protection equipment[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 132-140.
- [3] 张雪霏,贺兰菲,高晓晶,等.基于改进的形态梯度法的变电站母线故障检测技术[J]. 水电能源科学, 2021, 39(3): 159-163.
ZHANG Xuefei, HE Lanfei, GAO Xiaojing, et al. Fault detection technology of substation bus based on improved morphological gradient method[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(3): 159-163.
- [4] AJAGEKAR Akshay, YOU Fengqi. Quantum computing based hybrid deep learning for fault diagnosis in electrical power systems[J]. Applied Energy, 2021, 303: 117628.
- [5] 程方明,牛巧霞,刘文辉.变电站火灾风险评价指标体系及云模型分析[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42(4): 664-673.
CHENG Fangming, NIU Qiaoxia, LIU Wenhui, et al. Fire risk evaluation index system in substation and cloud model analysis [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(4): 664-673.
- [6] 王劭菁,马文嘉,王丰华,等.基于虚拟样本生成技术与概率神经网络的接地网故障诊断[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 309-316.
WANG Shaojing, MA Wenjia, WANG Fenghua, et al. Fault diagnosis of grounding grid based on virtual sample generation and probabilistic neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 309-316.
- [7] 张文龙,鲁志伟,苏侃,等.基于CDEGS的变电站接地网缺陷诊断研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(6): 22-28, 35.
ZHANG Wenlong, LU Zhiwei, SU Kan, et al. Research on defect diagnosis of substation grounding grid based on CDEGS[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(6): 22-28, 35.
- [8] 王永红,焦重庆,肖冰,等.变电站接地网上两点间电位差的特性[J]. 中国电力, 2021, 54(1): 150-158.
WANG Yonghong, JIAO Chongqing, XIAO Bing, et al. The potential difference characteristics between two points on grounding grid of substation[J]. China Electric Power, 2021, 54(1): 150-158.
- [9] 沈小军,于忻乐,王远东,等.变电站电力设备红外热像测温数据三维可视化方案[J]. 高电压技术, 2021, 47(2): 387-395.
SHEN Xiaojun, YU Xinle, WANG Yuandong, et al. Three-dimensional visualization scheme of infrared thermal temperature measurement data for substation electric power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 387-395.
- [10] 黄彬,秦逸帆,吕志瑞,等.变电站变压器运行损耗计算与智能降耗探讨[J]. 变压器, 2020, 57(1): 68-72.
HUANG Bin, QIN Yifan, LÜ Zhirui, et al. Discussion on operation loss calculation and intelligent loss reduction of transformer in substation[J]. Transformer, 2020, 57(1): 68-72.
- [11] 边晓旭,谢强.基于地震动聚类的变电站设备易损性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2671-2681.
BIAN Xiaoxu, XIE Qiang. Fragility analysis of substation equipment based on ground motion clustering[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2671-2681.
- [12] 张波,唐亮,梁晓伟,等.基于遗传粒子群法的配电网故障定位研究[J]. 计算技术与自动化, 2021, 40(1): 33-37.
ZHANG Bo, TANG Liang, LIANG Xiaowei, et al. Research on fault location of distribution network based on genetic particle swarm optimization[J]. Computing Technology and Automation, 2021, 40(1): 33-37.
- [13] 程晓磊,王鹏,王渊,等.基于大数据的配电网故障诊断预测模型设计[J]. 电气传动, 2022, 52(2): 61-66.
CHENG Xiaolei, WANG Peng, WANG Yuan, et al. Design of fault diagnosis and prediction model for distribution network based on large data[J]. Electric Drive, 2022, 52(2): 61-66.
- [14] 肖辅盛,罗艳,王庭刚,等.基于故障率分级的输电设备检修优化方法[J]. 计算技术与自动化, 2021, 40(2): 36-40.
XIAO Fusheng, LUO Yan, WANG Tinggang, et al. Transmission equipment maintenance optimization method based on failure rate classification[J]. Computing Technology and Automation, 2021, 40(2): 36-40.
- [15] 盖志强,洪卫东,张华峰.基于FIMD和Hilbert变换的线路行波故障诊断[J]. 电气传动, 2021, 51(24): 16-21.
GAI Zhiqiang, HONG Weidong, ZHANG Huafeng. Fault diagnosis of line traveling wave based on FIMD and Hilbert transform[J]. Electric Drive, 2021, 51(24): 16-21.