

基于新型关联规则算法的开关柜局放程度分类研究

郑文栋¹, 黄成军¹, 杨宁², 江秀臣¹

(1. 上海交通大学, 上海 200240; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 为对开关柜绝缘状态进行评估,文中介绍了一种新型的关联规则数据挖掘(ARM)算法,用于识别开关柜局部放电的严重程度。该算法采用模糊C均值聚类(FCM)的方法划分局部放电特征量区间,基于改进型Apriori寻找满足最小支持度和最小可信度的候选集,对候选集进行递推和多次检索以产生用于分类的关联规则库。基于关联规则库对采集的10 kV开关柜中的多组针尖电晕局部放电信号进行模糊推理,结果表明采用关联规则的局部放电分类识别率高,分类结论准确,为开关柜绝缘状态评估提供了一定的理论依据和实际应用价值。

关键词: 开关柜; 局部放电; 关联规则数据挖掘; 模糊C均值聚类; Apriori算法; 模糊推理

中图分类号: TM85 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2014)02-0023-06

Classification of Partial Discharge Level in Switchgear Cabinet Based on the Improved Association Rules Mining Algorithm

ZHENG Wendong¹, HUANG Chengjun¹, YANG Ning², JIANG Xiuchen¹

(1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: An improved association rules mining (ARM) algorithm is proposed for classification and recognition of partial discharge level to estimate the insulation status in switchgear cabinet. The method of fuzzy C-means clustering(FCM) is used to divide the range of partial discharge characteristic amounts. The Apriori algorithm is improved to find the candidate item sets which meet the minimum support and the minimum confidence. Recursion and retrieval are executed repeatedly to establish an association rule base for classification. A partial discharge experiment platform for 10 kV switchgear cabinet is set up, and several groups of corona partial discharge signals at different severity levels are detected for fuzzy reasoning. The results show that the signals can be classified into three severity levels accurately. The proposed classification method may benefit insulation status estimation and partial discharge detection.

Key words: switchgear cabinet; partial discharge; association rules mining; fuzzy C-means clustering; Apriori algorithm; fuzzy reasoning

0 引言

开关柜由断路器、隔离开关与接地开关、负荷开关、自动重合与分段器、操作机构、防爆配电装置等设备组成,是电网系统中的一种关键设备,在系统的发电、输电、配电、电能转换和消耗等环节中起通断、

控制或保护等作用。随着电网的不断发展,各种类型的开关柜广泛应用于供电网系统、二次变电站、中/低压变电站和工矿企业所属配电站中。

开关柜设备历年来的事故分析表明,随着设备绝缘故障的发展会引起开关柜内部局部放电(PD)的产生,而局部放电同时也会加剧绝缘老化的速度。因此监测开关柜设备的局部放电现象,尤其是对局部放电程度进行判别对于评估开关柜绝缘状态以及制定合理的维修策略至关重要^[1-7]。

收稿日期:2013-09-21; 修回日期:2013-10-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51307106)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51307106).

然而目前如何判断局部放电的严重程度仍然是国内外的专家学者研究的难点之一。传统的脉冲电流法受限于检测方式,无法对数量巨大的在线开关柜设备进行局放程度的测量。最新的研究结果表明暂态地电压法测得的信号具有和脉冲电流法相似的特征^[8]。文[9]提出随着放电程度的加深,放电量的大小、次数和放电脉冲的相位特征等都会发生明显的变化。基于此笔者提出了一种基于改进型关联规则算法对局放程度进行判断的方法,该方法通过对局部放电信号特征集进行挖掘,获得判断局放程度的关联规则库,并由模糊推理获得最终的严重程度结果。

1 改进型关联规则挖掘算法

1.1 关联规则算法的原型

关联规则算法最早由 AGRAWAL R 于 1993 年首先提出,用于大型数据的布尔型关联规则挖掘^[10]。其原理为一个由 m 个布尔型属性数据组成的项集 $I=\{I_1, I_2, \dots, I_m\}$, 存在一个 n 个事务组成的数据库 $t=\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, t 由一组二进制向量表示。对于 I 中的一个子集 A , 若有 $A \subseteq t_i$, 存在一条布尔型关联规则可表示为 $A \Rightarrow B$ 。其中 $A \subseteq I, B \subseteq I$ 且 $A \cap B = \emptyset$ 。

布尔型关联规则 $A \Rightarrow B$ 的支持度 Sup , 定义为包含 A 和 B 的事务数和总事务数的比值

$$\text{Sup} = \frac{\text{Sup}(A \cap B)}{n} \quad (1)$$

式(1)中: $\text{Sup}(A \cap B)$ 为数据库中支持 $A \cap B$ 的事务数; n 为事务总数。

布尔型关联规则 $A \Rightarrow B$ 的置信度定义为 Conf , 即包含 A 和 B 的事务数与 A 的事务数的比值

$$\text{Conf} = \frac{\text{Sup}(A \cap B)}{\text{Sup}(A)} \quad (2)$$

典型的布尔型关联规则挖掘算法有 Apriori 算法、FP-growth 算法和 TreePro-jection 算法。其中, Apriori 算法基于候选集生成和测试方法; FP-growth 算法和 TreePro-jection 算法则不产生候选集。文中采用的就是基于 Apriori 算法的挖掘算法^[11], 并在其基础上进行改进。

1.2 模糊 C 均值聚集划分

模糊 C 均值聚集(FCM), 是用隶属度确定每个数据点属于某个聚类的程度的一种聚类算法^[12]。1973 年, Bezdek 提出了该算法, 作为早期硬 C 均值聚类(HCM)方法的一种改进。

FCM 把 n 个向量 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 分为 c 个模糊组, 并求每组的聚类中心, 使得非相似性指标的价值函数达到最小。FCM 与 HCM 的主要区别在于 FCM

用模糊划分, 使得每个给定数据点用值在 $[0, 1]$ 间的隶属度来确定其属于各个组的程度。与引入模糊划分相适应, 隶属矩阵 U 允许有取值在 $[0, 1]$ 间的元素。不过, 加上归一化规定, 一个数据集的隶属度的和总等于 1, 即

$$\sum_{i=1}^c u_{ij} = 1, \forall j=1, \dots, n. \quad (3)$$

那么, FCM 的价值函数(或目标函数)为

$$J(U, c_1, \dots, c_c) = \sum_{i=1}^c J_i = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij}^m d_{ij}^2 \quad (4)$$

式(4)中: u_{ij} 介于 $[0, 1]$ 间; c_i 为模糊组 I 的聚类中心; $d_{ij} = \|c_i - x_j\|$ 为第 i 个聚类中心与第 j 个数据点间的欧几里德距离; $m \in [1, \infty)$ 是一个加权指数。

构造如下新的目标函数, 可求得使式(4)达到最小值的必要条件

$$J(U, c_1, \dots, c_c, \lambda_1, \dots, \lambda_n) = J(U, c_1, \dots, c_c) + \sum_{j=1}^n \lambda_j \left(\sum_{i=1}^c u_{ij} - 1 \right) \quad (5)$$

式(5)中, $\lambda_j, j=1, \dots, n$, 是式(3)的 n 个约束式的拉格朗日乘子。对所有输入参量求导, 使式(4)达到最小的必要条件为:

$$c_i = \frac{\sum_{j=1}^n u_{ij}^m x_j}{\sum_{j=1}^n u_{ij}^m}; \quad (6)$$

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \left(\frac{d_{ij}}{d_{kj}} \right)^{2/(m-1)}} \quad (7)$$

由上述两个必要条件, 在批处理方式运行时, FCM 用下列步骤确定聚类中心 c_i 和隶属矩阵 $U^{[13]}$:

- 1) 用值在 $[0, 1]$ 间的随机数初始化隶属矩阵 U , 使其满足式(3)中的约束条件;
- 2) 用式(6)计算 c 个聚类中心 $c_i, i=1, \dots, c$;
- 3) 根据式(4)计算价值函数, 如果它小于某个确定的阈值, 或它相对上次价值函数值的改变量小于某个阈值, 则算法停止;
- 4) 用式(7)计算新的 U 矩阵, 返回步骤 2)。

1.3 改进的关联规则算法流程

文中提出的基于 FCM 划分的关联规则挖掘算法, 该算法基于 Apriori 算法的思想, 算法的具体步骤为:

- 1) 采用模糊 C 均值算法将数量型属性离散化, 并对数量型属性上的取值进行区间划分, 将其划分为若干个模糊集等级;

2)由模糊集等级及原数量型数据集构造新的布尔型数据集,将原数量型属性不同的模糊等级作为新数据集的属性;

3)扫描新数据集,计算各项出现的次数,与最小支持度进行比较,得到所有的频繁 1-项集;

4)在频繁 1-项集的基础上,得到候选 2-项集,进而与最小支持度进行比较,得到所需的频繁 2-项集;

5)迭代循环,根据频繁(k-1)-项集集合得到频繁 k-项集;

6)删除小于最小支持率的项集,直到得到所有的 k-频繁项集;

7)从频繁项集中得到不小于最小置信度的关联规则。

程序的流程图见图 1。

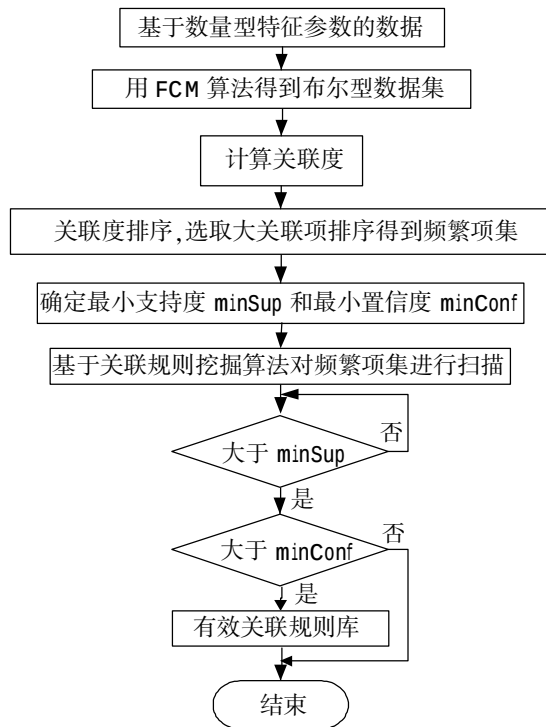


图 1 改进的关联规则算法流程图

Fig. 1 Flow chat of improved apriori algorithm

2 局部放电严重程度分类的实验设置

为了验证基于改进型关联规则的局部放电严重程度分类识别算法的有效性,在实验室中分别制作 3 种不同放电量的针尖模型,并在开关柜中进行放电实验研究。目前开关柜局放检测的手段有超声波,超高频等^[13-14],笔者采用在开关柜表面贴置容性传感器的方法检测局放产生的暂态地电压信号,对 3 种电晕模型的放电特性进行实验研究。

图 2 为搭建的局部放电实验平台及电晕模型,在实验过程中将 3 种电晕局放模型分别安装在 10 kV 开关柜实验平台中,逐渐增加电压至局部放

电现象出现,并记录该种模型的放电起始电压。表 1 为 3 种电晕局放模型的放电起始电压。



图 2 开关柜局部放电实验平台及 3 种电晕模型

Fig. 2 Three corona models and partial discharge experiment platform of switchgear cabinet

表 1 3 种电晕局放模型的放电起始电压

Tab. 1 Discharge inception voltage of three corona defect types

局部放电模型	放电起始电压/kV
电晕放电 1	5.0
电晕放电 2	5.5
电晕放电 3	6.5

实验过程中测得的暂态地电压信号经过检波后转化为低频脉冲信号进行存储和分析。3 组不同局放程度的针尖放电 PRPS 图谱见图 3。

由图 3 可见,针尖电晕在轻微放电时,放电脉冲集中于 270°相位附近,平均放电幅值在 80 mV 左右;随着放电程度的加深,放电脉冲的数量明显增多,同时放电脉冲的平均幅值增大,集中于 150 mV 左右;当放电进一步加深时,正半周 90°相位附近出现大量幅值在 600 mV 左右的放电脉冲,同时负半周的放电脉冲虽然幅值不再发生明显变化,但脉冲数量进一步增多。为了研究不同局部放电情况下的特征量变化,笔者建立了 13 组局部放电特征量参数,见表 2。由于特征参数是数值型的因此在计算关联规则前,必须对表 2 所示的参量进行离散化。

3 规则库的生成

3.1 FCM 进行特征量分类

以开关柜局放平台测得的针尖样本 3 为例,分析每周最大放电次数的分类结果,见图 4,图 4 中聚类中心为 11、30、50 3 类,在聚类中心点处,都存在某一隶属度函数达到最大值 1,而其余两个隶属度函数处于最小值 0 的情况。特征量分区效果比较理想,属于关联度性非常强的一类特征量。同时可以看出,根据 FCM 得到的隶属度函数与三角分布函数十分相似,从而也为下一章按三角分布进行模糊推理提供了依据。

将每组放电模型测得的局部放电数据分为两

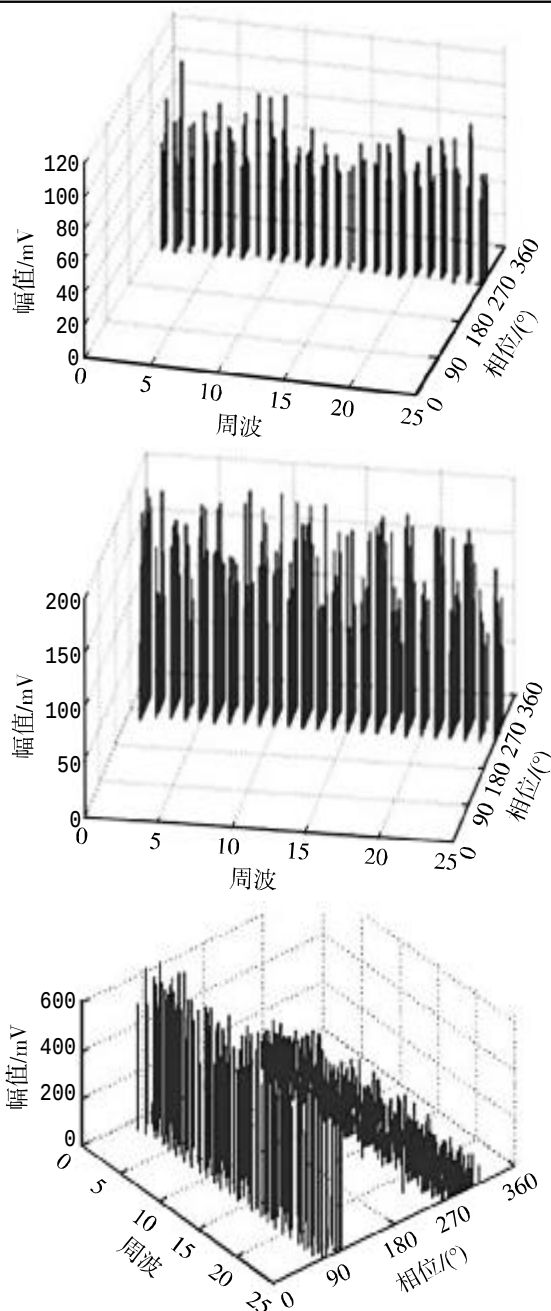


图 3 3 种不同局放程度的开关柜针尖放电图谱
Fig. 3 The PRPS maps of three different level corona PDs in switchgear cabinet

份,100 条作为训练的样本,100 条作为验证的样本。根据改进的关联规则算法进行数据划分,项集扫描和规则提取。通过验证样本中数据正确划分比例对提取的规则进行评价。

3.2 关联规则生成及筛选

关联规则的生成使用了改进的 Apriori 算法,当最小支持度和置信度分别设为 0.015 和 0.95 时,得出的规则数为:针尖样本频繁项集数为 2 的规则有 20 条,按改进的 Apriori 方法筛选出的 20 条规则见表 3、图 5。

通过规则库中某一特征量区间的出现的情况,

表 2 局部放电特征量参数

序号	名称	特征量公式
1	$N_{\max}$	每周期最大放电次数
2	$N_{p\max}$	正半周最大放电次数
3	$N_{p\text{mean}}$	正半周平均放电次数
4	$N_{n\max}$	负半周最大放电次数
5	$N_{n\text{mean}}$	负半周平均放电次数
6	C_c	连续放电周期率
7	N_{mean}	平均放电数
8	A_{Npn}	正负半周放电次数不平衡度
9	$V_{p\max}$	正半周最大放电量
10	$V_{p\text{mean}}$	正半周平均放电量
11	$V_{n\max}$	负半周最大放电量
12	$V_{n\text{mean}}$	负半周平均放电量
13	$A_{V\text{mean}}$	平均放电量不平衡度

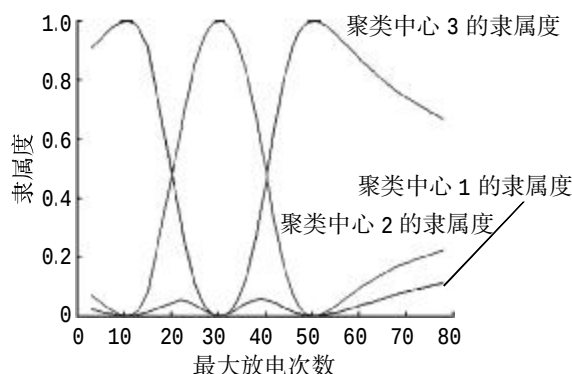


图 4 每周期最大放电次数的隶属度函数

Fig. 4 Membership function of the max PD numbers in every frequency cycle

表 3 关联规则特征库

序号	特征量	特征量	序号	特征量	特征量
1	$N_{\max}^3$	A_{Npn}^1	11	$N_{\max}^3$	C_c^1
2	N_{mean}^3	A_{Npn}^1	12	N_{mean}^3	C_c^1
3	$N_{\max}^3$	$A_{V\text{mean}}^1$	13	N_{mean}^3	A_{Npn}^1
4	N_{mean}^3	$A_{V\text{mean}}^1$	14	$N_{\max}^3$	A_{Npn}^1
5	$N_{p\max}^3$	$N_{\max}^3$	15	$N_{\max}^3$	N_{mean}^3
6	$N_{p\max}^3$	N_{mean}^3	16	N_{mean}^3	N_{mean}^3
7	$N_{\max}^3$	$V_{p\max}^1$	17	A_{Npn}^1	$A_{V\text{mean}}^1$
8	N_{mean}^3	$V_{p\max}^1$	18	$N_{\max}^3$	C_c^3
9	$N_{\max}^3$	$V_{n\max}^1$	19	N_{mean}^3	C_c^3
10	N_{mean}^3	$V_{n\max}^1$	20	$N_{\max}^3$	$V_{n\max}^1$

注:表中特征量的上标表示该特征量经过划分后所在的区间。

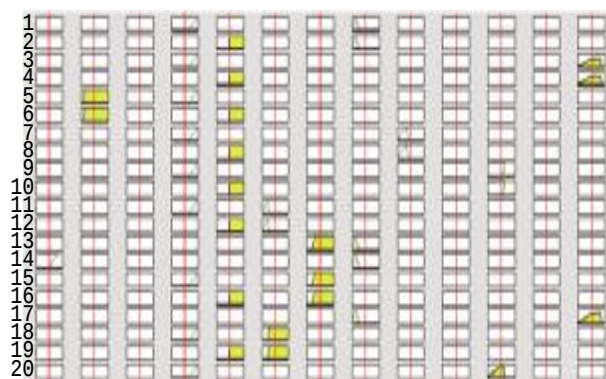


图 5 20 条关联规则形成的规则库

Fig. 5 Rule base of 20 association rules

可以看出该特征量区间在放电程度判定方面的重要性。例如在 20 条规则中, 每周最大放电次数出现了 6 次, 比出现 3 次的正负半周期平均放电量的不平衡度这一特征量在放电程度判定过程中发挥着更重要的作用。如果某一特征量在放电程度大中小对应的 20 条规则中均未出现如正半周平均放电次数, 可以认为这一特征量在放电严重程度的判定过程中是不起作用的, 从而在以后的数据判定中可以不再提取这一特征量。

4 局部放电严重程度的判定结果

4.1 模糊推理原则

文[15-18]讨论了模糊推理在模式识别中的应用, 通过上节获得的规则库进行模糊推理, 采用模糊推理的方法软化规则区间边界, 提高推理的准确性和稳定性, 获得区间型模糊规则来构建局放程度分类识别系统^[19-20]。

在模糊推理中, 重要的推理原则有以下几种^[21-24]:

1) **max-min 原则**。单条规则的前件隶属度计算就是根据样本数据求出规则中特征量隶属度的最小值, 而多条规则的模糊蕴含就是根据每条规则的前件隶属度得出最大值作为该规则后件被满足的程度。

2) **max-product 原则**。单条规则的前件隶属度计算就是根据样本数据得出规则中特征量区间隶属度的乘积, 而模糊蕴含的计算方法与 **max-min** 原则中的方法一致。

3) **sum-product 原则**。单条规则的隶属度计算与 **max-product** 原则一样, 但多条规则的模糊蕴含为各个规则前件隶属度之和 (前提为隶属度之和 ≤ 1)。考虑到实际中的规则库中规则数目, 将此原则加以改进, 得出多条规则的模糊蕴含为各个规则前件的隶属度之和/总的规则数, 得出隶属度的平均值表征规则后被满足的程度。

4.2 局部放电严重程度的判定

模糊推理在此是用来进行局部放电严重程度的判定, 根据严重程度为大中小的 3 种类型对应的规则后件被满足的程度, 将其中最大值对应的放电严重程度作为实际的判定结果。针尖模型模糊推理判定结果见表 4。

表 4 针尖模型模糊推理判定结果

Tab. 4 Fuzzy reasoning judgment result of tip models	
推理原则	判定结果
max-min	小: 100/100; 中: 96/100; 大: 100/100。
max-product	小: 100/100; 中: 96/100; 大: 100/100。
sum-product	小: 100/100; 中: 100/100; 大: 100/100。

如表 4 所示, 按 **sum-product** 推理原则的识别率比另两种推理原则的结果要好。

图 6 为不同最小置信度时的总识别率。当设置不同的置信度时, 如将最小置信度减小为 0.7, 生成的规则数有 25 条。此时得到的规则数相比最小置信度定为 0.95 时有所增加, 但图 6 所示识别率却会减小。因此为了获得较好的识别结果, 最小置信度的设定应大于 0.9。

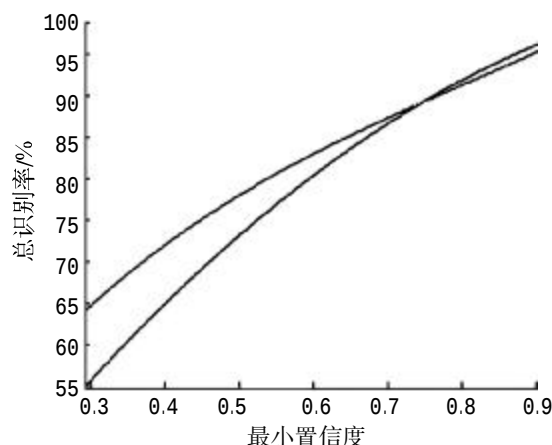


图 6 不同最小置信度时的总识别率

Fig. 6 Total recognition rate of different minimum confidence

5 结语

文中介绍了一种改进型关联规则挖掘算法, 用于自动识别开关柜局部放电的严重程度。该算法采用模糊 **C** 均值聚集划分局部放电特征量区间, 采用改进型 **Apriori** 寻找满足最小支持度和最小可信度的候选集, 并对候选集进行递推产生用于分类的关联规则库。

采用该方法对 10 kV 开关柜局放实验平台中的 3 种不同放电程度的针尖电晕局部放电信号进行模糊推理。当采用 **sum-product** 推理原则, 设置频繁项集为 2 最小识别率为 0.9 时, 分类识别准确。该方法为开关柜绝缘状态评估提供了一种新的理论依据, 并且具有很好的应用价值。

参考文献:

- [1] PEARSON J, HAMPTON B F, JUDD M D, et al. Experience with advanced in-service condition monitoring techniques for GIS and transformers[C]//IEE Colloquium on HV Measurements, Condition Monitoring and Associated Database Handling Strategies. London: IEE, 1998: 1-10.
- [2] 戎琳, 郑文栋, 钱勇, 等. 基于信号包络谱的 GIS 局部放电超声诊断方法研究[J]. 高压电器, 2011, 47(12): 39-43.
- RONG Lin, ZHENG Wendong, QIAN Yong, et al. Study of ultrasonic diagnosis method for partial discharge in GIS based on signal envelope spectrum [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(12): 39-43.

- [3] 孔令明, 肖云东, 刘娟, 等. 开关柜局部放电带电检测定位技术的应用与研究[J]. 山东电力技术, 2010(6): 5-8.
KONG Lingming, XIAO Yundong, LIU Juan, et al. Application and research of the PD of switchgear detection and location[J]. Shandong Electric Power Technology, 2010(6): 5-8.
- [4] 肖燕, 郁惟镛. GIS 中局部放电在线监测研究的现状与展望[J]. 高电压技术, 2005, 31(1): 47-49.
XIAO Yan, YU Weiyong. Present status and prospect of research of on-line partial discharge monitoring system in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(1): 47-49.
- [5] 郭灿新, 张丽, 钱勇, 等. XLPE 电力电缆中局部放电检测及定位技术的研究现状[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 56-60.
GUO Canxin, ZHANG Li, QIAN Yong, et al. Current status of partial discharge detection and location techniques in XLPE power cable[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 56-60.
- [6] 王科. 高压开关柜暂态对地电压局部放电检测设备 L 性能的模拟信号注入法评测[J]. 南方电网技术, 2013, 7(4): 43-46.
WANG Ke. The performance evaluation of TEV PD testing equipments for high voltage switchgear with analog signal injection method[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(4): 43-46.
- [7] 顾云霞, 孙海文, 金虎. TEV 与超声波法在开关柜局部放电检测中的应用[J]. 陕西电力, 2012, 40(12): 12-16.
GU Yunxia, SUN Haiwen, JIN Hu. Probe into partial discharge detection and location of switchgear based on TEV and ultrasonic wave methods[J]. Shaanxi Electric Power, 2012, 40(12): 12-16.
- [8] 任明, 彭华东, 陈晓清, 等. 采用暂态对地电压法综合检测开关柜局部放电[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2460-2466.
REN Ming, PENG Huadong, CHEN Xiaoqing, et al. Comprehensive detection of partial discharge in switchgear using TEV[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2460-2466.
- [9] 陈宏福, 黄成军, 钱勇, 等. 发电机局部放电评估方法[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 155-159.
CHEN Hongfu, HUANG Chengjun, QIAN Yong, et al. Preliminary investigation of the assessing method for PD in generator[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 155-159.
- [10] RAKESH A, TOMASZ I, ARUN S. Mining association rules between sets of items in large databases [M]. Washington, American: [s.n.], 1993.
- [11] LIU B, HSU W, MA Y. Integrating classification and association rule mining [C]//Proceedings of the Knowledge Discovery and Data Mining. [S.l.]: IEEE, 1998: 13-18.
- [12] SALAMA M M A, BARTNIKAS R. Fuzzy logic applied to PD pattern classification [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(1): 118-123.
- [13] 刘云鹏, 王会斌, 王娟, 等. 高压开关柜局部放电 UHF 在线监测系统研究[J]. 高压电器, 2009, 45(1): 15-17.
LIU Yunpeng, WANG Huibin, WANG Juan, et al. Research on on-line partial discharge UHF monitoring system for high voltage switchboard[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(1): 15-17.
- [14] 王培义, 朱伯涛. 开关柜局部放电超声波在线检测技术的应用[J]. 河北电力技术, 2010, 174(6): 26.
WANG Peiyi, ZHU Botao. Application of partial discharge ultrasonic on-line detection technology for switchgear[J]. Hebei Electric Power, 2010, 174(6): 26.
- [15] 陆建江, 宋自林, 钱祖平. 挖掘语言值关联规则[J]. 软件学报, 2001, 12(4): 607-610.
LU Jianjiang, SONG Zilin, QIAN Zuping. Mining linguistic value association rules [J]. Journal of Software, 2001, 12(4): 607-610.
- [16] FRIGUI H, KRISHNAPURAM R. Clustering by competitive agglomeration [J]. Pattern Recognition, 1997, 30(7): 1109-1119.
- [17] AGRAWAL R, SRIKANT R. Fast algorithms for mining association rules in large databases [C]//Proceedings of the 20th International Conference on Very Large Data Bases. [S.l.]: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1994: 487-499.
- [18] 陈莉, 焦李成. 基于关系代数的关联规则挖掘算法[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2005, 35(6): 691-698.
CHEN Li, JIAO Licheng. Association rule mining algorithm based on relation algebra theory [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2005, 35(6): 691-698.
- [19] 彭祖增, 孙毓玉. 模糊(Fuzzy)数学及其应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
- [20] KUNCHEVA L I. How good are fuzzy if-then classifiers [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2000, 30(4): 501-509.
- [21] 王立新. 模糊系统与模糊控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [22] 倪学锋, 谢诚. 极对壳绝缘局部放电试验对电容器绝缘老化的评定[J]. 电力电容器, 2005, 26(1): 35-38.
NI Xuefeng, XIE Cheng. Predication of the insulation ageing for power capacitor according to the pole-to-case insulation partial discharge test [J]. Power Capacitor, 2005, 26(1): 35-38.
- [23] 陈温良, 董燕, 贾华. 对金属化电容器局部放电和自愈放电性能的初步研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2008, 29(1): 31-36.
CHEN Wenliang, DONG Yan, JIA Hua. Preliminary research on partial discharge and self-healing characteristics of metallized film capacitors [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2008, 29(1): 31-36.
- [24] 夏建中, 李洪臣. 对电力电容器局部放电的理解与对策[J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 30(2): 7-9.
XIA Jianzhong, LI Hongchen. Research and countermeasure on partial discharge of power capacitor [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 30(2): 7-9.

郑文栋(1982—), 男, 博士研究生, 研究方向为高电压绝缘、高压电气设备状态监测与局部放电检测技术。