

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.02.011

基于模糊综合评价的水轮发电机组 局部放电状态评估

武桦¹, 赵佳佳¹, 冯建军¹, 贾嵘¹, 马富齐¹, 马喜平²

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 甘肃省电力科学研究所, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 局部放电可以有效反映水轮发电机组的绝缘状况, 因此对局部放电故障进行状态评估对掌握水电机组的绝缘劣化程度具有重要意义。本文建立了基于模糊综合评价的机组局部放电状态评估模型。首先根据水电机组的实际运行情况和放电能量, 将机组的局部放电故障均划分为3种状态等级; 然后以局部放电脉冲相位分布(PRPD)图谱的5个统计特征参数为评价指标, 建立了基于模糊综合评价的水电机组局部放电状态评估模型; 最后, 根据得到的隶属度对机组局部放电故障的状态等级进行评定。实例分析结果表明, 该方法能够准确、有效地判别水电机组局部放电故障的状态等级, 从而实现对机组绝缘状况的准确评估, 具有一定的工程实用价值。

关键词: 水轮发电机组; 局部放电; 状态评估; 模糊综合评价; 隶属度

中图分类号: TM81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2017)02-0187-06

State assessment on partial discharge in hydro-generator unit based on fuzzy comprehensive evaluation

WU Hua¹, ZHAO Jiajia¹, FENG Jianjun¹, JIA Rong¹, MA Fuqi¹, MA Xiping²

(1. School of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Gansu Province Electric Power Research Institute, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Partial discharge (PD) can effectively reflect the insulation condition of hydro-generator unit, thus the state assessment of PD fault being significant to master the degree of insulation deterioration of hydro-generator unit. A state assessment model of PD based on the fuzzy comprehensive evaluation is established in this paper. Firstly the PD faults of the unit are divided into three kinds of state levels according to the actual operation of hydro-generator unit and discharge energy. Then with five statistical parameters of PRPD as the evaluation index, the state assessment model of PD fault of hydro-generator unit based on fuzzy comprehensive evaluation is established. Finally, the severity of the PD fault of the unit is evaluated according to the degree of membership. Example analysis result shows that the method can be used to evaluate the insulation condition of the unit by judging the state level of the PD fault of hydro-generator unit accurately and effectively, and that it has certain engineering practical value.

Key words: hydro-generator unit; partial discharge; state assessment; fuzzy comprehensive evaluation; membership

长期以来, 对水电机组运行状况的判断大都是通过停电预防性试验和定期检修来实现的, 而此类方式又存在检修量大、经济费用高、可靠性差等问

题^[1,2]。如何实现机组的计划检修已成为目前的研究热点, 而对机组运行状态进行准确评估是解决上述问题的首要条件。

收稿日期: 2016-11-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51279161); 陕西省水利科技计划资助项目(2015slkj-04); 国网甘肃省电力公司科技项目(522722150012)

作者简介: 武桦, 女, 博士生, 研究方向为流体机械数据仿真。E-mail: w.h@163.com

通讯作者: 冯建军, 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为叶轮机械流动理论与优化设计。E-mail: jianjunfeng@xaut.edu.cn

绝缘性能的好坏会直接影响水轮发电机组运行的稳定性和安全性^[3],所以必须对其绝缘问题进行深入研究。局部放电(partial discharge, PD)作为主绝缘体老化的预兆和主要诱因,能够有效地表征水轮发电机组的绝缘状况^[4]。因此,可以通过对水电机组局部放电故障的状态评估来实现对机组绝缘劣化程度的准确评估。

目前常用的状态评估方法有:人工神经网络、支持向量机和模糊综合评价法等。人工神经网络^[5,6]可以模拟人脑神经网络进行运作,具有并行处理、联想记忆、自组织及自学习能力,但该方法需要有充足的学习样本,才能保证评估结果的可靠性;支持向量机^[7,8]具有良好的拟合与泛化能力,能够映射高度非线性的输入与输出,但其固有的二分类属性、核函数以及规则化参数选取困难等问题,使其在实际应用中具有一定的局限性。模糊综合评价法^[9,10]是建立在模糊理论上的一种综合评价方法,其首先利用隶属度的概念将定性评价转换为定量评价,然后根据多个影响因素对被评对象的隶属等级状况进行综合性评判。该方法既考虑到被评对象的层次性和影响因素的模糊性,又充分利用了人的经验,使得最终结果更为真实可靠。

本文将模糊综合评价法引入水轮发电机组局部放电故障的状态评估之中。首先,根据水轮发电机组的实际运行情况和放电能量,将机组的局部放电故障划分为3个状态等级,即:正常状态、异常状态和预警状态;然后,提取信号 PRPD 图谱的5个统计特征参数作为评价指标,建立了基于模糊综合评价的水电机组局部放电故障状态评估模型;最后,根据得到的隶属度对机组局部放电故障的状态等级进行评定,从而实现了对机组绝缘状况的准确评估。

1 模糊综合评价法

模糊综合评价法^[11]实质就是在模糊理论的基础上,考虑多种因素对事物的影响,利用模糊关系矩阵和隶属函数的概念来分析事物状态和征兆两者之间的不确定关系,从而对事物的真实状态做出综合评价。其具体实施步骤如下:

1) 确定被评对象的评价指标 U :

$$U = [u_1 \cdots u_i \cdots u_n] \quad (1)$$

式中, u_i 代表第 i 个评价因素, n 为评价因素的总数;

2) 确定评判集 V :

$$V = [v_1 \cdots v_j \cdots v_m] \quad (2)$$

式中, v_j 代表第 j 个模糊子集,对应一个特定的状态等级, m 为状态等级的数目;

3) 确定 U 中单个因素对 V 的隶属度,从而建立模糊评判矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, r_{ij} 代表某一个被评对象从 u_i 来看对 v_j 的隶属度;

4) 确定评价指标的权向量 W :

根据各个状态等级之间、指标之间的相对重要性确定各个评价因素的权重:

$$W = [\omega_1 \cdots \omega_i \cdots \omega_n] \quad (4)$$

5) 合成模糊综合评价结果矩阵 S :

选取合适的模糊算子,将 W 与各个被评对象的 R 进行运算,获得其对应的模糊综合评价结果:

$$S = W \circ R = [s_1 \cdots s_j \cdots s_m] \quad (5)$$

其中“ \circ ”为模糊算子。由式(5)便可得到被评对象对各个状态等级的隶属程度。

2 水电机组局部放电故障状态评估模型

2.1 状态等级的划分

结合水轮发电机组的实际运行情况和放电能量,将机组的局部放电故障划分为3个不同的状态等级,如表1所示。

表1 局部放电故障状态等级的划分
Tab. 1 Division of different PD fault state levels

故障等级	故障描述	检修策略
正常(L_1)	机组处于正常状态或者放电初始阶段,这一阶段以随机放电为主,脉冲能量较低	加强实时监测,定期检修
异常(L_2)	出现明显的异常放电信号,主绝缘部分性能参数下降明显	加强实时监测,停电排查故障缘由
预警(L_3)	脉冲能量高,形成了放电树,处于预击穿阶段	进行大修或者更换

2.2 模型的建立

采用梯形隶属函数和三角函数来描述上述三种故障等级的映射关系,具体如图1所示。

由图1可知,各个局部放电状态等级的隶属度函数可分别表示为:

1) L_1 正常状态:

$$r_{i1} = \begin{cases} 1 & U_i < a_1 \\ \frac{a_2 - U_i}{a_2 - a_1} & a_1 < U_i < a_2 \\ 0 & U_i > a_2 \end{cases} \quad (6)$$

2) L_2 异常状态:

$$r_{i2} = \begin{cases} 0 & U_i < a_1 \\ \frac{U_i - a_1}{a_2 - a_1} & a_1 < U_i < a_2 \\ \frac{a_3 - U_i}{a_3 - a_2} & a_2 < U_i < a_3 \\ 0 & U_i > a_3 \end{cases} \quad (7)$$

3) L_3 预警状态:

$$r_{i3} = \begin{cases} 0 & U_i < a_2 \\ \frac{a_3 - U_i}{a_3 - a_2} & a_2 < U_i < a_3 \\ 1 & U_i > a_3 \end{cases} \quad (8)$$

式中, a_1 、 a_2 和 a_3 分别代表 L_1 、 L_2 、 L_3 三种状态下表征局部放电故障严重程度的标准值; U_i 为第 i 个描述局部放电故障严重程度的评价因素, $i=1, 2, \dots, n$; r_{i1} 、 r_{i2} 和 r_{i3} 分别代表第 i 个因素对正常、异常和预警三个状态等级的隶属度。由此得到模糊评判矩阵:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} \end{bmatrix} \quad (9)$$

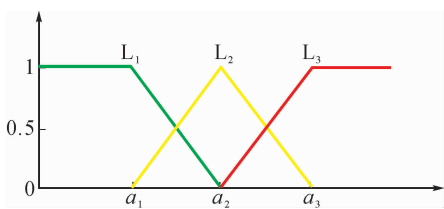


图1 不同局部放电状态等级的隶属度函数曲线
Fig. 1 Membership function curve of discharge fault severity level

2.3 评价指标的选取

研究表明,PRPD 图谱^[12]中正、负半周放电脉冲数 N^+ 和 N^- , 正负最大脉冲幅度 u_{\max}^+ 和 u_{\max}^- 及等值累计放电电量 Q_c 。这 5 个参数在局部放电过程中呈现单调变化,其状态中心不存在交叉现象。因此,选取上述 5 个参数作为评价指标,用以描述局部放电的故障等级,即:

$$\mathbf{U} = [N^+ \quad N^- \quad u_{\max}^+ \quad u_{\max}^- \quad Q_c] \quad (10)$$

2.4 隶属度的求取

本文通过模糊 c-均值聚类算法^[13]进行局部放

电故障隶属度的求解。选取 $N=100$ 个数据样本,并设置 $M=3$ 个聚类中心。具体过程如下:

设样本集为 $\Theta = [\theta_1 \quad \dots \quad \theta_i \quad \dots \quad \theta_N]$, 其中 θ_i 代表第 i 个样本。模糊聚类的目标函数为:

$$\min J(\Theta, \mathbf{C}) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M (h_{ik})^p (d_{ik})^2 \quad (11)$$

式中, \mathbf{C} 为模糊聚类中心矩阵, h_{ik} 为样本 θ_i 属于第 k 类的隶属度, 且 $\sum_{k=1}^M h_{ik} = 1$, $h_{ik} \in [0, 1]$; p 为加权指数, 且 $p \geq 1$; d_{ik} 为样本 θ_i 与第 k 类聚类中心 c_k 之间的距离, 且 $d_{ik} = \|\theta_i - c_k\|$ 。

求解式(11)就能获得最佳的隶属度矩阵 $\tilde{\mathbf{U}}$ 和中心矩阵 \mathbf{C} 。

引入 Lagrange 乘数因子 λ , 则式(11)等价于目标函数 F , 即:

$$F = \sum_{k=1}^M (h_{ik})^p (d_{ik})^2 + \lambda \left(\sum_{k=1}^M h_{ik} - 1 \right) \quad (12)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial \lambda} = \sum_{k=1}^M h_{ik} - 1 = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial u_{ik}} = p(h_{ik})^{p-1} (d_{ik})^2 - \lambda = 0 \end{cases} \quad (13)$$

由此可得,最佳的隶属度 u_{ik} 和中心 c_k 为:

$$u_{ik} = \sum_{j=1}^M \left(\frac{d_{jk}}{d_{if}} \right)^{\frac{2}{1-p}} \quad (14)$$

$$c_k = \frac{\sum_{i=1}^N (h_{ik})^p \theta_i}{\sum_{i=1}^N (h_{ik})^p} \quad (15)$$

2.5 局部放电故障状态评估流程

基于上述分析,利用本文所建立的模型进行水电机组局部放电故障状态评估的具体流程为:

1) 划分局部放电故障等级,建立故障评判集:

$$\mathbf{X} = [x_1 \quad \dots \quad x_j \quad \dots \quad x_m]$$

2) 确定故障评判指标,建立评价因素集:

$$\mathbf{U} = [u_1 \quad \dots \quad u_i \quad \dots \quad u_n]$$

3) 确定 \mathbf{X} 与 \mathbf{U} 之间的模糊评判矩阵 \mathbf{R} :

$$\mathbf{R} \in F(\mathbf{X} \times \mathbf{U})$$

4) 给定不同因子的权重,建立权重向量:

$$\mathbf{W} = [\omega_1 \quad \dots \quad \omega_i \quad \dots \quad \omega_n]$$

其中, ω_i 表示因子 i 对故障最终评判结果的影响程度, 且 $\sum \omega_i = 1$;

5) 计算最终评判结果 \mathbf{S} :

$$\mathbf{S} = \mathbf{W} \circ \mathbf{R} = [s_1 \quad \dots \quad s_j \quad \dots \quad s_m]$$

其中“ \circ ”为模糊算子。

3 实例分析

以某电厂水轮发电机组的局部放电样本数据为

例进行分析与验证。该电厂包含 5 台机组,单机容量为 250 MW,机端额定电压为 13.8 kV,于 2006 年投入运行,至今已运行 10 年。

首先,根据已知的故障样本求解不同局部放电故障状态等级下的特征中心值,即评价因素集,结果

如表 2 所示(其中,故障 A:匝间/相间放电;故障 B:机组端部放电;故障 C:主绝缘体自身缺陷);然后从 A、B、C 三种故障中各自选取一个样本数据进行分析,分别表示为 A_1 、 B_1 、 C_1 ,其对应的 PRPD 图谱分别如图 2、图 3、图 4 所示。

表 2 局部放电故障状态等级的评价因素集
Tab. 2 Set of evaluation factors on the state level of PD faults

故障类型	故障等级	N^+	N^-	u_{max}^+	u_{max}^-	Q_c
故障 A	L ₁ 正常状态	2.3	3.1	35.6	31.5	186.3
	L ₂ 异常状态	61.6	47.6	389.1	345.7	31 869.4
	L ₃ 预警状态	120.5	98.4	631.4	578.5	84 197.9
故障 B	L ₁ 正常状态	5.6	4.3	32.1	31.5	278.6
	L ₂ 异常状态	57.3	51.6	281.1	265.3	26 616.1
	L ₃ 预警状态	128.7	102.4	561.2	479.5	78 112.9
故障 C	L ₁ 正常状态	5.4	1.9	41.1	40.5	217.4
	L ₂ 异常状态	78.6	37.1	419.3	365.7	34 399.8
	L ₃ 预警状态	147.5	82.6	697.5	598.1	91 222.8

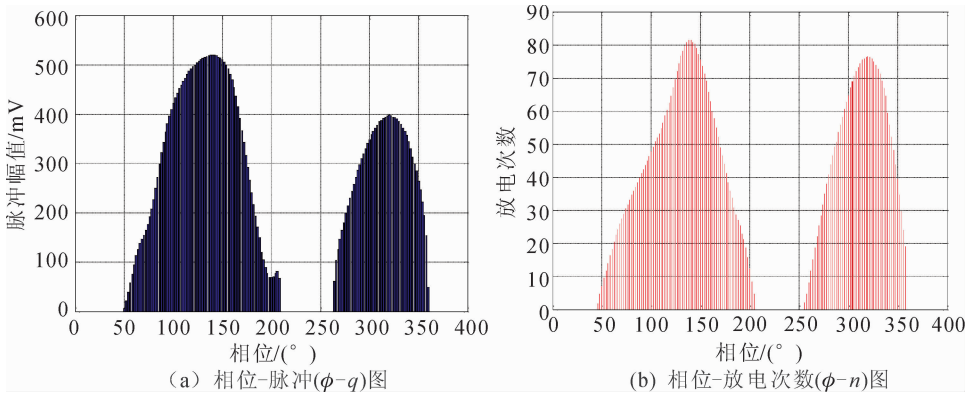


图 2 故障 A₁ 的 PRPD 图谱
Fig. 2 PRPD figure of fault A₁

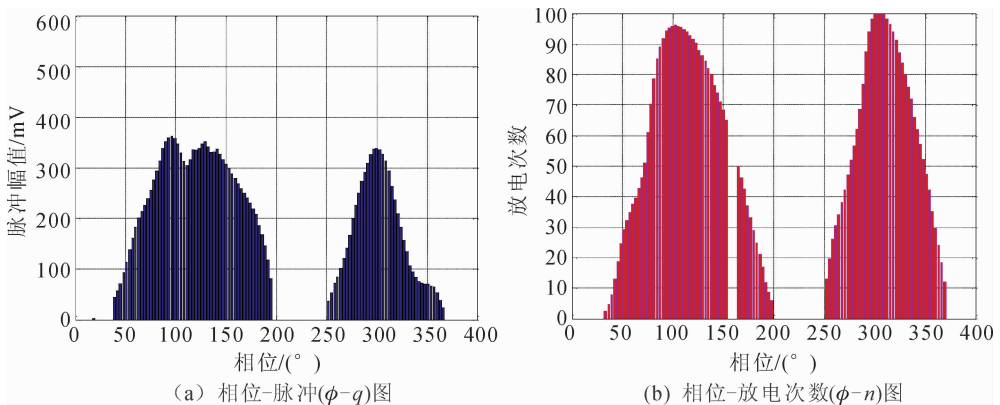


图 3 故障 B₁ 的 PRPD 图谱
Fig. 3 PRPD figure of fault B₁

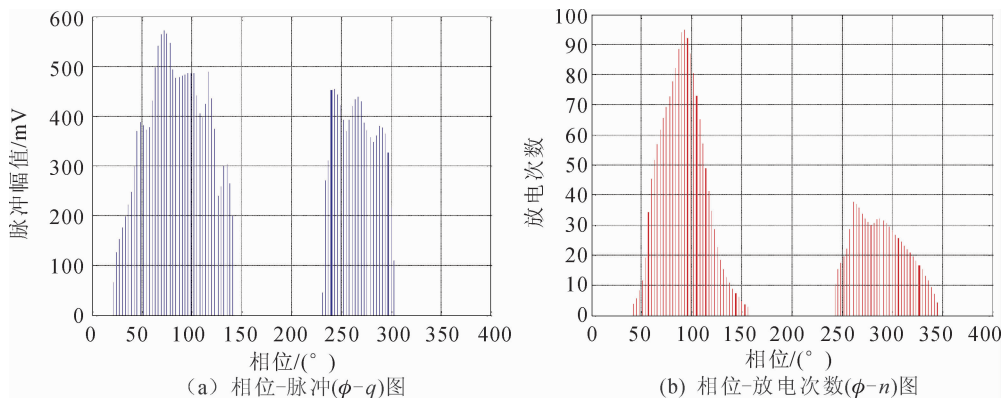


图4 故障 C_1 的 PRPD 图谱
Fig. 4 PRPD figure of fault C_1

根据上述 A_1 、 B_1 、 C_1 三种故障的 PRPD 图谱, 获得其对应的评价因素, 如表 3 所示。

表 3 A_1 、 B_1 、 C_1 的评价因素
Tab. 3 Evaluation factors of A_1 , B_1 and C_1

故障类型	N^+	N^-	u_{\max}^+	u_{\max}^-	Q_c
A_1	38.6	35.1	513.6	391.7	27 810.5
B_1	48.2	50.4	351.7	348.4	29 771.3
C_1	54.3	27.1	567.5	458.1	33 172.8

由此可得, A_1 、 B_1 、 C_1 对应的模糊评判矩阵为:

$$R_{A_1} = \begin{bmatrix} 0.388 & 0.612 & 0 \\ 0.281 & 0.719 & 0 \\ 0 & 0.486 & 0.514 \\ 0 & 0.802 & 0.198 \\ 0 & 0.872 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{B_1} = \begin{bmatrix} 0.176 & 0.824 & 0 \\ 0.025 & 0.975 & 0 \\ 0 & 0.748 & 0.252 \\ 0 & 0.612 & 0.388 \\ 0 & 0.939 & 0.061 \end{bmatrix}$$

$$R_{C_1} = \begin{bmatrix} 0.332 & 0.668 & 0 \\ 0.284 & 0.716 & 0 \\ 0 & 0.467 & 0.533 \\ 0 & 0.602 & 0.398 \\ 0.036 & 0.964 & 0 \end{bmatrix}$$

根据层次分析法^[14], 取各个评价因素的权重向量为:

$$W = [0.156 \quad 0.156 \quad 0.231 \quad 0.231 \quad 0.226]$$

通过模糊计算可得, 上述三种故障的最终评估结果为:

1) 故障 A_1 :

$$S_{A_1} = W \circ R_{A_1} = [0.133 \quad 3 \quad 0.702 \quad 2 \quad 0.164 \quad 5]$$

由此可见, 故障 A_1 的严重程度为 L_2 级, 机组的匝/相间放电出现异常;

2) 故障 B_1 :

$$S_{B_1} = W \circ R_{B_1} = [0.031 \quad 4 \quad 0.807 \quad 0 \quad 0.161 \quad 6]$$

由此可见, 故障 B_1 的严重程度为 L_2 级, 机组端部放电出现异常;

3) 故障 C_1 :

$$S_{C_1} = W \circ R_{C_1} = [0.104 \quad 2 \quad 0.680 \quad 7 \quad 0.215 \quad 1]$$

由此可见, 故障 C_1 的严重程度为 L_2 级, 机组主绝缘出现严重缺陷。

上述三种故障的分析结果与该电厂实际检修结果完全一致, 表明本文所提方法在水电机组局部放电故障状态评估方面具有可行性以及有效性。

4 结论

局部放电可以有效反映水轮发电机组的绝缘状况, 为此, 本文建立了基于模糊综合评价的机组局部放电状态评估模型, 以实现对其绝缘劣化程度的准确评估。

1) 根据水电机组的实际运行情况和放电能量, 将机组的局部放电故障均划分为正常、异常、预警 3 个状态等级。

2) 以模糊综合评价法为基础, 从局部放电信号的 PRPD 图谱中提取 N^+ 、 N^- 、 u_{\max}^+ 、 u_{\max}^- 和 Q_c 这 5 个特征参数作为评价指标, 建立了水电机组局部放电故障的状态评估模型。

3) 利用上述模糊综合评判模型计算隶属度, 根据隶属度大小来判定机组局部放电故障的状态等级。

实例分析表明, 本文方法能够对水电机组局部放电故障的严重程度进行准确判别, 进而实现对机组的绝缘状况的准确评估, 并具有较强的可操作性, 可为机组的状态维修提供技术指导。

参考文献:

- [1] 李军浩, 韩旭涛, 刘泽辉, 等. 电气设备局部放电检测技术述评 [J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2583-2601.
LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2583-2601.
- [2] 武桦, 贾嵘, 罗兴琦, 等. 基于时频流形的水轮发电机组局部放电信号特征提取方法 [J]. 水力发电学报, 2016, 35(9): 55-62.
WU Hua, JIA Rong, LUO Xingqi, et al. Feature extraction of generator partial discharge signals using time-frequency manifolds [J]. Journal of Hydroelectric Power, 2016, 35(9): 55-62.
- [3] MONTANARI G C, CAVALLINI A. Partial discharge diagnostics: from apparatus monitoring to smart grid assessment [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2013, 29(3): 8-17.
- [4] GAO W, DING D, LIU W, et al. Investigation of the evaluation of the PD severity and verification of the sensitivity of partial-discharge detection using the UHF method in GIS [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 38-47.
- [5] 周天春, 杨丽君, 廖瑞金, 等. 基于局部放电因子向量和 BP 神经网络的油纸绝缘老化状况诊断 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 18-23.
ZHOU Tianchun, YANG Lijun, LIAO Ruijin, et al. Diagnosis of aging condition in oil-paper insulation based on factor vectors of partial discharge and BP neural network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(10): 18-23.
- [6] 周沙, 景亮. 基于矩特征与概率神经网络的局部放电模式识别 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 98-102.
ZHOU Sha, JING Liang. Pattern recognition of partial discharge based on moment features and probabilistic neural network [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 98-102.
- [7] 唐炬, 林俊亦, 卓然, 等. 基于支持向量数据描述的局部放电类型识别 [J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1046-1053.
TANG Ju, LIN Junyi, ZHUO Ran, et al. Partial discharge type recognition based on support vector data description [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1046-1053.
- [8] 王瑜, 苑津莎, 尚海昆, 等. 组合核支持向量机在放电模式识别中的优化策略 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(2): 229-236.
WANG Yu, WAN Jinsha, SHANG Haikun, et al. Optimization strategy research on combined-kernel support vector machine for partial discharge pattern recognition [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(2): 229-236.
- [9] 林济铿, 李童飞, 赵子明, 等. 基于熵权模糊综合评价模型的电力系统黑启动方案评估 [J]. 电网技术, 2012, 36(2): 115-120.
LIN Jikeng, LI Tongfei, ZHAO Ziming, et al. Assessment on power system black-start schemes based on entropy-weighted fuzzy comprehensive evaluation mode [J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 115-120.
- [10] 国连玉, 李可军, 梁永亮, 等. 基于灰色模糊综合评判的高压断路器状态评估 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 161-167.
GUO Lianyu, LI Kejun, LIANG Yongliang, et al. HV circuit breaker state assessment based on gray-fuzzy comprehensive evaluation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 161-167.
- [11] 王福忠, 邵淑敏. 基于模糊综合评价法的变压器运行状态评估 [J]. 计算机仿真, 2015, 32(6): 141-145.
WANG Fuzhong, SHAO Shumin. Fuzzy strategy on running state evaluation of oil-immersed power transformer [J]. Computer Simulation, 2015, 32(6): 141-145.
- [12] 王刘旺, 朱永利, 贾亚飞, 等. 局部放电大数据的并行 PRPD 分析与模式识别 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1236-1244.
WANG Liuwang, ZHU Yongli, JIA Yafei, et al. Parallel phase resolved partial discharge analysis for pattern recognition on massive PD data [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1236-1244.
- [13] 王辉, 郑文栋, 吴晓春, 等. 模糊聚类算法参数优选方法及其在局部放电模式识别中的应用 [J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 3002-3006.
WANG Hui, ZHENG Wendong, WU Xiaochun, et al. Optimization method of parameter for fuzzy clustering algorithm and application in the PD pattern recognition for GIS [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 3002-3006.
- [14] 廖瑞金, 王谦, 骆思佳, 等. 基于模糊综合评判的电力变压器运行状态评估模型 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 70-75.
LIAO Ruijin, WANG Qian, LUO Sijia, et al. Condition assessment model for power transformer in service based on fuzzy synthetic evaluation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 70-75.