

基于热像信息融合技术的绝缘子故障分类研究

根据绝缘子常见故障的特点,利用热红外成像设备,引入图像分区域信息融合的思想,提出了基于“概率神经网络(PNN)并结合D-S证据理论”信息融合模型的绝缘子故障分类方法。此方法在绝缘子出现故障时,可综合多个信息来源进行诊断,从中筛选出能迅速反映绝缘子状态的特征量,并把这些特征量按照时间和图像区域进行分类,然后把这些数据输入到信息融合模型中,得到绝缘子热红外成像分类的结果。在搭建的测试系统上进行的测量表明:采用信息融合的模式,能很好地帮助变电站工作人员对绝缘子的健康状况进行分析。

王 宁/国网济南供电公司

黄 锐 吕俊涛 邢海文/国网山东省电力公司

0 引言

目前绝缘子故障的检测方法很多,主要方法为在线检测,包括微波反射法、紫外成像法、红外成像法、超声波检测法、红外测温法、无线电波法、激光多谱勒法、电场测量法、泄漏电流检测法和脉冲电流法等。其中,红外技术测温法(根据检测故障绝缘子因开裂或者绝缘电阻降低故障而产生的局部放电或者泄漏电流引起局部升温异常现象,进而给出绝缘子是否存在低零值、内部或表面开裂以及污秽程度等故障诊断信息),现在绝大多数的变电站在巡检中已经配备热红外成像仪,热像仪一次能够捕获几万乃至几十万点的温度数据并生成红外图像来判断绝缘子是否有潜在隐患。

但是,对绝缘子可能出现的故障类型判别,利用热红外成像设备得到的分析绝大多数还要依赖于变电站运行人员

的专家经验。本项目,使用热红外成像机芯设计了一套绝缘子故障监测装置,根据所选取的绝缘子表面特征量,利用信息融合技术快速分析出绝缘子可能出现的故障类型。该方法无须停电和直接接触绝缘子,因此可以在不停电的情况下帮助变电站巡视人员。

1 绝缘子热红外试验

1.1 试验布置和试品

试验在绝缘子高压测试室进行,如图1所示。

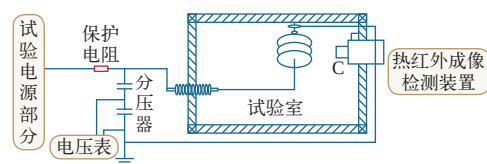


图1 测量系统接线示意图

试品为XP-70悬式陶瓷绝缘子,模拟220 kV输电线路。选取的故障绝缘子试品有以下三种情况。

- 1) 绝缘子绝缘电阻劣化,分为低值绝缘子和零值绝缘子两种。
- 2) 绝缘子表面污秽,表现的故障为因环境严重污染引起表面泄漏电流增大。
- 3) 绝缘子破损,机械原因或电弧灼伤,出现绝缘子裂纹故障,横向或纵向裂纹造成温度异常。

1.2 试验方案

变电站现场电磁环境复杂,背景环境、大气环境及临近电气设备等因素都会对红外检测结果产生影响。为了进



王 宁/工程师

关键词/Keywords

绝缘子·
故障·
热红外成像·

一步消除干扰, 确认缺陷性质, 为了测试不同故障类型的绝缘子在热红外成像仪下的热像分布状况, 分析和提取反映故障类型的特征判据, 制定试验方案如下: 加电压试验时间为19:00, 测试温度为5℃, 相对湿度为40%。如图2所示, 利用IRS S45-A摄像仪组件, 利用平板显示模块和锂电池组件搭建了用于提取算法分析数据的试验平台。

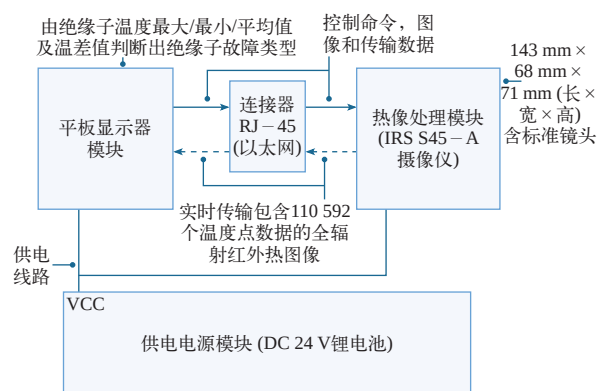


图2 测量系统接线示意图

2 热像仪采集数据的像素级融合

在热像仪拍摄好一张热像图后, 需要把热图的图像转化成温度, 也就是将显示的界面通过程序的设计求出每一个点的对应温度。

目前本系统设计了两种选定区域的方法, 一种是两点成线法, 根据两点成线原理, 先点击选定两个纵横坐标互不相同的点作为线段端点 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) , 通过数学运算得到一次函数 $y = Ax + B$, 然后结合C语言程序设计, 通过纵横坐标加1单位长度, 得出这条线段内所有点的坐标, 也就是线段内每一处的温度数据。另一种是两点成面法, 同样选定两个纵横坐标互不相同的点作为矩形框对角点 (x_3, y_3) 、 (x_4, y_4) , 然后互换坐标即可得到另外两个对角点 (x_3, y_4) 、 (x_4, y_3) , 从而形成一个矩形平面, 可得到矩形框内所有点的坐标, 进而再调用函数求出所有坐标点的温度, 也就是矩形框内每一处的温度数据。

现将特征量分类如下: 从空间上划分, 将特征量分为钢帽部分温度特征参数和绝缘子部分温度特征参数, 如图3所示。

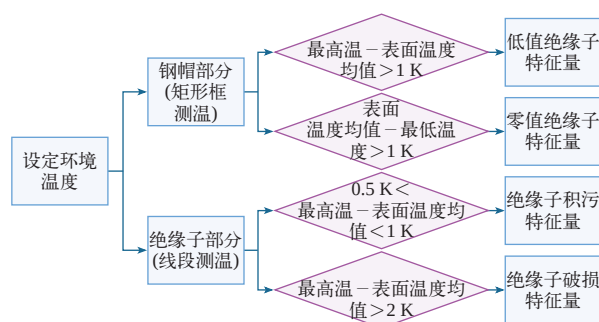


图3 特征量的分区域提取示意图

在故障判断时, 首先对获取的所述环境温度、绝缘子表面温度分布以及温度突变特征选取点获取图3中的4类温度参数作为绝缘子温度参数特征量, 另外加入环境影响因素特征参数。

3 热像仪采集数据的特征级融合

选用三层PNN概率神经网络进行特征级融合, PNN概率神经网络的结构如图4所示, X 为网络的输入, Y 为输出。

PNN概率神经网络直接从训练样本载入数据并更新网络权值, 除样本数据外无须大量的训练, 可以由新的特征量的输入计算输出的概率函数。

1) 为了便于后面的部分进行处理, 首先将四个特征量的数值进行归一化处理, 将所有数据归一化到 $[0, 1]$ 之间的数据, 消除各维数据的量纲问题

$$\bar{x}_i = \frac{x_i - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (1)$$

2) 根据系统输入输出序列 (X, Y) , 确定输入层节点数 n 和隐层神经元个数 l , 以及确定输出竞争层神经元个数 m ; 神经元个数是特征相量的维数。

3) 隐层输出计算。PNN一般分为输入层、模式层、求和层和输出层四层, 训练样本为上面抽取的特征量。输出相量 M 表示输入的训练样本, 属于各类的概率密度函数, 计算公式如下

$$M_{ij} = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{m/2}} \exp\left(-\frac{(X - \omega_{ij})(X - \omega_{ij})^T}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

式中, m 为类别数; T 为输入样本数; ω_{ij} 为权值; σ 为平滑参数。求和层计算相量 M 的加权和 S , 其

$$\text{中, } \sum_{i=1}^N \omega_{ij} = 1, S_i(X) = \sum_{i=1}^N \omega_{ij} M_{ij}(X), i \in \{1, 2, \dots, n\}.$$

4) 输出层输出计算。计算求和层输出 $\text{Output} = \max S_i(X)$ 。由此得到PNN的模式层, 并将其作为PNN的初始化网络, 同时计算所有样本的识别率 R_i , 如果识别率大于设定的阈值则本次迭代结束。每轮迭代都新添加样本权值 $\omega_{ij} = 1 - R_i^k$, 其中 R_i^k 为所有样本的识别率 (k 为调整指数), 原有样本权重按照 $\omega_{i+1} = R_i^k \omega_i$ 进行更新, 保证权重值处于一种衰减状态。由此可以对输出层进行迭代微调整: $O(X)^{j+1} = R_i^k O_j^i(X) + (1 - R_i^k) O_j^{\text{new}}(X)$, 从而更新PNN网络, 由此重复计算直至识别率达到设定的阈值。

该PNN网络用三层节点表示: 输入节点 x_j , 输出节点 y_i , 隐节点 o_i 。

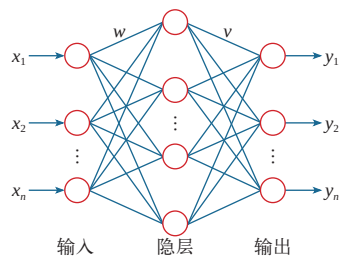


图4 特征级融合的结构

用两个PNN神经网络进行特征级融合训练的结构如表1所示。

表1 PNN的结构

项目	网络类型	层数	节点数
子网络1	PNN网络	3	5-8-4
子网络2	PNN网络	3	5-6-4

所选取的PNN输入如表2和表3所示。

表2 钢帽部分温度特征参数子网络1

子网络1	特征量
1	低值绝缘子温度特征量
2	零值绝缘子温度特征量
3	污秽程度
4	环境温度
5	相对湿度

PNN输出可以处理为模式分类问题, 也可以处理为数学映射的逼近问题。处理为模式分类问题时, 要求有尽可能多的样本来接近模式识别的边界。

表4为PNN输出的期望值, 其中, A_1 为低值绝

表3 绝缘子部分温度特征参数子网络2

子网络2	特征量
1	绝缘子积污特征量
2	绝缘子破损特征量
3	污秽程度
4	环境温度
5	相对湿度

缘子输出; A_2 为零值绝缘子输出; A_3 为绝缘子污秽输出; A_4 为绝缘子破损输出。

表4 PNN期望输出

样本分类	PNN期望输出			
	A_1	A_2	A_3	A_4
正常区	0.1	0.1	0.1	0.1
故障区	0.9	0.9	0.9	0.9

4 D-S证据理论应用于决策级融合

根据神经网络的输出, 在训练PNN网络样本时, 神经网络的输出并不等于0或1, 而是一个介于0和1之间的有理数。

由于D-S证据理论擅长于解决不确定性问题, 将每个输出作为一个独立的证据, 使之成为各种状态的可信度分配。

设 U 表示 X 所有可能取值的一个论域集合且所有在 U 内的元素互不相融, 则称 U 为 X 的识别框架。 U 的所有子集所构成的集合就是 U 的幂集, 记为 2^U 。

定义1: 函数 $m: 2^U \rightarrow [0, 1]$ 在满足下列条件 $m(\emptyset) = 0, \sum m(A) = 1$ 时, 称 $m(A)$ 为 A 的基本概率赋值, 表示在某条件下对结论 A 的直接支持。

定义2: 识别框 U , 称 $1 - \text{Bel}(\bar{A})$ 为 A 的似然函数, 记为 $pl(A)$ 。 $\text{Bel}(\bar{A})$ 表示确定不是 $\bar{A}$ 的程度

$$pl(A) = 1 - \text{Bel}(\bar{A}) \quad (3)$$

则称 $[\text{Bel}(A), pl(A)]$ 为 A 的信任区间。

设 m_1 和 m_2 是 2^U 上的两个相互独立的基本概率赋值, 焦元分别为 $A_1, \dots, A_k$ 和 $B_1, \dots, B_r$, 又设

$$K_1 = \sum m_1(A_i) m_2(B_j) < 1 \quad (4)$$

则

$$m(c) = \frac{\sum m_1(A_i) m_2(B_j)}{1 - K_1} \quad \forall C \subset U \quad C \neq \emptyset \quad (5)$$

式中, K_1 为冲突因子, 若 $K_1 \neq 1$, 则 m 确定一个基

本概率赋值；若 $K_1=1$ ，则认为 m_1 、 m_2 矛盾，不能对基本概率进行组合。决策级融合的框架结构如图5所示。

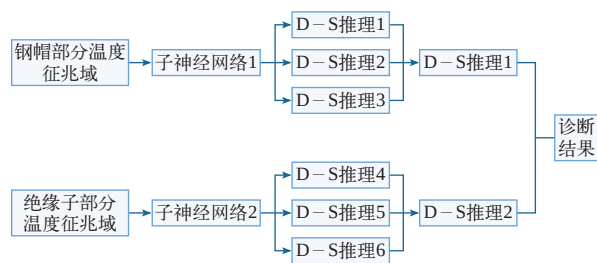


图5 决策级融合的框架结构

假定绝缘子部分的识别框架为{零值绝缘子，绝缘子污秽}，则幂集元素有{（零值绝缘子），（绝缘子污秽），（零值绝缘子，绝缘子污秽）}三个元素，其中元素（零值绝缘子，绝缘子污秽）表示即可能是零值绝缘子也可能是绝缘子污秽，实际上就是无法确定究竟是哪一种分类状况。首先进行三次不同采样时刻的融合来说明证据理论的推理过程，表5和表6为PNN子神经网络进行识别后的三次不同采样时刻输入得到的概率输出结果。

表5 绝缘子温度实测

最高温度/℃	18.3
最低温度/℃	14.5
环境温度/℃	14.8
最大温差/℃	3.8（最高温度-环境温度）
故障判据	绝缘子局部温度偏高，温差超过0.5-1 K
判别结果	疑似零值绝缘子

表6 PNN期望输出

序号	零值绝缘子 $m(A)$	绝缘子污秽 $m(B)$	不确定 $m(\theta)$
1	0.45	0.35	0.2
2	0.7	0.2	0.1
3	0.6	0.2	0.2

本系统在完成主要装置的设计后，在北京某特高压电站进行实测，以下分析过程为本装置在实测中得到的分析情况，具体参见图6绝缘子热像图和表5、表6 绝缘子故障判别分析。

绝缘子部分进行的融合计算： $K'_1=m_1(A)m_2(B)+m_1(B)m_2(A)=0.335$ 。 $m'(A)=[m_1(A)m_2(A)+m_1(A) \cdot$

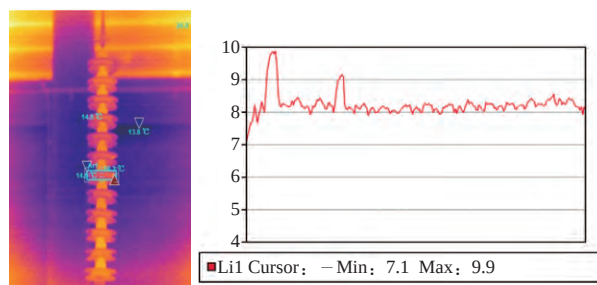


图6 绝缘子热像图和温度分布曲线

$m_2(\theta)+m_1(\theta)m_2(A)]/(1-K'_1)=0.751\ 880$ 。 $m'(B)=[m_1(B)m_2(B)+m_1(B)m_2(\theta)+m_1(\theta)m_2(B)]/(1-K'_1)=0.218\ 045$ 。 $m'(\theta)=m_1(\theta)m_2(\theta)/(1-K'_1)=0.030\ 075$ 。得到，零值绝缘子 $m'(A)=0.751\ 880$ 。绝缘子污秽 $m'(B)=0.218\ 045$ 。不确定 $m'(\theta)=0.030\ 075$ 。

将第一次融合的结果再与表6中第三次采样的结果进行融合，可以得到： $K'_2=m'(A)m_3(B)+m'(B)m_3(A)=0.281\ 203$ 。 $m(A)=[m'(A)m_3(A)+m'(A)m_3(\theta)+m'(\theta)m_3(A)]/(1-K'_2)=0.861\ 925$ 。 $m(B)=[m'(B)m_3(B)+m'(B)m_3(\theta)+m'(\theta)m_3(B)]/(1-K'_2)=0.129\ 707$ 。 $m(\theta)=m'(\theta)m_3(\theta)/(1-K'_2)=0.041\ 841$ 。得到，零值绝缘子 $m(A)=0.862$ ，绝缘子污秽 $m(B)=0.130$ ，不确定 $m(\theta)=0.042\Omega$ 。

5 结束语

本示例的图像，该绝缘子红外成像符合绝缘子片老化发热典型特征。同时经过进一步的停电检修测量，该片绝缘子绝缘电阻为200 MΩ，根据Q/GDW 1168—2013《输变电设备状态检修试验规程》，也可判定该绝缘子为零值绝缘子。

可以看出经过信息融合技术得到的融合结果，能直接判断出该绝缘子为零值绝缘子。相比原始采用热红外设备得到的图像，能较好地将结果的概率数值朝正确的结果靠近。降低不确定度和误判率。这样能帮助变电站的巡视人员无须借助专家经验和停电测试，能清晰地划分出故障和非故障设备，减少误判率。

参考文献

- [1] 夏德芬. 红外热像检测零值绝缘子影响因素研究 (下转第35页)

减出力的方法实测的 B 值能够准确反映系统静态频率特性系数 β 的实际值, 实测过程安全可靠、测试方法更加优化且工程操作方面易于实现。

参考文献

- [1] 刘振亚. 中国电力与能源 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [2] 孙玉娇, 周勤勇, 申洪. 未来中国输电网发展模式的分析与展望 [J]. 电网技术, 2013, 37 (7): 1929-1935.
- [3] 高翔, 等. 现代电网频率控制应用技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [4] 李卫东, 常桦骥, 陈兆庆, 等. 区域控制偏差的动态内涵 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40 (24): 146-150.
- [5] 唐跃中. AGC按联络线偏差控制时频率偏差系数的确定 [J]. 电网技术, 1997, 21 (6): 5-7, 13.
- [6] 魏晖, 沈善德, 朱守真, 等. 系统自然频率特性系数的实测与计算 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (5): 49-52.
- [7] 刘尧, 李卫东. 自动发电控制中频率偏差系数确定方法的探讨 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (6): 42-47.
- [8] Kennedy T, Hoyt S M, Abell C F. Variable,

nonlinear tie-line frequency bias for interconnected systems control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3 (3): 1244-1253.

- [9] Oni B, Graham H, Walker L. Investigation of nonlinear tie line bias control of interconnected power systems [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100 (5): 2350-2356.
- [10] 文丽, 王坚, 陈明辉, 等. 三段式频率偏差系数及其在互联电网调频中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (19): 59-63.
- [11] 赵万宗, 李滨, 韦化, 等. 互联电网CPS标准下计及一次调频的最优AGC控制模型 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36 (10): 2656-2664.
- [12] 贾燕冰, 严正, 高翔, 等. 基于动态系数法的互联电网K系数调整策略 [J]. 电网技术, 2009, 33 (12): 72-76.
- [13] DL/T 5003—2005 电力系统调度自动化设计技术规范 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [14] 任广宇. CPS 标准下动态调整频率偏差系数的自动发电控制 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [15] 袁炜灯, 关杰康, 郑风雷, 等. 多元件并行运行电力系统供电可靠性评估方法 [J]. 2017, 12 (2): 43-46.

(收稿日期: 2017-02-18) EA

(上接第29页)

- [D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [2] Q/GDW 1168—2013 输变电设备状态检修试验规程 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [3] 王静雷. 热红外图像异常目标检测算法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [4] 何洪英, 姚建刚, 蒋正龙, 等. 利用红外图像特征和径向基概率神经网络识别不同湿度条件下绝缘子的污秽等级 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (8): 117-123.
- [5] 张杰. 红外热成像测温技术及其应用研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [6] 李佐胜, 李文刚, 姚建刚, 等. 应用绝缘子红外

热像处理的现场污秽等级检测方法 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (4): 132-138.

- [7] 陈水桥, 陈洪山, 张训生. 红外热成像法研究电路板热分布特性 [J]. 物理实验, 2011, 6 (3): 8-11.
- [8] 张彦, 姚建刚, 毛田, 等. WebGIS红外热像零值绝缘子在线检测系统 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25 (4): 51-57.
- [9] 李旦. 基于红外热像的零值绝缘子图像处理关键技术研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [10] 陈金法. 基于红外热像技术的绝缘子状态检测与诊断 [J]. 电工电气, 2011 (12): 42-47.

(收稿日期: 2016-11-08) EA