

交联聚乙烯电缆局部放电灰度图像的模式识别

廖瑞金, 犹登亮, 周 淙, 刘 玲

(重庆大学高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044)

Pattern Recognition of XLPE Cable Partial Discharge Base on Gray Image

LIAO Rui-jin, YOU Deng-liang, ZHOU Quan, LIU Ling

(The key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

摘要: 局部放电模式识别是判断电气设备绝缘状况的重要方法之一。分形理论在局部放电特征的提取上是一种行之有效的方法,通过构造交联聚乙烯(XLPE)电缆局部放电信号的灰度图像,采用逐段搜索确定无标度区域,并采用盒维数与信息维数为特征量作为人工神经网络的输入,对局部放电缺陷进行模式识别。研究表明分形特征在局部放电模式识别上具有良好的效果。

关键词: 局部放电; 分形理论; 无标度区; 人工神经网络; 模式识别

中文分类号: TM855

文献标识码: A

Abstract: Partial discharge pattern recognition is an important way to assess insulation condition of electrical equipment. Fractal theory is effective to extract features of PD. Based on the construction of gray image of XLPE PD signals, this paper determines the scaleless range by piecewise search, selects the box-dimension and information dimension as the input variables for artificial neural network and carries out PD pattern recognition. Results indicate the extracted fractal characteristics can meet the requirements of PD pattern recognition.

Key words: partial discharge(PD); fractal theory; fractal scaleless range; artificial neural networks; pattern recognition

0 引言

交联聚乙烯电力电缆以其合理的工艺和结构、安装敷设简单、运行维护工作少、优良的电气性能和安全可靠的运行特点,在电力系统中得到了广泛的应用。电缆运行的可靠性关系电网安全,由于 XLPE 电缆制造或安装中留下的缺陷也常导致事故发生,而局部放电能有效反映电缆内部缺陷状况。因此,在线监测 XLPE 电缆局部放电成为当前的研究热点。

XLPE 电缆局部放电的在线监测,对保证电缆的安全可靠运行、掌握电缆的绝缘状况及指导检修工作有着十分重要的意义。要准确地了解和掌握 XLPE 电缆内缺陷类型的性质和特征,有效的方法是对获得的局部放电信号进行模式识别。

特征提取和模式分类是局部放电模式识别的两个关键环节。随着数字化技术的发展,局部放电可以采用二维谱图、三维谱图、脉冲波形等表示。从谱图中可以提取统计特征、分形特征、矩特征等用于模式识别。文[1]中提出了一种基于灰度图像的数学形态谱的特征量提取方法。目前,广泛应用于局部放电模式识别的方法主要有:距离分类法,人工神经网络识别法、专家系统等^[2]。

1975 年,文 [2] 率先提出分形几何的概念。1995 年,文[3]首次将分形特征应用于局部放电识别,以 ϕ_{q-n} 三维谱图的分维数和空缺率为特征量,研究了环氧树脂空隙放电的模式识别^[3]。文[4]提出了从局部放电脉冲序列的二维散点图中提取 Hausdorff 维数、信息维数和分布中心等新特征量提取方法,但是散点图中只有当散点数超过 1 000 时才有明显的无标度区,此方法有一定的局限性。

笔者通过在实验室模拟 XLPE 电缆的常见缺陷,获取了大量局部放电样本数据,构造出 XLPE 电缆局部放电灰度图像,利用改进的自适应分段搜索法确定分形图像在无标度区,计算灰度图像的分形特征量-盒维数和信息维数作为 BP 神经网络的识别输入量。

1 XLPE 电缆缺陷模型及灰度图像

1.1 XLPE 电缆缺陷模型及试验线路

文[5-6]研究表明,导致电缆发生局部放电的主

收稿日期: 2006-08-25; 修回日期: 2006-10-16

作者简介: 廖瑞金(1963-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事电气设备在线监测与诊断技术。

要原因是:①XLPE 电力电缆运行于地下,潮湿环境可能使电缆局部受潮;②电缆在施工安装以及运行中人为破坏致使电缆局部绝缘损伤;③电缆长期在水分和电场的共同作用下,发展出绝缘水树枝;④电缆头在施工时未达到工艺要求而留下气泡;⑤电缆线芯表面毛刺等。

笔者采用 4 段实际的 10 kV 电缆作为试品,分别制作了表面毛刺、局部损伤、内部气泡和绝缘受潮、水树 4 种缺陷。制作电缆头线芯表面有毛刺的试验模型时,先剥开电缆屏蔽层、半导体层和绝缘层,在电缆线芯表面缠绕少量小导线,然后热缩绝缘管,安装屏蔽层和接地线;制作局部损伤模型时,将 1 cm 绝缘挖去约 1/2 厚度,使其绝缘性能降低,然后恢复金属屏蔽层;制作绝缘含有气泡的试验模型时,采取人工针刺的力式,先剖开电缆的金属屏蔽层和外半导体层,用针刺电缆绝缘,针刺深度为绝缘层的 2/3,呈下三角形排列的 3 个气隙然后完成电缆头的制作;制作绝缘含有水树的电缆头时,将水分渗入绝缘层,经一定时间培养出水树(最终将转化为电树)。图 1 是 4 种缺陷的集中示意图,实际的缺陷模型中 4 种缺陷独立存在。具体试验接线原理见图 2。

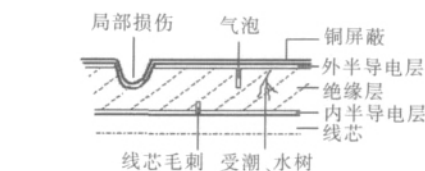
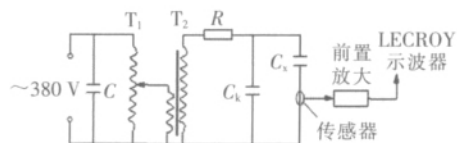


图 1 XLPE 电缆缺陷模型示意图



T_1 ——感应调压器,0~380 V T_2 ——无局放试验变压器,100 kV/0.25 A
C——滤波电容 R ——保护电阻,100 kV/10 Ω C_k ——耦合电容
 C_s ——电缆试品电容 前置放大器——10 倍放大,带宽 80 MHz 示波器——Lecroy WavePro7100,带宽 1 GHz,最高采样率 20 GS/s

图 2 XLPE 电缆局部放电试验研究接线图

1.2 局部放电样本的采集

试验前,通过预加电压测定高压线路的最低放电电压,确保整个试验线路在试验过程中不发生放电,本试验系统在 28 kV 以内无局部放电现象发生。试验过程中每个缺陷试验条件见表 1。

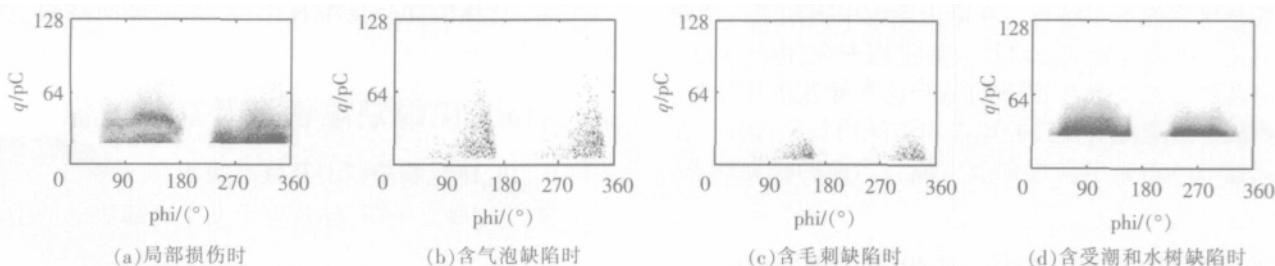


图 4 电缆 4 种缺陷的灰度图象

表 1 4 种模型对应试验电压及样本数

缺陷模型	试验电压/kV	样本数
毛刺缺陷	15/16/17	30/30/30
局部损伤	14/14.5/15	30/30/30
绝缘含气泡	14/15/16	30/30/30
受潮和水树	13/14/15	30/30/30

2 局部放电灰度图构造

将工频相位 ϕ 轴按照 0~360 划分为 360 个小区间,将放电量 q 轴按照 0~1 000 pC 划分成 128 个小区间,因而 ϕq 平面被划分成 360×128 个小区间;统计 ϕq 平面上各小区间内的放电次数,即得到 $H_n(q, \phi)$ 空间曲面。灰度图象的灰度级为 0~255,根据 $H_n(q, \phi)$ 空间曲面最小值和最大值分别对应于最小灰度级和最大灰度级的原则,构造局部放电 $H_n(q, \phi)$ 灰度图象,各象素点的灰度值为:

$$m_{ij} = n_{ij} / n_{\max} \times 255 \quad (1)$$

式中: m_{ij} 为 $H_n(q, \phi)$ 图象象素点灰度; n_{ij} 为 $H_n(q, \phi)$ 空间曲面放电次数; $n_{\max}$ 为 $H_n(q, \phi)$ 最大放电次数。图 3 是毛刺缺陷局部放电的 $H_n(q, \phi)$ 三维图谱的正负半波图;图 4 为对应 4 种缺陷的灰度图象。

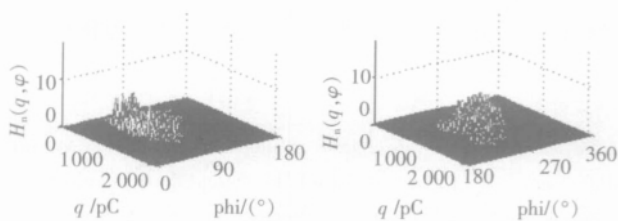


图 3 电缆含气泡缺陷时 $H_n(q, \phi)$ 谱图

3 局部放电灰度图象分维数提取

3.1 自适应分段搜索标度法

XLPE 电缆局部放电图像只在一定尺度范围内具有自相似性,这个范围称为无标度区,它是研究随机分形的基础。分维数的计算只能以无标度区为基础。文献[3, 7-9]因为没有考虑无标度区的确定,严格来说,不是真正意义上的分形维。

确定分形无标度区的方法有^[10]:人工判定法、相关系数检验法、强化系数法、拟合误差法、分维值误差法、自相似比法、基于遗传算法的方法和三折线法等。但其各自都有自身的缺点:人工判定法需要人工

干预,不利于人工解算;相关系数检验法约束太宽松,对系统性弯曲的鉴别能力很差;强化系数法是一种经验方法,对系统弯曲鉴别能力也不高;拟合误差法容易陷入局部最优;分维值误差法求得的分维值偏小;自相似比法计算过程复杂、繁琐;基于遗传算法^[11]的计算方法,边界条件难以量化,计算的可重复性差;三折线法截取的非标度区存在不可靠性。笔者提出新的自适应分段搜索确定分形图象的非标度区。

设实验数据由 n 个点组成, (X_i, Y_i) 为 i 点的坐标,其中 $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。令非标度区的起点是第 b 个点,即 (X_b, Y_b) , 终点是第 e 个点,即 (X_e, Y_e) , 且 $1 \leq b < e \leq n$, 平均残差平方和为:

$$G = \frac{1}{e-b+1} \sum_{i=b}^e (Y_i - \alpha - \beta X_i)^2 \quad (2)$$

且达到最小,其中 α, β 为直线方程的参数。限定约束条件为:

$$e-b \geq n/4 \quad (3)$$

即非标度区的长度不能太短,至少要包含实验点总数的 $1/4$ 。

具体实现过程如下: ①获得多尺度观察结果 $[\ln \delta, \ln N_\delta]$, 记为实验点 (X_i, Y_i) ($i=1, 2, 3, \dots, n$); ②逐段搜索的初始长度 $m=n/4$, 循环开始; ③依次对区间 $[1, m], [2, m+1], \dots, [n-m-1, n]$ 内的实验点进行最小二乘直线拟合, 并采用式 (2) 计算各直线段的平均残差平方和, 得到残差序列 $S_j(m)$ ($j=1, 2, \dots, n-m-1$), 记残差序列 $S_j(m)$ 的最小元素为 $S_{\min}(m)$, 记录 $S_{\min}(m)$ 本身及其对应区间的所有信息; ④ $m=m+1$, 返回步骤 ③开始下一次循环, 当 $m=n$ 时整个循环终止; ⑤对所有 m , 最小的 $S_{\min}(m)$ 对应的区间就是分形非标度区, 记录该区间信息。

3.2 局放原始灰度图象盒维数和信息维数计算

确定非标度区间后, 就可以计算局部放电原始灰度图象盒维数和信息维数了。原始灰度图象正负半波的盒维数 D_B^+, D_B^- 计算流程图见图 5。原始灰度图象正负半波的信息维数 D_I^+, D_I^- 计算流程图见图 6。

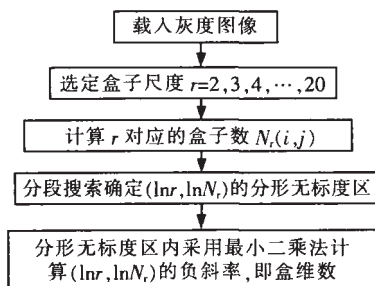


图 5 原始灰度图象盒维数计算流程图

4 基于 BP 神经网络和分形特征的模式识别

采用 BP 神经网络为模式分类器, 见图 7。输入

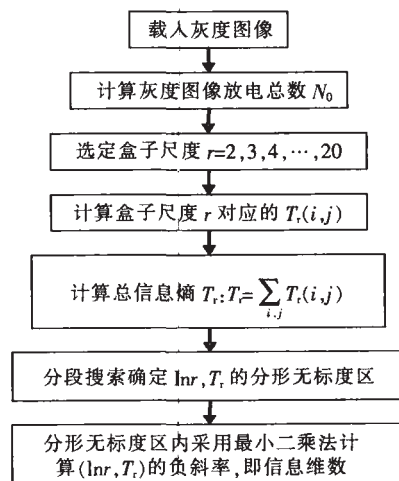


图 6 原始灰度图像信息维数计算流程图

节点共 4 个, 以 XLPE 电缆局部放电灰度图象的分维数 $D_B^+, D_B^-, D_I^+, D_I^-$ 为输入量; 输出节点 4 个, 对应识别结果, 对 XLPE 电缆绝缘内不同缺陷的局部放电进行识别。表 2 为以分形特征量为模式识别分类器的输入量识别结果。为了便于比较以分形特征作为识别特征量的识别效果, 笔者采用相同的试验数据, 对以局部放电的三维谱图正负半波统计算子为特征量^[5]的 BP 神经网络模式识别率见表 3。

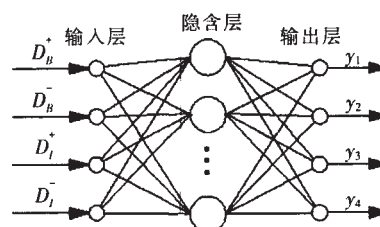


图 7 XLPE 电缆局部放电模式识别方案

表 2 以分形特征为特征量识别结果

放电类型	待识别/总样本数	识别率/%
毛刺缺陷	30/90	88
局部损伤	30/90	92
绝缘含气泡	30/90	90
受潮和水树	30/90	95

表 3 以统计算子为特征量的识别率

放电类型	识别率/%
毛刺缺陷	85
局部损伤	93
绝缘含气泡	87
受潮和水树	95

从表 2 识别结果可以看出, 4 种识别效果都在 88% 以上, 特别是水树的识别率达到了 95%, 识别效果良好。识别结果表明, 以非标度区的分形特征量为模式识别的输入是有效的。

对比表 2 和表 3 发现: 分形特征量为分类器的输入除局部损伤识别率较低以外其 (下转第 91 页)

因为真空不存在对流传热,使得VIS中的径向传热与其它绝缘介质电气设备相比大大减少,为了加强轴向传热需要增加主回路导体的横截面积。因此建议设计人员在设计真空绝缘组合电器时适当增加主回路导体半径并尽可能采用实心导体以帮助从轴向散出VIS中的热量。

(2)主回路导体长度越小,许用载流量越大。应在满足设计要求的情况下尽可能减小主回路导体的长度,这样一方面有利于散热,另一方面也有利于减小VIS的体积。

(3)接触电阻越小,许用载流量越大。应尽量选用接触电阻小的断路器和隔离开关。因为接触电阻是电气设备的主要热源,例如在断路器接触电阻为 $12.5\ \mu\Omega$ 、隔离开关接触电阻是 $5\ \mu\Omega$ 、主导体半径为 0.06 m 、长度为 3 m 的VIS中,接触电阻的发热量占总发热量的 67.4% 。另一方面接触电阻多处于VIS的内部,其发出的热量不易散出。目前在市场上已出现回路电阻为 $7\pm\ \mu\Omega$ 的 40.5 kV 真空断路器,因此VIS的载流量仍有上升的空间。

(4)由于高于 40.5 kV 电压等级的VIS绝缘距

离的增加,因此在相同条件下的可用载流量要小于 40.5 kV 的可用载流量。

5 结论

(1)确定了VIS最高允许温度,建立了简化的热学模型,并应用有限元软件ANSYS进行了长期发热计算。

(2)根据长期发热计算结果,对各种影响VIS载流量的因素进行了分析,并提出了对VIS的设计建议。

(3)经过计算得到了 40.5 kV VIS的可用载流量范围:在一定条件下,含有母线的 40.5 kV VIS载流量约可以达到 2000 A ;不含母线的 40.5 kV VIS载流量约可以达到 2500 A 。

参考文献:

- [1] 徐国政,张节容,钱家骊,等.高压断路器原理和应用[M].北京:清华大学出版社,2000.
- [2] 吴励坚.大电流母线的理论基础与设计[M].北京:电力工业出版社,1984.
- [3] John H Lienhard. A Heat Transfer Textbook. Third Edition [M]. New Jersey: Printice-hall, Englewood Cliffs, 2002.

(上接第87页)

它3种缺陷的识别率皆高于以统计算子为特征量输入的认识率。结果表明,两种识别方法都是有效的。

5 结论

(1)提出逐段搜索法确定XLPE电缆局部放电信号的无标度区,为灰度图像的分维数计算提供可靠的依据。识别的结果表明无标度区的确定是有效的。

(2)通过计算灰度图像正、负半波的盒维数和信息维数,并将其作为BP神经网络的输入,得到了较好的识别效果。

(3)通过与以三维谱图正、负半波统计算子为特征量的BP神经网络模式识别率相比较,证明了两种识别方法的有效性。

参考文献:

- [1] 刘云鹏,律方成,李成榕.局部放电灰度图像数学形态谱的研究[J].中国电机工程学报,2004,24(5):179-183.
- [2] 张济忠.分形[M].北京:清华大学出版社,1995.

- [3] Satish L, Zaengl W S. Can Fractal Features be Used for Recognizing 3-D Partial Discharge Patterns [J]. IEEE trans on Dielectrics and Elect. Insulation, 1995, 2(3): 352-359.
- [4] 高凯,谈克雄,李福祺,等.基于散点集分形特征的局部放电模式识别研究[J].中国电机工程学报,2002,22(5):22-26.
- [5] 杨孝华.基于人工神经网络的XLPE电力电缆局部放电模式识别的研究[D].重庆:重庆大学,2002.
- [6] 孙佳峰,仲海,张军.电力电缆击穿机理及常见故障原因[J].农村电气化,2000(8):31.
- [7] 李剑.局部放电灰度图像识别特征提取与分形压缩方法的研究[D].重庆:重庆大学,2001.
- [8] Krivda A, Gulski E, Satish L. The Use of Fractal Features for Recognition of 3-D Discharge Patterns[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(5): 889-892.
- [9] 李剑,孙才新.局部放电灰度图像分维数研究[J].中国电机工程学报,2002,22(8):123-127.
- [10] 巫兆聪.分形分析中的无标度区确定问题[J].测绘学报,2002,31(3):240-244.
- [11] 费斌,蒋庄德,王海容.基于遗传算法求解分形无标度区的方法[J].西安交通大学学报,1998,7(32):72-75.

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!