

绝缘局部放电特征量提取与模式识别研究

针对高压设备出现的绝缘缺陷及局部放电特点,为提高电缆模拟缺陷的识别率,设计了三种典型的绝缘缺陷物理模型,并采用统计和经验模态分解与奇异值分解相结合两种不同的特征量提取方法进行缺陷类型辨识,最后采用支持向量机进行模式识别。实验结果表明两种特征量的识别效果均良好,且奇异值分解特征量相对统计特征量识别效率高、识别时间短,表现出了更为良好的识别特性。

鲁大勇/国网濮阳供电公司 李鹏飞/国网河南省电力公司 蒋波涛/徐州凯思特机电科技有限公司

0 引言

针对电气设备局部放电(Partial Discharge, PD)信号的辨识,传统做法是绘制出各种放电类型的二维谱图,然后提取各种指纹谱图特征参数^[1-4],再通过聚类或者神经网络进行PD的模式识别^[5]。但对于高采样率且数据样本存量大的高频检测法,由于前期数据处理工作量巨大,而且当所选用特征较多或者神经网络节点数较多时,按照传统做法需要很长时间,且PD放电辨识效果还不一定达到最佳。

经验模态分解(EMD)能提供良好的时频局部化特性,分解得到的瞬时频率能合理定义IMF,且算法简单,不会出现能量泄露。另外,EMD不需要选择基小波和分解层次,也不需要选择窗函数。然而,EMD在模式识别应用中不具有平移不变性,表现为信号在时域上微小平移会导致各尺度上的矩阵系数发生较大变化。而矩阵的奇异值在反映矩阵

的固有特征且具有良好稳健性的同时,能够有效地克服上述的不足^[6]。

本文采用统计和EMD与奇异值分解(SVD)两种不同的提取特征量的方法进行缺陷类型辨识。对于提取出的两种不同的特征量采用适用于小样本、非线性且高维特征量的分类器——支持向量机(SVM)进行模式识别,最后对比两种特征量的识别特性,得出最佳的模式识别方法。

1 绝缘局部放电实验

1.1 绝缘局部放电实验一般步骤

根据实验要求,本文构造针板放电、沿面放电及固体绝缘气隙放电三种PD模型。PD实验电路如图1所示。实验电路连接正确,接地线一定要连接牢靠,实验室接地装置良好,接地电阻要达到要求^[7]。

1) 测量最大允许实验电压。在未放置缺陷试品和电极的完整实验电路中,平稳缓慢升高电压,当示波器出现放电脉冲时的实验电压值即为最大允许实验电压。

2) 实验和采集PD信号。将要实验的PD类型的相应试品和电极放入实验容器后结合容器内介质形成某种PD类型所需环境,缓慢均匀地升高电压,当示波器上出现放电脉冲时所加电压为起始放电电压。

3) 放电量校正。如果要作放电量分析,由于PD实际放电量无法直接测量,一般用视在放电量表示PD量的大小。视



鲁大勇/高级工程师

关键词/Keywords

局部放电 ·
经验模态分解 ·
奇异值分解 ·
支持向量机 ·

江苏省科技型企业技术创新基金项目(BC2014071),
徐州市科技计划项目(KC14GMO47)。

在放电量与脉冲电压的比例如式(1)所示

$$K_0 = \frac{q_0}{H} \quad (1)$$

式中, H 为示波器上脉冲电压大小。本文输入 500 pC 电量, 测得示波器上脉冲电压, 从而得到 K_0 。

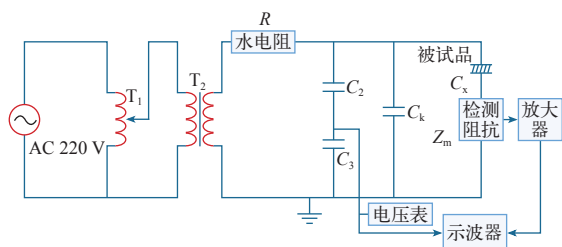


图1 PD实验电路

图1中, T_1 为调压器, 50 kV·A, 0~400 V, 125 A; T_2 为变压器, 50 kV·A, 50 kV; R 为水电阻, 5 kΩ; C_1 、 C_2 为电容分压器, 2 000 : 1; $C_k = 990$ pF; C_x 为缺陷模型。

1.2 三种绝缘放电信号波形

图2~图4为三种局部放电类型放电信号, 采样频率为1 MHz, 取一个工频周期信号, 即20 039个数据点。图中局部放电信号极性与电压相位相反, 其原因是检测模块放反。由于实验装置难以拆除, 故不作更改, 处理数据时对纵坐标取反即可。



图2 实测空气中电晕放电PD信号

由图2~图4可以看出局部放电信号都出现在电压绝对值增大的相位上。图2为空气中电晕放电, 可以看出由于极性效应, 负半周期放电次数多, 呈现负半周密而少, 正半周期稀而大的现象。图3为空气中沿面放电, 可以看出正、负

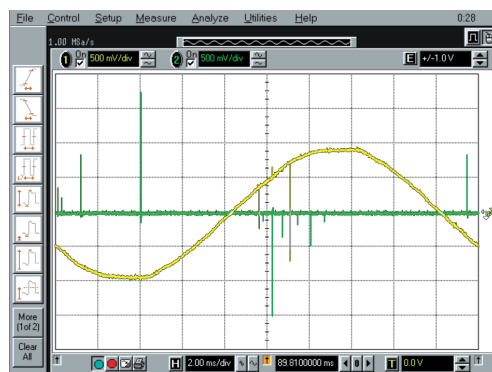


图3 实测空气中沿面放电PD信号



图4 实测油中气隙放电PD信号

半周期局部放电信号不对称, 负半周期放电次数多于正半周期。图4为油中气隙放电, 可以看出正、负半周期局部放电信号比较对称。以上关于三种实测局部放电信号都与理论上各类型放电特征描述基本相符, 说明这些局部放电信号良好。但对于实际状况中的放电现象并不能直接观察得出结论, 原因有以下几点: ①放电现象具有偶然性, 并非每一次放电都具有本类型放电的显著特征; ②实际状况中的放电在多数情况下是复合放电, 是多种情况的累加, 不能直接识别。

2 绝缘局部放电信号的特征量提取

模式识别主要指对系统的描述、理解和综合, 要通过大量的信息对复杂的过程学习、判断并寻找规律。在这个过程中, 要用可以代表系统特征的量来描述系统, 这个参量就称为特征量。特征量的选择很大程度上就决定了模式识别的最

终效果^[8]。

文中对统计特征量提取和基于EMD-SVD的特征量提取两种不同提取方法都做了相应的研究,并对比了不同提取方法的识别效率。

2.1 统计特征量提取

2.1.1 统计特征量提取方法及步骤

统计特征量提取方法主要是对脉冲电流法测得的放电信号构造指纹谱图,包括二维 $\varphi-q$ 谱图、 $\varphi-n$ 谱图、 $n-q$ 谱图和三维 $\varphi-q-n$ 谱图,然后提取各种指纹谱图特征参数。统计特征量提取步骤如下。

1) 构造局部放电指纹图谱。从局部放电检测装置获得的基本参数为:①放电量 q_i ,第 i 次放电电视在放电量;②放电相位 φ_i ,第 i 次放电脉冲相位;③放电重复率 n ,单位时间内放电次数。对这些基本参数进行统计分析,可以得到二维 $\varphi-q$ 谱图、 $\varphi-n$ 谱图、 $n-q$ 谱图和三维 $\varphi-q-n$ 谱图。将这种特殊图形称为放电指,并进一步提取指纹特征就可得到特征量。

2) 提取局部放电特征量。局部放电二维 $\varphi-q$ 谱图、 $\varphi-n$ 谱图反映了函数关系 $q(\varphi)$ 、 $n(\varphi)$,分析图谱特性时,以 φ 作为随机变量, q 、 n 对应于概率密度。假设图谱服从正态分布,用正态分布统计算子的计算方法提取局部放电特征量。

2.1.2 局部放电信号波形处理

根据统计特征量的提取步骤,对从示波器采集到的数据首先进行预处理。下面以电晕放电为例简要介绍数据处理过程,处理步骤如下。

1) 去除信号噪声。首先采取阈值去噪的方法,去除密集而微小的噪声。然后采用小波自适应去噪,主要针对毛刺信号,如图5所示。

2) 每种类型的放电,分别有10个样本,每个样本采取40个周期的放电波形。对每个周期的采样点提取峰值,然后对每个采样点取出40个周期的最大值,如图6所示。

3) 对图 $\Psi-Q_{\max}$ 提取特征量 Sk^+ 、 Sk^- 、 Ku^+ 、 Ku^- 、 Pe 、 CC 、 Q 、 m 和 mcc ,对 $\Psi-Q_{ave}$ 图谱提取特征量 Sk^- 、 Ku^+ 、 Ku^- 、 Pe 、 CC 、 Q 和 mcc ,对图

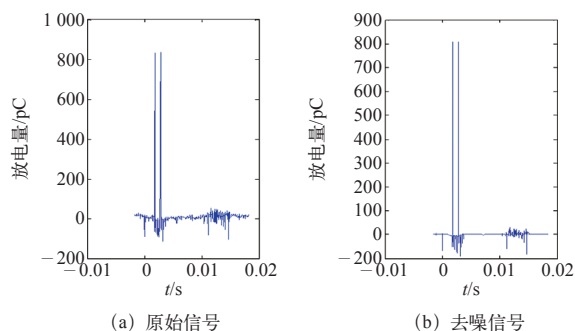


图5 去噪前后的电晕放电波形对比

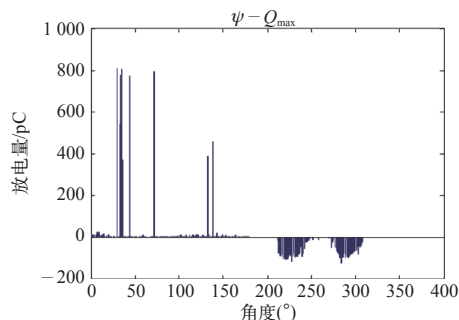


图6 电晕放电相位-最大值波形

谱 $\Psi-n$ 提取特征量 Sk^+ 、 Sk^- 、 Ku^+ 、 Ku^- 、 Pe 和 CC 。绘出电晕放电各个特征量的变化图形,如图7所示。

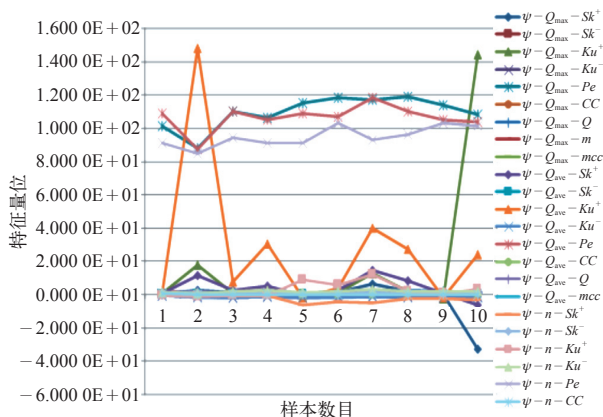


图7 电晕放电特征量变化图

2.2 基于EMD-SVD的特征量提取

EMD能自适应地将复杂信号分解为多个频率由高到低的单一或窄带频率的IMF分量。IMF分量构建奇异值分解矩阵,其行向量表示不同频率段的时域信号。奇异值分解后得到的奇异值反映各瞬时频率段信号的集中情况。

EMD-SVD就是利用EMD得到的各阶IMF分

量构建矩阵做SVD, 得到能反映各单一或窄带频率的IMF分量的能量集中情况的特征量。EMD-SVD是利用各类PD信号频率特征对各类PD信号进行辨识。用奇异值向量作为特征量就是提取各类PD信号频率特征^[9]。

2.2.1 经验模态分解理论-EMD

EMD步骤。

1) 找出信号的所有极值点, 利用曲线拟合方法分别将所有极大值点和所有极小值点连接拟合成上、下两条包络线, 计算两条包络线的均值为 m_1 , 用原数据序列 $x(t)$ 减去该均值即可得到一个去掉低频的新数据序列 h_1 , 即

$$h_1 = x(t) - m_1 \quad (2)$$

2) 因为 h_1 一般仍不是一个IMF分量序列, 为此需要对其重复进行上述处理过程。重复进行上述处理过程 k 次, 直到 h_1 符合IMF的定义要求, 所得到的均值趋于零为止, 这样就得到了第1个IMF分量 $c_1(t)$, 它代表信号 $x(t)$ 中最高频率的分量

$$h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t) = h_{1k}(t) \quad (3)$$

$$c_1(t) = h_{1k}(t) = imf_1 \quad (4)$$

3) 将IMF从信号中分离出来, 得到的差值信号为

$$r_1 = x(t) - imf_1 = x(t) - c_1(t) \quad (5)$$

4) 含有较多周期成分, 对差值信号重复步骤1)~3), 得到的第二个分量, 如此反复进行, 直到或残余分量 r_n 满足终止条件时(一般 r_n 是单调函数、常量或仅有1个极点时), EMD停止。

信号经分解后可表示为

$$x(t) = \sum_{s=1}^n imf_s + r_n \quad (6)$$

式中, imf_s 为信号频率从高到低的使瞬时频率能合理定义的IMF分量。

EMD流程图如图8所示。

2.2.2 奇异值理论-SVD

奇异值分解的本质是正交变换, 是谱分析理论在任意矩阵的推广。在信号处理中, 奇异值实际意义为反映信号能量集中情况, 在矩阵中表现为矩阵固有特征, 具有处理速度快和良好的平稳

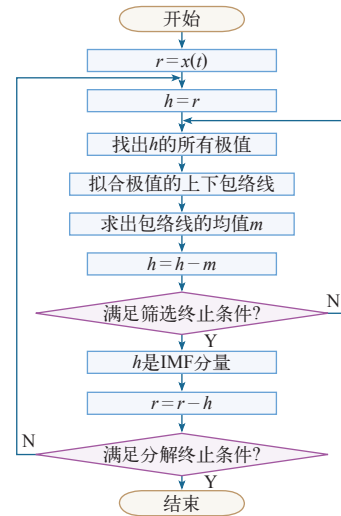


图8 EMD流程图

性, 有利于有较强随机性的PD信号模式识别。

定义双线性函数为: $f(x, y) \in x^T A y$, $x \in R^{m \times 1}$, $A \in R^{m \times n}$, $y \in R^{n \times 1}$ 。

对向量 x 、 y 作线性变换: $x = U\alpha$ 、 $y = V\beta$, 则 $f(x, y) \in \alpha^T S \beta$, $S = U^T A V$ 。

若是对称矩阵, 则存在正交矩阵、使得为对角矩阵。

由矩阵SVD定理可知: 令 $A \in R^{m \times n}$ (或 $A \in C^{m \times n}$), 则存在正交(酉)矩阵 $U \in R^{m \times m}$ (或 $U \in C^{m \times m}$) 和 $V \in R^{n \times n}$ (或 $V \in C^{n \times n}$) 使得: $A = U \Sigma V^T$ 或 $(A = U \Sigma V^H)$, 其中 $\Sigma = \begin{pmatrix} \Sigma_r & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$, $\Sigma_r = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r)$ 且 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \sigma_r > 0$, $r = \text{rank}(A)$, $r \leq \min(m, n)$ 。

2.2.3 EMD-SVD的特征量提取步骤

基于EMD与SVD相结合的特征量提取步骤如下。

1) 根据EMD方法, 对PD信号做EMD, 利用经过去噪后的各个 imf_s 形成固有模态矩阵。

2) 对矩阵进行SVD, 得到奇异值向量作为特征向量输入SVM完成模式识别。

3 基于SVM的模式识别

SVM是一种从一组已经被标定的实验数据中查找函数的方法。相对神经网络识别器而言SVM识别器更适用于小样本、非线性及高维数据的模

式识别，其学习速度比神经网络快很多^[10]。

3.1 针对统计特征量的模式识别

在进行模式识别之前首先对获得的特征量进行相关性分析^[8]。然后对数据归一化，每种放电用5~6个样本训练SVM。在训练算法的选择上，实验采用三种针对非线性特征量算法，即基于遗传算法、粒子群算法和网格算法。三种算法所获得参数值如表1所示。经检验，当 $c=1$ ， $g=256$ 时识别效率最高，可达到86.666 7%，识别结果如图9所示。

表1 统计特征量算法参数

参数 算法	c	g	检验参数	识别率(%)
遗传算法	85.1	877.007 4	$c=1$ $g=256$	86.666 7
粒子群算法	0.925 59	220.892 3		
网格算法	85.031 4	778.522 3		

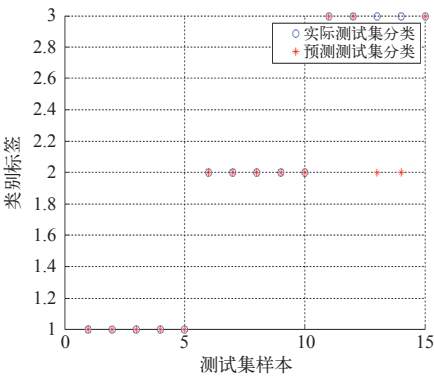


图9 统计特征量测试结果

每种局部放电有5个样本数据用于测试，由图9可以看出：对于三种类型的放电总识别率均达到86.666 7%。对于空气中电晕放电和空气中沿面放电识别率均达到了100%，而对于油中气隙放电识别率为60%，5个测试样本中，有2个被误识别为空气中沿面放电。

3.2 针对奇异值特征量的模式识别

由于SVD所得到的奇异值之间，属于不同频率的参数，是不具有相关性的。在这里就不作相关性分析。对数据归一化，每种放电用60个样本训练SVM，40个样本用于验证。三种算法的训练结果如表2所示。经检验，当 $c=85$ ， $g=46$ 时识别

效率最高，可达到90.997 4%，识别结果如图10所示。

表2 奇异值特征量算法参数

算法 参数	c	g	检验参数	识别率(%)
遗传算法	49.8	16	$c=85$ $g=46$	90.997 4
粒子群算法	85	3.5		
网格算法	1	27.8		

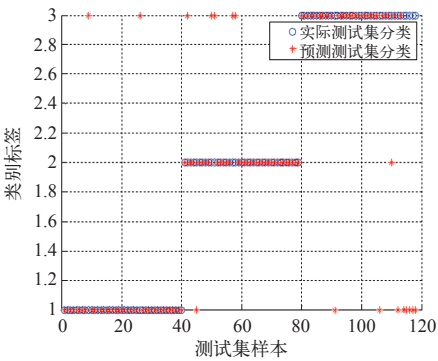


图10 奇异值分解系数特征量测试结果

由图可以看出 $c=85$ ， $g=46$ 时，识别率最高。令 $c=85$ ， $g=46$ ，将每类放电剩下的40个样本用于测试。得到识别结果见图10，识别率达到90.997 4%。

每种局部放电有40个周期的数据用于测试，由图10可以看出：对于电晕放电，成功识别38个，2个被误识别为气隙放电；对于空气中的沿面放电，成功识别36个，1个被误识别为电晕放电，3个被误识别为气隙放电；对于气隙放电，34个的数据被成功识别，1个被误识别为沿面放电，5个被误识别为电晕放电。总识别率达到90.997 4%。

4 结束语

本文基于三种典型的绝缘缺陷物理模型，对比分析了统计特征量提取以及EMD-SVD两种特征量提取方法的特点。采用SVM识别器对三种放电模型进行识别，实验结果表明，相比统计方法EMD-SVD产生的特征量能更加有效表征局部放电特征，其特征量数目少、识别时间短且识别效率更高。

本文采用的SVM识别器对于三种放电模型总

的识别效率均达到了85%以上,在本次分类识别中表现出了很高的识别率,其适用于小样本、非线性和高维数据分类,对于工程实际具有指导价值。

参考文献

- [1] 程养春, 刁常晋, 刘少宇, 等. 恒定电压下油纸绝缘局部放电发展规律及缺陷状态诊断 [J]. 高压技术, 2013, 39 (5): 1061-1068.
- [2] 张建文. 电气设备故障诊断技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [3] 郑殿春. 给予BP网络的局部放电模式识别 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2005.
- [4] Yan J M, Liao R J, et al. Measurements and analysis of surface damage on oil impregnated insulation paper caused by partial discharge [J]. Measure Ment Science and Technology, 2011, 22 (5): 655-703.
- [5] 廖瑞金, 严家明, 杨丽君, 等. 局部放电对油浸

绝缘纸表面损伤特性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (10): 129-136.

- [6] Sekii Y. Degradation of low-density polyethylene and cross linked polyethylene by partial discharge [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17 (1) : 116-124.
- [7] 汪可, 廖瑞金, 郑升讯, 等. 油浸绝缘纸电劣化过程中的局部放电混沌特性 [J]. 高电压技术, 2013, 39 (12) : 3075-3081.
- [8] 陈伟根, 许庭, 谢波, 等. 油纸绝缘气隙放电与油中产气规律相关回归分析 [J]. 高电压技术, 2013, 36 (3) : 59-64.
- [9] 邱昌容, 王乃庆. 电工设备局部放电及其测试技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [10] 成小瑛. 局部放电模式识别特征量提取方法研究与特征量相关性分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2003.

(收稿日期: 2015-06-09) **EA**

(上接第44页)

4 结束语

本文详细分析了三相六开关单周控制的工作原理并推导出其控制方程, 针对传统模拟单周PFC技术的缺点, 提出了一种单周PFC数字控制方案。该数字方案具有控制灵敏、可靠性高、一致性好、成本低及能够实现稳定数字控制等优点。最后通过实验验证, 证明了控制策略的可行性。能够实现输入电流很好地跟踪输入电压, 实现高功率因数校正, 具有较高的实际应用价值。

参考文献

- [1] Zheren Lai, Keyue Ma Smedley. A family of continuous-conduction-mode power-factor-correction controllers based on the general pulse-width modulator [J]. IEEE Transactions on Power Electron. 1998, 13 (3) : 501-510.

- [2] 樊铤, 韦微, 陈杰, 等. 单周期控制VIENNA整流器的研究 [J]. 电力电子技术, 2013, 47 (2) : 30-32.
- [3] Qiao Chongming, Smedley K M. A general threephase PFC controller for rectifiers with a series-connected dual-boost topology [J] . IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38 (1) : 137-148.
- [4] Ghodke D V, Chatterjee K, Fernandes B G. Modified one-cycle controlled bidirectional high-power-factor AC-to-DC converter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55 (6) : 2459-2472.
- [5] 凌雁波. 数字单周期控制技术的研究和应用 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [6] 张厚升. 单周控制的三相六开关高功率因数整流器的研究 [J]. 电能质量, 2010 (11) : 41-44.

(收稿日期: 2015-05-26) **EA**