

DOI: 10.7652/xjtuxb201704009

采用荧光光纤检测局部放电的自适应阈值方法

李威¹, 鲁华祥¹, 陈天翔², 陈刚¹

(1. 中国科学院半导体研究所高速电路与神经网络实验室, 100083, 北京;
2. 厦门理工学院福建省高电压技术重点实验室, 361024, 福建厦门)

摘要: 针对光测法实际检测中光电器件噪声及阈值设定困难的问题,提出了一种自适应的阈值方法。根据放电信号与噪声信号的相位分布差异,对采样数据进行分组量化与多周期累加。在充分分析累加序列功率成分的基础上,采用自回归(AR)谱估计理论,计算累加序列的功率谱并提取信号功率、噪声功率及谐波基波比三项功率谱指标。基于三项功率谱指标定义了一种放电评价参数,该参数能够表征信号功率占放电总功率的加权比值。通过噪声功率的波动幅度完成自适应阈值的设定。实验结果表明,所提方法可以根据采样数据动态调整阈值,实现放电的自动检测,无需人工干预,检测灵敏度高。该研究对于电力设备故障初期的预警及长期在线监测具有重要的意义。

关键词: 荧光光纤;系统噪声;相位分布;功率特征;评价准则

中图分类号: TM85 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)04-0059-08

Adaptive Threshold Method for Partial Discharge Detection by Fluorescent Fiber

LI Wei¹, LU Huaxiang¹, CHEN Tianxiang², CHEN Gang¹

(1. High Speed Circuits and Neural Networks Laboratory, Institute of Semiconductors CAS, Beijing 100083, China;
2. High-Voltage Key Laboratory of Fujian Province, Xiamen University of Technology, Xiamen, Fujian 361024, China)

Abstract: Aiming at the noise of photoelectric device and difficulty of threshold setting, an adaptive threshold method is proposed. According to the distribution differences of partial discharge (PD) signals and noises, the sample data are divided into groups and accumulated by multi-cycles in time domain. Sufficiently investigating the power features, the AR spectrum estimation is applied to calculate the power spectrum of the sequence, and three power indexes, i. e., total power, signal power and harmonic ratio, are extracted. Analyzing the indexes, a parameter is defined which can characterize the weighted ratio of signal power to total power, and the adaptive threshold is set in terms of the fluctuation of noise power. Experiments show that the proposed method is able to adapt the threshold according to sample data and realize auto-detection of PD with high sensitivity and without human intervention, especially for early warning and online monitor of electrical equipment.

Keywords: fluorescent fiber; system noise; phase distribution; power characteristics; evaluation criteria

局部放电会导致电力设备内部产生绝缘劣化,长此以往将影响设备的正常工作并带来安全隐患^[1]。局部放电过程会伴随产生电脉冲、电磁辐射、超声波、光辐射及其他分解产物,因此对应的检测方法主要有脉冲电流法、超高频检测法、超声波检测法、化学检测法和光测法等^[2-7]。其中光测法通过局部放电辐射的光信号来实现测量,该方法不受电磁干扰的影响,灵敏度高,有效性强,且由光纤制作而成的前端探头可以深入设备内部,方便布置和定点监测,是近年来颇受国内外关注的局部放电检测新方法。荧光光纤受光面积大,不受数值孔径限制^[8],因而较其他光测法系统具有更好的应用前景。

截至目前针对光测法的研究已经取得了一定的成果^[9-17]。文献^[11-12]将光测法与脉冲电流法进行比较,对比了不同放电模型下光脉冲幅值与放电量的关系。文献^[15]将检测到的光信号脉冲与超高频法测得的脉冲进行比较分析,并以相位(φ)、能量(Q)、脉冲数(n)为轴建立 φ - Q - n 三维图谱。文献^[17]对光测法单个脉冲的积分值进行了定量研究,证明了其与视在放电量呈线性关系。这些研究在局部放电(PD)的实际检测中存在明显的不足。首先,这一类研究的实验条件过于理想,未考虑实际中可能存在的系统漏光及光电器件的热噪声问题。其次,数据采集中需要同步采集相位信息,依靠相位信息并通过人工阈值判断放电脉冲,而在实际应用中相位信息的获取有时极为不便,过分依赖相位信息的处理方法在工程应用中可行性受限。

基于现有的研究基础及不足,本文提出了一种PD自动检测方法。通过对数据进行有效的分组量化统计与多周期叠加,对叠加结果进行功率谱计算并提取相应的功率谱指标,依据本文制定的自适应阈值方法实现PD的自动检测。

1 实验装置

本文采用如图1所示的实验装置采集所需数据,装置由荧光光纤检测系统、局部放电模型、局部放电检测仪组成。其中荧光光纤检测系统包括荧光光纤传感模块、数据采集电路和上位机。荧光光纤传感模块则由荧光光纤、普通传输光纤和光电倍增管(PMT,型号 H10723-210)组成。局部放电模型包括高压端、金属箱体以及针-板缺陷模型。金属箱体的规格为 100 cm×80 cm×80 cm,顶部开有 20 cm×20 cm 的观察窗,实验时将观察窗关闭。针-板模型位于箱体中心位置,针-板间距为 1 cm,荧光光

纤长为 1 m,直径为 1 mm,置于箱底,与针-板轴线平行。荧光光纤到针-板的垂直距离为 40 cm,普通传输光纤长为 10 m。

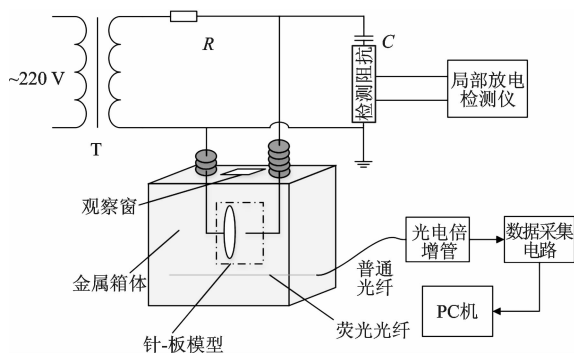


图1 实验装置组成示意图

局部放电检测仪(JFD-251)用以记录PD的放电强度,以视在放电量(单位 pC)表示^[2]。当发生放电时,放电模型两端产生瞬时变化的 ΔU ,经耦合电容 C 耦合到检测阻抗,回路中产生脉冲电流 I ,采集电流流经检测阻抗后产生的电压,进行分析和处理。为尽量模拟实际应用中的场景,系统不采集相位信息。

2 数据分析及时域处理

光测法利用光电转换器件将光传感器接收到的微弱的局部放电光辐射转化为电信号。在实际测量中,由于PMT本身的热噪声^[18]及环境的杂散光干扰,所得数据在无PD时仍然有较多的脉冲输出,且脉冲与PD产生的光脉冲输出在波形特征上难以区分。

文献^[16-17]表明,光测法所得光脉冲与脉冲电流法所得电流脉冲在相位分布上具有良好的一致性,在施加电压大于起始放电电压的相位区间内均可产生放电。相比较而言,噪声脉冲则较为均匀地分布在各相位区间。

本文依据放电信号与噪声的分布差异对采集到的数据进行时域处理,具体实施步骤如下。

设采样数据为 $v(1) \sim v(n)$,将其以 8 个工频周期为一组分为若干序列,序列之间数据连续且无重叠

$$v(1) \sim v(n) \Rightarrow \begin{cases} a_1 = v(1) \sim v(n_s) \\ a_2 = v(n_s + 1) \sim v(2n_s) \\ \vdots \\ a_N = v((N-1)n_s + 1) \sim v(Nn_s) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $n_s = \lfloor 8T/\Delta t \rfloor + 1$, $T = 20$ ms 为一个工频周期, Δt 为采样时间间隔, 符号“ $\lfloor \cdot \rfloor$ ”表示取整; N 为序列个数。以序列 a_1 为例, 将其均匀量化为 K 个区间, 区间宽度为 $(8T/K)$ ms, 为保证量化的分辨率, $K \geq 128$ 。

根据文献[17]所述, 光测法脉冲信号的一次积分值与视在放电量成正比, 能够表征 PD 所释放的光能量。因此, 本文将脉冲的一次积分值作为统计的有效参数, 记为 e 。分别统计序列 a_1 中各区间内的 e 值, 结果记为 E_1

$$E_1 = (e_{11} \ e_{12} \ \cdots \ e_{1K}) \quad (2)$$

将式(1)中所有序列均做相同的处理, 得到矩阵

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1K} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2K} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ e_{N1} & e_{N2} & \cdots & e_{NK} \end{pmatrix} \quad (3)$$

以提高统计的有效性, 将 $\mathbf{E}$ 每列元素叠加, 得到

$$S = \left(\sum_{i=1}^N e_{i1} \quad \sum_{i=1}^N e_{i2} \quad \cdots \quad \sum_{i=1}^N e_{iK} \right) \quad (4)$$

S 序列中每个元素为若干个工频周期相同相位区间的能量累加值, 可看做采样数据的时域特征。

3 功率特征分析及自适应阈值

由放电信号与噪声的分布差异可知, 无 PD 发生时, S 序列较平坦, 无明显的峰值, 表现为噪声的小幅度波动。出现 PD 时, S 序列在波形上会有多个峰出现, 代表工频周期内 PD 出现的相位区间, 峰值处为 PD 强度较大的区间。由于相位信息难以获取, 峰值在 S 序列中的具体位置无法确定, 但由 PD 的周期性可知, 相邻的峰值相位差约为 180° , 即工频周期的一半。

根据傅里叶级数的性质, 任何周期信号均可以分解为基波及其谐波的组合。随着 PD 的出现, S 序列中重复性峰呈现周期性, 且 PD 愈强, 峰值愈大, 周期性愈明显。 S 序列中周期性信号成分主要表现为 100 Hz 和 50 Hz, 其中 100 Hz 信号的大小主要体现工频正负半周期的 PD 大小, 50 Hz 信号主要表现正负半周期的 PD 差异。由于 100 Hz 信号与 50 Hz 信号的二次谐波频率重叠, 100 Hz 的谐波信号也与 50 Hz 的高次谐波重叠。为方便表述, 此处并不具体区分两种信号, 仅将 S 序列视作基波为 50 Hz 的信号。由于光测法表征的是 PD 释放的光能量, 随着 PD 的增强, S 序列中直流成分也必然增加, 但直流成分包含原始的噪声, 无先验知识的情

况下无法具体求出。因此, 对 S 序列进行零均值化处理

$$S = S - E(S) \quad (5)$$

式中: E 为均值函数。

放电过程是一个时域无限过程, 数据采样是对其有限的观测, 通过有限的数据序列可以估计得到观测长度内的能量表征, 也即功率信息。本文从功率谱估计的角度对 S 序列进行分析, 采用 Burg 法进行 AR 谱模型参数的估计及功率谱的求取。

对于求取得到的功率谱, 为系统化地提取功率谱图中的放电信息, 定义功率谱指标如下: T 表示所分析的频率内的总功率, 可以通过各频率点的功率和表示; P 表示信号功率, 即前面章节所分析的 50、100 Hz 及其各次谐波的功率和, 由周期信号频谱的收敛性可知, 随着谐波次数的增加, 谐波分量逐渐减小, 因此本文只计算到 300 Hz 的谐波; R 为谐波基波比, 用于衡量信号功率中谐波与基波的相对关系。当放电强度增加时, 放电的稳定性也会增加, S 序列愈加光滑, 因此谐波基波比 R 相应减小。 T 、 P 及 R 的计算式如下

$$\left. \begin{aligned} T &= \sum_{i=1}^{K/2} P_{f,i} \\ P &= \sum_{i=1}^6 P_{i,50} \\ R &= \frac{P_{150} + P_{250}}{P_{50}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: f 为频率分辨率; $P_{f,i}$ 表示频率 f 、 i 处的功率值; K 为 S 序列的长度。

式(6)中 R 的计算采用 150 Hz 与 250 Hz 处的功率和与 50 Hz 处的功率之比, 即 50 Hz 的奇次谐波与基波 50 Hz 的比值, 这是因为 50 Hz 的奇次谐波不会受到 100 Hz 信号的影响。为了更清楚地给出放电的数值关系, 定义放电评价参数

$$\phi = \frac{1}{R} \frac{P}{T} \quad (7)$$

ϕ 表示在一次放电过程中表征放电信号的功率占总功率的加权比值。由于目前针对光测法的研究尚处于实验室阶段, 无通用的定量标准, 放电的强弱也没有严格的划分界限。因此, 本文仅通过 ϕ 将放电检测结果分为未放电 ($0 \sim \phi_h$) 和已放电 ($> \phi_h$), 其中 ϕ_h 为判断是否放电的阈值, 以下分析 ϕ_h 的取值。

当放电评价参数 ϕ 大于阈值 ϕ_h 时, 认为所采集数据中已检测到放电现象; 当 ϕ 小于阈值 ϕ_h 时, 认为系统未检测到放电。对此, 本文提出了一种自适

应阈值设定方法,该方法从数据本身出发,避免了人工阈值的设置困难及不合理性。

当未发生放电时,理想情况下 S 序列为白噪声过程,各频率处功率值相等,即功率谱线为平行于频率轴的直线。假设此时的功率为 P_0 ,由式(6)可计算得到 $T=KP_0/2$, $P=6P_0$, $R=2$,结合式(7)可得 $\phi=6/K$ 。若发生局部放电, ϕ 值变大。因此,理想情况下可设阈值 $\phi_h=6/K$,即当 ϕ 大于阈值 $6/K$ 时,认为已发生放电。实际上,噪声并非绝对的白噪声,受观测数据长度所限,各频率处的功率无法保证绝对相等,存在一定的波动,因此修改 ϕ_h 如下

$$\phi_h = \frac{6}{K} + \epsilon \quad (8)$$

式中: ϵ 为表征波动大小的参数。文中采用样本变异系数对其进行估计

$$\epsilon = s(P_{sn})/E(P_{sn}) \quad (9)$$

式中: s 为标准差; E 为均值; P_{sn} 为求得的功率谱中除 50 Hz 及其各次谐波后的功率值序列,即所得频率内噪声功率序列。

ϵ 的存在使得对于不同的采样数据, ϕ_h 可以进行有效的自我调整,调整依据为当前数据中噪声功率的波动情况。相比固定阈值,动态调整后的 ϕ_h 能够更准确地反映当前放电情况。

4 实验结果及分析

4.1 算法验证

首先以 PD 强度 200 pC 为例,说明本文算法的实施步骤。参数 $\Delta t=80$ ns, $K=256$, $N=100$,后续实验均采用相同参数。图 2 为一段原始数据。图 3 为量化统计与多周期叠加后得到的 S 序列。图 4 为阶数是 30 的 AR 谱图,其中纵轴按 $10\lg P$ 取对数坐标。

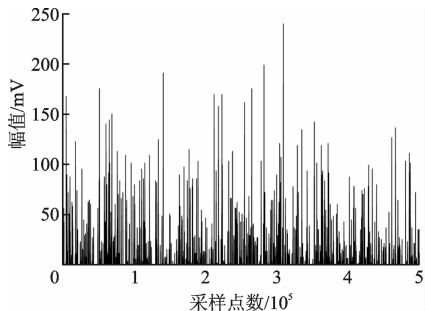


图2 原始数据

图 2 中放电信号淹没在噪声之中,肉眼无法确定是否发生局部放电。从图 3 中可以看出,分组统计所得 S 序列中有较为明显的两种信号峰。从图 4

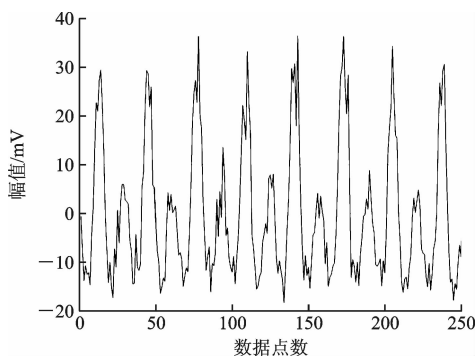


图3 分组量化统计结果

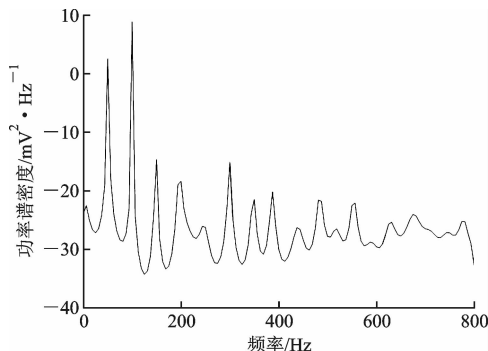


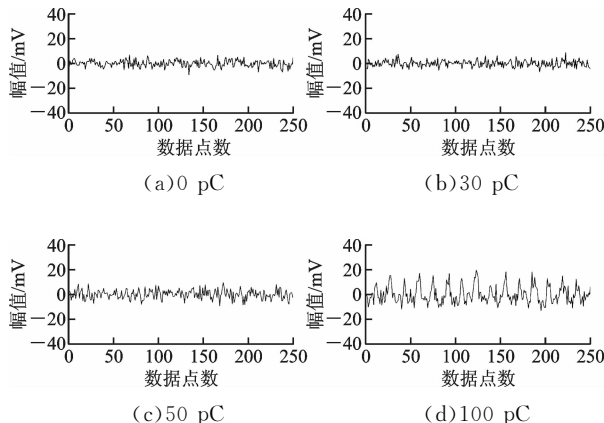
图4 阶数为 30 的 S 序列功率谱图

中可见明显的 50、100 Hz 及其二次谐波的功率谱值。由式(6)~式(9)计算得到 $\phi_h=1.3442$, $\phi=24.3221$,表明此时已发生局部放电。

4.2 不同放电强度下算法检测效果

为进一步验证本文算法的检测效果,以不同放电强度下各 100 组数据进行以下实验。图 5 为其中一组 S 序列,原始数据累加幅值经归一化处理。

图 5 显示了不同 PD 强度下分组累加的结果,可以看出,随着 PD 的增强, S 序列中的双峰越来越明显,曲线也愈加平滑。图 6 为其对应的功率谱图,对比可以发现,未放电时各频率点功率在一低值附近波动,无明显的功率峰值。随着放电的出现,50、100 Hz 及其各次谐波处的功率开始变大,且功率谱



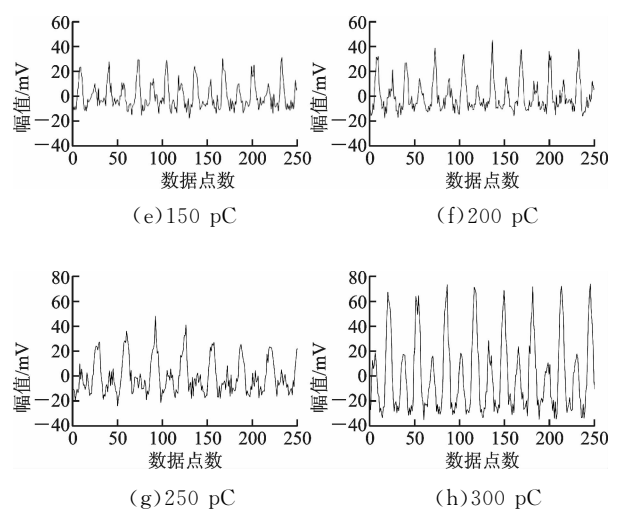


图 5 不同 PD 强度下的 S 序列波形

随着放电的增强逐渐增大。这与理论分析结果相符,即系统能够检测到正负半周期放电区间产生的放电脉冲,而当放电越来越强的时候,50 Hz 及 100 Hz 信号都有明显的增大,表明检测到的放电能量逐步增强,且正负半周期的放电能量差异也逐渐凸显。另外可以看出,谐波分量相对于基波分量也随 PD 的增强而减小,与理论分析相吻合。

表 1 给出了 100 组的检测结果,从中可以看出,在噪声污染较大的环境下放电强度达到 50 pC 左右时,算法已能够对大部分数据做出正确判断。在放电强度逐渐增大至 200 pC 以上时,算法能够保证 100% 的检测率。

当放电强度为 100、150 pC 时,部分检测结果均为未放电的情况,如表 2 所示。对比表 1 可以看出,此时求得的 ψ_h 及 ψ 与未放电时(0 pC)相近。这是

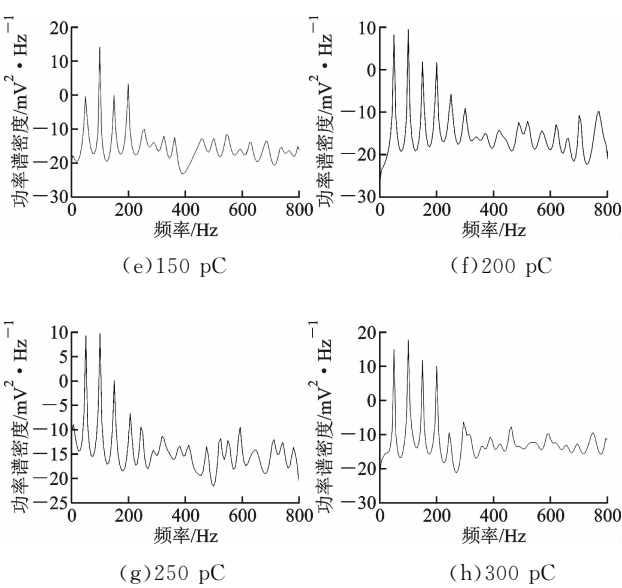
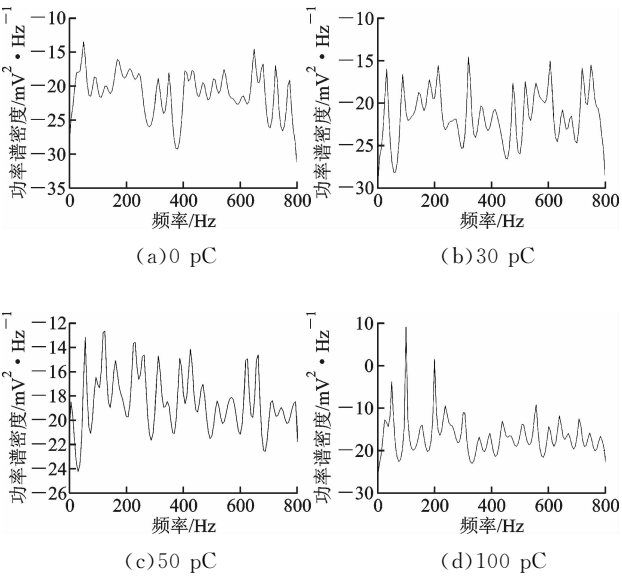


图 6 不同放电强度下的功率谱图

因为在放电不稳定阶段,系统采集到的部分数据中有时未出现明显的放电信号,导致检测结果为未放电,与阈值设定本身无关。实际检测时,可以进行多次测量,综合判断。

表 1 不同放电强度下算法检测结果

放电强度 /pC	100 组 ψ 值分布		ψ_h 均值	ψ 均值	检测 结果
	$0 \sim \psi_h$	$> \psi_h$			
0	100	0	0.137 8	0.018 2	未放电
30	98	2	0.225 4	0.020 8	未放电
50	18	82	0.361 5	0.498 3	放电
100	10	90	0.432 2	0.816 8	放电
150	4	96	0.561 7	0.945 2	放电
200	0	100	1.584 5	27.102	放电
250	0	100	3.871 3	38.637	放电
300	0	100	5.722 3	43.858	放电

表 2 放电强度为 100、150 pC 时的部分检测结果

放电强度/pC	序号	ψ_h	ψ	结果
100	1	0.215 2	0.043 7	未放电
	2	0.174 6	0.120 9	未放电
	3	0.214 2	0.203 3	未放电
150	1	0.193 1	0.164 4	未放电
	2	0.231 6	0.083 7	未放电
	3	0.225 7	0.135 6	未放电

4.3 不同噪声表现下算法检测效果

在图 1 所示的实验装置中,由荧光光纤、普通传输光纤、PMT 组成的荧光光纤传感模块是整个检测

系统的关键部分,同时也是检测系统噪声的主要来源。即使参数相同的两路传感模块,PMT 的热噪声差异也会造成数据在噪声表现上的不一致。为测试不同噪声表现下算法的检测效果,实验采用 4 路荧光光纤传感模块,将模块中 4 根荧光光纤紧密并排放置于金属箱底以保证距放电点距离相同,分别采集不同放电强度下各 100 组输出数据。图 7 为 0 pC 时其中一组的输出结果,图中可以看出不同模块噪声脉冲无论幅值还是个数均有明显的差异。

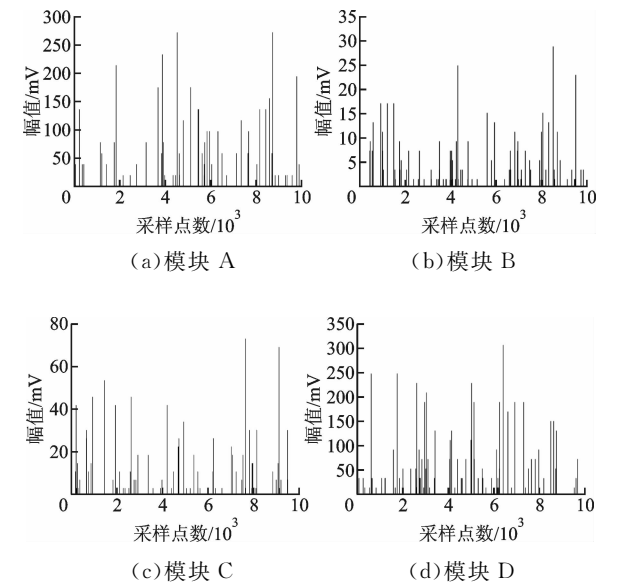


图 7 4 路传感模块的噪声输出

4 路传感模块所采集的各 100 组数据的检测结果如表 3 所示,表中放电检出率定义为 100 组数据中检测结果为放电所占的比率。

从表 3 可以看出,对于同一放电下的 4 路 PMT 来说,虽然噪声大小不同,但最终的检测结果却具有良好的一致性,且检出率误差小于 9%。这是因为本文所提出的放电评价指标是基于放电信号功率的相对增量,即信号功率相对于总功率的增量大小。所设置的阈值同样源于数据本身的波动,具有自适应性。对于不同的 PMT 来说,虽然噪声表现有所差异,但是这种差异在功率比值中得到弱化,最终得到的 ϕ 可以正确地给出 PD 的检测结果。

4.4 荧光光纤位置对检测结果的影响

以上实验在固定荧光光纤位置的基础上,通过改变放电强度,研究了不同放电强度及不同噪声表现下算法的检测效果。为测试荧光光纤摆放位置对检测结果的影响进行以下实验。实验中将 3 根荧光光纤分别放置于距针-板垂直距离为 40、30 及 20 cm 处,改变施加电压,用局部放电仪同步记录放电强

度。3 组检测通路的检测结果如表 4 所示,表中放电检出率仍定义为 100 组数据中检测结果为放电所占的比率。

表 3 不同传感模块下算法检测结果

放电强度/pC	传感模块编号	ϕ_h 均值	ϕ 均值	放电检出率/%	检测结果
0	A	0.131 1	0.013 1	0	未放电
	B	0.117 6	0.010 2	0	未放电
	C	0.124 3	0.008 4	0	未放电
	D	0.126 8	0.009 6	0	未放电
50	A	0.329 8	0.443 7	91	放电
	B	0.372 6	0.521 0	95	放电
	C	0.311 2	0.453 1	99	放电
	D	0.282 6	0.469 3	96	放电
100	A	0.391 1	0.565 7	95	放电
	B	0.389 6	0.485 4	94	放电
	C	0.415 4	0.539 9	92	放电
	D	0.427 8	0.521 6	98	放电
250	A	3.319 5	31.371	100	放电
	B	3.113 6	32.512	100	放电
	C	2.897 2	35.413	100	放电
	D	3.239 2	32.064	100	放电

从表 4 中可以看出,当局部放电仪显示放电强度达到 30 pC 时,20 cm 处的荧光光纤检测出放电的组数达 86 组,30 cm 处为 35 组,40 cm 处仅为 3 组,随着放电强度的增加,3 个位置处光纤的放电检出率均有提升,但距离放电源位置越近,检测效果越

表 4 不同检测距离下算法检测结果

放电强度/pC	距离/cm	ϕ_h 均值	ϕ 均值	放电检出率/%	检测结果
0	20	0.140 2	0.009 7	0	未放电
	30	0.136 8	0.010 6	0	未放电
	40	0.141 2	0.009 2	0	未放电
30	20	0.344 3	0.412 3	86	放电
	30	0.261 1	0.210 1	35	未放电
	40	0.225 6	0.021 3	3	未放电
50	20	0.972 0	18.22 3	100	放电
	30	0.491 2	0.893 4	96	放电
	40	0.324 5	0.483 2	74	放电
100	20	4.429 7	41.46 2	100	放电
	30	1.232 4	25.52 6	100	放电
	40	0.432 4	0.571 2	94	放电

好。因此,在实际应用中,可以将检测系统安装于电力设备中易出故障的关键部位,以达到实时监测的目的,并可在故障初期给出预警。

5 结 语

目前,局部放电光测法虽已取得一定进展,但检测过程中人工设定检测阈值较为困难,相位信息获取难度大。本文提出了一种基于功率特征的自动阈值方法,以实现局部放电的自动检测。主要工作如下。

(1)建立了针-板电极下荧光光纤检测系统与局部放电检测仪联合实验平台,研究了不同放电强度及不同光纤位置下的放电检测情况。

(2)根据放电信号与噪声信号的相位分布差异,对采样数据进行分组量化统计与多周期叠加,完成了原始数据时域特征序列 S 的提取。

(3)在充分分析 S 功率成分的基础上,采用 AR 谱估计方法得到 S 的功率谱信息。基于信号与噪声的差异,从功率谱中提取得到信号功率、噪声功率及谐波基波比 3 项功率谱指标。

(4)基于 3 项功率谱指标,提出了放电评价参数 ϕ ,通过理想条件下的计算结果及实际检测时未放电相位区间的波动大小给出自动阈值 ϕ_h 的设定方法,以阈值 ϕ_h 将检测结果分为放电和未放电。

(5)在不同放电强度、不同噪声表现、不同光纤摆放位置下进行了多组对比实验,实验结果表明文中所提数据处理方法及相应的自动阈值设定方法能够有效地完成 PD 的自动检测,灵敏度高且能够适应不同的系统噪声。

需要说明的是,本文采用的是针-板电极进行的放电实验,对于其他放电类型如悬浮电极、气隙放电等,其放电信号也满足本文分析的相位分布特点,因此本文方法也同样适用。本文所用检测系统及相应的检测方法也存在一定的不足,由于采用统计分析并以数值方式给出检测结果,对于单个局部放电脉冲特征的刻画能力较弱。当存在多个放电源时,本文方法也仅能给出放电结果,对不同放电源的区分能力较弱。

本文下一步工作计划是研究实际的放电遮挡、油气等不同介质中的放电监测和利用多根荧光光纤的检测差异,实现放电源的定位及多放电源的识别。

参考文献:

[1] 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,1994:30-40.

[2] 国家质量监督检验检疫总局. 局部放电测量: GB/T 7354—2003 [S]. 北京:中国标准出版社,2003.

[3] 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.

[4] 张志东,宋建成. 干式变压器局部放电在线监测脉冲电流传感器的开发[J]. 电网技术,2011,35(2):149-153.

ZHANG Zhidong, SONG Jiancheng. Development of pulse current sensor for online monitoring of partial discharge in dry-type transformer [J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 149-153.

[5] 赵煦,孟永鹏,成永红,等. 变压器现场超高频局部放电信号的时频特征分析[J]. 西安交通大学学报,2011,45(12):83-86,128.

ZHAO Xu, MENG Yongpeng, CHENG Yonghong, et al. Time-domain characteristic site analysis for ultra-high frequency partial discharge in power transformer [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(12): 83-86, 128.

[6] 钟理鹏,汲胜昌,刘凯,等. 低微水的体积分数对 SF_6 局部放电及分解特性的影响[J]. 西安交通大学学报,2016,50(3):112-119,133.

ZHONG Lipeng, JI Shengchang, LIU Kai, et al. Influence of H_2O on SF_6 discharge and decomposition characteristics under low moisture conditions [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(3): 112-119, 133.

[7] 李继胜,李军浩,罗勇芬,等. 用于电力变压器局部放电定位的超声波相控阵传感器的研制[J]. 西安交通大学学报,2011,45(4):94-99.

LI Jisheng, LI Junhao, LUO Yongfen, et al. Study of phase-ultrasonic receiving-planner array transducer for partial discharge location in power transformer [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(4): 94-99.

[8] 魏念荣,张旭东,曹海翔,等. 用荧光光纤技术检测局部放电信号传感器的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版),2002,42(3):329-332.

WEI Nianrong, ZHANG Xudong, CAO Haixiang, et al. Study of fluorescent fiber sensors for partial discharge detection [J]. Tsinghua Science and Technology (Science and Technology), 2002, 42(3): 329-332.

- [9] 马斌, 周文俊, 汪涛, 等. 棒-板模型交流电晕放电紫外数字图像处理及其应用判据 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 74-79.
MA Bin, ZHOU Wenjun, WANG Tao, et al. An experimental investigations on applicable criterion for AC corona discharge evolvement of rod-plane gap on UV digital image processing [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 74-79.
- [10] 张占龙, 王科, 唐炬, 等. 变压器电晕放电紫外脉冲检测法 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 84-88.
ZHANG Zhanlong, WANG Ke, TANG Ju, et al. Detection method for corona discharge of transformers on ultraviolet pulse [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 84-88.
- [11] 徐阳, 喻明, 曹晓珑, 等. 局部放电光脉冲测量法与电测法的比较 [J]. 高电压技术, 2001, 27(4): 3-5.
XU Yang, YU Ming, CAO Xiaolong, et al. Optical pulse method for partial discharge measurement and the comparison with electrical current method [J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(4): 3-5.
- [12] 王灿林, 廖永力, 王黎明, 等. 电晕紫外光脉冲和电晕电流脉冲相关性的研究 [J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 88-91.
WANG Canlin, LIAO Yongli, WANG Liming, et al. Relationship between the UV corona pulses and the corona current pulses [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(7): 88-91.
- [13] 任重, 董明, 任明, 等. 冲击电压下 SF_6 气体在极不均匀场中局部放电的时频特征 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(8): 116-120.
REN Zhong, DONG Ming, REN Ming, et al. Time-frequency characteristics of partial discharge of SF_6 gas in an extremely uneven field under impulse voltage [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(8): 116-120.
- [14] SCHWARZ R, MUHR M. Modern technologies in optical partial discharge detection [C]// 2007 Report-Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 163-166.
- [15] 唐炬, 欧阳有鹏, 范敏, 等. 用于检测变压器局部放电的荧光光纤传感系统 [J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1129-1135.
TANG Ju, OUYANG Youpeng, FAN Min, et al. System using fluorescent fiber for partial discharge detection in transformer [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1129-1135.
- [16] 唐炬, 刘永刚, 裘吟君, 等. 针-板电极局部放电光测量法信号一次积分值与放电量的关系 [J]. 高电压技术, 2012, 38(1): 88-91.
TANG Ju, LIU Yonggang, QIU Yinjun, et al. Relationship between first integral value of signals of the optical method and charge quantity of partial discharge from needle-plate electrode [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(1): 88-91.
- [17] SCHWARZ R, MUHR M. Partial discharge detection in oil with optical methods [C]// IEEE International Conference on Dielectric Liquids. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 245-248.
- [18] 郭从良, 曾丹, 李杰, 等. 光电倍增管的噪声模型 [J]. 核电子学与探测技术, 2004, 24(2): 117-131.
GUO Congliang, ZENG Dan, LI Jie, et al. The noise model for photomultiplier [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004, 24(2): 117-131.

[本刊相关文献链接]

- 邵先军, 何文林, 刘石, 等. 电力设备局部放电特高频电磁波数值计算技术研究. 2016, 50(12): 24-31. [doi: 10.7652/xjtuxb201612005]
- 张亮, 车斌, 韩旭涛, 等. 负极性振荡雷电冲击电压下 SF_6 尖板模型局部放电特性. 2016, 50(4): 108-116. [doi: 10.7652/xjtuxb201604017]
- 钟理鹏, 汲胜昌, 刘凯, 等. 低微水的体积分对 SF_6 局部放电及分解特性的影响. 2016, 50(3): 112-119. [doi: 10.7652/xjtuxb201603018]
- 赵煦, 孟永鹏, 成永红, 等. 变压器绕组对局部放电电磁波传播特性的影响. 2015, 49(4): 6-11. [doi: 10.7652/xjtuxb201504002]
- 钟理鹏, 汲胜昌, 李金字, 等. 吸附剂对 SF_6 典型分解产物含量及变化规律的影响. 2015, 49(2): 86-92. [doi: 10.7652/xjtuxb201502015]
- 唐明, 梁得亮, 王青山, 等. 矿用电缆局部放电监测的最优二代小波包基降噪. 2013, 47(12): 32-37. [doi: 10.7652/xjtuxb201312006]
- 任重, 董明, 任明, 等. 冲击电压下 SF_6 气体在极不均匀场中局部放电的时频特征. 2013, 47(8): 115-120. [doi: 10.7652/xjtuxb201308020]
- 柯春俊, 潘成, 吴锴, 等. 人工气隙面积对局部放电特性的影响. 2013, 47(6): 103-108. [doi: 10.7652/xjtuxb201306018]

(编辑 杜秀杰)