

用于局部放电信号定位的多样本能量 相关搜索提取时间差算法

唐炬, 陈娇, 张晓星, 许中荣

(输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市 沙坪坝区 400044)

Time Difference Algorithm Based on Energy Relevant Search of Multi-sample Applied in PD Location

TANG Ju, CHEN Jiao, ZHANG Xiao-xing, XU Zhong-rong

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University),
Shapingba District, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: A new time difference algorithm of multi-sample nonstationary signals is proposed in this paper, including its principle and formula, which uses the mathematical transformation of “relevant-shift-superposition” to obtain a statistical accumulated energy curve from a large amount of PD samples of transformer in laboratory. The time delay of multiple sensors by relevant search principle was obtained. This method has been used in PD measurement of transformer and proved to be effective to solve the problems of strong dispersiveness in PD location by single-sample signal as well as the difficulty to access time delay accurately, its time error is in the picosecond level and location error is in the centimetre level.

KEY WORDS: transformer; partial discharge; time difference; energy curve; relevant search

摘要: 提出一种应用多样本非平稳信号的能量相关搜索提取时间差算法, 阐明该算法的原理, 给出具体计算公式和步骤, 对实验室获得的大量变压器局部放电超高频信号数据样本, 经过“相关-移位-叠加”数学变换, 得到具有统计意义的能量累积曲线, 再利用相关搜索原理准确计算出多传感器信号间的时间差, 有效解决了多信号间时间差难以准确获取和用单样本数据对局放源定位的结果分散性大的问题, 其定位时间误差在皮秒级, 距离误差在厘米级。

关键词: 变压器; 局部放电; 时间差; 能量曲线; 相关搜索

0 引言

超高频检测技术具有检测频率高、抗干扰性强

和灵敏度较高^[1-4]等优点, 将其应用于变压器局部放电(partial discharge, PD)定位是当前在线监测和故障诊断领域中的一个热点问题^[5-6]。

文献[7]从仿真的角度, 提出将整个变压器分割成多个 5 cm×5 cm×5 cm 的单元格进行定位, 网格划分得越小定位越准确, 需处理的数据量也必然增大, 不适合在线监测。文献[8]在实验室仿真研究了一种基于超高频和超声波相控接收阵的PD定位方法, 在不考虑信号的传播衰减和噪声的影响情况下, 可对油中局放进行比较精确的定位。文献[9]提出了利用能量衰减进行定位的方法, 定位误差也为厘米级, 但当PD信号传播路径中发生折、反射时, 该法定位的有效性较差。文献[10]提出了利用所测波形的累积能量曲线求拐点来获取时间差的方法, 但它只局限于单样本信号, 缺乏统计性。

目前, 国内外研究最多、相对效果较好的还是时间差定位法^[11], 依据的是多传感器接收信号的时延信息, 因此时延的准确测量是定位精确与否的关键。获取时延的方法通常是测量信号具有特征的某一点的时间, 然后直接将不同接收点的该时间相减^[12]。方法虽然简单, 但受干扰的影响经常出现虚假的特征点, 影响时延的测量精度。本文提出了一种基于多样本非平稳信号的能量相关原理搜索时间差算法(time difference on energy-related, TDOE), 通过计算各通道多样本间的互相关函数, 选取互相关函数之和最大的信号为标准信号, 再进行移位和叠加处理, 即“相关-移位-叠加”的数学变换, 以消除非平稳放电信号由于干扰带来的水平时间上的随

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)(2009CB-724506)。

National Basic Research Program of China(973 Program)(2009CB-724506)。

机误差,最后,将得到的统计样本数据转化为能量累积曲线,经过相关时间搜索,可准确获取信号间的时间差,从而使得定位准确、可靠,误差在厘米级。该方法既能大大改善采用单样本信号进行定位时易受干扰、定位分散性大的缺点,还有效地避免了用累积能量曲线求时间差时拐点的求取问题。

1 多样本的相关-移位

根据某一时刻所测的波形进行时间差的提取和PD定位,具有比较大的随机性和偶然性。为最大限度地消除这种随机性,作者采用抽取多样本的统计规律来反映总体的时间特征。假设每路传感器同时采集了 n 次PD信号,即每通道有 n 个样本波形,各样本间由于放电时刻和传播路径不同,放电脉冲的起始位置和波形都不相同,具体选用哪个样本为标准计算时间差是首先要解决的核心问题。本文引用“相关”的概念,“相关”是描述信号特性内在关联的特性,通常被用来分析随机信号的统计特性,反映信号间的相似程度。数学中对互相关函数的计算采用如下公式^[13]

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y(t-\tau)dt \quad (1)$$

式(1)表明函数 $x(t)$ 和 $y(t)$ 在时移过程中的相似性。由于采样信号的波形数据是离散的,其对应互相关函数可写成

$$R_{ij}(m) = \sum_{k=1}^s x_i(k)x_j(k-m) \quad (2)$$

式中: i, j 分别为同一通道的第 i 个样本和第 j 个样本; k 为采样点号; s 为采样点数(即信号的长度); m 为移位的点数(对应连续信号中的时移 x_j); x_i 和 x_j 可代表两个不同传感器获得的波形数据。

很显然,在一个传感器采集的 n 个样本中,若第 k 个波形样本与其余波形的相似性最好,可认为此次波形最能反映放电特性,所受干扰最小,取该样本作为移位标准计算时间差。移位是指对于选定的波形样本,改变其与其他各波形样本间的相对距离,直到两波形的互相关函数取极大值为止,然后叠加取平均波形。这样所得的波形在一定程度上消除了水平晃动和随机干扰,具有代表性。再用所得波形进行能量累积计算,所得的累积能量曲线就有统计意义。具体的计算步骤如下:

1) 对任一传感器获得的 n 个波形样本,分别计算它们之间不移位时的互相关函数的值,即 $R_{ij}(0)$ 的值。例如对样本1,可以计算 $R_{12}(0), R_{13}(0), \dots, R_{1n}(0)$ 。

2) 对每个样本,计算它与其他样本间位移为零时的互相关函数之和 M_i ,即

$$\begin{cases} M_1 = R_{12}(0) + R_{13}(0) + \dots + R_{1n}(0) \\ M_2 = R_{21}(0) + R_{23}(0) + \dots + R_{2n}(0) \\ \vdots \\ M_n = R_{n1}(0) + R_{n2}(0) + \dots + R_{n(n-1)}(0) \end{cases} \quad (3)$$

3) 取 $M_1, M_2, \dots, M_n$ 中最大数对应的波形样本为标准进行移位。假设最大数为 $M_a(1 \leq a \leq n)$,就以其对应的波形样本 a 为标准进行移位。

4) 移位的点数即为两波形间的互相关函数取最大值时 m 的值。例如以波形样本 a 为标准,样本1向它移位,移位的点数则为 $R_{a1}(m)$ 取最大值时的 $m_{\max}$ 。

5) 将移好位的 n 个样本叠加后进行平均,得到具有统计意义的波形 $\bar{x}_a$,即

$$\bar{x}_a = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \quad (4)$$

将各通道经叠加平均后的波形运用能量相关搜索法,即可求得两波形间的时间差。

2 能量相关搜索时间差

通常求取两信号间的时间差是以波形第1峰值到达时间为标准^[14],也可以波形第1拐点处的时间为标准计算,但由于现场各种干扰的影响,第1峰值和第1拐点不一定来自信号本身,而且,超高频法测得电气设备各传感器间PD波形的时间差常为纳秒级甚至皮秒级^[15],对时延的精度要求非常高。因此,单纯选取第1峰值或第1拐点作为标准均不理想。本文作者将测得的PD信号波形数据进行能量转换,获取能量累积曲线,通过能量相关搜索来求取时间差。信号的累积能量 E 可用式(5)算出

$$E_i = \sum_{k=0}^i u_k^2, \quad i = 0, 1, \dots, N \quad (5)$$

式中: u_k 为所测到的一次波形中的第 k 点的电压值; N 为采样点数。

图1为采用超高频传感器在实验室获取的同一时刻两路变压器超高频PD信号典型波形(图中 u_F 为幅值),其对应的累积能量曲线如图2所示。

信号能量最终将衰减为零,故累积能量曲线将趋于一常数。利用能量相关搜索来求取时间差的原理和方法如下:

由于两通道的传感器与放电源组成了一个三角形,根据两边之差小于第3边原理可得时间差 ΔT

$$\Delta T < d/C \quad (6)$$

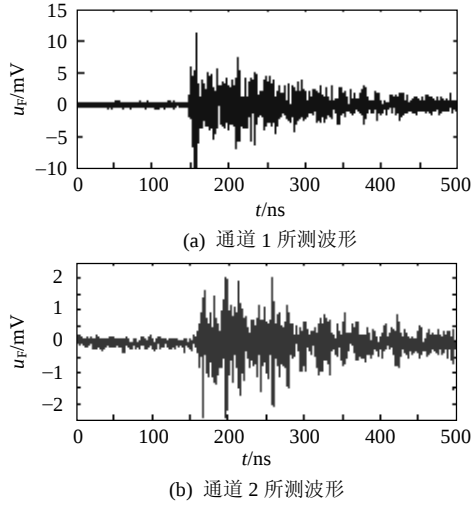


图 1 两路变压器超高频 PD 信号的波形

Fig. 1 Waveform of two PD signals from transformer

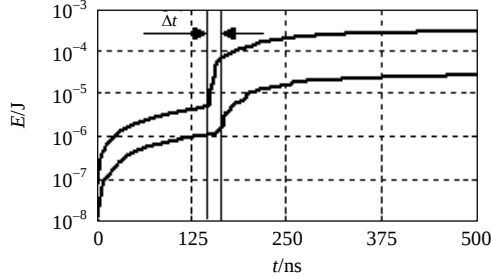


图 2 图 1 的 PD 信号能量累积曲线

Fig. 2 Energy cumulation curves of two PD signals in fig. 1
式中: d 为两传感器间的距离; C 为电磁波在介质中的传播速度, 令

$$K = \Delta d / C \quad (7)$$

式中: Δd 为两信号 K 时间段内的距离, $[0, K]$ 时间段内的时间差可以通过以下能量相关性进行分析。

两信号在 $[0, K]$ 时间段内的时间差可以通过以下能量相关性进行分析。

假设通道 1 和通道 2 的能量函数分别为 $w_1(t)$ 和 $w_2(t)$, 根据广义平稳随机序列的互相关函数可得

$$R(m) = E[w_1(t)w_2(t+m)] \quad (8)$$

式中 m 为时延数, 当 $m=\Delta T$ 时, $w_1(t)$ 和 $w_2(t)$ 具有极大相关性。 m 的搜索区间为 $[0, K]$, 其搜索过程如图 3 所示。

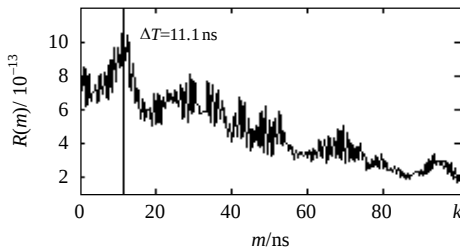


图 3 相关函数曲线

Fig. 3 Relevant function curve

由图 3 可见, 当 m 在 $0 \sim \Delta T$ 之间时, 两通道波形逐渐接近, 互相关函数呈增大趋势; 当 $m=\Delta T$ 时, 互相关函数取最大值, 此时两波形重叠, m 的取值为 11.1 ns 即为所求时间差; 此后 m 增大, 两通道波形又渐渐远离, 互相关函数取值逐渐变小。

转化成 $x(t)$ 与 $y(t)$ 的互相关函数无偏估计表达式为

$$\hat{R}_{xy}(m) = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau y(t)^2 \cdot x(t+m)^2 dt \quad (9)$$

设采样间隔为 Δt , 采样容量 $N = \tau/\Delta t$, 时延数 $m = j \cdot \Delta t$, $j \in \{0, 1, \dots, K/\Delta t\}$ 。式(9)的离散序列表达式为

$$\hat{R}_{xy}(j\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-j-1} y(i\Delta t)^2 x(i\Delta t + j\Delta t)^2, i=0, 1, \dots, N \quad (10)$$

由式(10)可获取互相关函数极大值所对应的信号延时 ΔT , 即对应两信号的时间差。

3 局放信号的实验室获取与定位分析

本文所计算的时延是变压器局放定位的前期工作, 所采集的信号都是在实验室模拟获取。该实验装置由变压器本体(3.10 m×2.35 m×2.05 m)、模拟放电源、传感器阵列、高频同轴传输线、4 通道超宽带 LeCroy 7100 高速示波器等组成, 如图 4 所示。

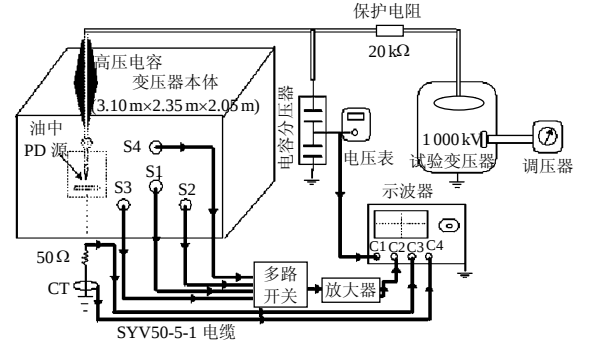


图 4 变压器 PD 模拟实验装置

Fig. 4 Experimental system for PD location

传感器阵列的输出通过射频同轴电缆直接送至示波器采集显示, 各路通道传输线长度均相等, 以降低系统固有时延带来的影响。为保证定位系统对脉冲信号的时延测量精度, 采用了 1 GHz 模拟带宽的(最大采样率 20 GS/s, 双路存储容量 48 MB)高速数字示波器。放电源为实验室所制作的针-板缺陷模型, 传感器采用超高频微带贴片天线传感器^[16]。

为方便验证本文算法的有效性, 选用两个性能基本相同的传感器作为检测单元, 系统误差的标定可通过在任一传感器中注入放电脉冲, 另一传感器测得的理论时延和实际时延之差即为系统时延。经实验标定两传感器间的固有时延是 0.437 ns。

变压器中超高频PD脉冲上升沿时间一般在 $1\sim 2\text{ ns}$ ^[17]，其起始波头的衰减特性是决定其定位能力的关键因素，脉冲宽度越小、前沿越陡，时间分辨率越高，相应时延的测量越准确。因此可先将信号通过一个高频滤波器，提取信号的高频成分来确定时延，这又将引起白噪声的相对成分变大，为提高信噪比，在通过高通滤波器之前，先用小波^[18]去噪。图 5 所示为图 1 小波去白噪后的PD波形。

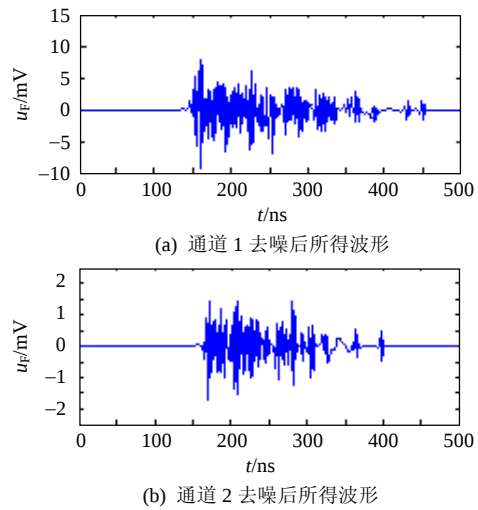


图 5 小波去白噪后的两路变压器超高频 PD 波形

Fig. 5 PD waveform from transformer after wavelet denoise treatment

由于变压器中绝缘结构复杂，铁心、绕组等对PD信号的传播特性影响非常大^[19-21]，传感器所接收的信号波形取决于信号的传播途径。当PD信号按均匀的油媒介传播时，波峰的最大值出现在信号的起始位置；当局放信号被迫经过金属障碍物或变压器箱体时，信号将发生反射、折射、绕射等，导致波形畸变，波峰的最大值可能出现在信号中部，这将影响时间差的计算。因此，可在变压器油箱两侧安装两组天线阵列^[15]，对于发生在铁心一侧的放电，利用该侧的传感器阵列进行检测和定位，这样PD源到传感器间的传播路径接近直线，可以有效避免铁心对时延测量的影响。此外，对已接收到的经折、反射后的波形，可通过在滤波后的波形上加一个时间窗，取信号的起始部分(即沿最短路径传播的成分)进行计算。图 6 所示为经高通滤波器滤波后加窗的波形。

在实验中，固定PD源，改变两传感器到PD源的距离差并测量在不同距离差 Δd 下的 n 组波形样本，取 3 个距离差($\Delta d_1, \Delta d_2, \Delta d_3$)下的波形样本进行分析，其中 $\Delta d_1=110\text{ cm}$ ， $\Delta d_2=245\text{ cm}$ ， $\Delta d_3=317\text{ cm}$ 。

1) 距离差为 $\Delta d_3=317\text{ cm}$ 时(理论时间差为

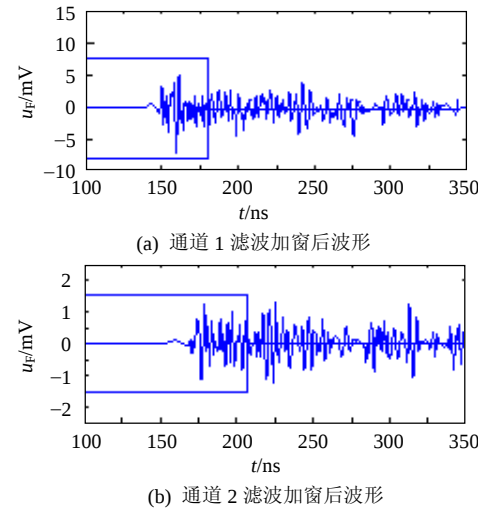


图 6 高通滤波器滤波后加窗的两路变压器超高频 PD 波形

Fig. 6 PD signals from transformer after filtering and windowing treatment by high-pass filter

10.566 ns)，选取 10 组单样本分别计算时间差，并将这 10 组样本进行“相关-移位-叠加”处理计算统计时间差，将单样本与多样本所得实测值与理论值相比较，误差如表 1 所示。

表 1 单样本与多样本所得时间差的误差比较

Tab. 1 Error comparison between single sample and multi-sample

样本序号 n	实测时间差/ns	误差/ns	除去系统误差后的误差百分比/%
1	11.135	0.659	2.10
2	9.725	0.841	3.82
3	11.075	0.509	0.68
4	11.675	1.109	6.36
5	13.050	2.484	19.37
6	11.425	0.859	3.99
7	9.825	0.741	2.87
8	12.350	1.784	12.74
9	11.100	0.534	0.92
10	10.750	0.184	2.39
10 个样本	11.125	0.559	1.15

可以看出，单样本所得时间差分散性大，且存在误差较大的样本，如果直接将其用于定位，必然导致定位结果不稳定，准确度不高。将这 10 组样本经过“相关-移位-叠加”处理后，所得多样本的统计时间差与理论时间差很接近，误差仅为 1.15%，解决了用单样本定位时，定位结果分散性大的不足。

2) 在每个距离差下，取 7 组波形样本计算时间差，样本数 N 分别为 5、10、15、20、25、30、35，其时间差计算的误差百分比 e 如图 7 所示。

由图 7 可以看出，随着样本数的增加，实测时间差越来越接近理论值，当样本数增加到 20 时，误差基本上在 1%左右，因此一般选取 20~30 个样

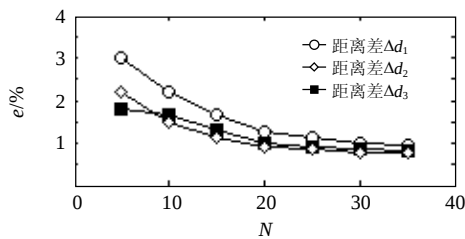


图 7 样本数与误差百分比曲线
Fig. 7 Relation between sample number and error percentage

本进行计算就能达到较高的定位精度。

3) 对变压器的PD源定位时,可以变压器试验箱体的任意一顶点作为参考点O建立空间坐标系,如图 8 所示。图中:放电源实际位置 $P_0(x_0, y_0, z_0)$,距离坐标原点为R,传感器S1 为参考传感器,用本文所述时间差算法可分别计算出图 5 中传感器S2、S3 和S4 与S1 的时间差,即 Δt_{21} 、 Δt_{31} 和 Δt_{41} ,代入文献[15]中的定位算法,即可得到PD源的位置。设求出的放电源位置为 $P(x, y, z)$,则与实际放电源 P_0 的距离误差用式(11)计算。

$$\Delta R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \quad (11)$$

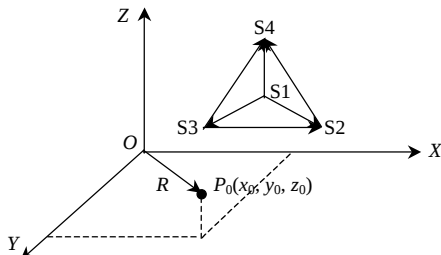


图 8 局放源定位示意图
Fig. 8 PD signal location sketch

在实验室分别对 4 个不同的PD源位置进行了定位测量和计算,结果如表 2 所示。由表 2 可得,定位的最小误差为 4.36 cm,平均误差为 4.89 cm,与用相控阵^[7]和能量衰减^[8]法定位时的误差相比较(如表 3 所示),用本文所计算的时间差用于定位时,

表 2 局放源定位结果及误差

Tab. 2 PD location results and errors

实际放电源位置 P_0/cm	实测时延/ns	TDOE 定位结果 P/cm	误差 $\Delta R/\text{cm}$
(150,159,150)	(1.39,0.66,0.72)	(148,162,147)	4.69
(210,50,45)	(0.46,2.05,1.82)	(213,54,43)	5.39
(150,159,56)	(0.67,0.15,0.16)	(147,160,53)	4.36
(80,100,100)	(0.82,0.34,1.02)	(81,96,103)	5.10

表 3 不同方法的局放定位误差比较

Tab. 3 PD location error comparison among different methods

定位方法	相控阵	能量衰减	TDOE
误差/cm	6.00	7.30	4.89

其定位的准确性比另外两种定位方法高。

4 结论

1) 提出了用多样本非平稳信号的能量相关搜索提取时间差算法,经过“相关-移位-叠加”数学变换,得到 PD 信号具有统计意义的能量累积曲线,利用能量相关搜索原理可计算出多传感器信号间的时间差,能有效消除所获 PD 信号的水平晃动和随机干扰,从而准确定位出 PD 源位置。

2) 随着样本数的增加,时间差计算精度越高。当样本数大于 20 时,误差百分比小于 1%,对实验室模拟测试计算表明,多样本所得统计时间差逼近理论值,时间差精度可达皮秒级。在实验室平均定位误差为 4.89 cm,比相控阵法和能量衰减法定位精度更高。

3) 在实际应用中,对所获得的 PD 波形经小波去噪后,再通过高通滤波器获取信号的高频成分,可提高时间分辨率,使时延测量更准确。同时通过对滤波后波形加时间窗的办法,可以避免因信号传播路径不同所带来的测量误差。

参考文献

- [1] 王国利,郑毅,郝艳捧,等.用于变压器局部放电检测的超高频传感器的初步研究[J].中国电机工程学报,2002,22(4):154-160. Wang Guoli, Zheng Yi, Hao Yanpeng, et al. Study on the ultra-high frequency sensor for PD detection in power transformer [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 154-160(in Chinese).
- [2] 钱勇,黄成军,江秀臣,等.基于超高频法的GIS局部放电在线监测研究现状及展望[J].电网技术,2005,29(1):40-43. Qian Yong, Huang Chengjun, Jiang Xiuchen, et al. Present situation and prospect of ultrahigh frequency method based research of on-line monitoring of partial discharge in gas insulated switchgear[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 40-43(in Chinese).
- [3] 王国利,郝艳捧,袁鹏,等.变压器局部放电超高频检测中的混频技术研究[J].中国电机工程学报,2004,24(10):115-120. Wang Guoli, Hao Yanpeng, Yuan Peng, et al. Application of frequency mixing technique to ultra-high-frequency PD detection for transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 115-120(in Chinese).
- [4] 罗日成,李卫国,邓本再.电力变压器局部放电在线监测系统的研制[J].电网技术,2004,28(16):57-59,85. Luo Richeng, Li Weiguo, Deng Benzai. Development of on-line monitoring system for partial discharge within power transformer [J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 57-59, 85(in Chinese).
- [5] 王国利,郝艳捧.电力变压器局部放电检测技术的现状和发展[J].电工电能新技术,2001,20(2):51-57. Wang Guoli, Hao Yangpeng. Present situation and development of PD detection methods used in power transformers[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2001, 20(2): 51-57(in Chinese).

- [6] 罗日成, 李卫国, 李成榕. 基于阵列信号处理的变压器内局部放电源多目标定位方法[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 65-69.
Luo Richeng, Li Weiguo, Li Chengrong. A multi-target method to locate internal partial discharge sources within transformer based on array signal processing[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 65-69(in Chinese).
- [7] Judd M D, Li Yang, Hunter I B B. Partial discharge monitoring for power transformers using UHF sensors part I: sensors and signal interpretation[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(2): 5-14.
- [8] 罗勇芬, 李艳明, 刘丽春. 基于超高频和超声波相控接收原理的油中局部放电定位方法仿真研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(1): 35-39.
Luo Yongfen, Li Yanming, Liu Lichun. Simulation of PD location method in oil based on UHF and ultrasonic phased array receiving theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(1): 35-39(in Chinese).
- [9] Meijer S, Jongen R A. Location of insulation defects in power transformer based on energy attenuation analysis[C]. Proceeding of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Kitakyushu, 2005.
- [10] Yang L, Judd M D, Bennoch C J. Time delay estimation for UHF signals in PD location of transformers[C]. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon, Boulder, 2004.
- [11] 赵宏忠, 王桂玲, 谢良贵. 无源时差定位算法研究[J]. 现代防御技术, 2007, 35(1): 76-83.
Zhao Hongzhong, Wang Guiling, Xie Lianggui. Research on passive localization estimate algorithm of TDOA[J]. Modern Defence Technology, 2007, 35(1): 76-83(in Chinese).
- [12] 胡来招. 无源定位[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 150-153.
- [13] 姜建国, 曹建中, 高玉明. 信号与系统分析基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 270-273.
- [14] Tang Zhiguo, Li Chengrong, Huang Xingquan. The feasibility of locating PD source in transformer using the UHF technology [C]. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Annual Report Conference, Boulder, 2004.
- [15] 唐志国, 李成榕. 基于辐射电磁波检测的电力变压器局部放电定位研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 96-101.
Tang Zhiguo, Li Chengrong. Study of partial discharge location in power transformer based on the detection of electromagnetic waves [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 96-101(in Chinese).
- [16] 张晓星, 唐炬, 孟延辉. GIS 局部放电检测的微带贴片天线研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(12): 1595-1599.
Zhang Xiaoxing, Tang Ju, Meng Yanhui. Study on the outer UHF microstrip patch antenna for partial discharge detection in GIS [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(12): 1595-1599(in Chinese).
- [17] M Pompili. Early stage of negative PD in dielectric liquids[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(4): 602-613.
- [18] 张吉先, 钟秋海, 戴亚平. 小波门限消噪法应用中分解层数及阈值的确定. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 118-122.
Zhang Jixian, Zhong Qiuhai, Dai Yaping. The determination of the threshold and the decomposition order in threshold de-noising method based on wavelet transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 118-122(in Chinese).
- [19] 唐炬, 宋胜利, 李剑. 局部放电信号在变压器绕组中传播特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 91-96.
Tang Ju, Song Shengli, Li Jian. Propagation characteristics of partial discharge pulses in transformer windings[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 91-96(in Chinese).
- [20] 丁燕生, 唐志国, 李成榕. 变压器的 UHF 法局放故障定位初探[J]. 高电压技术, 2005, 31(11): 18-20.
Ding Yansheng, Tang Zhiguo, Li Chengrong. Preliminary research on the feasibility of PD location in power transformer using UHF[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(11): 18-20(in Chinese).
- [21] 高文胜, 桂俊峰, 谈克雄, 等. 局部放电信号在电力变压器绕组传播过程中的畸变[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 31-36.
Gao Wensheng, Gui Junfeng, Tan Kexiong, et al. Distortion caused by partial discharge propagation along power transformer winding [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 31-36(in Chinese).



唐炬

收稿日期: 2008-06-20。

作者简介:

唐炬(1960—), 男, 四川蓬溪人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事高压电气设备绝缘在线监测及故障诊断研究, cqtangju@vip.sina.com;

陈娇(1985—), 女, 江西樟树人, 硕士研究生, 从事高压电气设备故障诊断技术研究工作;

张晓星(1973—), 男, 湖北武汉人, 博士, 副教授, 从事电气设备在线监测的传感器研究;

许中荣(1979—), 男, 江苏大丰人, 博士研究生, 主要从事高压电气设备绝缘在线监测和故障诊断技术研究工作。

(责任编辑 马晓华)