

变压器现场超高频局部放电信号的 时域特征分析

赵煦¹, 孟永鹏¹, 成永红¹, 吴锴¹, 高飞²

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 陕西工业技术研究院, 710054, 西安)

摘要: 对安装在同一台变压器上的两个超高频天线传感器连续采集的电磁波信号进行时间差和累积能量比分析,采用高斯函数对电磁波时域信号进行拟合,并通过拟合曲线相似度归纳了现场超高频信号的特征拟合曲线.分析表明,时间差与累积能量比的关系可以用来判断安装在不同位置的传感器同时采集的变压器局部放电电磁波信号是否来自同一个放电源;两个传感器同时采集到的来自同一放电源的电磁波应具有较高的相似度,有助于更准确地判断电磁波是否来自同一放电源;时域拟合波形能够去除由于微小干扰导致的波形差异,能够判断变压器局部放电类型,从而可以通过超高频局部放电电磁波信号对变压器实施局部放电故障诊断.

关键词: 电力变压器;局部放电;超高频;电磁波

中图分类号: TM855 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)12-0082-05

Time-Domain Characteristic Site Analysis for Ultra-High Frequency Partial Discharge in Power Transformer

ZHAO Xu¹, MENG Yongpeng¹, CHENG Yonghong¹, WU Kai¹, GAO Fei²

(1. State Key Laboratory of Power Equipment and Electrical Insulation, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shaanxi Industrial Technology Research Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: The relationship between time-of-flight difference and accumulation energy is introduced to analyze the time-domain waveform of ultra-high frequency electromagnet (EM) wave induced by partial discharge (PD) from interior of transformer. Gauss function is applied to fit the waveform of EM, and the characteristics of EM are presented by the statistical analysis for all the fitting curves. It is shown that the relationship between time-of-flight difference and accumulation energy enables to identify whether the EM signals acquired by different sensors come from the same source of PD and more accurately to determine whether the EM signals come from the same source of PD due to the high similarity coefficient of EM wave induced by the same PD. And the fitted curves in time domain are beneficial to remove the interference to evaluate the PD pattern.

Keywords: power transformer; partial discharge; ultra-high frequency; electromagnetic wave

电力变压器中的局部放电是影响变压器安全运行的重要因素,如何快速有效地检测局部放电并对其进行放电类型和位置的识别一直是科研工作者和现场运行人员十分关注的问题.局部放电电流脉冲

会产生高频空间电磁波辐射,由于超高频检测频带很宽,相比传统的脉冲电流检测方法而言,能够包含更多的局部放电信息,所以通过超高频电磁波信号分析局部放电特征,利用超高频电磁波对局部放电

类型和放电位置识别已经得到越来越多的重视和应用^[1-2]. 文献[3]基于最短光程差理论利用电磁波对局部放电定位进行了初步分析;文献[4-5]针对电磁波在变压器中的传播规律进行了仿真分析,得出了绕组和铁心对电磁波传播的影响. 由于电磁波可以通过变压器壳体的缝隙衍射出来,从而为外置式超高频传感器监测局部放电电磁波提供了理论依据^[6]. 由于变压器内部电磁波传递路径复杂,现场电磁环境干扰,以及有多个放电源同时存在等因素的影响,目前无法获得超高频电磁波信号与局部放电视在放电量的关系,无法利用超高频电磁波进行局部放电定位,这在一定程度上阻碍了局部放电超高频检测的现场应用.

本文对一年内连续监测的 3 台 330 kV 变压器局部放电超高频电磁波信号进行累积功率比与时间差的关系分析,并利用高斯拟合曲线对信号进行相似度统计分析,得到了变压器局部放电电磁波信号的时域基本特征.

1 局部放电电磁波传播基本过程

通常绝缘介质内的局部放电脉冲电流产生的电磁辐射可以看成是一个点源激发瞬态电磁场,该瞬态电磁场遵循麦克斯韦基本方程. 通过求解麦克斯韦方程得到非齐次的达贝尔方程

$$\nabla^2 A - \mu \epsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\mu J \quad (1)$$

$$\nabla^2 \varphi - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (2)$$

式中: φ 和 A 分别为标量电位和磁矢位,在洛伦兹条件 $\nabla \cdot A - \mu \epsilon \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0$ 下,磁矢位 A 单独由电流密度 J 决定,动态位 φ 单独由电荷密度 ρ 决定. 达贝尔方程的解为

$$\varphi(r, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_V \frac{\rho(r', t - R/v)}{R} dV' \quad (3)$$

$$A(r, t) = \frac{\mu}{4\pi} \int_V \frac{J(r', t - R/v)}{R} dV' \quad (4)$$

式中: $R = |r - r'|$ 是场点 r 到源电荷的距离. 式(3)、式(4)表明,在 t 时刻、场中某点 r 处,动态位以及场量并不是决定于该时刻激励源的情况,而是决定于在此前 $(t - R/v)$ 时刻激励源的情况.

由于变压器的腔体近似为一个矩形,电磁波在此腔体内传播并反复振荡. 由电磁波导理论可知,在单导体的空心或填充介质的波导管内,只存在横电波(TE 波)和横磁波(TM 波),所以在变压器腔体

内也存在 TE 波和 TM 波的振荡模式^[7]. 通过求解波动方程,得到谐振腔中的 TE 波和 TM 波振荡模式的谐振频率为

$$(f_0)_{m,n,p} = \frac{1}{2(\mu\epsilon)^{1/2}} \left(\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 + \left(\frac{p}{l} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (5)$$

式中: a, b, l 表示谐振腔的尺寸; m, n, p 是波的振荡模式. 式(5)表明,当给定腔体尺寸时,随着 m, n 和 p 取一系列不同的整数,得到腔内一系列不连续的谐振频率 f_0 . 频率的不连续性是封闭的金属空腔中电磁波传播的一个重要特性. 可见,变压器内部的局部放电所激发的电磁波不但与局部放电电流脉冲本身有关系,还与变压器的尺寸有着一定的联系.

2 超高频局部放电信号的监测与分析

2.1 局部放电在线监测系统

现场采用的超高频局部放电传感器是微带天线传感器,带宽为 10~3 000 MHz,具有测量频率高、频带宽、信息量大、抗干扰强等优点. 每台变压器上安装两个超高频传感器,分别安装在下方底座和上方检修孔的绝缘缝隙处,如图 1 所示. 由于现场存在外界电磁波的干扰,传感器需采用金属外壳屏蔽外界干扰,只在对准缝隙的一面留有开口接收变压器内部的电磁波信号. 由于微带天线耦合电磁波具有



(a) 钟罩和底座缝隙处



(b) 本体检修孔处

图 1 超高频传感器安装位置

方向性,所以外界干扰电磁信号对传感器入射角度很小,而且干扰信号到达传感器时衰减比较严重,可以达到有效屏蔽外界电磁干扰的效果。

利用安装在变压器附近的一台工控机,同时采集两个传感器耦合到的超高频信号,系统采样率为 $1 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$,采样时间为 $1 \mu\text{s}$,连续采集时间间隔为 2 h ,并通过光缆将数据实时传送到位于变电站主控室的在线监测服务器中。图2为传感器监测到的局部放电电磁波信号。

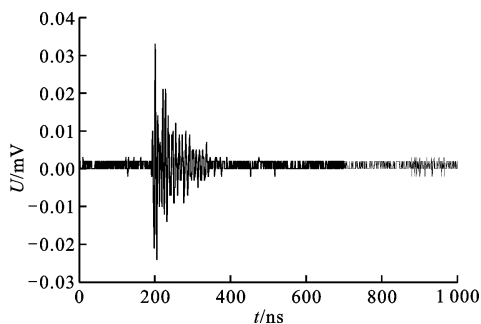


图2 现场典型局部放电电磁波信号

2.2 累积能量比与时间差分析

信号能量 E 用所有采样点电压平方和表示

$$E = \frac{\Delta\tau}{R} \sum_{i=1}^L U_i^2 \quad (6)$$

式中: L 表示采样波形的长度; U_i 表示第 i 个采样点的电压; R 为采集系统匹配阻抗, 值为 50Ω ; $\Delta\tau$ 为采样间隔, 值为 1 ns ; e_i 表示触发起始时刻后 i 个点的累积能量

$$e_i = e_{i-1} + U_i^2 \quad (7)$$

定义两个传感器的累积能量比

$$R_P = E_{S_2} / E_{S_1} \quad (8)$$

式中: E_{S_1} 表示钟罩处信号的能量; E_{S_2} 为检修孔处信号的能量。时间差 Δt 为

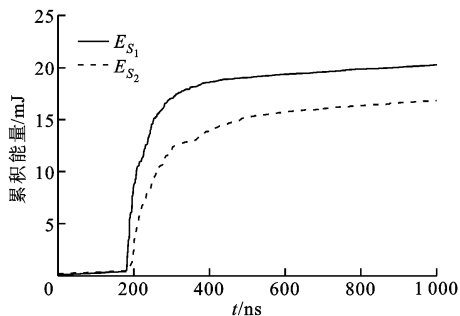
$$\Delta t = t_{S_2} - t_{S_1} \quad (9)$$

式中: t_{S_2} 、 t_{S_1} 为电磁波到达传感器的时间, 并定义相对能量增长 R_{Ej} 为

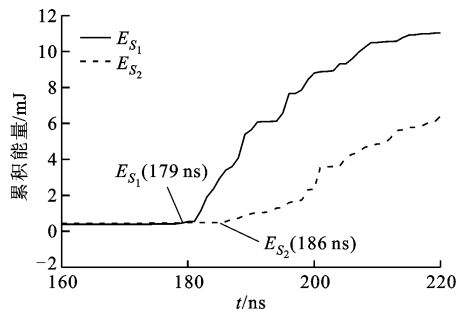
$$R_{Ej} = \left\{ \frac{e_i}{e_{i-1}} - 1 \right\} \quad (10)$$

图3a为两个超高频传感器在某一时刻同时采集的超高频信号的能量累积曲线, 图3b所示是信号起始位置处累积能量的放大图。由于局部放电激发的电磁波为瞬时信号, 因此能量累积曲线的拐点处即为超高频信号到达传感器的时间^[8-9]。从图中可以看出, 超高频信号到达 S_1 的时间比到 S_2 早 7 ns , 累积能量比 R_P 为 0.825 , 即 S_1 接收到的信号比 S_2 早

且能量大。如果两个传感器接收到的信号来自变压器内部同一个放电源, 那么此次放电的位置距离 S_1 较近, 由电磁波信号在油中的传播速度为 $2 \times 10^8 \text{ m/s}$, 可计算出放电位置到两个传感器的距离差大约为 1.4 m 。



(a) 不同位置局部放电信号的累积能量



(b) 信号起始位置累积能量曲线放大图

图3 局部放电信号的累积能量

由于时间差是判断放电位置距离传感器远近的重要参数, 故在计算时间差之前需要对信号去除直流分量, 然后计算信号的累积能量, 得到信号的累积相对能量增长 R_{Ej} (如图4所示), 利用相对能量增长的最大值判断信号到达传感器的时间。为了准确识别到达时间, 使用相对能量增长最大值的 15% 作为到达时间的阈值^[10], 对图4a中信号进行分析, 得到的信号到达时间为 180 ns , 图4b中信号到达时间为 187 ns , 两者时间差为 7 ns , 这与图3得到的结果类似。

由于局部放电电磁波可以看成是由点源辐射得到的, 所以随着离点源距离越远, 单位面积上传感器耦合到的信号能量越小。同时, 由于电磁波在有耗介质(媒质导电)中传播时能量不断衰减, 即单位面积上传感器耦合的电磁波信号能量随距离增大而衰减, 所以利用时间差 Δt 和累积能量比 R_P 的关系, 可以初步确定放电位置距离某个传感器的远近, 如表1所示。当 $\Delta t < 0$ 、 $R_P > 1$ 或 $\Delta t > 0$ 、 $R_P < 1$ 时, 满

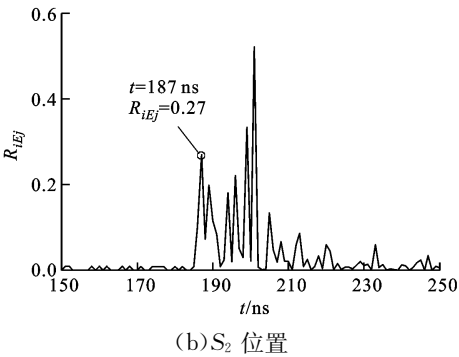
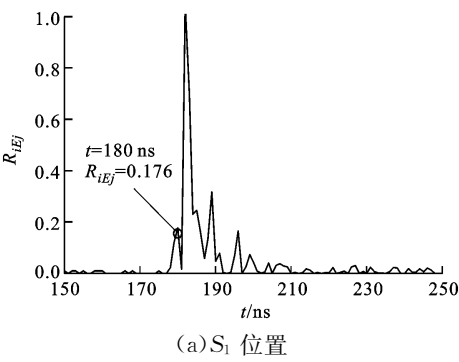


图 4 单次放电信号相对能量增长趋势

足电磁波在传递过程中衰减的规律,可以认为采集到的电磁波由同一个放电源激发;当 $\Delta t < 0$ 、 $R_P < 1$ 或 $\Delta t > 0$ 、 $R_P > 1$ 时,不满足电磁波在传递过程中的衰减规律,可以认为两个传感器采集到的电磁波信号由不同的放电源激发。

图 5 所示为 1# 变压器两个超高频传感器电磁波信号的时间差与累积能量比关系。根据表 1 中的判断准则,图 5a 采集到的电磁波来自同一个放电源,而图 5b 采集到的电磁波来自不同的放电源。从图 5 可以看出,距离 2# 传感器相对较近的放电源多,而且多数监测信号来自相同的放电源。

表 1 时间差与累积能量比的关系

R_P	$\Delta t < 0$ 时	$\Delta t > 0$ 时
> 1	信号先到达 S_2 S_2 采到的信号能量大于 S_1	信号先到达 S_1 S_2 采到的信号能量大于 S_1
< 1	信号先到达 S_2 S_1 采到的信号能量大于 S_2	信号先到达 S_1 S_1 采到的信号能量大于 S_2

2.3 局部放电电磁波信号时域波形基本特征

现场采集到的电磁波信号的时域波形形状各异,为了识别变压器内部局部放电类型,必须对波形的时域特征进行分析和归类。本文使用高斯函数对

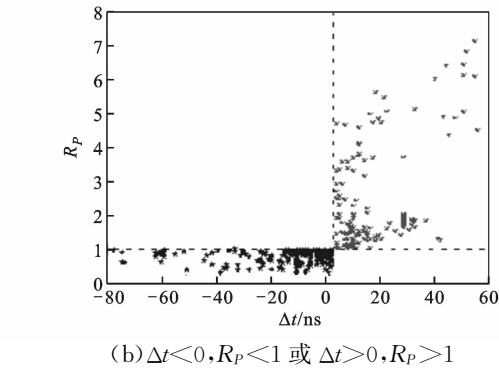
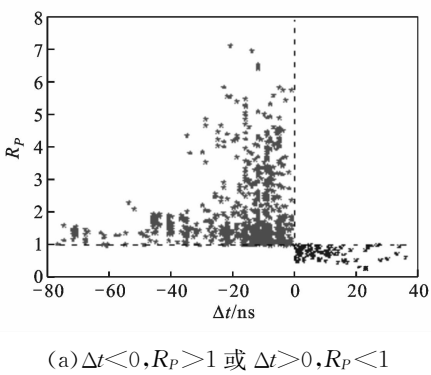


图 5 1# 变压器超高频信号时间差与累积能量的关系

时域波形进行拟合,拟合前需要去除信号的直流分量,计算各个采样点电压(归一化)平方。拟合公式为

$$y = a_1 e^{-(U-b_1)/c_1)^2} + a_2 e^{-(U-b_2)/c_2)^2} \tag{11}$$

对现场采集到的电磁波信号进行拟合,依据拟合波形单峰、双峰和峰的宽度共得到 9 类不同的拟合曲线,用 $M_1 \sim M_9$ 表示,表 2 给出了这 9 类波形的相关系数。从表 2 的相关系数可以看出, M_4 、 M_9 与 M_1 的相关系数大于 0.8,所以选取 M_1 作为特征拟合曲线;同样 M_3 与 M_2 , M_7 、 M_8 与 M_2 的相关系数也大于 0.8。最终选取 M_1 、 M_2 、 M_5 、 M_6 这 4 种拟合曲线作为局部放电信号特征拟合曲线,并对所有处理后的时域波形进行分类,4 种特征拟合曲线如图 6 所示。

表 3 为使用 4 种特征拟合曲线对所采集到的信号进行相似度统计分析的结果,从中可以看出, M_1 、 M_2 、 M_5 3 种特征拟合曲线在所采集的信号中普遍存在, M_6 对应的波形出现的次数较少。表 4 为对分别安装在 3 台变压器上的传感器同时采集信号的相似度分析结果,从中可以看出,1#、2# 变压器采集到信号的相似度较低,3# 变压器采集到信号的相似度较高。由于不同放电类型激发电磁波的特征波形不同,从而可以看出 1#、2# 变压器的放电类型比 3# 变压器多。

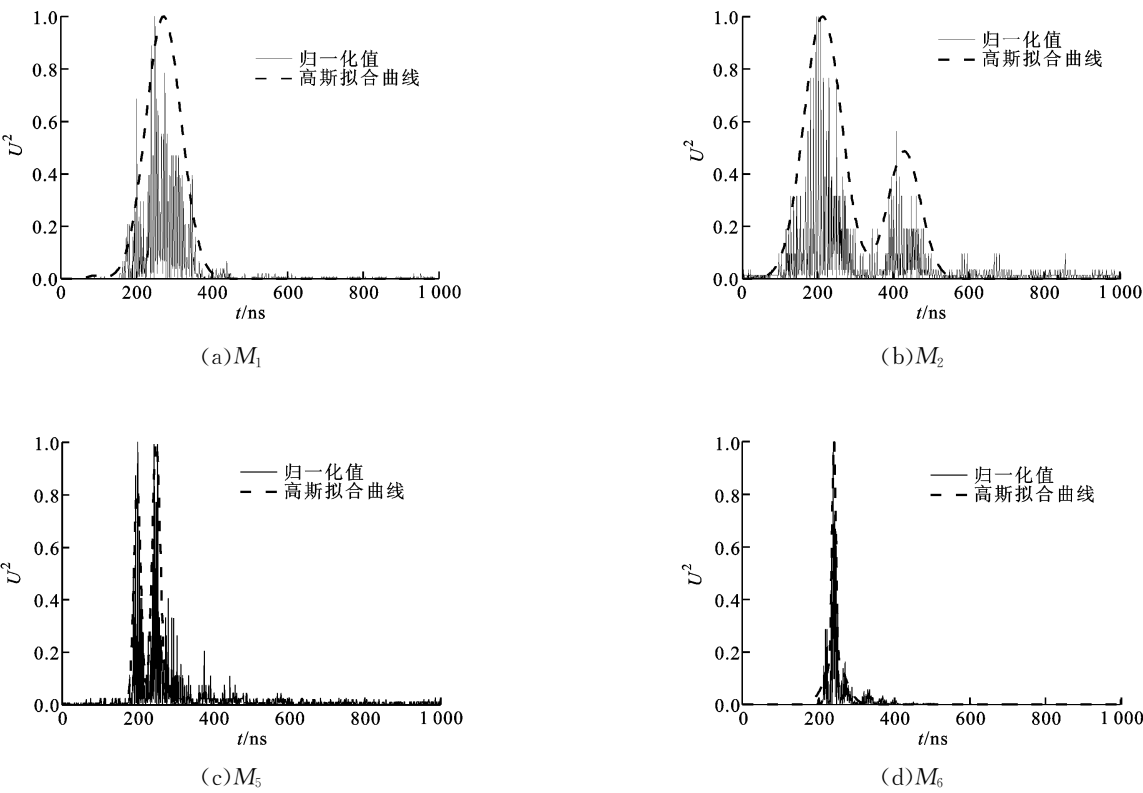


图 6 4 种局部放电电磁波信号特征曲线

表 2 9 种高斯拟合曲线的相关系数

拟合 曲线	相关系数								
	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9
M_1	1.00	0.58	0.54	0.84	0.61	0.64	0.49	0.60	0.87
M_2	0.58	1.00	0.95	0.62	0.80	0.70	0.92	0.89	0.78
M_3	0.54	0.95	1.00	0.66	0.72	0.56	0.91	0.82	0.63
M_4	0.84	0.62	0.66	1.00	0.78	0.57	0.55	0.50	0.79
M_5	0.61	0.80	0.72	0.78	1.00	0.70	0.69	0.67	0.80
M_6	0.64	0.70	0.56	0.57	0.70	1.00	0.60	0.59	0.78
M_7	0.49	0.92	0.91	0.55	0.69	0.60	1.00	0.76	0.68
M_8	0.60	0.89	0.82	0.50	0.67	0.59	0.76	1.00	0.69
M_9	0.87	0.78	0.63	0.79	0.80	0.78	0.68	0.69	1.00

表 3 特征拟合曲线与采集信号高斯拟合曲线的相似性统计

拟合曲线	相似个数(阈值为 0.80)	相似比例/%
M_1	4 543	54.7
M_2	3 124	37.6
M_5	3 169	38.2
M_6	584	7.0

表 4 同时采集信号的相似性分析结果

变压器	相似个数(阈值为 0.8)	相似比例/%
1#	574	43.4
2#	444	42.4
3#	1 453	81.7

3 结 论

- (1)利用时间差与累积能量比的关系,可以判断同时采集的变压器局部放电电磁波信号是否来自内部同一个放电源。
- (2)如果不考虑电磁波传播过程中的干扰,两个传感器同时采集到同一类型放电的电磁波具有很高的相似度,可以更准确地判断电磁波是否为同一放电类型。
- (3)时域拟合波形能够去除由于微小干扰导致的波形差异的影响,同时利用得到的特征拟合曲线能够将现场时域波形进行分类,有助于判断变压器局部放电类型。

参考文献:

[1] MASAYUKI H, SHINYA O, SATOSHI M. Recent trend of the partial discharge measurement technique using the UHF electromagnetic wave detection method [J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2007, 2(5):504-509.

[2] TENBOHLEN S, DENISSOV D, HOEK S M. Partial discharge measurement in the ultra high frequency (UHF) range[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008,15(6):1544-1552.

[3] 丁燕生,唐志国,李成榕,等. 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, et al. Preliminary research on the feasibility of PD location in power transformer using UHF [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31 (11): 18-20.

[4] 孟延辉,唐炬,许中荣,等. 变压器局部放电超高频信号传播特性仿真分析 [J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2007, 30 (5): 70-74.

MENG Yanhui, TANG Ju, XU Zhongrong, et al. Simulation propagation of partial discharge UHF signals in transformer[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007,30(5): 70-74.

[5] 常文治,唐志国,李成榕,等. 变压器局部放电 UHF 信号传播特性的仿真分析[J]. 高电压技术, 2009, 35 (7): 1629-1634.

CHANG Wenzhi, TANG Zhiguo, LI Chengrong, et al. Simulation analysis of PD UHF signal propagation in transformers[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7):1629-1634.

[6] 王颂,李香龙,李军浩,等. 变压器局部放电超高频信号外传播特性的试验研究[J]. 高压电器, 2007, 43 (2):101-105.

WANG Song, LI Xianglong, LI Junhao, et al. Experimental study for outside propagation characteristic of the UHF signal emitted by partial discharge in transformers[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43 (2): 101-105.

[7] 冯慈璋,马西奎. 工程电磁场[M]. 北京:高等教育出版社, 2000: 297-320.

[8] JUDD M D, LI Yang , HUNTER I B B. Partial discharge monitoring for power transformers using UHF sensors: part 1 Sensors and signal interpretation[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21 (2): 5-14.

[9] JUDD M D, LI Yang, HUNTER I B B. Partial discharge monitoring for power transformers using UHF sensors: part 2 Field experience[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(3): 5-13.

[10] PINPART T, JUDD M D. Improving UHF partial discharge location in high voltage equipment[C]//2009 44th International Universities Power Engineering Conference. New York, NY, USA: IEEE, 2009:537-541.

(编辑 杜秀杰)