

变压器局部放电在线监测 超高频 Hilbert 分形天线研究

李 剑¹, 宁佳欣¹, 金卓睿¹, 王有元¹, 李 湜²

(1. 重庆大学 高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044;

2. 四川绵阳电业局, 四川 绵阳 621000)

摘要: 论述了 Hilbert 分形天线基本原理, 并根据分形天线电磁场理论, 提出了应用于变压器局部放电超高频在线监测的 Hilbert 分形天线优化设计方法。通过仿真计算, 研究了几何参数对 Hilbert 分形天线性能的影响, 设计出用于变压器局部放电监测的 3 阶 Hilbert 分形天线。通过气隙放电、沿面放电、电晕放电 3 种典型变压器绝缘缺陷局部放电实验, 采用分形天线和脉冲电流传感器对这 3 种局部放电进行了测量, 并分析了分形天线的局部放电测量信号功率谱。实验结果证明该天线能够有效应用于变压器局部放电超高频在线监测。

关键词: 变压器; 局部放电; 在线监测; 超高频检测; 分形天线

中图分类号: TM 855

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)06-0031-05

0 引言

近年来的研究表明, 超高频检测法能够有效测量 SF₆ 气体绝缘组合电器和电力变压器内部局部放电^[1-3]。然而, 将超高频检测法成功应用于现场变压器局部放电在线监测仍需进一步深入研究。超高频天线是变压器局部放电超高频在线监测方法的关键技术, 天线的性能及优化设计是成功实现高灵敏度变压器局部放电监测的根本保证。

目前, 有多种超高频天线被应用于局部放电检测: 文献[4]中介绍了双臂阿基米德平面螺旋天线的

性能及其在局部放电检测中的应用情况; 文献[5]介绍了偶极子天线模型, 研究了局部放电超高频信号的波形特征; 文献[6]采用倒锥状天线对油中的局部放电进行了测量; 圆板天线和圆环天线在 SF₆ 气体绝缘组合电器的局部放电检测中得到了应用^[7]。

通信领域应用的小型化超高频天线的谐振频率通常高于数千兆赫兹, 通频带非常窄。局部放电超高频检测频带介于 300~3 000 MHz 之间, 用于局部放电检测的超高频天线在实际测量中需要通过增大天线尺寸来降低谐振频率, 这与变压器局部放电在线监测对内置小型化超高频天线设计的要求相矛盾。

现提出一种用于变压器局部放电超高频在线监测的体积小、频带宽的 Hilbert 分形天线设计方法, 介绍了 Hilbert 分形天线的基本原理和性能, 讨论了几

收稿日期: 2007-01-23; 修回日期: 2007-03-29
基金项目: 重庆市科委科技计划重大项目(CSTC2005AA6003);
教育部新世纪优秀人才支持计划资助(NCET-06-0763)

DC resistance measurement for low voltage side winding of large-scale transformer

LIANG Zhi-rui, ZHEN Xu-feng, NIU Sheng-suo

(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Several DC resistance measurements for low voltage side winding of large-scale transformer are introduced, detailed in testing process and measuring results. A new method is proposed to improve present measuring methods, which is based on the full-voltage constant-current source method and the saturable magnetic circuit method. At forced stationary circuit state, full-voltage is used to quickly increase the winding current and shorten the transient process, and constant-current source is then achieved for measuring. With the high and low voltage windings connected in series, because the turns of high-voltage windings are much more than those of low-voltage windings, a small going-through measuring current may make the iron core saturated, which reduces the winding inductance greatly and shortens the testing time.

Key words: large-scale transformer; DC resistance; saturable magnetic circuit method; windings; quick measuring

何参数对 Hilbert 分形天线性能的影响;设计制作了 3 阶 Hilbert 分形天线,并应用分形天线对变压器 3 种典型人工绝缘缺陷模型的局部放电进行测量和实测信号分析,证明了该天线能够有效应用于变压器局部放电超高频在线监测。

1 Hilbert 分形天线基本原理

Hilbert 分形天线依据 Hilbert 分形曲线设计而成,图 1 为 1~4 阶 Hilbert 分形曲线;该曲线为连续曲线,具有严格自相似性^[8-9];随着分形阶数的增加,Hilbert 分形曲线通过自相似迭代从一维空间逐渐填充到二维空间,曲线分维数随分形阶数增加而变大,取值范围为 $[1,2]$ ^[10]。分维数表征了分形曲线占据空间的利用率,分维数越大,曲线空间占有率越高。

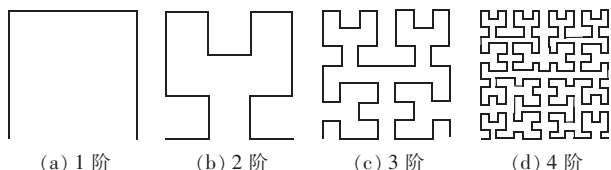


图 1 第 1~4 阶 Hilbert 分形曲线

Fig.1 The 1st,2nd,3rd and 4th order Hilbert curves

由于 Hilbert 分形曲线的自相似特性, N 阶 Hilbert 分形天线有 N 个谐振频率^[11]。小型化 Hilbert 分形天线的谐振频率较高,通过优化设计天线的几何结构及参数,使天线最低谐振频率处于局部放电超高频检测频带中,从而用于监测变压器局部放电。因此,下面重点讨论与天线最低谐振频率相关的 Hilbert 分形天线特性。Hilbert 分形天线馈电点位置的改变会引起天线输出阻抗的改变。图 2 所示为一个 3 阶 Hilbert 分形天线基本结构,图中点 1~5 分别为 5 个馈电点。文献[11]

证明了采用中心馈电的 Hilbert 分形天线输出阻抗较小,经优化设计后的非中心馈电 Hilbert 分形天线的输出阻抗能够达到或接近 $50\ \Omega$,可与传输电缆达到良好的阻抗匹配。

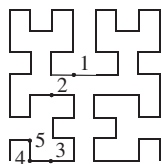


图 2 3 阶 Hilbert 分形天线及馈电点位置示意图

Fig.2 The 3rd order Hilbert antenna and its feed-points

2 Hilbert 分形天线仿真与优化设计

Hilbert 分形天线体积小,可作为内置式超高频天线通过变压器放油阀置于变压器内部,实现变压器局部放电在线监测。分别设计了 2 阶和 3 阶 Hilbert 分形天线,采用 Ansoft 电磁场仿真软件,计算 Hilbert 分形天线谐振频率 f_r 及其输出阻抗 R_o ,并分析了分形天线外围尺寸 L 、分形天线阶数 n 、天线导体宽度 b 和馈电点对 f_r 和 R_o 的影响。

Hilbert 分形天线采用印制电路板制作,电介质的介电常数和厚度由仿真优化确定。仿真设置电路板相对介电常数优化范围为 3~5,板厚度为 1~3 mm,

分形天线频带范围为 300 kHz~3 GHz,仿真终止条件为谐振频率处驻波比低于 2。

表 1 所示为采用中心馈电的 2 阶和 3 阶 Hilbert 分形天线的 f_r 和 R_o 随天线 L 、 n 和 b 变化的仿真计算结果,最优的电介质板介电常数和厚度分别为 4.4 和 1.6 mm。由表 1 可见, f_r 随 L 的增大而降低; n 的增加会导致 f_r 降低;随着 b 的增加, f_r 会相应提高。同时可以看出,增加 n 会引起 R_o 增加,减小 b 会提高输出电阻 R_o 。对于采用中心馈电的 Hilbert 分形天线而言,很难通过调整天线参数使 R_o 接近 $50\ \Omega$,不利于与 $50\ \Omega$ 传输电缆匹配。

表 1 中心馈电 Hilbert 天线 f_r 和 R_o 仿真结果

Tab.1 Simulation results of f_r and R_o of Hilbert antenna with central feed-points

L/mm	n	b/mm	f_r/MHz	R_o/Ω
50	2	4	590.108	3.554
50	3	4	427.382	1.006
50	2	2	565.438	4.662
50	3	2	399.983	1.967
30	2	2	780.716	2.765
30	3	2	643.595	0.571
30	2	1	759.613	3.656
30	3	1	624.782	1.927

通过改变馈电点位置,可改变谐振频率点天线的输出阻抗。表 2 所示为 $L=30\ \text{mm}$ 、 $b=2\ \text{mm}$ 的 3 阶 Hilbert 分形天线分别在如图 2 所示的 5 个馈电点馈电时,天线在谐振频率点 f_r 的输出阻抗 R_o 的仿真结果。可以看出, f_r 随馈电点位置的改变很小,而 R_o 却随馈电点位置发生很大变化;当馈电点设计在点 4 (如图 2 所示)时,天线 R_o 最接近于 $50\ \Omega$ 。

表 2 不同馈电点 3 阶 Hilbert 天线的仿真结果

Tab.2 Simulation results of the 3rd Hilbert antennas with different feed-points

馈电点	f_r/MHz	R_o/Ω
1	736.304	0.879
2	736.383	1.706
3	736.562	19.477
4	736.608	43.569
5	736.695	71.256

对 4 阶 Hilbert 分形天线的谐振频率和输出阻抗进行了上述仿真分析,仿真结果表明,4 阶 Hilbert 分形天线 ($b=1\ \text{mm}$, $L=30\ \text{mm}$) 的第 1 个谐振频率点出现在 361 MHz,在 2 GHz 以上出现第 4 个谐振频率,其他 2 个谐振频率略有下降。但相应的通频带宽减小了近 2/3。而且,4 阶及以上的 Hilbert 分形曲线非常复杂,在外围尺寸为 $30\ \text{mm}\times 30\ \text{mm}$ 的印刷电路板上加工 4 阶 Hilbert 分形天线时导线宽度难以达到 1 mm,天线性能无法达到优化的性能指标。因此,针对小型化天线的需要,没有选择 4 阶 Hilbert 分形天线用于变压器局部放电测量。

通过前面对 3 阶 Hilbert 分形天线的仿真结果可知,经优化设计后的 3 阶 Hilbert 分形天线能满足变压器局部放电监测内置式超高频天线要求,适合于变压器局部放电在线监测的内置超高频 Hilbert 分

形天线相对最优参数设计为 $L=30\text{ mm}$, $n=3$, $b=2\text{ mm}$, 馈电位置为图2中馈电点4, 电介质板的介电常数为4.4, 厚度为1.6 mm。图3所示为设计的变压器局部放电监测内置 Hilbert 分形天线在 817 MHz 处仿真的方向图。

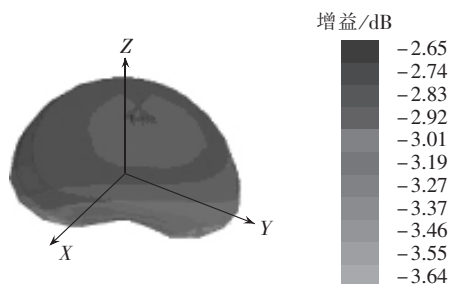


图3 Hilbert 分形天线在 817 MHz 处的方向图

Fig.3 The radiating pattern of the 3rd order Hilbert antenna at 817 MHz

设计的变压器局部放电监测的3阶 Hilbert 分形天线实测驻波比 λ 如图4所示, 天线的3个谐振频率为 817 MHz、1.7 GHz 和 2.5 GHz。天线在 817 MHz 时驻波比约为 1.5, 在 1.7 GHz 时驻波比约为 1.2, 在 2.5 GHz 时驻波比约为 1.6。第1个谐振频率处的通频带约为 600~900 MHz。

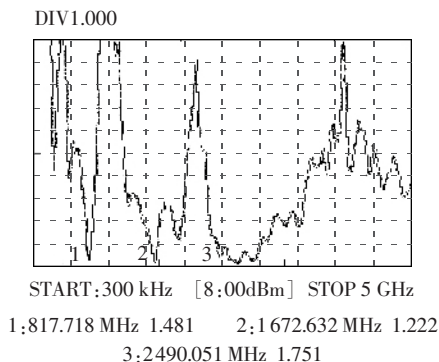


图4 3阶 Hilbert 分形天线实测驻波比 λ

Fig.4 The VSWR of the 3rd order Hilbert antenna

从设计结果可以看出, 将分形理论应用于天线设计有利于天线的小型化, 优化后的 Hilbert 分形天线具有良好的频率特性, 满足变压器局部放电在线监测系统对超高频天线小型化设计的要求。

3 典型绝缘缺陷局部放电实测结果及分析

为了验证设计的 Hilbert 分形天线在变压器局部放电检测中具有良好的效果, 文中设计了3种典型的变压器绝缘缺陷, 在实验室进行局部放电测量, 分析了 Hilbert 分形天线检测变压器局部放电超高频信号的有效性。

3.1 模型试验

图5所示为3种典型变压器油纸绝缘缺陷。图5(a)中高压电极和接地电极直径为 200 mm, 厚度为 10 mm, 气隙放电模型中采用3层纸板叠加制作, 中层纸板中心孔径为 100 mm, 绝缘纸板厚度为 0.5 mm, 直径为 500 mm; 图5(b)中高压电极和接地电极尺寸与图5(a)中所用电极相同, 绝缘纸板厚度和直径也

相同; 图5(c)中高压针电极锥角度为 5° , 针身直径为 10 mm, 接地电极与其他2个模型接地电极相同, 针板电极间隙高度为 10 mm。

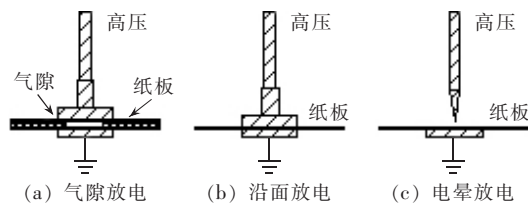


图5 3种典型油纸绝缘缺陷

Fig.5 Three typical oil-paper insulation defects

图6所示为实验室模拟油箱中绝缘缺陷局部放电实验及测量系统示意图。天线S经传输电缆将接收到的局部放电超高频信号接入示波器。电流传感器C经传输电缆将流过接地线的局部放电脉冲电流信号接入示波器。传输电缆长度相等。

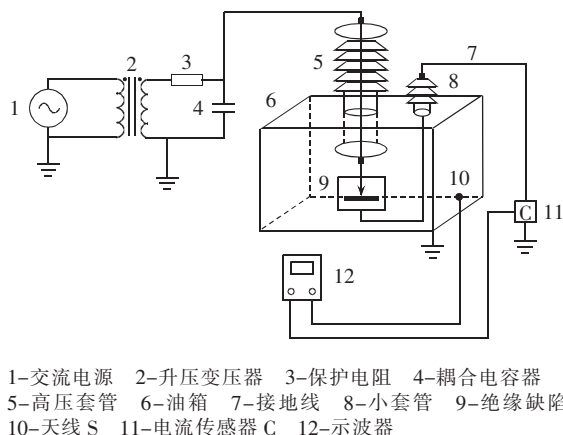


图6 实验室局部放电实验示意图

Fig.6 The setup of PD experiment in laboratory

实验中, 对于同一绝缘缺陷模型的多个试品, 在相同的实验电压下, 同时采集天线S和脉冲电流传感器C的2路信号。脉冲电流传感器通频带宽为 500 kHz~16 MHz。在未加压和较低电压时, 分别测量背景噪声, 然后逐步升高电压, 记录起晕电压 u_0 , 并将电压升至 $1.2u_0$, 保持 5 min, 升至 $1.5u_0$, 保持 5 s, 降压至 $1.2u_0$, 并维持该电压 30 min, 在最后 10 min 采集放电样本信号。图7所示为分形天线测量得到的3种绝缘缺陷局部放电信号时域波形, (a) 为气隙放电, (b) 为沿面放电, (c) 为电晕放电; 图12同。3种放电波形复杂, 都存在强烈的振荡。

图8所示为实验升压前和实验电压较低时的脉冲电流传感器和超高频天线实测背景噪声。图8(a)所示的脉冲电流传感器实测的背景干扰中存在幅值为 60 mV 的脉冲干扰, 图8(b)所示的分形天线检测到背景噪声水平为 1.2 mV, 无显著的脉冲干扰。在起始放电出现前的逐步升压过程中, 两传感器输出的噪声幅值稳定。

图9所示为实验电压下脉冲电流传感器(a)和分形天线(b)实测的气隙放电脉冲信号。可见, 脉冲电流传感器实测的脉冲信号 Pc1 与 Pc2 分别与分形天线

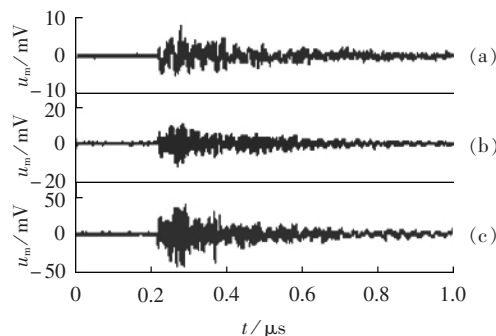


图 7 3 种绝缘缺陷局部放电
超高频信号时域波形

Fig.7 Waveforms in time domain of PD pulses for three insulation defects

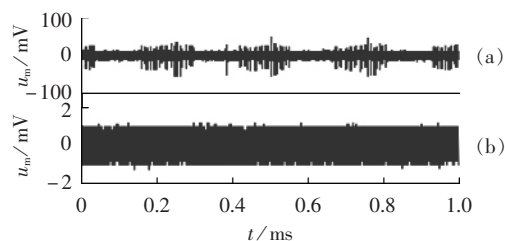


图 8 背景噪声

Fig.8 Background noises

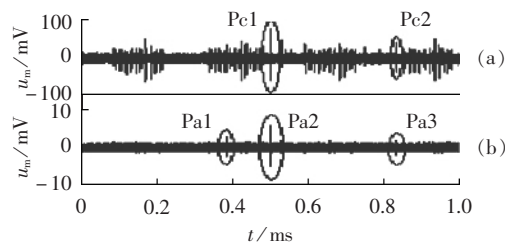


图 9 气隙放电实测信号

Fig.9 Detected signals of gap discharge

实测的 Pa2 和 Pa3 出现在相同时刻, Pc1 和 Pc2 的信噪比分别为 1.34 和 0.80, 而 Pa2 和 Pa3 的信噪比分别为 4.33 和 1.33; 同时, Pa1 的信噪比为 2.68, 而脉冲电流传感器输出信号中无法辨别该时刻的放电脉冲。

图 10 和图 11 所示分别为沿面放电和油中电晕模型在实验电压下的脉冲电流传感器(a)和分形天线(b)的实测局部放电脉冲信号。与图 9 所示结果相似, 分形天线实测的脉冲信号具有较高的信噪比; 由于脉冲电流传感器输出信号中具有较强的脉冲干扰, 脉冲电流传感器实测局部放电脉冲信号信噪比较低。其原因主要在于, 脉冲干扰从高压导线耦合窜入实验测试回路, 其能量集中频带与脉冲电流传

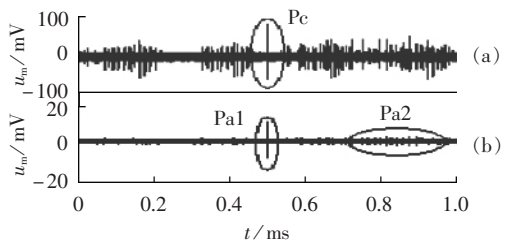


图 10 沿面放电实测信号

Fig.10 Detected signals of surface discharge

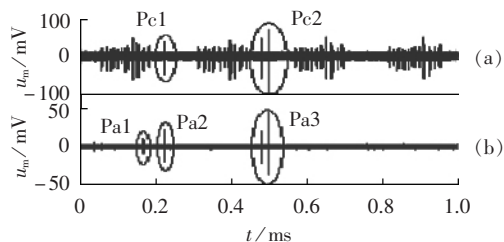


图 11 油中电晕实测信号

Fig.11 Detected signals of corona in oil

感器通频带重叠, 脉冲电流传感器对实测脉冲干扰具有较高的响应灵敏度; 分形天线在第 1 个谐振频率点处通频带在 600~900 MHz 之间, 远高于脉冲电流传感器的通频带与脉冲干扰能量集中的频带, 对实测的脉冲干扰不灵敏。

以上分析表明, 与脉冲电流传感器相比, 设计的 Hilbert 分形天线具有较高的信噪比, 适合作为变压器局部放电在线监测内置式传感器。此外, 当局部放电具有较大幅值时, 分形天线与脉冲电流传感器同样具有较大的响应输出; 采用分形天线与脉冲电流传感器联合测量局部放电信号, 结合脉冲电流法可以定量以及超高频法信噪比高的优点, 可在变压器局部放电在线监测应用中取得良好的抗干扰和定量分析效果。

3.2 局部放电超高频信号功率谱分析

图 7 所示的 3 种缺陷模型局部放电实测脉冲信号的功率谱如图 12 所示。可见, 气隙放电的分形天线实测脉冲信号(a)能量分布在 200 MHz 以下、400~700 MHz 及 900~1 200 MHz 等频段, 且在 183 MHz、478 MHz 和 1 210 MHz 3 个频率点能量相对较高; 沿面放电的分形天线实测脉冲信号(b)能量分布频段与气隙放电相似, 但在超过 600 MHz 频段的能量很低, 在 40 MHz、183 MHz 和 478 MHz 频率点上的能量相对较高; 油中电晕放电的分形天线实测脉冲信号(c)能量集中在 40 MHz, 在 120 MHz 和 195 MHz 2 个频率点具有一定的能量。

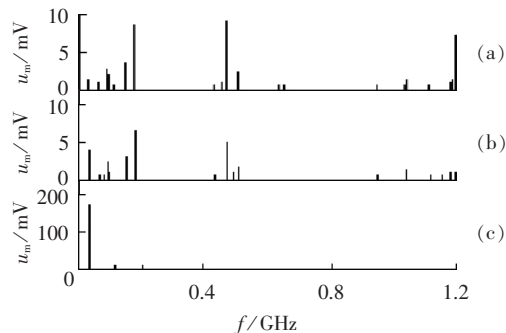


图 12 3 种局部放电缺陷的超高频信号功率谱

Fig.12 The power spectrums of UHF signals caused by three insulation defects

以上分析表明, Hilbert 分形天线对 3 种不同类型局部放电响应信号的功率谱具有明显的差别, 可用于区分不同类型的局部放电, 为进一步提取局部放电超高频信号特征, 进行局部放电模式识别, 判断变压器内部故障类型奠定了基础。

4 结论

a. 依据分形理论,提出了应用于变压器局部放电在线监测的 Hilbert 分形天线设计方法,通过仿真研究天线几何参数对天线性能的影响,设计出体积小、频带宽的 3 阶 Hilbert 分形天线,第 1 个谐振频率在局部放电超高频检测带宽内,通频带为 600~900 MHz,满足变压器局部放电超高频监测的要求。

b. 采用设计的 Hilbert 分形天线,结合脉冲电流法,对 3 种典型缺陷局部放电进行了测量,实测和结果表明,Hilbert 分形天线比脉冲电流传感器具有更高的信噪比,输出脉冲幅值随放电强度的变化而变化,可与脉冲电流法联合监测变压器内部局部放电。

c. 3 种不同放电类型放电的 Hilbert 分形天线实测信号功率谱具有显著的差异,实测脉冲信号的能量分布频段和能量集中的频率点都明显不同。

参考文献:

- [1] 郭俊,吴广宁,张血琴,等. 局部放电检测技术的现状和发展[J]. 电工技术学报,2005,20(2):29-35.
GUO Jun,WU Guang-ning,ZHANG Xue-qin,et al. The actuality and perspective of partial discharge detection techniques[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2005,20(2):29-35.
- [2] CONVERY A R, JUDD M D. Measurement of propagation characteristics for UHF signals in transformer insulation materials [C]//Proceedings of the 13th International Symposium on High Voltage Engineering. Delft, Netherland: [s.n.], 2003:25-29.
- [3] CHEN Qing-guo, WANG Yong-hong, WEI Xin-lao. The UHF method for measurement of partial discharge and interference suppression[C]//Proceeding of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Material. Kitakyushu, Japan: [s.n.], 2005: 829-832.
- [4] 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 Guo-li, ZHENG Yi, HAO Yan-peng, 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.
- [5] ZHOU Li-xing, LI Wei-guo, SU Sheng. The deduction of partial discharge pulse current from its radiating UHF signal[C]//The 7th International Power Engineering Conference. Singapore: [s.n.], 2005: 189-193.
- [6] CLEARY G P, JUDD M D. UHF and current pulse measurements of partial discharge activity in mineral oil[J]. IEEE Proceeding of Science, Measurement and Technology, 2006, 53(2): 47-54.
- [7] 孙才新, 许高峰, 唐炬, 等. 检测 GIS 局部放电的内置传感器的模型及性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 89-94.
SUN Cai-xin, XU Gao-feng, TANG Ju, et al. Model and performance of inner sensors used for partial discharge detection in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 89-94.
- [8] ZHU Jin-hui, HOORFAR A, ENGHATA N. Bandwidth, cross-polarization and feed-point characteristics of matched Hilbert antennas[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2003(2): 2-5.
- [9] CHEN Xuan, SAFIEDDIN Safavi-naeini, LIU Ya-xun. A down-sized printed Hilbert antenna for UHF band[C]//Antennas and Propagation Society International Symposium. Columbus: [s.n.], 2003: 581-584.
- [10] KIGAMI J. Analysis on fractals[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [11] VINOY K T, JOSE K A, VARADAN V K, et al. Resonant frequency of Hilbert curve fractal antennas[C]//Antennas and Propagation Society International Symposium. Boston, USA: IEEE, 2001: 648-651.

(责任编辑: 李 玲)

作者简介:

李 剑(1971-),男,陕西宝鸡人,教授,主要研究领域为电气设备状态监测、智能化故障诊断技术、电工绝缘材料(E-mail: lijian@cqu.edu.cn);

宁佳欣(1980-),男,北京人,硕士研究生,主要从事电气设备状态监测与智能化故障诊断技术研究;

金卓睿(1973-),男,江西永丰人,博士研究生,主要从事电气设备状态监测与智能化故障诊断技术研究。

Research on UHF Hilbert fractal antenna for online transformer PD monitoring

LI Jian¹, NING Jia-xin¹, JIN Zhuo-rui¹, WANG You-yuan¹, LI Ming²

(1. Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology,

Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Mianyang Electric Power Bureau, Mianyang 621000, China)

Abstract: The basic principle of Hilbert fractal antenna is discussed and an optimized method to design Hilbert fractal antennas for online monitoring of transformer PD (Partial Discharge) based on the fractal antenna electromagnetic theory is proposed. Influences of geometric parameters on the capability of Hilbert fractal antennas are researched by simulation. A 3rd-order Hilbert fractal antenna is designed for online monitoring of transformer PD. The PD experiments of three typical and artificial insulation defects: gap discharge, surface discharge and corona discharge, are carried out, and both fractal antenna and pulse current sensor are used for PD measurement. The power spectrums of pulse signals detected by the fractal antenna are analyzed. Experimental results show that the Hilbert fractal antenna is qualified for online PD UHF (Ultra-High-Frequency) monitoring.

This project is supported by Significant Science and Technology Program of Chongqing Science and Technology Commission (CSTC2005AA6003) and Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-06-0763).

Key words: transformer; partial discharge; online monitoring; ultra-high-frequency detection; fractal antenna