

电力变压器局部放电特高频信号外部传播特性研究

李军浩, 司文荣, 杨景刚, 袁鹏, 李延沐, 李彦明

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对变压器箱体的接缝处可以衍射出局部放电特高频(UHF)电磁波信号的现象,在分析变压器箱体接缝对局部放电特高频电磁波传播影响的基础上,探讨了接收天线外部检测特高频信号的可行性,并通过实验研究了局部放电特高频电磁波的外传播特性,通过对信号进行小波包分析,比较了外部接收和内部接收信号的差异.结果表明,特高频电磁波可以透过变压器箱体接缝衍射出来,且两者谱能量分布并非完全一致,外部检测到的特高频信号距离接缝的远近具有不同的表现形式,强度随着变压器箱体缝宽增大而增大.研究工作为变压器局部放电外部检测提供了理论指导.

关键词: 局部放电;特高频信号;外部检测;电力变压器

中图分类号: TM835.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)06-0718-05

Propagation Characteristic of Partial Discharge Ultra High Frequency Signals Outside Transformer

LI Junhao, SI Wenrong, YANG Jinggang, YUAN Peng, LI Yanmu, LI Yanming

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: It is found in field detection that ultra high frequency (UHF) signals can diffract from the joint of transformer. The feasibility of using external UHF sensor for detecting partial discharge activities is discussed, and the external propagation characteristic of UHF electromagnetic wave is investigated via the lab experiment. The wavelet packet analysis of signals shows that the frequency distribution of external signals and the inside signals is quite different. The relationship between distance of joint and UHF sensor is also researched and the results show that UHF signals may leak outside the transformer through the joints after multiple refraction and reflection in the transformer tank, and the electromagnetic wave expression varies with different distance.

Keywords: partial discharge; ultra high frequency signal; external detection; power transformer

局部放电特高频(UHF)检测技术通过传感器接收变压器内部局部放电所激发的特高频电磁波信号,实现局部放电的检测.其测量频率高,可避开变压器外部电晕等多种干扰的影响,信号的信噪比高,检测灵敏度高,可靠性好,目前在国内外得到了深入的研究和广泛的应用^[1].

用UHF法在线监测变压器局部放电时,接收天线最理想的安装位置为变压器箱体内,因为变压器箱体屏蔽作用良好,有利于提高测量系统的抗干扰能力.目前,国内特高频检测法通常采用内置传感

器形式^[2],这样不仅可以提高检测灵敏度,还能减少变压器的外部干扰.但是,该方式可能需要对变压器结构设计进行改善,或是造成安装传感器的不便.

为了便于吊芯检修,大型电力变压器的外壳通常是由盖板、箱体或者箱体、底座两部分组成,两者之间通过密封橡胶圈进行密封,其结构如图1所示,不同型号和容量的变压器其接缝距离从几毫米到几厘米不等.密封圈对特高频信号的衰减很小,当发生局部放电时,特高频信号在变压器本体内传播的同时,会在变压器的密封接缝处发生衍射,从而泄漏出



图1 现场变压器接缝示意图

来,这就使得在外部进行变压器局部放电的检测成为可能^[3]。

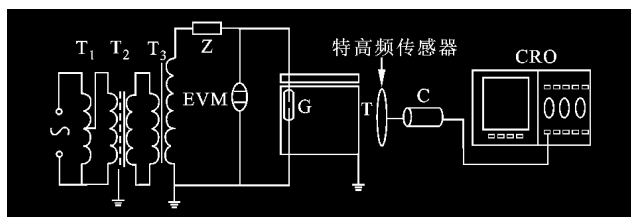
国外一些学者通过外置 UHF 传感器进行电力变压器的局部放电检测及定位研究^[4]。国内西安交通大学等单位使用外置 UHF 传感器进行变压器的局放源定位工作也在开展当中,并通过外置传感器捕捉并定位变压器局部放电故障。

虽然利用外置传感器进行变压器局部放电检测及定位得到了一定程度的应用,但对特高频信号在变压器本体内外的传播特性研究还不够深入。本文旨在通过实验对变压器局部放电特高频信号的内外传播特性进行研究,通过对 UHF 信号的接缝衍射特性进行了深入的分析,为 UHF 信号进行变压器的局部放电外部检测提供了理论指导。

1 实验线路及测量结果

实验系统接线原理图如图 2 所示。实验电源由自耦调压器 T_1 输出后经隔离变压器 T_2 接到无局放高压实验变压器 T_3 (额定电压 $U_N=100$ kV,额定功率 $S_N=10$ kV·A,100 kV 下放电电量小于 3 pC) 上。隔离变压器 T_2 可有效地抑制电网中窜入的高次谐波,改善供电电源的品质。为避免高压引线放电,引接线采用了光滑铜杆,所有接头均经过特殊处理,变压器箱体内充满 25# 变压器油。

特高频信号发生源采用自行研制的亚纳秒脉冲



T_1 : 自耦调压器; T_2 : 隔离变压器; T_3 : 无局放高压实验变压器;

Z: 低通高阻阻抗; EVM: 静电电压表; G: 特高频信号发生源;

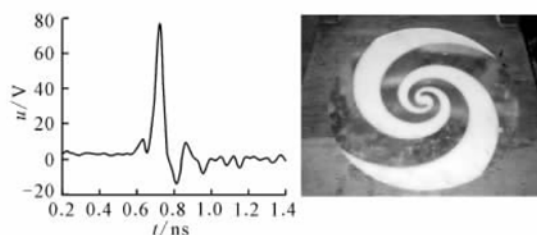
C: 50 Ω 测量电缆; T: 实验用变压器箱体;

CRO: TDS680B 示波器

图2 实验接线原理图

发生器所产生的亚纳秒脉冲作为特高频信号发生源。该高压亚纳秒脉冲发生器产生的脉冲波形稳定,上升沿小于 500 ps,脉宽小于 1 ns,幅值达到 4 kV 以上,可激发出高达 1 GHz 的电磁波信号^[5],频段范围基本覆盖了变压器内缺陷产生的局放脉冲所辐射的高频电磁波频段。

特高频传感器采用自行研制的平面等角螺旋天线^[6],有效检测频带为 300 MHz~3 GHz,如图 3 所示。示波器采用泰克公司的 TDS680B 示波器,其采样率最高为 5 GHz,带宽为 1 GHz,储存深度为 16 kB。

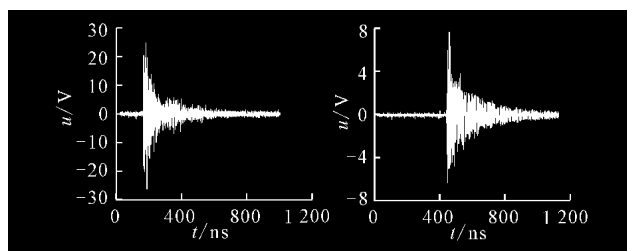


(a) 特高频信号源

(b) 特高频传感器

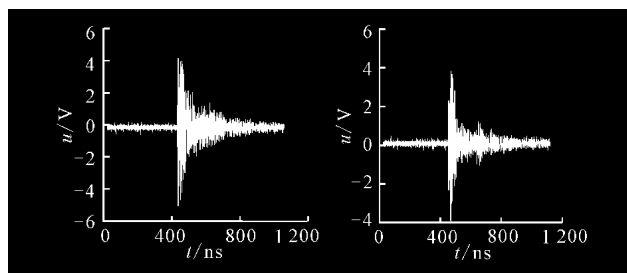
图3 特高频信号源及传感器

用上述实验系统分别就特高频传感器放置在变压器箱体内部和在外部接缝处进行了测量。实验过程中,将特高频信号源放置在实验用变压器箱体内部一侧,测量当特高频传感器放置在箱体内部时接收到的特高频信号。由于密封橡胶圈对电磁波的衰减很小,可用空气间隙等效。所以,将变压器的铁盖与变压器的箱体中间使用木质支撑物支撑,留出 1 cm 的空气间隙,将特高频传感器正放置在变压器内部及对接缝不同距离处进行测量,结果如图 4 所示。



(a) 内部测量

(b) 距离接缝 35 cm



(c) 距离接缝 60 cm

(d) 距离接缝 100 cm

图4 传感器与接缝不同距离时的时域波形

2 信号的小波包分析

对于局部放电这种非平稳信号,传统的傅里叶分析具有一定的局限性,容易产生虚假的高频信号,而小波分析则是专门针对非平稳信号发展起来的,使用小波分析对局部放电信号进行分析无疑是更为合适的。

为了比较接缝衍射出的信号与内部测量到的信号能量随频率的分布,本文提出了一种基于小波包分析的变压器局部放电信号能量-频率的模式识别方法,计算出变压器局部放电信号不同频率段能量特征值,通过比较不同频率段的能量特征值来比较信号的整体差异。

小波分析可以对非平稳信号进行有效的时频分解,但由于其尺度是按二进制变化的,所以在高频段频率分辨率较差,在低频段时间分辨率较差。小波包分析能够为信号提供一种更加精细的分析方法,它将频带进行多层次划分,对小波分析没有细分的高频部分进一步分解,并能够根据被分析信号的特征,自适应地选择相应频带,使之与信号频谱相匹配,从而提高了时-频分辨率^[7]。

首先,对信号进行小波包分解,这里采用3层分解来说明算法过程,分别提取第3层从低频到高频8个频率成分的信号特征,其分解结构如图5所示。

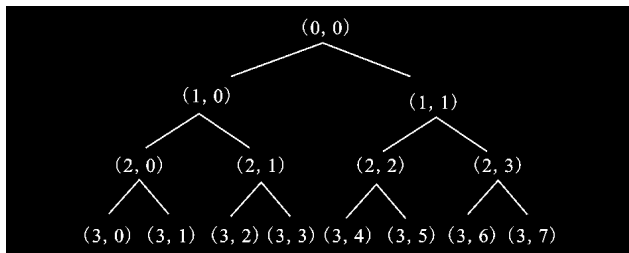


图5 小波包3层分解树结构

其中 (i,j) 表示第 i 层的第 j 个节点, $i=0,1,2,3;j=0,1,2,\dots,7$,每个节点都代表一定的信号特征。 $(0,0)$ 表示原始信号 S , $(1,0)$ 节点代表小波包分解第1层的低频系数 X_{10} , $(1,1)$ 节点表示小波包分解第1层的高频系数 X_{11} , $(3,0)$ 节点表示第3层第0个节点的系数,其他以此类推。

然后,对小波包分解系数重构,提取各频带范围的信号。以 S_{30} 表示 X_{30} 的重构信号, S_{31} 表示 X_{31} 的重构信号,其他以此类推。在这里,只对第3层的所有节点进行分析,则总信号 S 可以表示为

$$S = S_{30} + S_{31} + S_{32} + S_{33} + S_{34} + S_{35} + S_{36} + S_{37}$$

变压器的局部放电信号在频域上分布得非常广,不同的频带具有不同的能量,在某个频带内的局部放电能量可能会强些,在其他频带内可能会弱些。在进行外部测量时,通过接缝衍射出来的信号与在内部测量相比,其能量随频率的分布也是不同的。因此,以能量为元素可以构造一个特征矢量,对于局部放电信号而言,各频带的总能量可求出。

设 $S_{3j}(j=0,1,2,\dots,7)$ 对应的能量为 E_{3j} ,则有

$$E_{3j} = \int |S_{3j}(t)|^2 dt = \sum_{m=1}^n |x_{jm}|$$

式中: $x_{jm}(m=1,2,\dots,n)$ 表示重构信号 S_{3j} 的各离散点的值。以能量为元素构造的特征矢量

$$\mathbf{T} = [E_{30}, E_{31}, E_{32}, E_{33}, E_{34}, E_{35}, E_{36}, E_{37}]$$

信号的有效检测频率范围为 $0 \sim 2.5$ GHz,提取的 $S_{3j}(j=0,1,2,\dots,7)$ 8个频率成分所代表的频率范围如表1所示。

对各个信号进行小波包分解,并求其各个频带的能量特征值,结果如表2所示,表中距离表示天线到接缝的距离。由于特高频天线是一个宽频带的接收天线,所以信号的主要能量范围由特高频放电源

表1 各频率成分所代表的频率范围

信号	S_{30}	S_{31}	S_{32}	S_{33}	S_{34}	S_{35}	S_{36}	S_{37}
频率范围/GHz	$0 \sim 0.313$	$0.313 \sim 0.625$	$0.625 \sim 0.938$	$0.938 \sim 1.25$	$1.25 \sim 1.563$	$1.563 \sim 1.875$	$1.875 \sim 2.188$	$2.188 \sim 2.5$

表2 信号各个频带的小波包分解能量特征值

距离/cm	E_{30}	E_{31}	E_{32}	E_{33}	E_{34}	E_{35}	E_{36}	E_{37}
内部	83.820	148.012	79.005	46.138	7.737	12.232	16.372	9.427
35	39.995	26.919	41.363	25.047	1.492	1.563	2.160	1.675
45	32.715	32.207	40.543	23.515	1.441	1.547	2.123	1.624
50	42.866	36.190	43.193	23.507	1.458	1.498	1.737	1.546
60	24.893	26.258	34.424	16.981	1.377	1.441	1.989	1.579
70	20.661	19.081	32.693	17.059	1.382	1.535	1.792	1.554
80	20.094	20.942	29.238	15.979	1.392	1.503	1.909	1.550
90	16.576	24.147	27.796	15.643	1.422	1.412	1.823	1.549
100	15.607	25.620	24.042	12.624	1.383	1.468	1.842	1.578

的上限频率和接收天线的下限频率决定,即接收到的信号能量集中在 300 MHz~1 GHz 范围内。

3 结果分析

从表 2 可以看出,对于内部测量,各个频段的能量特征值都比较大,其最大值出现在 S_{31} 频段,即 0.313~0.625 GHz,对外部采集,其最大能量特征值出现在 S_{32} 频段,即 0.625~0.938 GHz 频段。

通常电力变压器绝缘结构中的局部放电可看成是由一点源发出的,当绝缘介质某处发生局部放电时,所产生的电磁扰动随时间变化产生电磁波,它们遵循麦克斯韦的电磁场基本方程。在传播过程中,每处电场强度和磁感应强度的方向总是相互垂直的,并且都跟那里的电磁波的传播方向垂直,所以说电磁波是一种横波,其能量沿电磁波的传播方向流动。

电磁波在传播过程中离开直线传播的路径绕到障碍物背后的现象叫衍射,电磁波在任何情况下,都会发生衍射现象,但在障碍物或孔径与波的波长差不多,或者比波的波长小时,才会发生明显的衍射现象。任何电磁波在真空中的传播速度都等于真空中的光速 $v=3\times 10^8$ m/s,且有 $v=\lambda f$,局部放电时产生的电磁波是由在频域范围内分布很广的各种波长不等的波所构成的。当波穿过变压器的接缝向外传播时,由于接缝的存在,电磁波会发生衍射现象,波长与接缝宽度相差不多的波会发生明显的衍射现象。当波长过大时,衍射现象将变得不明显。通过接缝衍射出来的电磁波,频域越高,波长越小,越接近接缝的宽度,越容易发生衍射,即对接缝而言,高频部分更加敏感,表 2 数据也显示出了这一点。

比较距接缝不同距离时的分析结果可以看到,当天线距离接缝较近时接收到的能量较高,而在中间某个距离之后,随着天线与接缝距离的增加,接收到的能量会迅速减弱,当距离增加到一定的程度,接收到的能量反而趋于平稳。不同时间段的多次实验均呈现此类现象,说明该现象是客观存在,并非测量误差和干扰引起的。

从光波的角度来看,由于接收天线距接缝距离不同,波的衍射类型也不同。由衍射理论可知,当波垂直入射单缝时,衍射图样会随着接收屏幕远离单缝而由菲涅尔衍射逐渐过渡到夫琅禾费衍射,即随着天线与接缝之间距离的增加,开始时为菲涅尔衍射,其光强分布比较散,随着距离的增加,逐渐转变为夫琅禾费衍射,能量则相对趋向于集中,最后完全转变为夫琅禾费衍射,能量更加集中,则天线接收到

的能量趋于平缓。

从电磁波场的角度看,电磁辐射场根据感应场和辐射场的不同而区分为近场区(感应场)和远场区(辐射场)。近场区内,电场强度与磁场强度的大小没有确定的比例关系,近场区的电磁场强度比远场区大得多,且随距离的变化比较快,在此空间内的不均匀度较大,即是一种振荡的表现。在远场区中,所有的电磁能量基本上均以电磁波形式辐射传播,这种场辐射强度的衰减要比感应场慢得多,远场区为弱场,其电磁场强度均较小^[8-9]。

对从接缝衍射出的电磁波来说,接缝相当于一个辐射源,如果天线距离接缝较近的话,对天线而言是处在近场区,感应到的是一个幅值较高、振荡的信号。随着天线远离接缝,天线处在远场区中,接收到的信号逐渐变弱,并变得比较平缓。表 1 中的数据显示在距离接缝 50 cm 时信号最强,但实际上在 50 cm 之内的近场区信号呈现振荡特性,多次的测量也表明并不是每次测量时 50 cm 处都能接收到最大能量,但最大能量都集中在距离接缝 50 cm 以内的范围。

对于通过接缝衍射出来的电磁波信号,一方面具有波衍射本身特有的一些性质,同时由于接缝相当于一个信号源,具有电磁场本身的特性,其表现形式是两者的综合表现。

通过以上的实验可以看出,接缝对局部放电信号的高频部分更为敏感,对外部测量而言,特高频方法更为有效。同时,在进行外部测量时,天线与接缝的距离对能否测量到最大信号具有很大关系,在距离接缝 50 cm 范围内接收到的信号相差不大,但距离大于 50 cm 则会迅速衰减。由于通过接缝衍射出来的特高频信号相比内部衰减很大,很微弱的放电信号在外部很可能测量不到。

为比较不同缝宽对接收 UHF 信号的影响,保持放电源位置、放电强度不变,天线位置距离接缝约 1 m 处进行测量。改变变压器箱体接缝宽度,测得的结果见表 3,可见接收到的信号强度随缝宽的增大而增大,但是从 5 mm 以上的接缝接收到的 UHF 信号强度要高于从 5 mm 以下的接缝接收到的 UHF 信号。总的来讲,缝隙越大接收的信号越强。

表 3 不同缝宽时的测量结果

缝宽/mm	1	3	5	8	10
信号幅值/V	1.83	1.75	3.96	6.52	6.80

4 结 论

通过测量变压器本体内部和通过接缝处衍射散出的局部放电特高频信号,对其进行小波包分解,计算能量特征值可以发现,由于电磁波在通过接缝时的衍射,通过接缝衍射出来的信号高频部分相比低频更加明显,对外部检测来说,特高频的方法更为适合.同时,由于天线距接缝的距离不同,衍射的性质也不同,天线接收到的信号场也不同,而接收信号强度最大的距离决定波和场两者的综合作用.对于1 cm的接缝宽度,在距离接缝50 cm之内的信号能量呈振荡特性,大于50 cm的距离则迅速衰减变弱,在600~900 MHz的频带范围内信号能量最大.

局部放电激发的高频电磁波可以通过变压器接缝衍射出来,这为检测变压器内局部放电提供了一种更为便捷的新途径.

参考文献:

- [1] FUHR J, HAESSING M, BOSS P, et al. Detection and location of internal defects in the insulation of power transformers[J]. IEEE Trans on Electrical Insulation, 1993, 28(6): 1057-1067.
- [2] 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): 154-159.
WANG Guoli, ZHENG Yi, HAO Yanpeng, et al. Study on the ultra-high-frequency sensor for PD detection in power transformer[J]. Proceedings of CSEE, 2002, 22(4): 154-159.
- [3] MOORE P J, PORTUGUES I E, GLOVER I A. Partial discharge investigation of a power transformer using wireless wideband radio-frequency measurements[J]. IEEE Trans Power Del, 2006, 21(1): 528-530.
- [4] MOORE P J, PORTUGUES I E, GLOVER I A. Radiometric location of partial discharge sources on energized high-voltage plant[J]. IEEE Trans Power Del, 2006, 20(3): 2264-2271.
- [5] 李军浩, 王晶, 王颂, 等. 一种亚纳秒高压脉冲发生器的研制[J]. 电工电能新技术, 2006, 25(1): 77-79.
LI Junhao, WANG Jing, WANG Song, et al. Development of subnanosecond high-voltage pulsed source[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2006, 25(1): 77-79.
- [6] 王晶. 变压器局部放电超高频信号传播特性的研究[D]. 西安: 西安交通大学电气工程学院, 2006.
- [7] 胡昌华, 张军波. 基于 MATLAB 的系统分析与设计: 小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.
- [8] 王绍民, 赵道木, 林强. 对光波及电磁波衍射本性的认识和判断[J]. 浙江大学学报(理学版), 2000, 27(1): 109-113.
WANG Shaomin, ZHAO Daomu, LIN Qiang. Recognition and judgement on the nature of diffraction for the optical wave and electro-magnetic wave[J]. Journal of Zhejiang University(Sciences Edition), 2000, 27(1): 109-113.
- [9] 王秉中. 计算电磁学[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

(编辑 杜秀杰)