

油浸式高压套管局部放电非接触式特高频检测

陈钜栋¹, 江军¹, 杨小平², 李建生³, 张潮海¹

(1. 江苏省新能源发电与变换重点实验室(南京航空航天大学), 江苏 南京 211106;

2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024;

3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:变压器套管是承担引出线与变压器箱体绝缘的重要支撑装置, 现有变压器套管潜伏性放电故障检测技术及时性差且灵敏度较低, 而特高频技术抗干扰能力强且可实现非接触式检测。文中提出一种基于特高频检测技术的套管局放检测方法, 建立 35 kV 套管的局放仿真模型并开展真型套管不同类型缺陷的局放试验。所得结论为: 电容屏间油纸和外侧油道都是特高频电磁波传播的有效路径; 传播过程中横电波(TM波)从-16 dB 大幅衰减至-5 dB, 横磁波(TE波)初始成分不足1%, 主要成分为横电磁波(TEM波); 特高频段能量主要集中在0.3~1.5 GHz。通过设置无接触特高频传感器即可实现套管的带电检测, 确保电力变压器运行安全可靠。

关键词: 变压器套管; 特高频; 局部放电; 带电检测; 非接触式

中图分类号: TM854

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2021)01-0147-08

0 引言

变压器套管是使导体与变压器箱体绝缘的一种引线支撑装置。国际大电网会议(international council on large electric systems, CIGRE)变压器故障统计数据显示, 37.8%的变压器故障原因为套管故障, 如末屏引出线断裂、连接处锈蚀等^[1]。在110 kV及以上的电力系统中, 油纸绝缘型套管为高压套管的主要形式, 使用比例达93%^[2]。整体而言, 套管故障具有偶发性强、故障影响时间长等特点^[3]。制造工艺缺陷、末屏引线接触不良、气隙缺陷、表面污闪等会引发套管内外发生局部放电这一早期绝缘故障现象^[4-5]。在局部放电的作用下, 套管的绝缘会逐渐老化、变质, 进而导致损坏。因此, 加强对套管绝缘的检测和评估对提高变电设备的安全可靠运行具有重要意义。

传统的套管局放检测方法仍以介损和电容测量为主, 但该方法局限较多, 如需要变压器停运等, 且局部缺陷反映困难, 准确性无法保证^[6]。为了实现在线监测, 可通过末屏泄露电流判断套管的工作状况, 信噪比和实施可行性较高^[7-8], 但需改动接地回路, 实际操作的安全风险性较高^[9-10]。传统方法可优化得到频域介电谱法(frequency domain spectroscopy, FDS), 其实质是将常规的工频介损和电容测量扩展到低频和高频频段(如扩展到0.1 Hz~1 kHz)^[11-13]。考虑到温度对测试结果的影响, FDS

需要对测试结果进行修正, 如归算到同一温度、增加温度校正因子进行转换等^[14-16], 故FDS无法对套管局放进行有效判断。

为了实现非接触式的在线监测, 近年来有学者提出了特高频法^[17-18], 即通过外部非接触式对套管内部局放产生的特高频信号进行在线监测^[19-20]。借鉴气体绝缘开关(gas insulated substation, GIS)中较为成熟的特高频电磁波检测技术^[21-22], 可实现局放程度诊断、局放发展趋势预判, 且不影响实际设备的正常运行。基于此, 文中首先通过理论和仿真分析明确了特高频电磁波信号的泄露路径和衰减特性; 然后, 在35 kV真型套管上人为设置了3种典型的局放故障并开展试验; 最后, 对外部实际检测信号进行分析, 进而对特高频检测法的可行性进行研究, 为后续套管非接触式带电检测和在线监测提供理论和技术支撑。

1 同轴波导理论

套管内部采用多层电容屏, 其实质为多层同轴波导结构, 如图1所示。

电磁波传播过程研究可从麦克斯韦方程组出发, 由边界及其他限制条件求出方程组的解。首先对麦克斯韦方程组进行化简, 得到亥姆霍兹方程为:

$$\begin{cases} \nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \mu \varepsilon \mathbf{E} = 0 \\ \nabla^2 \mathbf{H} + \omega^2 \mu \varepsilon \mathbf{H} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{E} , \mathbf{H} 分别为电场和磁场强度; ε , μ 分别为波导介质的介电常数和磁导率; ω 为角频率。

在柱坐标系下进行分解, 通过边界条件得出方

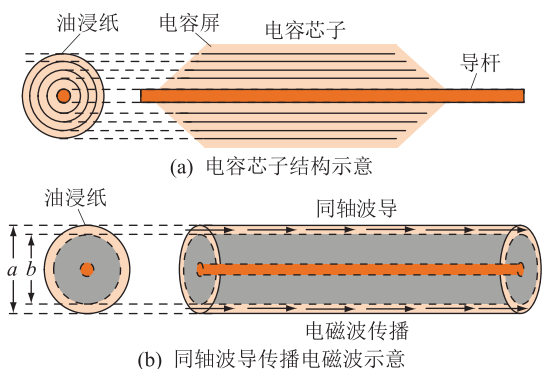


图1 变压器套管同轴波导模型

Fig.1 Coaxial waveguide model of transformer bushing

程的解为贝塞尔函数,进而求出各个传播模式下的截止频率。

$$\begin{cases} f_c(M_{TM,mn}) \approx \frac{vn}{2(a-b)} & m, n = 1, 2, \dots \\ f_c(M_{TE,m1}) \approx \frac{vm}{\pi(a+b)} & m = 1, 2, \dots \\ f_c(M_{TE,01}) = \frac{v}{2(a-b)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: a, b 分别为同轴波导的内、外直径; v 为电磁波在介质中的传播速率; m, n 为不同电磁波的模式。

横电磁波(transverse electromagnetic wave, TEM)不存在截止频率,且能在波导中传播;横磁波(transverse magnetic wave, TM)截止频率很高;横电波(transverse electric wave, TE)截止频率相对较低。波导结构中传播的主模为TEM,并存在部分TE。

为得到更接近真实情况的电磁波传播特性,对分析过程中的某些条件进行修改。实际的介质均存在损耗,有损介质也称为耗散介质,即电导率 σ 不为0,且考虑传导电流 J_c 不为0。为了简化分析,仍保持介质均匀、线性和各向同性。将麦克斯韦方程组改写为:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} \\ \nabla \times \mathbf{H} = j\omega\tilde{\varepsilon}\mathbf{E} \\ \nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \\ J_c \neq 0 \\ \rho = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\tilde{\varepsilon}$ 为复介电系数; ρ 为电荷密度。

令:

$$\begin{cases} \omega^2\mu\tilde{\varepsilon} = \tilde{k}^2 \\ j\tilde{k} = \alpha + j\beta \end{cases} \quad (4)$$

式中: α 为衰减常数; β 为相位常数。

代入求解亥姆霍兹方程,得到电磁波在介质中

的透入深度为:

$$\delta = \frac{1}{\omega} \left[\frac{2}{\mu\varepsilon} \left(1 + \frac{\sigma^2}{\mu^2\varepsilon^2} \right)^{1/2} - 1 \right]^{-1/2} \quad (5)$$

铝电导率 σ 为 3.4×10^7 S/m,磁导率 μ 为 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m。根据式(5),当电磁波频率 f 为0.3 GHz时,电磁波透入铝的深度为 $4.97 \mu\text{m}$ 。由于存在透入深度,可将透入并损耗的能量等效为电阻上消耗的能量(实际转化为焦耳热)。对应单位长度、单位宽度下的表面等效电阻率 R_s 为:

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi\mu f}{\sigma}} \quad (6)$$

则由金属波导壁引起的衰减常数为:

$$\alpha_c = \sqrt{\frac{\omega\varepsilon}{\sigma}} \frac{1/a + 1/b}{\ln(a/b)} \quad (7)$$

油浸纸电导率 σ 为 10^{-15} S/m, f 为3 GHz时,其对应的衰减常数为0.27 dB/m。可以看出,油浸纸电导率很低,绝缘性能良好,电磁波在其内部传播时损耗很小。此外,可以根据式(8)计算得到同轴波导中传播时介质(油浸纸)损耗近似为0。

$$\alpha_m = \frac{\pi}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_r} \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \quad (8)$$

式中: λ_0 为电磁波在空气中的波长; ε_r 为相对介电常数。

综上所述,特高频电磁波无法穿透电容屏,在波导中的传输损耗主要为导体损耗,损耗值较小。理论上来说,电容屏间和外侧油道都是特高频电磁波传播的有效路径。

2 35 kV 套管局部放电仿真分析

文中采用时域有限差分法(finite difference time domain method, FDTD)进行套管局放仿真。FDTD是用中心差商代替电磁场对时间和空间的偏导,通过时域递推计算模拟波的传播过程,得出场分布。仿真模型根据BRW-36/400-3型35 kV套管实际尺寸1:1搭建,主要结构包括外部上下瓷套、电容芯子、导杆、均压罩等。在套管底部设置油箱模拟其实际在变压器上的工况,电容屏层数简化设置为4层且屏间距不变,套管外部设置7层完美吸收层(perfect matched layer, PML),确保电磁波在外部空间不存在折、反射。模型各部分尺寸、介电常数、磁导率等参数均与实际情况一致。

为了模拟实际局部放电的电磁波传播过程,局部放电等效电路设置为电流源串联电阻,放电电流幅值为1 A,电阻为5 Ω 。仿真中设置局放源在套管下瓷套表面,探针等距离均匀设置在套管的每层电

容屏中间以及油道中,接收在各通道处传播的电磁波信号,如图 2 所示。

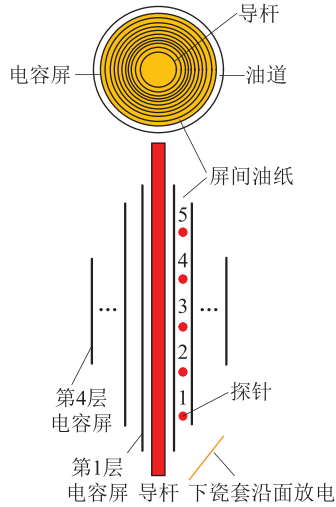


图 2 仿真中屏间探针设置

Fig.2 Setting of sensors in capacitance in simulation

由此,通过套管内下瓷套沿面放电的局放仿真可以得到电磁波在套管内部的传播过程,从而分析得出其相关规律与特性,为后续试验提供依据。电磁波传播时的坡印廷矢量 S 随时间变化的过程如图 3 所示。可以看出,下瓷套沿面放电时,电磁波能传播到外部且其泄露路径包括电容屏间及外侧油道,与理论分析相吻合。

电磁波在套管同轴结构中传播时存在 3 种不同模式:TE 模、TM 模、TEM 模。TE 模和 TM 模存在截止波长,当信号波长低于截止波长时将会衰减,因此实际电磁波中各分量难以确定。而根据不同模式电磁波的定义,即 TE 模在传播方向上存在磁场分量、TM 模在传播方向上存在电场分量、TEM 模在传播方向上无电场和磁场分量,分析每个探针所接收到的沿传播方向的 E, H 分量,即可得到 TE 模、TM 模的传播特性。而分析沿传播方向的 S 分量可得到电磁波整体能量的变化特性。从这 3 个方面可分析每层波导结构中的电磁波传播规律。

TM 模、TE 模并非传播的主模,取传感器 S1 ~ S5 接收 E, H 信号在特高频段的峰值 E_m, H_m 进行分析。o1~o4 分别为第 1~4 层的油纸,oc 为油道,仿真结果分别如图 4、图 5 所示。

对电磁波传播方向的 S 波形数据进行分析,可从整体上判断电磁波传播过程中的能量变化情况。取传感器接收信号特高频段 S 的峰值 S_m 进行分析,如图 6 所示。

分析沿传播方向的 E (TM 分量), H (TE 分量) 传播规律,可以得到:

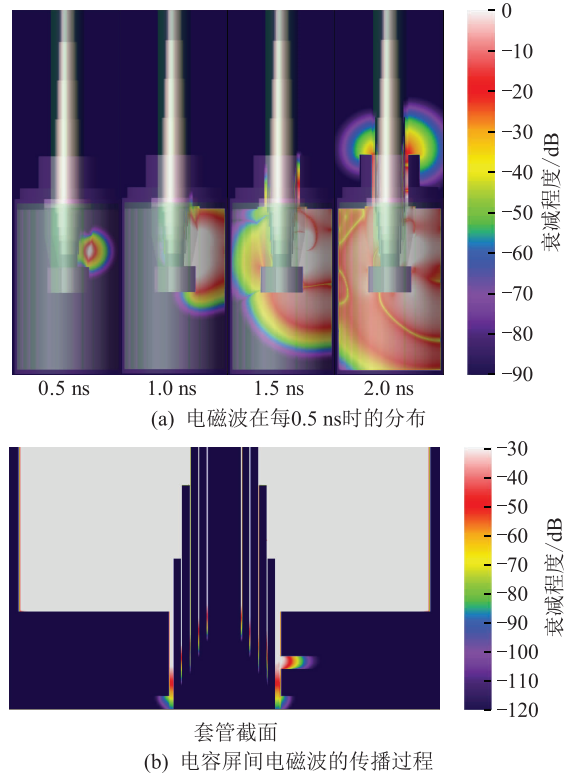


图 3 下瓷套沿面放电时电磁波的传播过程

Fig.3 Electromagnetic wave propagation process of creeping discharge on the surface of lower porcelain sleeve

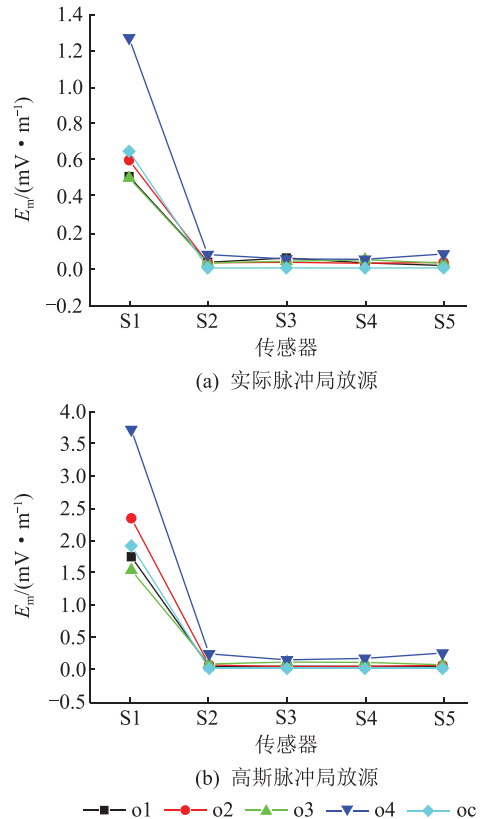


图 4 传播方向上的 E_m 变化

Fig.4 Variety of E_m in propagation direction

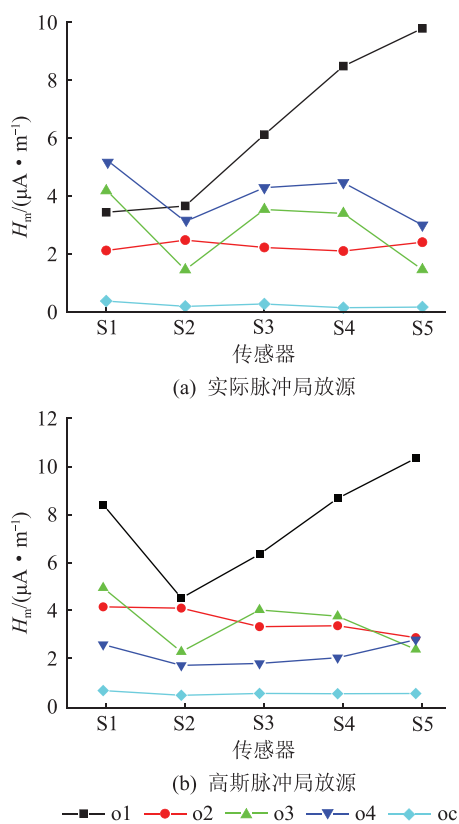


图5 传播方向上的 H_m 变化

Fig.5 Variety of H_m in propagation direction

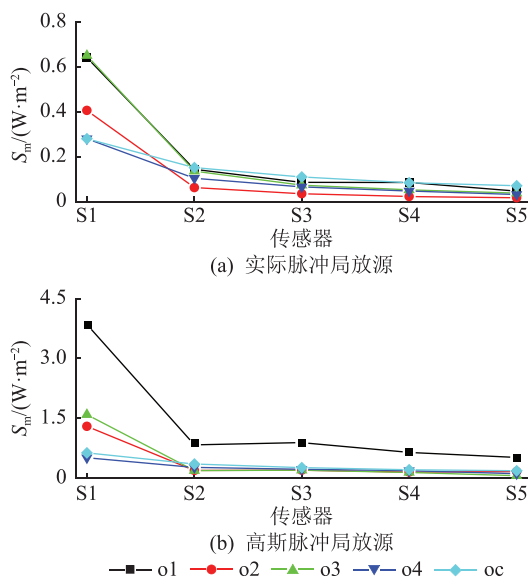


图6 传播方向上的 S_m 变化

Fig.6 Variety of S_m in propagation direction

(1) TM 由于截止频率很高(10 GHz 以上),其进入波导后立刻大幅衰减,虽然 E 初始能量相对较高,但在特高频段立刻衰减了近 10~40 倍;

(2) H 的变化规律并不明显,呈现相对稳定的波动,但其能量占比不到 1%;

(3) 总体而言,TE 模和 TM 模占总体的电磁波

的能量很小,因此进一步分析的必要性不高;而传播的模式主要为 TEM 模,可在电容屏间及油道进行有效传播。

根据理论分析,电磁波进入电容屏间时产生较大衰减,后续变化较为平稳,衰减程度不大,即第 1 个到第 2 个传感器之间衰减较大(高次模波迅速衰减),后续衰减很小(介质损耗)。由仿真结果可知,虽然进入不同波导的初始能量明显不同(电磁波在套管下部油箱内多次折、反射造成),但整体变化趋势与理论分析能够较好吻合。

实际情况下各部件成分更为复杂,不但为非线性、非均匀介质,且在波导内部传播时会产生介质中的折、反射,导致能量损耗,因此电磁波信号在电容屏间将会衰减更大。由于油道间介质为变压器油,其线性度和均匀度比油浸纸更高,相对衰减则更小。

3 真型套管局部放电试验

为验证理论分析与仿真结果的正确性,采用无故障的 35 kV 油浸式变压器套管为试验模型,且升压到 40 kV 时对应局放量小于 10 pC。对套管设置如图 7 所示的 3 种故障。

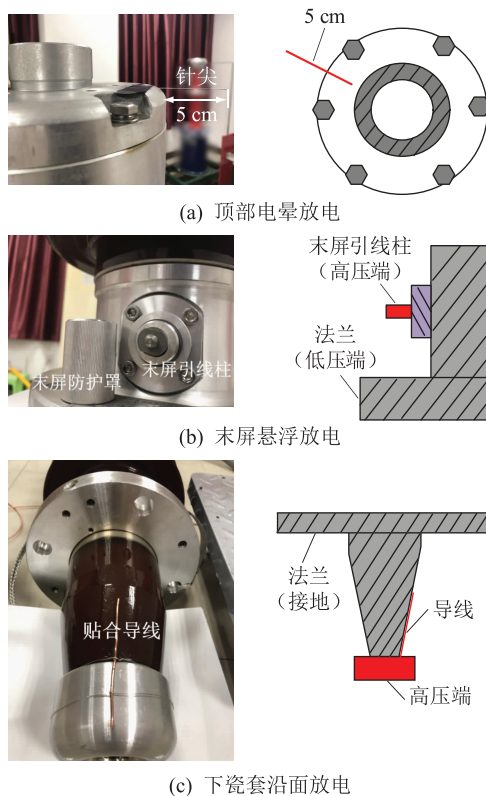


图7 3种局放故障设置

Fig.7 Three partial discharge fault settings

(1) 顶部电晕放电。用绝缘胶带将针尖末端固定在套管顶部并紧密贴合,针尖尖端伸出 5 cm。

(2) 末屏悬浮放电。将末屏接线柱上的防护罩旋开,末屏接线柱未与大地相连,升压时即可产生稳定悬浮电位。

(3) 下瓷套沿面放电。将粗导线与下瓷套表面贴合,并且下端与高压端均压罩良好接触。

试验布置如图 8 所示。在外部设置特高频传感器,试验采用阶梯升压法,每升高 2 kV 并保持一段时间,观察有无局放,记录局放起始电压、稳定局放电荷量等相关数据,并绘制谱图。



图 8 试验布置
Fig.8 Test setup

特高频段为 0.3~3 GHz,根据采样定理,采样频率应达到所需最高频率的 2.56~4 倍甚至更高。但实际采样时,对于一个工频周期内的信号,通过包络检波电路对实际采集的特高频信号进行包络检波,可大大降低所需的硬件采样频率,且保留大部分原始波形特征,便于后续数据统计分析。调整信号放大器增益为 40 dB,增益频带为 0.3~2 GHz。对于具体的放电波形采集,提高采样率为 10 GS/s,采样周期为 100 ns。

对每种放电故障进行采样,各采集 200 组数据,进行局部放电相位分布(phase resolved partial discharge, PRPD)谱图绘制,如图 9—图 11 所示。其中,幅值采用归一化设置,相位为 0~360°。图 9 中套管顶部高压端电晕放电的起始电压为 35 kV,且随着电压升高,局放次数的增长不明显,放电主要分布在 0~120°和 180°~280°范围内,分布分散,放电量较低。图 10 中套管末屏引线柱悬浮放电的起始电压为 6 kV,且发展很快,8 kV 以上时无法维持局放,进而发展为更为严重的电弧放电,这是因为末屏引线柱靠近接地法兰,较低电压就能引起局放。末屏悬浮放电分布范围较窄,主要为 0~120°和 200°~320°,局放电荷量较高。图 11 中套管下瓷套表面沿面放电的起始电压为 15 kV,继续升压可以观察到单个周期内局放次数明显增多,幅值也略有提升但较为稳定;升压到 30 kV 时,放电主要分布在 0~110°,150°~270°,340°~360°,其中稳定的局放电量在 100 pC 左右,最高可达到 120 pC。

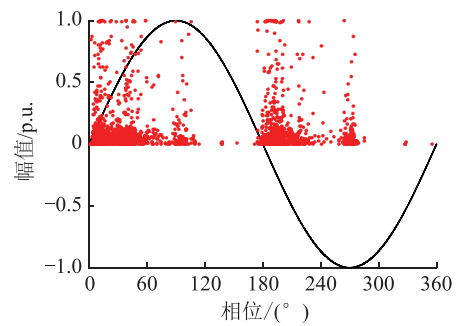


图 9 顶部电晕放电 PRPD 谱图
Fig.9 PRPD of corona discharge of last screen

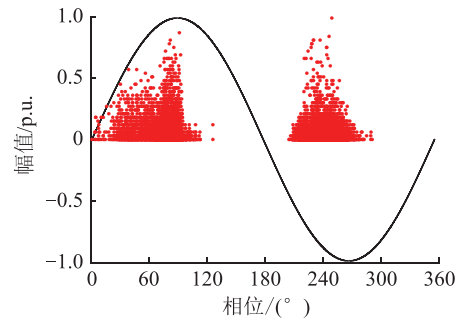


图 10 末屏悬浮放电 PRPD 谱图
Fig.10 PRPD of suspension discharge of last screen

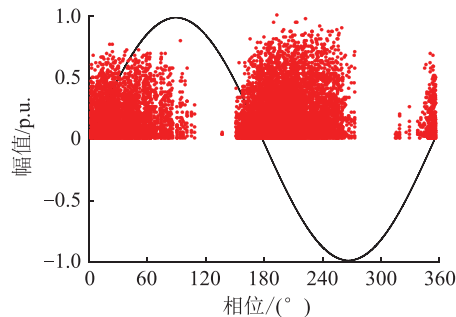


图 11 下瓷套沿面放电 PRPD 谱图
Fig.11 PRPD of creeping discharge on the surface of lower porcelain sleeve

下瓷套沿面放电时其信号无法穿透金属制的油箱及法兰,而外部实际可检测到电磁波信号,验证了仿真的正确性。

3 种放电的频谱图对比如图 12 所示,可以看出,外部放电主要分布在 0~0.4 GHz 内,而内部放电由于波导的限制,低频段几乎没有信号分布,这也印证了同轴波导的传输特性。从频谱特征来看,电晕放电波动范围较大,并且整体相对稳定;末屏放电在特高频段分布能量较少,但其放电起始电压低,放电量高,因此虽然其主峰频率并不在特高频范围内,但实际也能有效检测;下瓷套沿面放电频谱主峰在 0.3 GHz 附近,后续呈现相对稳定的波动但幅值较低,分布范围相对更宽。

以 0.3 GHz 为间隔,统计特高频的各个频段能

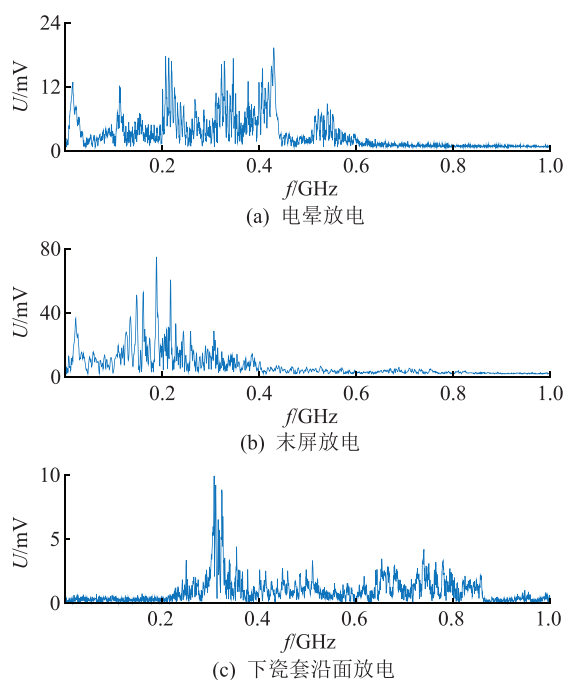


图 12 3种放电类型频谱

Fig.12 Spectrum of three discharge types

量占比,结果如表 1 所示。3 种放电类型中近 90% 的能量集中在 0.3~1.2 GHz 之内,但最大能量占比所在频段各有差别。电晕放电中 47.24% 的能量集中在 0.6~0.9 GHz 内,末屏放电整体上为单调下降趋势,而下瓷套沿面放电能量多分布在较低频段,且比较平稳。

表 1 不同放电类型的各个频带能量占比
Table 1 Energy ratio of different types of partial discharge at each frequency band

频带/GHz	电晕放电/%	末屏放电/%	下瓷套沿面放电/%
0.3~0.6	29.02	59.19	34.93
0.6~0.9	47.24	20.78	26.03
0.9~1.2	14.67	07.59	26.81
1.2~1.5	3.72	3.12	7.07
1.5~1.8	2.01	0.49	1.33

综上所述可知,实际检测时考虑成本、耗时等因素,可选择频带为 0.3~1.5 GHz 的特高频传感器进行检测,在采集大部分有效信号的同时降低硬件需求、较少采样时间。由于不同类型放电具有不同特点,不同放电波形的特征提取及局放模式识别也是后续研究的重点。

4 结论

文中针对油浸式套管的早期局部放电故障,以 35 kV 真型套管为研究对象,分析了电磁波在套管中的传播特性,建立了对应的局放仿真模型,并进行了典型放电类型的试验,得到如下结论:

(1) 电容屏间和外侧油道都是特高频电磁波传播的有效路径。TM 由于截止频率高,其进入波导后立刻大幅衰减(从 -16 dB 衰减至 -5 dB)。TE 波虽然截止频率低,但其成分很少(不足 1%),因此主要成分是 TEM。结合仿真和理论分析,实际情况下的电容屏间油纸与理想介质具有一定差距,衰减也相应增大,但其泄露路径不变。

(2) 套管不同部位不同类型的局部放电特征谱图明显不同,因此也可以从放电的统计数据分辨套管的放电类型;而外部传感器接收到的信号在特高频段的主要能量集中在 0.3~1.5 GHz 范围内,为后续的数据采集与分析提供了参考。

(3) 油浸式套管的结构具有高度相似性(均为同轴波导),可通过与套管无接触的特高频传感器实现对套管的在线监测,并对局放程度进行定量分析,保障变压器系统安全稳定运行。

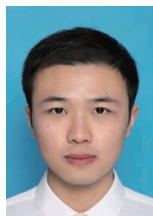
本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019008)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] International Council on Large Electric Systems. Power transformers and reactors-transformer bushing reliability[R]. Paris, France; CIGRE, 2019.
- [2] 戴佳民,齐波,卓然,等. 油浸纸套管电容芯子浸渍不良缺陷的放电过程及其特征[J]. 电工技术学报, 2017, 32(7): 185-193.
DAI Quanmin, QI Bo, ZHUO Ran, et al. Discharge process and characteristics of the poor impregnated defect of capacitor core in oil-immigrated paper bushing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7): 185-193.
- [3] 齐波,戴佳民,卓然,等. 潮气侵入对油浸纸套管电气特性的影响[J]. 高电压技术, 2017, 43(8): 2592-2598.
QI Bo, DAI Quanmi, ZHUO Ran, et al. Influence of the ingress of moisture on electric characteristic of oil-immigrated paper bushings[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(8): 2592-2598.
- [4] 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.
- [5] 李志超. 换流变压器阀侧套管绝缘故障检测技术研究[D]. 北京:华北电力大学, 2017.
LI Zhichao. Research on insulation fault detection technology for bushing used in valve-side of converter transformer[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [6] 宁子森. 高压套管绝缘缺陷监测方法的研究[D]. 北京:华北电力大学, 2017.
NING Zisen. Study on the methodology of monitoring insulation defects of high-voltage bushing[D]. Beijing: North China Elec-

- tric Power University, 2017.
- [7] BOTELHO M P G, GOMES T B, NAZARE F V B D, et al. A novel monitoring method for condensive bushings [C]//Proceedings of the 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference. I2MTC, 2013:1266-1271.
- [8] 张显聪,徐洋,王勇,等. 电容式套管局部放电的末屏地线 UHF 传感[J]. 高压电器, 2016, 52(2):62-67, 73.
ZHANG Xiancong, XU Yang, WANG Yong, et al. UHF sensing of partial discharge in condenser type bushing from end shield grounding tap[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(2):62-67, 73.
- [9] 唐嘉宏. 220 kV 变压器高压套管末屏故障原因分析与处理[J]. 华电技术, 2011, 33(7):45-47, 81.
TANG Jiahong. Cause analysis and treatment of terminal screen fault of 220 kV transformer high voltage bushing[J]. Huadian Technology, 2011, 33(7):45-47, 81.
- [10] 陈润颖,车红卫,奉策红,等. 500 kV 变压器高压套管末屏接地故障分析及处理[J]. 广东电力, 2014, 27(1):85-88.
CHEN Runyin, CHE Hongwei, FENG Cehong, et al. Analysis on grounding fault of high voltage bushing end screen of 500 kV transformer[J]. Guangdong Electric Power, 2014, 27(1):85-88.
- [11] 张大宁,白帆,牛朝滨,等. 不同受潮类型下油纸绝缘套管的频域介电谱特性[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16):4942-4950, 4998.
ZHANG Daning, BAI Fan, NIU Chaobin, et al. Frequency domain spectroscopy characteristics of oil-paper insulated bushings under different damp types[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16):4942-4950, 4998.
- [12] WANG D, ZHOU L, LIAO W, et al. Moisture estimation for oil-immersed bushing based on FDS method: field application[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(11):2762-2769.
- [13] ZHANG D, ZHAO H, YUN H, et al. Study on FDS characteristics of oil-immersed paper insulation bushing under non-uniform moisture content[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2018, 12(5):691-697.
- [14] 周利军,刘伟迪,王东阳,等. 基于频域介电谱法的油浸式套管受潮状态评估[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11):134-140.
ZHOU Lijun, LIU Weidi, WANG Dongyang, et al. Evaluation of the moisture state of oil-impregnated paper bushing based on FDS [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11):134-140.
- [15] ROBALINO D M. Accurate temperature correction of dissipation factor data for oil-impregnated paper insulation bushings: field experience [C]//Proceedings of the 2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 2011:251-254.
- [16] ROBALINO D M, GUNER I, WERELIUS P. Analysis of HV bushing insulation by dielectric frequency response [C]//Proceedings of the 2016 IEEE Electrical Insulation Conference. EIC, 2016:571-575.
- [17] LIU Q, ZHENG S, ZHANG Q, et al. Experimental study on UHF pattern of partial discharges in transformer bushings [C]//Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. ICHVE, 2016:1-4.
- [18] 张强,李成榕,刘齐,等. 变压器升高座内部套管局部放电特高频信号传播特征[J]. 电网技术, 2017, 41(4):1332-1337.
ZHANG Qiang, LI Chengrong, LIU Qi, et al. Research on propagation of UHF signals by partial discharges in ascending flanged base [J]. Power System Technology, 2017, 41(4):1332-1337.
- [19] 罗沙,田宇,李宾宾,等. 基于尺度-能量熵特征对的特高频局部放电辨识方法[J]. 电力工程技术, 2019, 38(4):152-158.
LUO Sha, TIAN Yu, LI Binbin, et al. UHF partial discharge identification method based on scale-energy entropy feature pair [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(4):152-158.
- [20] 王亮,郑书生,李成榕,等. GIS 浇注孔传播内部局部放电 UHF 电磁波的特性[J]. 电网技术, 2014, 38(1):241-247.
WANG Liang, ZHENG Shusheng, LI Chengrong, et al. Distribution of electric field strength and spectral characteristic of UHF signal of partial discharge inside GIS at resin sprue of metal ring [J]. Power System Technology, 2014, 38(1):241-247.
- [21] 丁登伟,唐诚,高文胜,等. GIS 中典型局部放电的频谱特征及传播特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(10):3243-3251.
DING Dengwei, TANG Cheng, GAO Wensheng, et al. Frequency attributes and propagation properties of typical partial discharge in GIS [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10):3243-3251.
- [22] 汪正江,夏红攀. 组合电器局部放电特高频检测的气压影响分析[J]. 电力工程技术, 2018, 37(3):107-111.
WANG Zhengjiang, XIA Hongpan. Analysis of air pressure influence on partial discharge UHF detection of GIS [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(3):107-111.

作者简介:



陈钜栋

陈钜栋(1996),男,硕士在读,研究方向为电气设备状态检测与故障诊断(E-mail:judong1019@163.com);

江军(1988),男,博士,副教授,研究方向为电气设备状态监测与故障诊断;

杨小平(1980),男,硕士,高级工程师,从事变电检修、运维等工作。

Non-contact partial discharge detection of high voltage oil-impregnated-paper bushing based on UHF technology

CHEN Judong¹, JIANG Jun¹, YANG Xiaoping², LI Jiansheng³, ZHANG Chaohai¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of New Energy Generation and Power Conversion(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics), Nanjing 211106, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China; 3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: Existing detection techniques for partial discharge based on transformer bushings have low sensitivity and cannot detect timely, while ultra-high frequency (UHF) technology has high anti-interference ability and can achieve contactless detection. UHF detection technology for bushing partial discharge detection method is proposed. A 35 kV bushing partial discharge simulation model is established and a partial discharge test is performed for different types of defects. The conclusions include that both oil-impregnated paper amid the capacitances and the oil channel are effective paths for UHF electromagnetic wave propagation. Transverse magnetic wave (TM) is greatly attenuated during the propagation process (from -16 dB to -5 dB). The initial component of the transverse electric wave (TE) is less than 1% and the main component is the transverse electromagnetic wave (TEM). The main energy in the UHF band concentrates in the lower frequency domain, and the partial discharge of different defect types of the bushing corresponds to different characteristic spectra. The contactless UHF sensor of the bushing can realize the live detection of the bushing, thereby ensuring the safety and reliability of the power transformer operation.

Keywords: transformer bushing; ultra-high frequency (UHF); partial discharge; live detection; contactless

(编辑 吴楠)

(上接第 141 页)

Natural fouling characteristics of composite insulators in special industrial dust areas

SHAO Shichao¹, BI Xiaotian², LI Mingzhe¹, CHEN Jie², WU Xiaohan¹, TAO Fengbo²

(1. Graduate International School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518000, China;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: Silicone rubber composite insulator has the advantages of high mechanical strength, excellent antipollution flashover performance, light weight, convenient operation and maintenance. It has been widely used in power grid construction. As silicone rubber material has excellent hydrophobicity and hydrophobicity mobility, its surface can still maintain good antifouling flashover ability after contamination. In some industrial areas, there is special industrial dust pollution, and the special industrial dust pollution in such areas has obvious impact on the performance of composite insulators, which makes the composite insulator surface in operation more prone to fouling. After fouling the hydrophobicity of the insulator surface is significantly reduced and the insulation performance is weakened. In order to study the natural pollution characteristics of composite insulators in special industrial dust areas, the composite insulators operated in a special industrial park in Jiangsu are sampled to study the pollution characteristics. The results show that the surface contamination of composite insulators operating in this area is generally heavy, the density of pollution equivalent salt is high, and the soluble salt components of pollution are mainly CaSO₄ and Na₂SO₄. The main components of insoluble ash are C, O, Si, containing carbon powder, SiO₂, CaO and other substances, which affect the surface conductivity and absorption of insulators.

Keywords: composite insulator; industrial dust; fouling characteristics; component analysis; microscopic analysis

(编辑 吴楠)