

DOI: 10.7652/xjtuxb201504002

变压器绕组对局部放电电磁波传播特性的影响

赵煦¹, 孟永鹏¹, 成永红¹, 邹琳², 刘通², 李锐海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. 南方电网电力科学研究院, 510080, 广州)

摘要: 为了研究变压器绕组对局部放电电磁波传播特性的影响,根据一台 330 kV 变压器绕组的实际结构,建立了变压器绕组仿真计算模型。采用时域有限差分法(FDTD)研究了局部放电发生在绕组内部和外部时,变压器绕组对电磁波时域波形幅值的衰减规律,以及在相同的条件下绕组对局部放电电磁波频谱分布的影响,并通过与无障碍空间中传播时局部放电电磁波的频率特性进行对比,得到了局部放电电磁波不同频率段的频率幅值和,及其在总频率幅值和中所占的比例。研究发现:绕组对内部放电和外部放电产生的局部放电电磁波传播特性的影响不同,绕组对内部放电产生的不同频率段电磁波的幅值有增强的作用,而且对 1 000~2 500 MHz 高频段的增强作用比其他频率段强;绕组对外部放电产生的电磁波幅值有较强衰减作用,穿过绕组后电磁波的幅值至少衰减为无障碍空间时幅值的 70%。

关键词: 变压器;局部放电;电磁波;传播特性

中图分类号: TM85 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)04-0006-06

Simulation Analysis of Effects of Transformer Windings on Propagation Characteristics of Partial Discharge Electromagnetic Waves

ZHAO Xu¹, MENG Yongpeng¹, CHENG Yonghong¹, ZOU Lin², LIU Tong², LI Ruihai²

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

2. Electric Power Research Institute of China, Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China)

Abstract: A simulation model for transformer windings is proposed to study the effect of the transformer windings on the propagation of electromagnetic (EM) wave induced by partial discharge (PD). The study is based on the size of windings in a 330 kV power transformer. A finite difference time domain (FDTD) method is used to analyze the propagation of PD EM wave in both internal and external windings. The effect of transformer windings on the propagation characteristics of PD electromagnetic waves is studied by applying PD pulse current signals in different places. This model is also used to study the effect of winding structures on the frequency spectrum of PD electromagnetic waves. The sum of the peak amplitudes in different bands and their proportions in the total sum are calculated through dividing the frequency spectrum into different bands. The calculation results are compared with those obtained in the places with and without obstacles (windings). It is found that the effects of transformer windings on the propagation characteristics of typical partial discharge electromagnetic waves are different in different places, and that the propagation characteristics depend on the location of PD according to windings. Windings increase the amplitude of EM waves from internal PD, especially in the

收稿日期: 2014-10-23。 作者简介: 赵煦(1982—),男,博士生;成永红(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金创新群体资助项目(51221005);南方电网科技项目。

网络出版时间: 2015-03-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150303.1010.002.html>

frequency band 1 000 MHz-2 500 MHz; and make a strong attenuation of 30% on the amplitude of EM waves from external PD.

Keywords: transformer; partial discharge; electromagnetic wave; propagation characteristic

局部放电是引起电力变压器绝缘损伤并引发故障的一个重要原因。在现有的局部放电检测方法中,特高频(UHF)检测由于具有检测灵敏度高、抗干扰能力强、信息量丰富、现场使用方便等优点得到了国内外研究者的普遍关注^[1-4]。相比其他电力设备,变压器结构更为复杂,包含绕组、铁芯、油纸板、导线、油箱等部件。不同组件的形状和材料各异,使得局部放电激发的电磁波信号在变压器内传播时受到多次衰减、反射和衍射,其传播路径和传播特性与在无障碍空间传播相比,发生了更为复杂的变化,最终影响局部放电检测的准确性。因此,研究 UHF 局部放电信号在变压器内的传播特性以及各个变压器组件对放电信号特征的影响规律是进行局部放电检测、识别和定位的重要基础。为此,各国学者开展了长期广泛的研究工作,取得了许多重要成果^[5-7]。然而,以往的文献无论是针对局部放电磁波传播特性的理论计算还是实验模拟,其研究仅仅还停留在定性分析阶段,缺少具体的量化指标。目前还没有针对变压器组件(如绕组和铁芯)建立起与真实结构相近似的理论计算模型,从而系统研究不同组件形状和尺寸下局部放电磁波时域和频域特征与传播路径之间的关系,同时也缺乏与之相对应的实验来验证计算结果的准确性,使得现有的研究结果还很难用于指导真正的 UHF 局部放电检测。本文采用时域有限差分法建立与真实变压器绕组结构相同的仿真模型,通过仿真计算得到变压器内典型放电类型激发的电磁波在传播过程中受绕组影响后,在时域特征和频域特征上的变化规律。

1 局部放电磁波的计算方法

局部放电磁波本质上是一种宽频带暂态电磁波,其传播空间中每一个点的电场值 E 和磁场值 H 都是空间 (x, y, z) 和时间 t 的函数。时域有限差分法(FDTD)是能够在时域空间求解平面电磁波的有效方法之一,借助中心差分逼近算法,对偏微分形式的 Maxwell 方程在时间和空间上进行离散化^[8]。由于该方法不受材料非线性特性的影响,因此可以用来计算局部放电激发的宽频带放电磁波信号,得到其时域波形,并进一步分析变压器组件对不同频率带局部放电磁波传播时频域特征的影响。具

体的计算方法表示为

$$E_x^{n+1/2}(k) = E_x^{n-1/2}(k) - \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \Delta x} [H_y^n(k+1/2) - H_y^n(k-1/2)] \quad (1)$$

$$H_y^{n+1}(k+1/2) = H_y^n(k+1/2) - \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta x} [E_x^{n+1/2}(k+1) - E_x^{n+1/2}(k)] \quad (2)$$

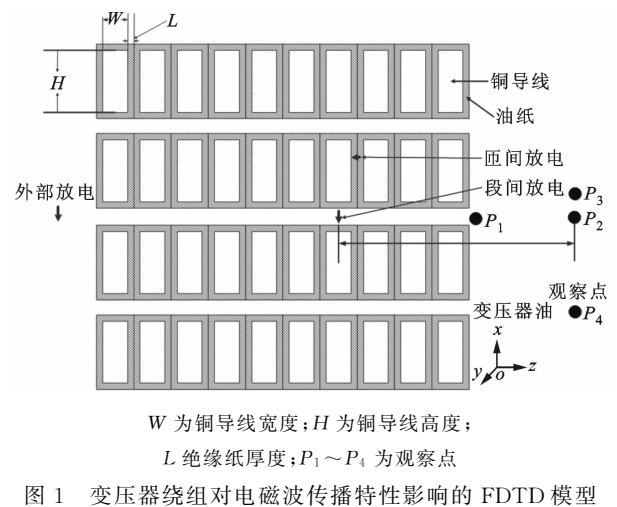
式中: E 和 H 分别表示电场强度和磁场强度; n 表示计算时间; k 表示 z 轴方向的空间步长。从式(1)、式(2)中可以看出:电场和磁场在空间和时间上是交替出现的,而且假设磁场在空间上位于相邻的 2 个电场之间,通过在时间和空间上同时迭代计算;电场强度 E 通过 $n-1/2$ 时间的 E 和 n 时刻与该 E 在空间上相邻的 2 个磁场值计算得到。

由电磁场和电磁波分析的相关理论^[9]可知:在电磁场远场区,电场 E_x 、 E_y 、 E_z 这 3 个方向的分量中 E_x 方向幅值最大。电场强度与磁场强度之间的关系为 $E_x = 377H_y$,相对于电场来说,磁场幅值很小,在分析中可以不予考虑,因此在本文所有计算中仅采用电场在 x 轴方向的分量来说明变压器绕组对电磁波信号传播特性的影响。

绕组是变压器内的主要组件和绝缘结构,由铜导线和油纸构成,每段绕组由油纸包绕铜导线形成多匝螺旋结构,段与段间为油隙。本文根据一台 330 kV 变压器的绕组结构建立了局部方面信号在变压器绕组中传播的 FDTD 模型,其纵向剖面图如图 1 所示。图中局部放电源的位置可根据需要设置为匝间放电、段间放电以及外部放电。局部放电的观察点(测量点)放置在绕组右侧。绕组匝数和段数可根据需要调整。绕组中铜线规格为 $1.5 \text{ mm} \times 7.5 \text{ mm}$;包绕铜导体的绝缘纸单边厚度为 1 mm ;绕组段与段的间隙(油隙厚度)为 4 mm 。仿真中局部放电源到绕组左边缘的距离设为 150 mm ,在绕组右侧的 4 个不同的观测点(P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_4)获取局部放电信号进行分析,如图 1 中所示。

根据相关实验研究^[6,10]确定了局部放电磁波传播特性的仿真计算参数,局部放电磁波在无障碍空间传播的介质为变压器油,传播速度为 2 m/s 。变压器油的相对介电常数为 2.2,磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$,由于其良好的绝缘性能,计算中电导率

近似取为 0;油纸绝缘的相对介电常数为 4.4,磁导率 $\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ H/m,电导率为 1×10^{11} S/m;绕组中铜导体的相对介电常数为无穷大,电导率为 5.96×10^7 S/m,磁导率设为 1。



仿真中将局部放电源等效为一个电偶极子天线,其长度为 1 mm,激励源为归一化处理的局部放电脉冲电流波形。计算中注入的电流方向为 x 轴负方向,FDTD 计算的网格划分尺度为 $1\text{ mm}\times1\text{ mm}$ 。本文为了研究真实局部放电电磁波在变压器中的传播特性,建立了 4 种典型的单一模式变压器局部放电模型(金属颗粒悬浮电位放电、电晕放电、油楔放电和油纸板内部气隙放电),并采用 IEC60270 规定的标准局部放电测量方法得到了不同放电模式下的局部放电电流波形,提取的放电电流时域基本特征参数如表 1 所示。

表 1 局部放电脉冲电流特征参数			
放电类型	上升沿宽度/ns	下降沿宽度/ns	脉冲宽度/ns
悬浮放电	2.4	30	32.4
电晕	1.2	15.4	16.6
油楔	1	30.2	31.2
气隙	4	36.8	40.8

2 绕组对放电电磁波时域特征的影响

以发生在绕组段间的电晕放电为例,通过 FDTD 计算模拟得到了局部放电电磁波经过绕组时的传播动态过程,如图 2 所示。可以看到,与无障碍空间电磁波的传播过程不同,放电电磁波经过绕组中铜线和油纸界面的多次反射、散射和绕射作用后,传播到绕组外部,最终放电电磁波不再是以球面波

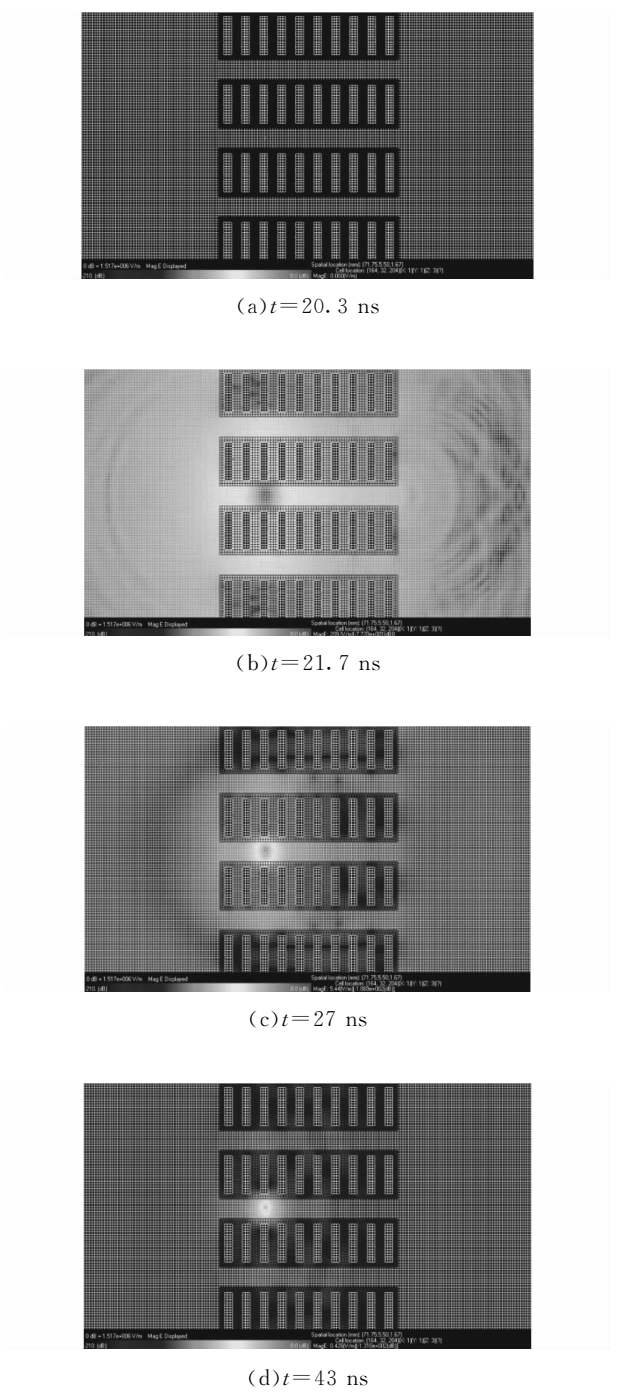


图 2 绕组段间局部放电电磁波传播的动态过程

均匀向四周辐射,且在绕组的段间与匝间多个位置产生局部振荡,如图 2d 所示,从而在与放电源相邻两侧的绕组匝间形成了一些局部场强较高的区域。在图 1 观测位置 P_2 获得的局部放电电磁波的波形如图 3 所示。

将电晕放电发生在绕组内部(段间放电)时 2 种不同绕组结构(10 匝 10 层和 30 匝 20 层)对电磁波时域波形幅值的影响,与无障碍空间的电磁波传播的计算结果进行对比,如图 4 所示。可以看出:对于

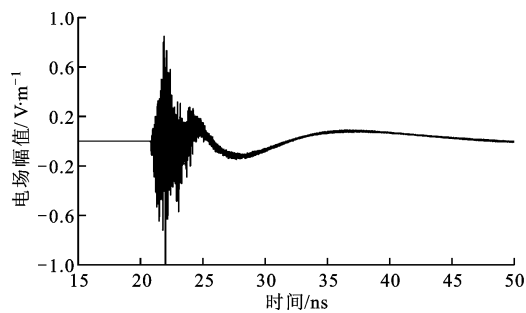


图 3 电晕放电电磁波的时域波形

10 匝绕组和 30 匝绕组,当电磁波穿过绕组后,其幅值与无障碍空间的幅值基本一致,也就是说,其影响基本可以忽略。

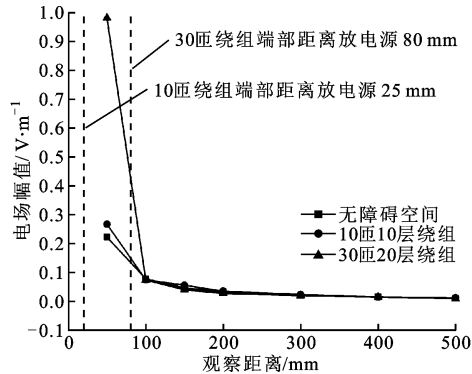


图 4 绕组内部放电对电磁波幅值的影响

采用同样的方法对发生在绕组外部的悬浮放电电磁波传播过程进行了仿真,得到了绕组结构对电磁波时域波形幅值的影响,如图 5 所示。可以看到,在这种情况下,电磁波要穿过整个绕组,在进入绕组时一部分电磁波被绕组铜导线反射,使得电磁波幅值有一定程度衰减。当电磁波穿过绕组时,绕组对外部放电产生的电磁波幅值有很强的衰减作用,电磁波的幅值衰减为无障碍空间时幅值的 70%,这部分衰减主要是由于电磁波传播至绕组时,由绕组铜导线反射引起的。

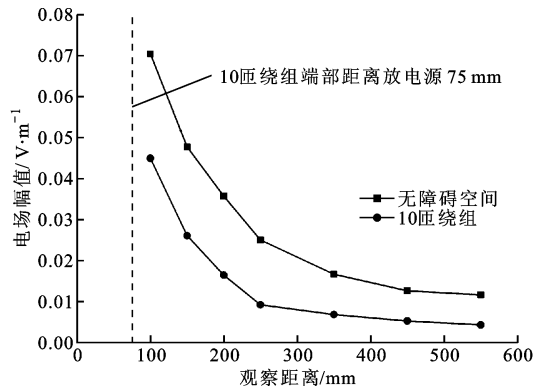
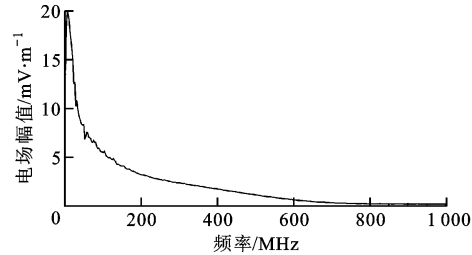


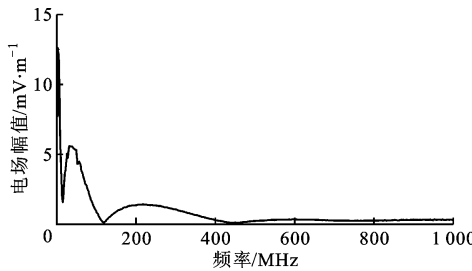
图 5 绕组外部放电对电磁波幅值的影响

3 绕组对放电电磁波频域特征的影响

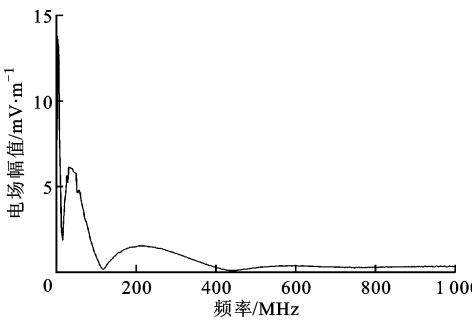
将计算得到的时域波形进行 FFT 分析得到电磁波电场时域波形的频谱分布。图 6 为发生在绕组段间的电晕放电在绕组中传播时,在不同观测点得到的绕组结构对电磁波频谱的影响。从图中可以看到;测量点 P_1 (即绕组出口处) 的波形频谱不同于其他 3 个测量点,含有更多的低频分量,且各个频率分量的幅值都比其他测量点的频率分量幅值大;对比测量点 P_4 ,测量点 P_2 、 P_3 的频谱中在 25 MHz 的频



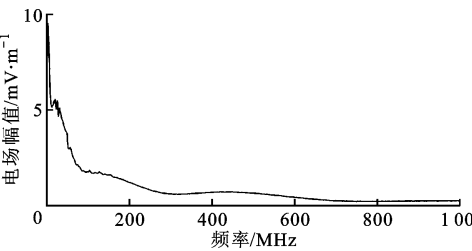
(a)测量点 P_1



(b)测量点 P_2



(c)测量点 P_3



(d)测量点 P_4

图 6 绕组对局部放电电磁波频率分布的影响

率处出现一个波谷,在 90 MHz 附近出现一个波峰;测量点 P_4 的频谱与测量点 P_1 的低频部分相似,但强度要小得多,并且含有更多的高频成分。这说明在放电电磁波到达绕组外部时,在相同位置具有相似的频域特征,只是在频谱幅度上存在一定程度的差异。

将得到的放电电磁波的频谱分为 6 个相邻的频率段(0~100 MHz、100~200 MHz、200~300 MHz、300~500 MHz、500~1 000 MHz 和 1 000~2 500 MHz),各个频段内的频率幅值和 M 由下式确定

$$M = \sum_{i=1}^n x_i \tag{3}$$

式中: x_i 为各离散频率点的幅值; n 为频率段内的频率点数。

通过比较不同频段的频率幅值和分析了绕组对局部放电电磁波特征频率的影响。以放电发生在绕组段间为例,分析结果如图 7 所示。可以看到:当绕组内部发生局部放电时,在绕组外部电磁波不同频率段的幅值和比无障碍空间时增大,但是绕组匝数对电磁波各频率段幅值之和的增强作用并不明显。同时,绕组对电磁波不同频率段幅值之和的增强程度不同,对高频段尤其是 1 000~2 500 MHz 频率段的增强作用比其他频率段要大得多。

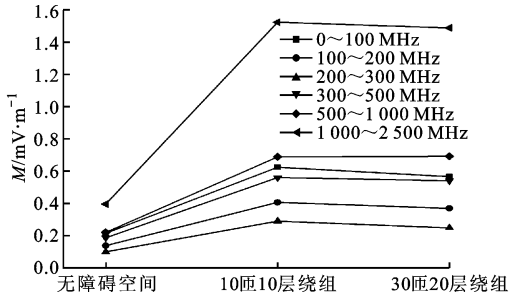


图 7 不同类型绕组下内部放电的电磁波频率幅值

图 8 为不同电磁波各频率段的频率幅值和占整个频谱总幅值之和的比例 k_M ,用下式表示

$$k_M = M_i / \sum_{i=1}^m M_i \tag{4}$$

式中: M_i 为第 i 个频率段内的电场幅值之和。

从图 8 可以看到:高频段(500~1 000 MHz 和 1 000~2 500 MHz)频率幅值之和的比例增大,而其他频率段的比例有所下降。当绕组匝数从 10 匝增加到 30 匝时,高频段的比例继续上升而其他频率段的比例继续下降。相比无障碍空间下电磁波的传播特性,高频段(1 000~2 500 MHz)的比例增加最

多,增加了约 10%,而其他频率段的比例变化幅度整体较小。

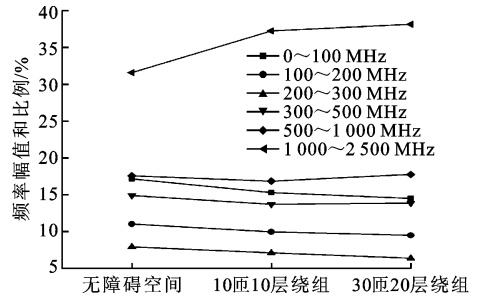


图 8 不同类型绕组下电磁波频率幅值之和的比例

图 9 为外部放电时计算得到的各频率段的幅值和。可以看到:当发生外部放电时,绕组对电磁波各个频率段的幅值和比例的影响较小,只使得高频段(1 000~2 500 MHz)的比例所有增加,增加值为 5%,而其他各个频率段的比例基本没有变化。

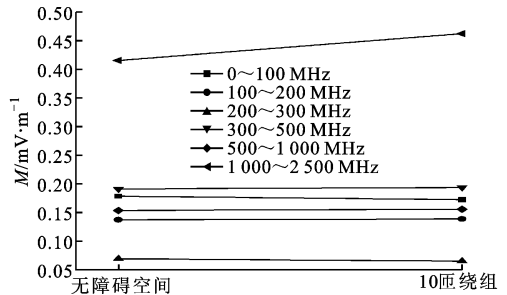


图 9 外部放电对电磁波各频率段的幅值和比例的影响

进一步分析了在 4 种不同局部放电模式下,绕组对局部放电电磁波各个频率段频率幅值之和的影响,图 10 是当放电发生在绕组内部(段间)时,不同放电类型对应的频率幅值和占整个频率幅值之和的比例。为了便于比较,同时给出了无障碍空间传播时,不同放电类型的频率幅值之和的比例,如图 11 所示。比较图 10 和图 11 可以看到:对于悬浮放电而言,500~1 000 MHz 范围内的比例基本保持不变;500 MHz 以下的各频率段都呈现减小的趋势,1 000~

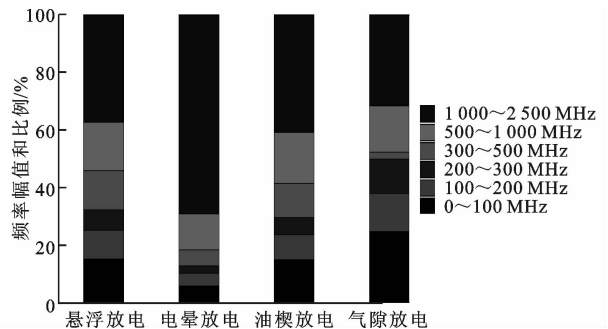


图 10 不同放电类型受绕组影响的频率幅值和比例

2 500 MHz 的高频段分量有显著的增加;其余 3 种放电类型各个频率段的变化趋势基本与悬浮放电的变化趋势一致,但由于不同放电类型各个频率段的比例各不相同,使得受到绕组影响后 4 种放电类型的频率幅值和的比例仍具有可分性。同时,可以看到,悬浮放电类型和油楔放电类型的各个频率段的比例分布相似,电晕放电类型的高频成分比例最大,气隙放电类型高频段的比例较无障碍空间中的比例有显著增加。

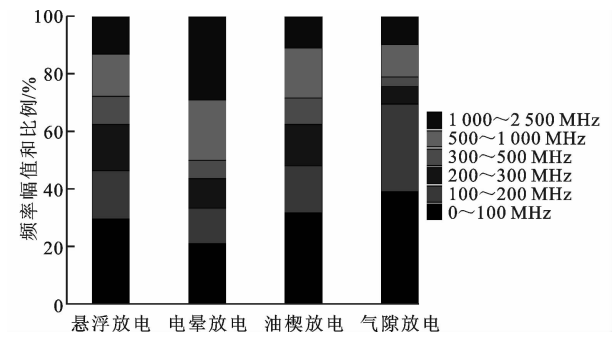


图 11 无障碍空间不同放电类型频率幅值的比例

4 结 论

采用 FDTD 建立了变压器绕组对局部放电磁波传播特性影响的仿真模型,得到如下结论。

(1)绕组对局部放电磁波时域特征的影响主要表现在:当局部放电发生在绕组内部(匝间放电和段间放电)以及绕组端部时,绕组对电磁波幅值有增强作用,当电磁波穿过绕组后其幅值基本与无障碍空间中类似。当局部放电发生在绕组外部时,绕组对外部放电产生的电磁波幅值有较强的衰减作用,穿过绕组后电磁波的幅值至少衰减为无障碍空间时幅值的 70%。

(2)绕组对局部放电磁波频域特征的影响主要表现在:当放电发生在绕组内部时,绕组对电磁波不同频率段的幅值有增强的作用,而且对 1 000~2 500 MHz 高频段的增强作用比其他频率段强,而绕组匝数的变化对频率幅值的影响不大;对于外部放电,绕组仅使 1 000~2 500 MHz 高频段的比例略微增加,增加值为 5%,而对于其他各个频率段的比例基本没有影响。

参考文献:

[1] 王昌长,李福祺,高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断 [M]. 北京:清华大学出版社,2006: 3.
[2] BARTNIKAS R. Partial discharges: their mechanism,

detection and measurement [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(5): 763-808.
[3] COENEN S, TENBOHLEN S, MARKALOUS S, et al. Sensitivity of UHF PD measurements in power transformers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6): 1553-1558.
[4] TENBOHLEN S, DENISSOV D, HOEK S, et al. Partial discharge measurement in the ultra high frequency (UHF) range [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6): 1544-1552.
[5] 李军浩,司文荣,杨景刚,等. 电力变压器局部放电特高频信号外部传播特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(6): 718-722.
LI Junhao, SI Wenrong, YANG Jinggang, et al. Propagation characteristic of partial discharge ultra high frequency signals outside transformer [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(6): 718-722.
[6] MORITA N, KOZAKO M, HIKITA M, et al. Study of partial discharge induced electromagnetic wave propagation property in power transformer model [C] // The 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 44-47.
[7] 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 Wen-zhi, TANG Zhi-guo, LI Cheng-rong, et al. Simulation analysis of PD UHF signal propagation in transformers [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1629-1634.
[8] MUR G. Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic-field equations [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1981(4): 377-382.
[9] 谢处方,饶克谨. 电磁场与电磁波 [M]. 北京:高等教育出版社,2006: 34-83.
[10] 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): 100-105.
WANG Song, LI Xiang-long, LI Jun-hao, 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): 100-105.

(编辑 刘杨 杜秀杰)