

受潮对油纸电容式套管频域介电响应的影响

廖瑞金¹,杜永永²,高 竣²,罗定春²,郭 进²

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044;2. 国网成都供电公司,四川 成都 610000)

摘要:设计制作了10 kV油浸纸套管模型,对该模型进行电势分布仿真,得出电势沿径向路径线性分布的结论。同时,套管模型实际工频电容测量值30.197 pF与理论计算值30.172 pF接近,套管模型基本满足实际需求。测试了不同受潮程度下套管的主绝缘与绝缘油的频域介电响应特性后发现:受潮缺陷会使主绝缘的介质损耗和电容在整个频域(10^{-3} ~ 10^3 Hz)内明显增加;受潮后的绝缘油介质损耗在整个频域内明显增加,而电容则在 10^{-3} ~ 10^{-1} Hz频段内明显增加, 10^{-1} ~ 10^3 Hz内基本保持不变。最后选取特征频率点(10^{-3} 、 10^{-2} 、 10^{-1} Hz)下的电容值与工频电容值的比值为特征量有效地实现了对套管受潮状态的评估,为频域介电响应技术应用于油纸电容式套管的状态评估提供了理论参考。

关键词:油纸电容式套管;主绝缘;绝缘油;受潮缺陷;电容比;频域介电响应

中图分类号:TM 41

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201910014

0 引言

电力变压器是输配电能量转换的核心,而套管作为电力变压器系统的重要组成部分,一旦发生故障将会导致变压器的停运,甚至使整个变压器损坏。研究表明超过30%的变压器故障是由套管故障引起的,且因套管缺陷故障引起的变压器事故数占变压器事故总数的比例有逐年增大的趋势。套管受潮是一种比较典型的造成套管故障的绝缘缺陷^[1]。水分不仅会加速套管油纸绝缘的老化而且还会导致套管介质损耗增加,从而引起过热现象,严重时会发生爆炸^[2-3]。此外,套管油纸绝缘间微水受热会转化为气泡,极易导致局部放电的发生^[4]。因此,对变压器套管受潮状态的评估具有很重要的意义。

目前,套管的例行试验主要包含目测检查套管表面状态、测试20℃下工频介质损耗和电容量以及取油样进行油中气体分析^[5]。但是工频电压下套管介质损耗以及电容量的变化不足以灵敏地反映套管的故障状态,而进行油中气体的色谱分析需要取样,会对套管的密封性造成一定的损坏^[5-7]。因此,基于电介质极化和弛豫理论的频域介电谱技术由于其具有无损、现场测试抗干扰能力强的特点而被不断应用到电力设备的状态评估中来^[2,7,9-18]。虽然目前针对受潮对油纸绝缘频域介电响应的研究已经较多,但研究主要集中于变压器油纸绝缘介电响应。变压器油纸绝缘很难直接进行绝缘油介电响应的测试,需要取油操作且油样并不能表征绝缘油的整体绝缘状态,因此通过绝缘油与主绝缘介电响应的协同分析评估油纸系统绝缘状态的研究极少。由于油纸套管与变压器的结构不同,套管主绝缘的绝缘状态可通过引线接头与末屏之间的介电响应来评估,

而套管内部绝缘油的绝缘状态则可通过接地法兰和末屏之间的介电响应来评估,因此可通过受潮对套管主绝缘和绝缘油间隙的介电响应的综合分析来评估受潮对套管油纸绝缘状态的影响。但套管造价昂贵,且现场试验操作复杂,故设计制作油纸电容式套管模型研究受潮对油纸套管绝缘状态的影响具有重要的工程实用价值。国外学者FOFANA I等设计了油纸电容式套管模型研究加工过程中产生的结构缺陷及低温对频域介电响应的影响,为频域介电响应技术应用于套管状态评估提供了较好的借鉴^[12],但其制作模型采用的是魏德曼纸且结构过于简单,而实际运行套管主要采用电缆纸,故研究结果具有一定的局限性。SMITH D J等建立了单层绝缘结构套管模型研究水分对频域介电响应的影响^[13],但是其主要采用有限元仿真进行研究,忽略了各绝缘层之间的差异性,且仿真结果与实际测试结果有较大的误差。因此,设计制作电场分布和油纸绝缘结构满足套管绝缘结构设计原理的油浸纸电容式套管模型来模拟受潮对套管油纸绝缘频域介电谱的影响具有重要的意义。

本文通过不同受潮程度的油纸电容式套管模型和不同水分含量的绝缘油样品研究受潮对套管主绝缘和绝缘油频域介电响应的影响。

1 电容式套管模型设计

实际油纸电容式套管的剖面图如图1所示。油纸电容式套管通过各金属极板形成串联相等的电容改善油纸绝缘中电场的分布。在“等电容”的原则下,任意一层的电容均满足式(1)^[19]。

$$C_k = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0 l_k}{\ln(r_k/r_0)} \quad k=0,1,\dots,n \quad (1)$$

其中, k 为层数, $k=0$ 和 $k=n$ 分别对应最内层和最外

层; C_k 为第 k 层的电容; l_k 为第 k 层极板长度; r_k 为第 k 层极板半径; ε_r 为油纸相对介电常数, 设为 3.5; ε_0 为真空介电常数, 其值为 $8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 。

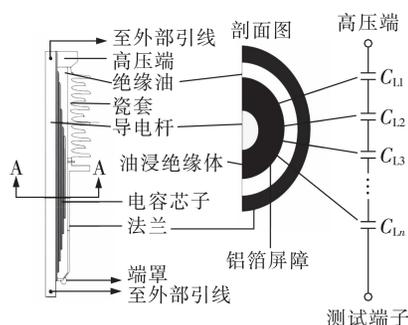


图 1 实际油浸纸电容式套管模型的剖面图

Fig.1 Section view of actual oil-paper condenser bushing

为了提高套管的耐局部放电能力以及选取较高的最大工作场强, 套管的绝缘层厚度取得很薄, 一般为 1.0~1.2 mm。本文采用的电缆纸厚度为 0.12 mm, 为了设计和计算的方便, 绝缘层厚度取为 1.2 mm。此外, 套管在长期运行中承受电压的时间很长, 套管油纸绝缘击穿主要是由局部放电引起的电老化过程。因此, 电容式套管的设计主要以不发生有害的局部放电为原则。油纸绝缘金属极板在油中的局部放电起始场强 E_0 满足下列经验公式:

$$E_0 = 10.6 / (d^{-0.55} \varepsilon_r^{-0.45}) \quad (2)$$

其中, d 为最小绝缘厚度。

油纸套管径向工作场强约为 2.5~3.5 kV/mm, 考虑到绝缘裕度的要求一般为 1.5~2, 取径向最大工作场强为 3.5 kV/mm, 则裕度为 1.56, 满足要求。

油浸纸套管模型的基本结构图和实物图如附录中的图 A1 所示。套管模型主要由直径为 10 mm、厚度为 1 mm 的紫铜管包绕 0.12 mm 厚的电缆纸以及 0.01 mm 的铝箔极板组成。本文设计的简化油纸套管模型的电压等级为 10 kV, 设计按照“等厚度”原则, 即各绝缘层厚度相同, 通过调节铝箔极板的长度实现串联电容及电场的均匀分布。导电杆采用外径为 10 mm、长度为 15 cm 的紫铜管。套管电容芯子按照如下方法卷制: 10 层电缆纸加铝箔极板, 10 层电缆纸加铝箔, 10 层电缆纸加铝箔。油纸电容式套管模型的设计尺寸如表 1 所示。

表 1 套管模型的设计尺寸

Table 1 Size of bushing model

绝缘层序数	外径/mm	绝缘层厚度/cm	极板长度/cm
0	5.2	—	—
1	6.2	1.2	10.3
2	7.4	1.2	8.3
3	8.6	1.2	7.0

为了验证套管模型满足设计的要求, 采用 COM-

SOL Multiphysics AC/DC 模块建立 10 kV 油纸套管仿真模型, 得到套管的整体电势分布如附录中的图 A2 所示。选择套管最内层绝缘层中间位置到最外层绝缘层中间位置为路径 (如图 A1(a) 中的 A→B 方向所示), 得到电势沿路径的分布如图 2 所示。由图可见, 径向电势沿径向方向线性降低, 套管的电场设计基本满足要求。同时, 采用瑞典生产的 IDAX-300 绝缘诊断分析仪对实际制作的油纸电容式套管模型进行工频电容测量, 实际测得的工频电容为 30.197 pF, 与由式 (1) 计算得到的理论值 30.172 pF 相差较小。综上可知, 本文设计的套管模型基本满足研究的要求。

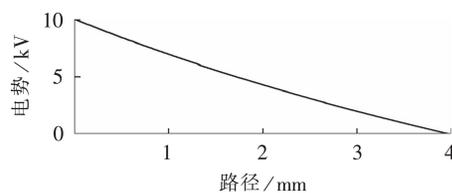


图 2 电势沿路径的分布

Fig.2 Potential distribution along path

2 样品的制备

2.1 主绝缘受潮样品的制备

测试采用瑞典生产的 IDAX-300 绝缘诊断分析仪, 其输出幅值为 200 V 的电压, 可以测量频率在 0.1 mHz~1 kHz 范围内样品的电容和介质损耗。

套管模型的制备与预处理流程如下:

- 使用卡尔费休滴定水分仪测得电缆纸初始水分含量为 8%;
- 在 105 °C 的条件下对套管模型进行 48 h 的真空干燥;
- 在 90 °C、50 Pa 的条件下对矿物油进行 48 h 的真空干燥;
- 在 60 °C、50 Pa 的条件下对套管模型进行 48 h 的真空浸油, 然后充氮气 24 h, 以使套管充分浸油;
- 将浸油后的套管分别在空气湿度为 62%、温度为室温的环境中吸潮不同的时间, 制备受潮含水量为 0.7%、1.0%、1.6%、2.8%、3.3% 的样品来模拟不同受潮程度的套管绝缘状态。

2.2 不同含水量的绝缘油样品的制备

(1) 将 25 号矿物油在 90 °C、50 Pa 的条件下真空干燥 48 h, 采用微量移液器制备不同水分含量的绝缘油样品并电磁搅拌 2 h, 使其均匀分散;

(2) 在常温下对绝缘油样品进行 1 h 的超声振荡, 然后在 60 °C 的条件下真空静置 4 h, 制备不同水分含量的绝缘油样品。

3 实验结果

3.1 主绝缘受潮的影响

套管会由于制造时电容芯子干燥不充分或者投

入运行后密封不严而进水受潮,图3为不同含水量的主绝缘的介质损耗和电容随频率的变化,其中,介质损耗以损耗角正切值 $\tan \delta$ 的形式表征,后同。

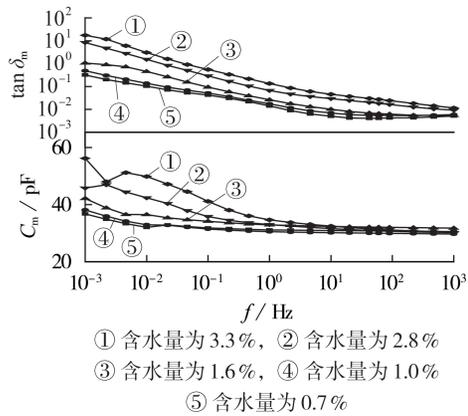


图3 不同含水量的主绝缘介质损耗和电容
Fig.3 Dielectric loss and capacitance of main insulation with different water contents

由图可见,随着含水量的增加,套管的介质损耗明显增大,特别是当频率小于1 Hz时增加趋势更加明显。主要原因如下:随着套管绝缘纸水分含量的增加,导致绝缘纸电导率增加,电导损耗增大,同时由于水分等杂质的引入使得单位体积内参与极化的分子数目增加,从而极化损耗增大,缩短了油纸界面极化响应时间,因此曲线向高频方向移动;电容只有在受潮比较严重,即含水量为1.6%、2.8%、3.3%时才会明显增大;含水量为1.0%时可能水分的分布对电容的影响占主要因素,因此电容随含水量的变化规律不明显。

3.2 绝缘油受潮的影响

实际检修中由于要取油样进行测试,可能会对套管的密封性能造成影响,同时会使部分水分侵入套管内部,造成绝缘油受潮,在套管接地法兰和末屏之间进行介电响应测试则可以反映套管内部绝缘油的绝缘状态。

图4为受潮程度不同的绝缘油的介质损耗和电容随频率的变化。可看出,随着含水量的增加,绝缘油的介质损耗在整个频带内增加,并且会出现一个“平台”;而随着水分含量的增加,电容在 10^{-3} ~ 10^{-1} Hz频段内明显增加,在 10^{-1} ~ 10^3 Hz频段内基本保持不变。产生上述现象的原因主要是:水分是极性分子,相对介电常数远大于绝缘油,随着水分含量的增加,单位绝缘油体积内的极化分子数目增多,从而极化损耗增大,介质损耗也相应增大。但是水分引起的空间电荷极化弛豫时间比较长,在 10^{-3} ~ 10^{-1} Hz频段内才能完成。随着频率的增加,空间电荷的移动速度赶不上电场的变化,空间电荷极化无法建立,而绝缘油主要存在电子极化的作用,电子位移极化完成时间极短,在整个频率范围内都可以完成,因此电容

在 10^{-1} ~ 10^3 Hz频段内基本保持不变。

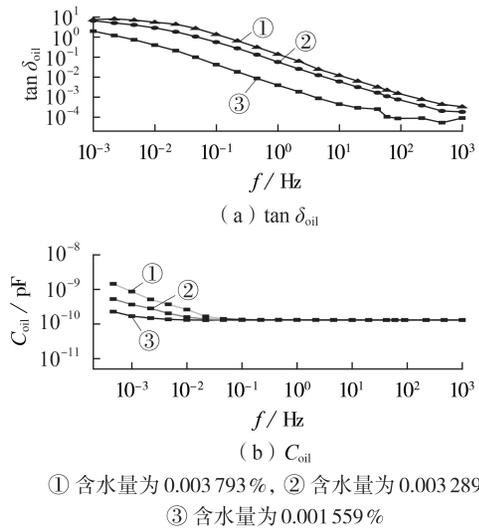


图4 不同含水量的绝缘油介质损耗和电容
Fig.4 Dielectric loss and capacitance of insulation oil with different water contents

3.3 受潮对电容比的影响

电容比对于电气设备故障的有效诊断具有十分重要的意义,国外学者采用0.1 mHz频率点下的电容和工频电容的比值作为电容比^[13]。电容比越小,则绝缘状态越好。但是由于测试到0.1 mHz需要很长的时间,不便于现场评估,因此本文采用 10^{-3} 、 10^{-2} 、 10^{-1} Hz频率点下的电容与工频电容的比值作为电容比评估受潮状态的影响。表2和表3分别为绝缘油与主绝缘电容比随含水量的变化。可以看出,随着水分含量的增加,主绝缘和绝缘油的电容比明显增大,同时选择 10^{-3} Hz频率点的电容值与工频电容的比值作为电容比对于反映受潮的程度更加灵敏。

表2 不同频率点下不同含水量的绝缘油电容比

含水量/%	$C_{0.1\text{Hz}}/C_{50\text{Hz}}$	$C_{0.01\text{Hz}}/C_{50\text{Hz}}$	$C_{0.001\text{Hz}}/C_{50\text{Hz}}$
0.001 559	1.00	1.01	1.29
0.003 289	1.01	1.21	2.78
0.003 793	1.03	2.00	6.43

表3 不同频率点下不同含水量的主绝缘电容比

含水量/%	$C_{0.1\text{Hz}}/C_{50\text{Hz}}$	$C_{0.01\text{Hz}}/C_{50\text{Hz}}$	$C_{0.001\text{Hz}}/C_{50\text{Hz}}$
0.7	1.04	1.05	1.20
1.0	1.06	1.11	1.29
1.6	1.08	1.15	1.33
2.8	1.09	1.19	1.43
3.3	1.41	1.70	1.92

4 现场测试

为了验证频域介电响应技术应用于备用套管状

态评估的可靠性以及利用套管模型研究受潮对套管介电响应的有效性,对暴露于潮湿空气中 24 个月后的电压等级为 62.8 kV 的备用套管进行频域介电响应测试。

图 5 和图 6 分别为油纸电容式备用套管受潮后主绝缘和绝缘油的介质损耗和电容随频率的变化。由图可见,受潮对真实备用套管和前述套管模型的影响规律基本保持一致,备用套管主绝缘的介质损耗及介电常数随着频率的降低急剧增大,绝缘油的介电常数及介质损耗也随着频率的降低急剧增大,呈低频弥散效应。

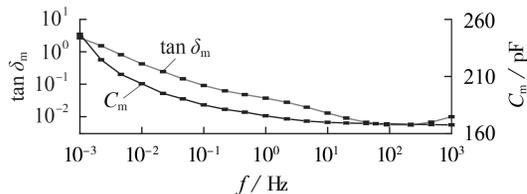


图 5 实际油纸电容式备用套管的主绝缘介质损耗和电容
Fig.5 Dielectric loss and capacitance of main insulation of actual oil-paper condenser bushing for back-up

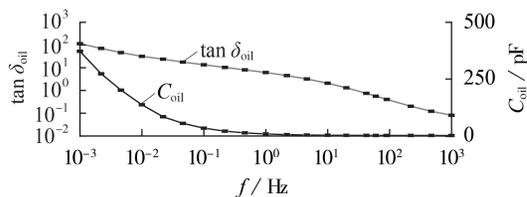


图 6 实际油纸电容式备用套管的绝缘油介质损耗和电容

Fig.6 Dielectric loss and capacitance of insulation oil of actual oil-paper condenser bushing for back-up

5 结论

本文通过制作油纸电容式套管的实体模型来模拟实际套管出现的受潮缺陷,同时研究了不同含水量对绝缘油频域介电响应的影响,得出如下结论。

(1)随着含水量的增加,套管主绝缘介质损耗和电容值在测试频域内明显增大;绝缘油介质损耗随着含水量的增加在整个频域范围内明显增大,绝缘油电容值在 10^{-3} ~ 10^{-1} Hz 频段内明显增加,在 10^{-1} ~ 10^3 Hz 频段内基本保持不变。

(2) 10^{-3} 、 10^{-2} 、 10^{-1} Hz 频率点下主绝缘和绝缘油的电容比随着含水量的增加明显增大,选择 10^{-3} Hz 频率点的电容比更有利于对受潮状态的可靠评估。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] ZINK M H, LIPFE V K, BERGER F, et al. Ageing condition assessment of generator transformer bushings by means of dielectric simulation models [C]//Condition Monitoring and

Diagnosis (CMD). Bali, Indonesia: IEEE, 2012: 137-140.

- [2] LUNGAARD L E, HANSEN W L, PAINTER D T J. Aging of oil-impregnated paper in power transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 230-239.
- [3] WERELIUS P, OHLEN M, JIALU C, et al. Dielectric frequency response measurements and dissipation factor temperature dependence [C]//2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. San Juan, PR, USA: IEEE, 2012: 296-300.
- [4] PRZYBYLEK P, MORANDA H, WALCZAK K, et al. Can the bubble effect occur in an oil impregnated paper bushing? [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(6): 879-1883.
- [5] GAFVERT U, ADEEN L, TAPPER M, et al. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain applied to diagnostics of power transformers [C]//Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Xi'an, China: IEEE, 2000: 825-830.
- [6] BLENNOW J, EKANAYAKE C, WALCZAK K, et al. Field experiences with measurements of dielectric response in frequency domain for power transformer diagnostics [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 681-688.
- [7] BRAUN J M, DENSLEY R J, SEDDING H G, et al. Accelerated aging and diagnostic testing of 115 kV type U bushings [C]//Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Anaheim, CA, USA: IEEE, 2000: 460-472.
- [8] 冯达, 柯春俊, 吴锴. 基于频域介电谱分析的油纸套管状态评估仿真 [J]. 变压器, 2015, 52(4): 52-54.
FENG Da, KE Chunjun, WU Kai. Assessment and simulation of oil-paper bushing [J]. Transformer, 2015, 52(4): 52-54.
- [9] 杜振波, 聂德鑫, 张连星, 等. 基于频域介电谱分析的高压套管绝缘状态评估 [J]. 高压电器, 2013, 49(11): 6-11.
DU Zhenbo, NIE Dexing, ZHANG Lianxin, et al. Insulation evaluation of high voltage bushing based on frequency domain spectroscopy analysis [J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(11): 6-11.
- [10] SUMEREDER C, MUHR M. Dielectric response measurements at high voltage bushings [C]//2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Beijing, China: IEEE, 2008: 1150-1153.
- [11] NIKJOO R, TAYLOR N, NIASAR M G, et al. Dielectric response measurement of power transformer bushing by utilizing high voltage transients [C]//2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2012: 503-506.
- [12] BOUAICHA A, FOFANA I, FARZANEH M, et al. Dielectric spectroscopy techniques as quality control tool: a feasibility study [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2009, 25(1): 6-14.
- [13] SMITH D J, MCMEEKIN S G, STEWART B G, et al. A dielectric frequency response model to evaluate the moisture content within an oil impregnated paper condenser bushing [J]. IET Science, Measurement & Technology, 2013, 7(4): 223-231.
- [14] 魏建林, 王世强, 彭华东, 等. 变压器油纸绝缘的介电响应特性研究——加速热老化的介电谱 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 56-62.
WEI Jianlin, WANG Shiqiang, PENG Huadong, et al. Investigation of dielectric response characteristics of transformer oil-paper insulation—dielectric spectroscopy of accelerated thermal aging [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 56-62.
- [15] 高竣, 廖瑞金, 王有元, 等. 油纸绝缘水平平衡样品的制备及水分评估频域特征量提取 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 196-202.

- GAO Jun, LIAO Ruijin, WANG Youyuan, et al. Preparation of oil-paper insulation samples with moisture equilibrium and frequency domain characteristic parameters extraction for moisture assessment [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 196-202.
- [16] 王有元, 高竣, 刘捷丰, 等. 变压器油纸绝缘老化与水分含量评估频域介电特征量[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 215-221. WANG Youyuan, GAO Jun, LIU Jiefeng, et al. Aging and moisture evaluation characteristic parameters for oil-paper insulation of transformer using frequency dielectric spectroscopy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 215-221.
- [17] 王世强, 魏建林, 张冠军, 等. 温度对油纸绝缘介电响应特性的影响[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 50-55. WANG Shiqiang, WEI Jianlin, ZHANG Guangjun, et al. Effect of temperature on dielectric response characteristics of oil impregnated pressboard [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 50-55.
- [18] 廖瑞金, 郝建, 杨丽君, 等. 变压器油纸绝缘频域介电特征量与绝缘老化状态的关系[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 43-49. LIAO Ruijin, HAO Jian, YANG Lijun, et al. Relationship between frequency domain dielectric characteristic quantity and aging status of transformer oil-paper insulation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 43-49.
- [19] 谢恒堃. 电气绝缘结构设计原理[M]. 北京: 中国机械工业出版社, 1992: 121-138.
- [20] 贺德华, 蔡金锭, 蔡嘉. 基于时域谱线特征量的变压器油纸绝缘诊断[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 122-127. HE Dehua, CAI Jingding, CAI Jia. Transformer oil-paper insulation diagnosis based on time-domain spectral curve characteristic parameters [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 122-127.

作者简介:



廖瑞金

廖瑞金(1963—),男,四川遂宁人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为输变电设备在线监测与故障诊断(E-mail: rjliao@cqu.edu.cn);

杜永永(1990—),男,山西平遥人,硕士研究生,主要研究方向为输变电设备故障诊断(E-mail: duyongyong@cqu.edu.cn)。

Effect of moisture content on dielectric frequency domain response of oil-paper condenser bushing

LIAO Ruijin¹, DU Yongyong², GAO Jun², LUO Dingchun², GUO Jin²

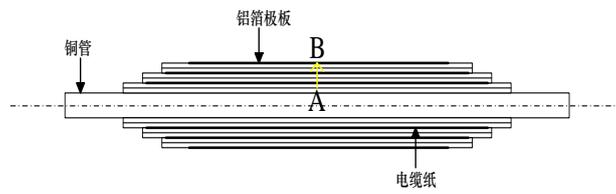
(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment and System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. State Grid Chengdu Power Supply Company, Chengdu 610000, China)

Abstract: A 10 kV OIP(Oil-Paper) bushing model is designed and made. The potential distribution of the 10 kV OIP bushing model is simulated, the simulative results show that the potential distribution of the 10 kV OIP bushing model is linearly along the radial path. The measured value of power frequency 50 Hz capacitance of the 10 kV OIP bushing model is 30.197 pF, which is close to the theoretical calculating value 30.172 pF, so the 10 kV OIP bushing model satisfies the actual requirements. The DFRs(Dielectric Frequency Responses) of main insulation and insulation oil of bushing with different moisture contents are studied. The results show: the dielectric loss and capacitance of the damp main insulation increase obviously in the whole frequency domain from 10^{-3} Hz to 10^3 Hz due to moistened defect; the dielectric loss of moistened insulation oil increases mostly in the whole frequency domain, while the capacitance only increases in the frequency domain from 10^{-3} Hz to 10^{-1} Hz, and remain basically unchanged from 10^{-1} Hz to 10^3 Hz. Finally, the ratios of capacitance value to power frequency capacitance value at characteristic frequency points(10^{-3} Hz, 10^{-2} Hz, 10^{-1} Hz) are selected to evaluate the moisture state of bushing insulation, which provides a theoretical reference for the application of DFR technology to the condition assessment of OIP bushing.

Key words: oil-paper condenser bushing; main insulation; insulation oil; moistened defect; capacitance ratio; dielectric frequency domain response

附录



(a) 套管结构



(b) 实物

图 A1 油浸纸套管的基本结构图和实物图

Fig.A1 Schematic diagrams of oil-paper bushing model structure and hand-made oil-paper bushing

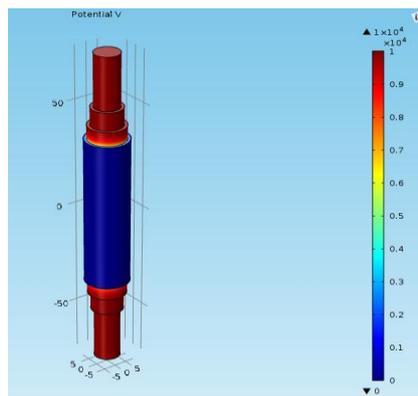


图 A2 10kV 油浸纸套管模型电势分布图

Fig.A2 Potential distribution of 10kV oil-paper bushing model