

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.02.019

# 变压器油纸绝缘套管受潮缺陷频域介电谱特征

张毅涛<sup>1</sup>, 齐波<sup>1</sup>, 林元棣<sup>2</sup>, 沈殷和<sup>1</sup>, 吴益明<sup>2</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206;

2. 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:**已有研究表明,频域介电谱(FDS)对油纸绝缘受潮缺陷的检测比较灵敏。为了研究变压器油纸绝缘套管受潮缺陷的FDS特征,测试了受潮后套管模型不同静置时间下的介损电压特性和0.001 Hz~1 kHz的介损频率特性。结果表明:在受潮初期,相同试验电压下介损随时间的变化呈现微弱增长趋势,但并不明显,相同时间下,介损随试验电压升高有所增长;在受潮中期,介损随时间的变化呈现明显增长趋势,并在120 h时介损达到峰值;在受潮末期,介损随着时间的增加呈现下降趋势,整个过程介损增量未超过规程规定值,可考虑降低规程规定值。在FDS的低频段0.001~0.01 Hz区间范围内可明显区分受潮套管和不受潮套管,1 mHz介损特征尤其明显。因此建议套管出厂及运行增加FDS低频段测试,利用FDS低频段特征进行套管绝缘诊断。

**关键词:**套管;油纸绝缘;受潮;频域介电谱;介质损耗

**中图分类号:** TM855

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2021)02-0135-06

## 0 引言

油纸绝缘套管是变压器设备的重要组成部分,起绝缘、引流和支撑作用,其绝缘结构分内绝缘和外绝缘。内绝缘为圆柱形电容芯子,由油浸纸和铝箔极板组成;外绝缘为瓷套<sup>[1]</sup>。因套管密封设计不合理或安装维护不当导致套管密封失效进水受潮,进而造成套管绝缘故障甚至引起变压器停运或着火<sup>[2]</sup>。根据中国电力科学研究院近二十年收集的事故统计,油纸绝缘套管一旦发生绝缘放电性故障,则导致变压器火灾事故的发生率高达83%<sup>[3]</sup>。可见套管故障会直接引发变压器故障,造成巨大经济损失。

套管受潮是油纸绝缘套管绝缘故障的主要形式之一,会对电力系统的安全可靠运行造成极大威胁<sup>[4-8]</sup>。如2015年9月2日某水电站轻重瓦斯保护动作,主变高低压侧断路器跳闸,套管油纸绝缘存在明显电弧放电痕迹。事后分析认为,套管密封不良造成绝缘受潮导致绝缘劣化,运行中产生局部放电并不断发展至套管导杆与法兰盘之间油纸绝缘击穿<sup>[9-10]</sup>。2005年4月30日某换流站换流变保护动作,换流变压力释放阀冒油,套管储油柜移位。套管解体发现电容屏间有严重电弧碳化通道,检查发现套管头部螺栓使用不当,有明显进水通道,造成绝缘受潮,引发故障<sup>[11-13]</sup>。

目前国内外关于水分对变压器油及绝缘纸板的影响研究较多,但针对套管油纸绝缘受潮特征的研究较少。现行《电力设备预防性试验规程》<sup>[14]</sup>对套管绝缘状况的判断作出了规定,但符合试验规程的套管仍有故障发生,因此有必要开展变压器油纸绝缘套管受潮缺陷的特征研究。华北电力大学王伟等人研究了水分含量对油纸绝缘沿面爬电的影响<sup>[15]</sup>,认为水分浓度的升高会显著降低沿面爬电的起始电压。研究显示频域介电谱(frequency domain spectroscopy, FDS)对油纸绝缘中的水分较敏感,可以通过FDS特征诊断油纸绝缘受潮状态<sup>[16-19]</sup>。已有研究将FDS方法应用于套管受潮状态的判断研究中<sup>[20-25]</sup>,但未明确给出受潮油纸绝缘套管的FDS特征。

为研究变压器油纸绝缘套管因密封失效引起的受潮缺陷对套管FDS的影响,文中研制了电场等值的套管试验模型,搭建了40.5 kV试验平台。对套管受潮不同静置时间(24 h, 48 h, 72 h, 96 h, 120 h, 144 h, 168 h, 192 h, 216 h)下介损电压特性和0.001 Hz~1 kHz的介损频率特性分别进行测试,分析其变化趋势,并通过数据对比获得受潮套管的诊断特征量。

## 1 研究平台及试验方法

### 1.1 试验模型

为便于实验室进行试验研究,文中研究采用了电场等值的套管模型。试验所用套管模型如图1所示,套管外套采用透明有机玻璃,便于观察试验现

收稿日期:2020-10-08;修回日期:2020-11-19

基金项目:国家电网有限公司科技项目(SCJSDK00ZPJS190-0269)

象,套管电容芯子由 0.125 mm 厚的电缆绝缘纸和 0.007 mm 厚的铝箔组成。套管模型的额定电压为 40.5 kV,最高工作相电压为 23.5 kV。套管径向场强最大值为 4.52 kV/mm,最小值为 2.21 kV/mm;上轴向场强最大值为 0.19 kV/mm,最小值为 0.11 kV/mm;下轴向场强最大值为 0.22 kV/mm,最小值为 0.18 kV/mm。该模型由国内某套管厂家加工制作,生产和处理工艺和实际油纸绝缘套管一致,保证套管模型的电气性能满足 GB/T 4109—2008《交流电压高于 1 000 V 的绝缘套管》<sup>[26]</sup> 的要求。

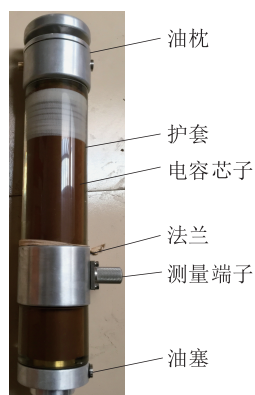


图 1 试验套管模型

Fig.1 Experimental bushing model

### 1.2 受潮模拟

为模拟套管头部密封不良引起的潮气入侵造成套管受潮缺陷,利用图 2(a)所示的超声波空气加湿器,从套管头部注油口部位注入水汽,从泄压阀部位排出水汽,对套管模型头部加湿 2 h,加湿结束后静置。头部加湿效果如图 2(b)所示,尾部积水分布如图 2(c)所示。空气加湿器的流量为 200 mL/h,水汽颗粒约 5 μm。该受潮模拟方法先使套管内变压器油受潮,然后水分从油中向纸中迁移使绝缘纸受潮,与实际套管受潮过程相似。

### 1.3 试验平台

文中建立了一套 40.5 kV 套管绝缘缺陷工频介损及 FDS 试验平台,如图 3(a)所示,所采用的试验回路如图 3(b)所示。采用并联回路的方法测试套管模型的局部放电脉冲电流信号,以保证试验过程中测量设备的安全。采用相对比较法,测试套管模型的介质损耗正切值( $\tan \delta$ )及电容量,以实现介损的在线监测。介损在线测量装置主要由高精度穿心式电流传感器和测量主机 2 个部分组成,介损的测量精度为 $\pm 0.04\%$ 。FDS 测试系统的输出电压峰值范围为 0~200 V,输出电流峰值为 0~50 mA,频率范围为 0.1 mHz~10 kHz。

### 1.4 试验方法

(1) 利用介损测试仪对 40.5 kV 套管在受潮

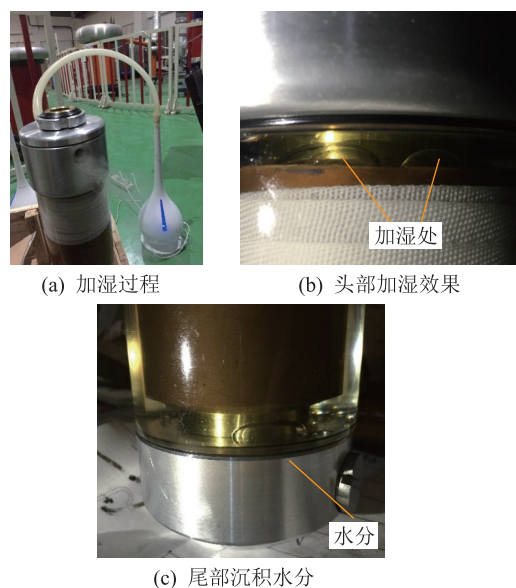
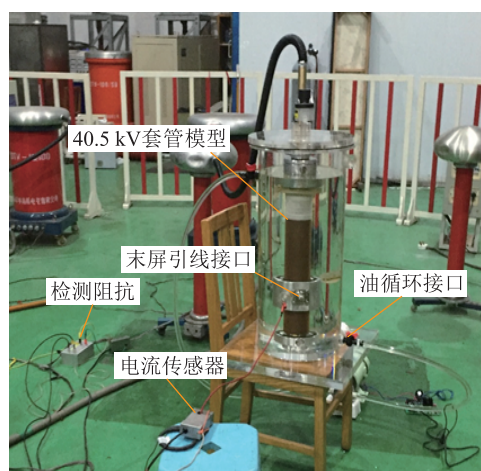
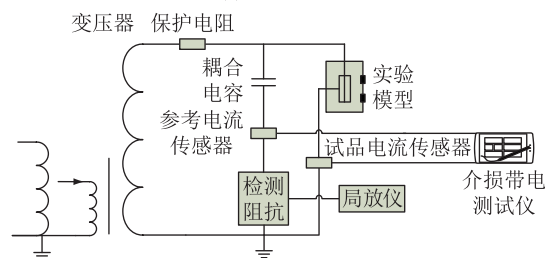


图 2 套管模型加湿过程

Fig.2 Process of moisture ingress of bushing model



(a) 平台实物



(b) 40.5 kV 套管试验回路

图 3 40.5 kV 套管试验研究平台

Fig.3 Experiment platform of 40.5 kV bushing

前、受潮后不同静置时间下的介损电压特性分别进行测试。文中采用阶梯升压法,试验电压由 10 kV 逐级升至 30 kV,升压步长为 5 kV/5 min。阶梯升压示意如图 4 所示。

(2) 利用介电响应测试仪对受潮前、受潮后不同静置时间下 0.001 Hz~1 kHz 的介损频率特性分别进行测试。FDS 测试电压峰值为 200 V。

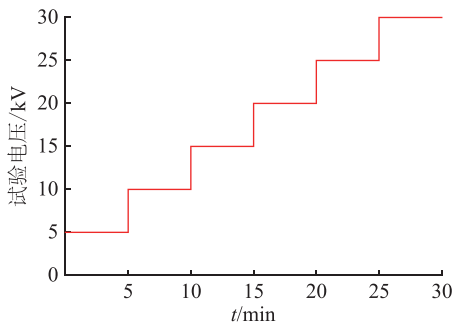


图4 阶梯升压示意

Fig.4 Schematic diagram of ladder booster

## 2 结果及分析

### 2.1 介质损耗正切值变化过程

40.5 kV 套管在受潮前、受潮后不同静置时间下介损电压特性曲线如图 5 所示。

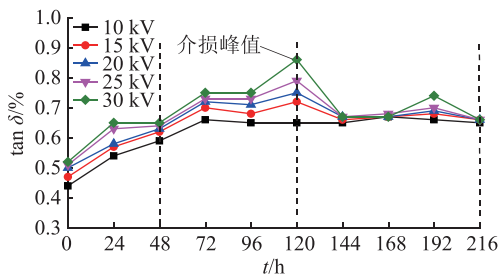


图5 介损变化趋势

Fig.5 Change trend of dielectric loss

由图 5 可以看出,潮气入侵 40.5 kV 套管后,在受潮初期 0—48 h,相同试验电压下介损随时间的变化呈现微弱增长趋势,但并不明显;相同时间下,不同试验电压下介损有所增长。在受潮中期静置 48—120 h 阶段,介损随时间的变化呈现明显增长趋势,并在 120 h 时介损达到峰值,此时阶梯升压下介损增量达到峰值,介损增量+0.22%。在受潮末期静置 120—216 h 阶段,介损随着时间的增加呈现下降趋势。介损最大值及介损增量均未超过 DL/T 596—1996<sup>[14]</sup> 及南网 Q/CSG 114002—2011<sup>[27]</sup> 规程的规定值。

受潮缺陷套管的特征量变化规律与时间有较强的相关性,利用传统的介损检测方法需要把握最佳时机。现有规程 DL/T 596—1996 及南网 Q/CSG 114002—2011 规定的介损增量 0.3% 偏大,建议介损增量应小于 0.2%。利用高电压介损法,可在受潮初期及时发现缺陷套管。

### 2.2 FDS 变化过程

将受潮后不同静置时间的 40.5 kV 套管 FDS 绘制成图,见图 6。在 FDS 的低频段 0.001~0.01 Hz 区间范围内可明显区分受潮套管与不受潮套管,

1 mHz 介损特征尤其明显。受潮后 0—216 h 内, FDS 低频段特征区间逐渐上升,而 50 Hz 介损变化特征不明显。建议出厂及运行增加 FDS 低频段测试,利用 FDS 低频段特征进行套管绝缘诊断。

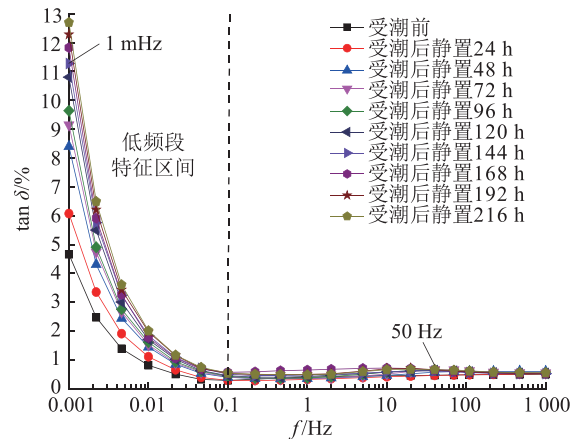


图6 FDS 特征变化趋势

Fig.6 Change trend of FDS characteristic

### 2.3 工频介损和低频介损对比

为了比较高电压下工频介损与 FDS 低频介损对受潮程度的灵敏性,选取相同时间下 10 kV 工频介损与 1 mHz 低频介损进行比较,如图 7 所示。随着静置时间的增加,10 kV 工频介损变化并不明显,而 1 mHz 低频介损呈现明显的增长趋势。1 mHz 低频介损最大值为 12.68%,其增量最大值为 8.02%。而现有规程 DL/T 596—1996 及南网 Q/CSG 114002—2011 规定的介损值应低于 1%,介损增量应低于 0.3%。1 mHz 低频介损值无论在增量还是数值方面,均比工频介损灵敏。

分析认为低频介损更灵敏的原因是,受潮情况下,套管芯子受潮与干燥区域的等效电阻、等效电容不相匹配。在超低频电场作用下,受潮层与干燥层间的界面极化增强,界面存在电荷的积累,弛豫效应明显。

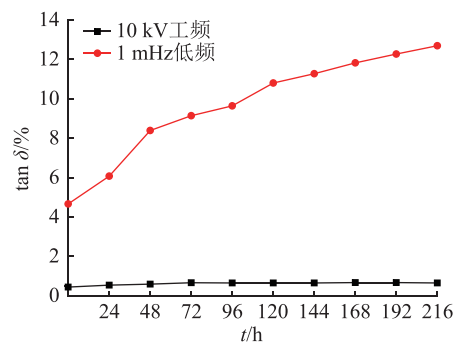


图7 10 kV 工频与 1 mHz 低频的 tan δ 比较

Fig.7 Comparison of tan δ for 10 kV power frequency and 1 mHz low frequency



### 3 现场应用

为更好地验证实验室获得的套管受潮 FDS 特征规律,对实际 500 kV 疑似受潮套管 A、正常套管 C、新出厂套管 Z 在室温下分别进行 FDS 测试,3 支套管测试工况如图 8 所示。

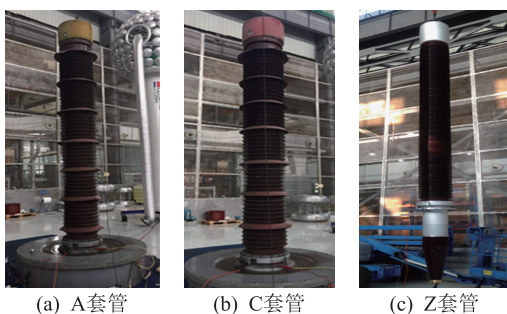


图 8 500 kV 套管 FDS 现场测试

Fig.8 FDS field test of 500 kV bushings

由图 9 可见,A 套管 1~10 mHz 介损明显高于 C 套管,0.001 Hz 介损值超过 10%。A 套管在低频范围(1 mHz ~0.1 Hz)段 FDS 曲线明显高于 C 套管和 Z 套管,说明 A 套管介电特性已发生改变。而 C 套管的 FDS 曲线与新套管的 FDS 曲线基本重合,该套管在 1 mHz~1 kHz 频段介损值始终低于 0.5%。测试完成后,对异常 A 套管进行解体并取纸样进行纸中含水量测试。采用卡尔费休滴定法实测套管纸样的平均含水量约为 1.1%,而 DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》规定,运行中变压器纸板 500 kV 电压等级变压器纸板含水量一般不大于 1%,因此确定 A 套管为受潮套管,FDS 低频介损特征明显。

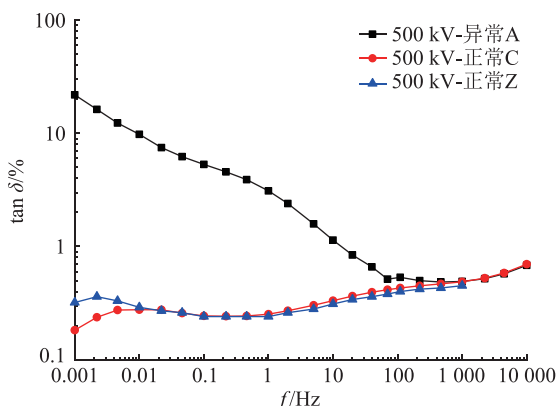


图 9 500 kV 套管的 FDS 特征

Fig. 9 FDS characteristic of 500 kV bushings

### 4 结语

受潮缺陷套管的特征量变化规律与时间有较强相关性,利用传统的介损检测方法需要把握最

佳时机。现有规程规定的介损增量 0.3% 偏大,建议规程介损增量应小于 0.2%。FDS 对受潮缺陷检测灵敏,建议利用 FDS 特征量诊断套管受潮缺陷。发现潮气入侵套管后,FDS 的 1 mHz 低频介损是关键特征量,1 mHz 低频介损值无论是增量还是数值均比工频介损灵敏。在潮气侵入后 0—216 h 中,FDS 的低频介损随静置时间增长而增大,其最大增量为 8.02%。建议出厂及运行增加 FDS 低频段(1 mHz~0.1 Hz)测试,利用 FDS 低频段特征进行套管绝缘诊断,建议 1 mHz 介损增量应小于 5%。

#### 参考文献:

[1] 刘其昶. 电气绝缘结构设计原理:下册[M]. 北京:机械工业出版社,1981.  
LIU Qichang. Electric insulation structure design principle: part II [M]. Beijing: China Machine Press, 1981.

[2] 深圳供电局有限公司. 输变电设备典型缺陷及故障案例分析[M]. 北京:中国电力出版社,2016.  
Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd. Analysis of typical defects and failure cases of electric transmission ans transformation equipment [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.

[3] 赵志刚,徐征宇,王健一,等. 大型电力变压器火灾安全研究[J]. 高电压技术,2015,41(10):3378-3384.  
ZHAO Zhigang, XU Zhengyu, WANG Jianyi, et al. Research on the fire safety of large power transformer [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3378-3384.

[4] 杨玥坪,何聪,李军浩. 工频恒定电压下 SF<sub>6</sub> 气体中沿面放电发展过程研究[J]. 电力工程技术,2020,39(1):145-150.  
YANG Yueping, HE Cong, LI Junhao. Development process of surface discharge in the SF<sub>6</sub> gas under constant voltage of power frequency [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 145-150.

[5] WANKOWICZ, BIELECKI J, SZROT M, et al. HV bushing failure in service, diagnostics and modelling of oil-type bushings [J]. Water and Eenergy International, 2010, 67(7).

[6] SETAYESHMEHR A, AKBARI A, BORSI H, et al. On-line monitoring and diagnoses of power transformer bushings [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(3):608-615.

[7] 俞华,段玮楠,申平. 套管诱发变压器突发性故障原因及建议[J]. 山西电力,2015(3):15-18.  
YU Hua, DUAN Weinan, SHEN Ping. Fault analysis and suggestion for sudden accident of transformer caused by bushing defect [J]. Shanxi Electric Power, 2015(3): 15-18.

[8] 古海峰,朱思旭,张玲玲. 一起变压器套管进水受潮缺陷分析[J]. 河北电力技术,2016,35(2):52-54.  
GU Haifeng, ZHU Sixu, ZHANG Lingling. Defects analysis on transformer casing inlet damp [J]. Hebei Electric Power, 2016, 35(2): 52-54.

[9] 林智勇,张达敏,郑运鸿,等. 混联等效电路 p 参数诊断变压器油纸绝缘老化研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48



- (15):164-169.
- LIN Zhiyong, ZHANG Damin, ZHENG Yunhong, et al. Investigation on the  $p$  parameter of hybrid equivalent circuit to diagnose transformer oil-paper insulation aging [J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(15):164-169.
- [10] 杨胜利, 谢建荣, 肖潇. 变压器套管受潮放电引起的事故分析及预防措施 [J]. *水电站设计*, 2019, 35(2):76-78.
- YANG Shengli, XIE Jianrong, XIAO Xiao. Accident analysis and preventive measures for transformer bushing damp discharge [J]. *Design of Hydroelectric Power Station*, 2019, 35(2):76-78.
- [11] 李应文, 徐兵, 吴力娜. 换流变压器套管受潮分析及预防措施 [J]. *变压器*, 2008, 45(4):71-73.
- LI Yingwen, XU Bing, WU Li'na. Wetted analysis and preventive measures of bushing in converter transformer [J]. *Transformer*, 2008, 45(4):71-73.
- [12] 刘庆珍, 张晓燕, 蔡金锭. 基于降维技术与  $K$ -means 聚类的油纸绝缘状态综合灰评估 [J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(8):62-70.
- LIU Qingzhen, ZHANG Xiaoyan, CAI Jinding. Comprehensive grey evaluation for oil-paper insulation based on dimension reduction techniques and  $K$ -means cluster [J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(8):62-70.
- [13] 林晓宁, 蔡金锭. 基于粗糙集理论的变压器油纸绝缘状态评估 [J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(7):22-29.
- LIN Xiaoning, CAI Jinding. Evaluation of transformer oil-paper insulation based on rough set theory [J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(7):22-29.
- [14] 中华人民共和国电力工业部. 电力设备预防性试验规程: DL/T 596—1996 [S]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- Ministry of Electricity Industry of the People's Republic of China. Preventive test code for electric power equipment: DL/T 596—1996 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 1996.
- [15] 王伟, 周冰, 徐剑峰, 等. 油纸绝缘系统中含高水分绝缘纸板的沿面爬电特性 [J]. *高电压技术*, 2011, 37(8):1924-1929.
- WANG Wei, ZHOU Bing, XU Jianfeng, et al. Creepage discharge performance of high moisture pressboard in oil-paper insulation system [J]. *High Voltage Engineering*, 2011, 37(8):1924-1929.
- [16] 董明, 刘媛, 任明, 等. 水分含量与分布对油纸绝缘频域介电谱影响的有限元仿真与研究 [J]. *高电压技术*, 2014, 40(11):3403-3410.
- DONG Ming, LIU Yuan, REN Ming, et al. Impacts of moisture content and distribution on frequency domain spectroscopy of oil-paper insulation system by FEM approach [J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(11):3403-3410.
- [17] 廖瑞金, 郭沛, 周年荣, 等. 水分和老化对油浸绝缘纸温度介电谱和活化能的影响 [J]. *高电压技术*, 2014, 40(5):1407-1415.
- LIAO Ruijin, GUO Pei, ZHOU Nianrong, et al. Influence of water content and aging on temperature domain dielectric spectroscopy and activation energy of the transformer oil impregnated papers [J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(5):1407-1415.
- [18] 廖瑞金, 马志钦, 郝建, 等. 水分对变压器油和绝缘纸频域介电谱特性的影响 [J]. *高电压技术*, 2010, 36(12):2869-2875.
- LIAO Ruijin, MA Zhiqin, HAO Jian, et al. Influence of water content on frequency domain spectroscopy characteristics of transformer oil and insulation paper [J]. *High Voltage Engineering*, 2010, 36(12):2869-2875.
- [19] 林燕桢, 蔡金锭. 回复电压极化谱特征量与油纸绝缘变压器微水含量关系分析 [J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(5):148-153.
- LIN Yanzhen, CAI Jinding. Analysis of the relationship between the characteristics of the return voltage polarization spectrum and micro water content of oil-paper insulation transformer [J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(5):148-153.
- [20] 戴佳民, 齐波, 李成榕, 等. 油浸纸套管尾部受潮故障模拟及早期特征 [J]. *电工技术学报*, 2018, 33(11):2613-2619.
- DAI Quanmin, QI Bo, LI Chengrong, et al. Fault simulation and early characteristics of tail moisture in oil-immigrated paper bushing [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(11):2613-2619.
- [21] 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 Quanmin, 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.
- [22] 徐肖伟, 刘伟迪, 王科, 等. 水分对电容式油纸绝缘套管频域介电谱的影响 [J]. *绝缘材料*, 2018, 51(2):62-67.
- XU Xiaowei, LIU Weidi, WANG Ke, et al. Influence of water content on frequency domain spectroscopy of capacitive oil-paper insulation bushing [J]. *Insulating Materials*, 2018, 51(2):62-67.
- [23] 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.
- [24] 董明, 刘媛, 任明, 等. 油纸绝缘频域介电谱解释方法研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(4):1002-1008.
- DONG Ming, LIU Yuan, REN Ming, et al. Explanation study of frequency-domain dielectric spectroscopy for oil-paper insulation system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(4):1002-1008.
- [25] 姚森敬, 田杰, 汤明杰, 等. 基于频域介电谱法的变压器油纸绝缘套管受潮状况分析 [J]. *南方电网技术*, 2014, 8(4):

52-56.

YAO Senjing, TIAN Jie, TANG Mingjie, et al. Study on moisture assessment of oil-paper insulated bushings based on frequency domain spectrum[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(4): 52-56.

[26] 中华人民共和国国家技术监督局. 交流电压高于 1 000 V 的绝缘套管: GB/T 4109—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

State Bureau of Technical Supervision of the People's Republic of China. Insulated bushings for alternating voltages above 1 000 V: GB/T 4109—2008[S]. Beijing: China Standard Press, 2009.

[27] 中国南方电网有限责任公司. 电力设备预防性试验规程: Q/CSG 114002—2011[S]. 广州: 中国南方电网有限责任公司, 2011.

China Southern Power Grid Co., Ltd. Regulations of test for electric equipment: Q/CSG 114002—2011[S]. Guangzhou: China Southern Power Grid Co., Ltd., 2011.

作者简介:



张毅涛

张毅涛(1994),男,硕士在读,研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail: zytncpeu@163.com);

齐波(1980),男,博士,教授,研究方向为电气设备绝缘在线监测与故障诊断、空间电场/电荷测量技术、新型介电材料的研制与应用;

林元棣(1988),男,博士,工程师,从事变压器状态评估和试验工作。

### FDS characteristic of damp-affected oil-paper insulation transformer bushings

ZHAGN Yitao<sup>1</sup>, QI Bo<sup>1</sup>, LIN Yuandi<sup>2</sup>, SHEN Yinhe<sup>1</sup>, WU Yiming<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Source (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** It has been reported that frequency domain spectroscopy (FDS) is sensitive to moisture content for oil-paper insulation. In order to reflect the characteristics of frequency domain dielectric spectrum about damp-affected defect in transformer oil paper insulation bushings, comparative study for the influence of voltage value and frequency value on dielectric loss from 0.001 Hz to 1 kHz is carried out. The results show that the value of  $\tan \delta$  increases slightly with time at the same value of test voltage in the first stage of the process of rising damp. At the same time, an increase of the value of  $\tan \delta$  is seen with the increasing test voltage. In the second stage of the process of rising damp, the value of  $\tan \delta$  increases remarkably with time, and reaches its peak at the time point of 120 h. At the third stage of the process of rising damp, the value of  $\tan \delta$  decreases with time. The value of  $\tan \delta$  in the whole process does not exceed the values of standard, and the value of standard is suggested to be reduced. In the low frequency band from 0.001 to 0.01 Hz, it is easy to distinguish the damp-affected bushings from the non-damp-affected bushings by frequency domain dielectric spectrum, especially at the frequency of 1 mHz. Therefore, it is recommended that FDS low-frequency test is used for insulation diagnosis.

**Keywords:** bushing; oil-paper insulation; damp-affected; frequency domain spectroscopy (FDS); dielectric loss

(编辑 钱悦)