

DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2020.02.013

1 000 MW 核电机组主变高压套管介损与 环境温度关系试验研究

Experimental study on relationship between the dielectric loss of main
transformer high-voltage bushing and ambient temperature
in a 1 000 MW nuclear power unit

贾辉¹, 曹浩², 刘希志¹, 李伟超¹, 陈伟¹, 高建强²

JIA Hui¹, CAO Hao², LIU Xizhi¹, LI Weichao¹, CHEN Wei¹, GAO Jianqiang²

(1. 辽宁红沿河核电有限公司 辽宁 大连 116000; 2. 华北电力大学 动力工程系 河北 保定 071003)

(1. Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Company Limited, Dalian 116000, China; 2. Department
of Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

摘 要: 变压器套管介损大小受环境温度影响明显, 北方地区年气温变化大, 会引起变压器套管介损的较大幅度变化, 不利于核电厂变压器套管的安全运行。对此, 以沈阳某核电厂主变压器高压套管为对象, 构建了一个密闭试验系统, 通过制冷设备和制热设备改变系统内环境温度, 研究了环境温度变化对套管电容量、介损的影响规律, 结果表明: 环境温度在 $-20 \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 套管电容量随温度的升高线性增大; 套管介损随环境温度的升高而明显下降, 但当环境温度高于 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后, 介损变化不大; 环境温度低于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 介损值已超过允许标准 0.7% , 为此要加强该变压器套管在冬季的保护措施。

关键词: 核电站; 高压套管; 介损; 电容量; 环境温度; 试验系统

中图分类号: TM 623.7 文献标志码: A 文章编号: 1674-1951(2020)02-0068-04

Abstract: Dielectric loss of transformer bushing is obviously affected by ambient temperature. The great annual temperature change in the northern China will lead to a large variety of transformer bushing dielectric loss, which is not conducive to the safe operation of transformer bushings in nuclear power plants. Hence, a closed testing system was constructed on a high-voltage bushing of a main transformer in a Shenyang nuclear power plant. By adjusting the ambient temperature in the system through refrigeration equipment and heating equipment, the influence of ambient temperature on the capacitance and dielectric loss of the bushing was studied. The results show that the bushing capacitance increases linearly with the temperature rise when the ambient temperature is between -20 and $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the bushing dielectric loss decreases significantly with the rise of ambient temperature, but keeps steady when the ambient temperature is higher than $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. When the ambient temperature is lower than $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, the dielectric loss will exceed the allowable standard by 0.7% . Therefore, a more prudent protection should be taken on transformer bushings in winter.

Keywords: nuclear power plant; high voltage bushing; dielectric loss; capacitance; ambient temperature; test system

0 引言

高压套管是变压器的重要组成部分, 其主要功能是通过高压引线从变压器箱中抽出高、中、低压绕组, 固定引线并与外壳保持良好的绝缘。根据套管的绝缘结构, 可分为纯瓷套管、充油套管和电容式套管, 其中电容式高压套管广泛应用^[1]。

套管介质损耗(以下简称介损)大小会受环境

温度、湿度和绝缘表面污秽程度的影响, 探究环境温度对套管介损的影响有利于加强对套管的保护。在近些年的研究中, 律方成分析了环境温度和湿度对电容型设备绝缘状况的影响, 并计算了主要环境因素对 $\tan\delta$ 影响的关联度^[2]; 李峰建立了环境温度、湿度、降雨等对变压器套管介损的影响模型, 通过建模分析提出了相应的预警策略^[3]。刘欢分析了湖北凤凰山变电站油纸电容型套管的历年试验数据, 探究了套管介损与环境温度的关系^[4]。王永强完成了人工气候室内变压器套管介损的在线测量试验, 以

收稿日期: 2019-06-21; 修回日期: 2020-01-21

此为基础分析了环境因素对电容型设备介损的影响情况^[5]。

与常规发电机组相比,核电机组对设备的安全性要求更高,而我国北方地区全年气温变化幅度较大,该区域的核电机组主变压器面对极端环境温度,其高压套管的介损值可能偏差较大,给套管运行状况的分析、判断带来诸多难题。本文以沈阳某核电厂型号为 EKTG 1800-550/2000 E10 的高压套管为例,探究环境温度对套管介损的影响。

1 试验系统设计

1.1 介损测量

介损是绝缘材料在电场下,由于自身的介质电导和介质极化而导致的能量损耗。其表达式如下:

$$P = U^2 \omega C_p \tan \delta = \frac{U^2 \omega C_s \tan \delta}{1 + \tan^2 \delta}, \quad (1)$$

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega C_p R_p} = \omega C_s R_s, \quad (2)$$

式中: C_p 、 R_p 为并联等效电容和电阻; C_s 、 R_s 为串联等效电容电阻^[6]。

当外界条件一定时,介损 P 正比于介损角正切值 $\tan \delta$,所以在一定试验条件下,可以用 $\tan \delta$ 值来代替介损 P 。

$\tan \delta$ 可由介损仪进行测量。介损仪的内部分为标准侧和被试侧,分别通过标准电容器和被试品的电容信号,通过测量两侧的信号,确定两侧信号的幅值和相位关系,进而得出试品的电容量和介质损失角正切值 $\tan \delta$ ^[7]。

套管温度是影响套管介损大小的一个重要因素,温度变化会导致介质电阻率 ρ 发生变化,从而导致等效电阻的变化^[8]。当套管正常运行时,套管温度大小主要受两方面影响,一是套管自身内部介损而产生的热量,二是套管与外界环境的换热。当套管处于理想的试验环境下,不考虑套管自身产生的热量及其他因素的影响,可以认定介损 P 仅随环境温度 t 变化:

$$P = f(\rho) = f(t)。 \quad (3)$$

1.2 试验系统

本试验在温度可调控的试验环境中进行,试验系统如图1所示。

制冷设备和制热设备负责调节实验室内的温度,2个数字温度计放于实验室的两侧对温度进行检测,温度偏差不能超过 0.5℃。为了尽量保证实验室温度分布均匀,冷热风进口各设有2个,分别位于实验室上方和下方。为防止套管与地面直接接触而造成热量的传递,套管要置于实验室支架上,以减

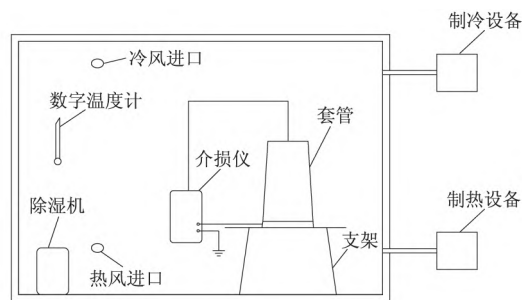


图1 试验示意

Fig.1 Experimental schematic diagram

少导热对套管温度的影响。

本次试验中试验仪器与被试品在同一环境下进行测试,为防止温度过低对介损仪的影响,低温环境下,介损仪每次启动测试前先预热 30 min。

除湿机负责调节实验室湿度,确保湿度在 68%~70% 范围内。

介损仪和套管在实验室内按正接法进行连接,套管 $\tan \delta$ 为套管主电容上的介损测量值。在测量变压器套管 $\tan \delta$ 时,与被试套管相连的所有绕组端连在一起加压,其余绕组端均接地,未屏接电桥,正接线测量^[9]。

1.3 环境温度变化分析

图1中的套管与试验环境主要的换热方式为对流换热和辐射换热。为使套管内部温度一致,在改变试验环境温度后,应当保持足够的时间 τ ,使系统换热达到稳定,再进行数据测量和记录。

根据能量守恒定律,套管自身温度变化模型如下:

$$(m_1 c_1 + m_2 c_2) \frac{dt}{d\tau} = Q_1 + Q_2, \quad (4)$$

式中: m_1 、 m_2 分别为套管和套管油的质量; c_1 、 c_2 为套管和套管油比热容; Q_1 、 Q_2 为套管表面与环境的对流换热量和辐射换热量。

根据式(4),可以估算环境温度变化 1℃,套管达到热平衡所需的时间。当环境温度由 -20℃ 升高到 -19℃ 时,根据表1数据可得 $\tau \geq 1.46$ h。

表1 估算 τ 所需的数据参数

Tab.1 Parameters required to estimate τ

项目	数值
套管总长/mm	2310
油端绝缘长度/mm	1400
最大外径/mm	329
套管油导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]	0.128
套管对流换热系数/[W·(m ² ·K) ⁻¹]	15
套管表面发射率	0.7
套管油的密度/(kg·m ⁻³)	895

但该计算方法存在很大误差,式(4)为简化的集总参数模型,没有考虑套管各种内部导热过程,也

没有考虑制冷制热设备与实验室环境达到热平衡所需时间。因此,当环境温度变化 1°C 时,整个试验系统达到热平衡所需要的时间比按式(4)估算的时间还要长。

综合分析上述因素,本试验过程中,在环境温度变化后,需要连续维持16 h后再进行相关参数测量,确保系统有足够的时间达到换热稳定^[10-13]。

2 试验结果及分析

2.1 试验过程

在常温条件下测出高压套管的介损值和电容,并记录数据。

将试验环境温度设定到 -20°C 并维持16 h,确保套管内部与外部界环境充分换热达到稳态,再进行测量。

将试验环境温度每升高 1°C 都维持16 h后,再测量、记录数据。

2.2 试验结果及分析

本试验环境温度的变化范围是 $-20\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。试验结果如图2、图3所示。

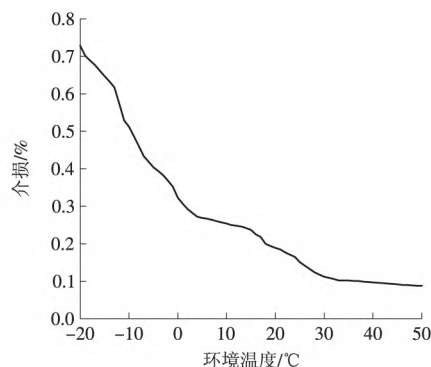


图2 介损随温度变化曲线

Fig. 2 The dielectric loss varied with temperature

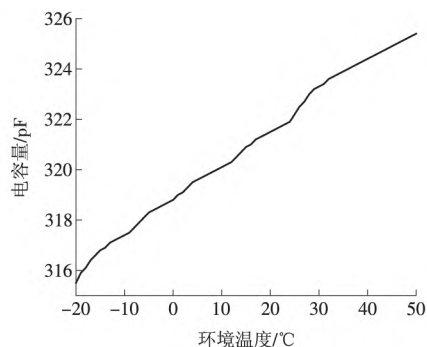


图3 电容量随温度变化曲线

Fig. 3 The capacitance varied with temperature

从上述结果中可以看出,随环境温度升高介损值不断下降。温度区间在 $-20\sim 0^{\circ}\text{C}$ 时,温度升高介损值下降速度较快,温度每升高 1°C ,介损约下降0.020百分点; $0\sim 30^{\circ}\text{C}$ 时,介损下降速度有所减小,

温度每升高 1°C ,介损下降约0.007百分点;温度高于 30°C 时,介损大小趋于稳定。

根据试验结果,需要特别注意的是:当环境温度低于 -18°C 时,根据《中国南方电网公司预防性试验规程》的要求,介损值已超过允许标准0.7%,此时要加强对套管的监测,防止因介损偏大而出现安全问题^[14]。

高压套管电容量一直随温度升高呈线性趋势增大,温度每升高 1°C ,电容量约增长0.141 pF。

3 结论

某核电站电容式高压套管介损随环境温度变化的试验,可以得出以下结论:

(1) 随温度升高该套管电容不断上升,介损不断下降,在 $-20\sim 0^{\circ}\text{C}$ 范围内,介损下降速度较快, $0\sim 30^{\circ}\text{C}$ 范围内下降速度有所减缓,环境温度高于 30°C 后介损大小趋于稳定。

(2) 要加强极端环境温度下对高压套管的保护,尤其是冬季,此时套管介损偏高,电容偏差较大。

参考文献:

- [1] 张会平,涂明涛,王晋昌,等. 500 kV 变压器套管介损偏大的原因分析[J]. 高电压技术, 2000(5): 74-75.
ZHANG Huiping, TU Mingtao, WANG Jinchang, et al. Cause analysis of the large dielectric loss of 500 kV transformer bushings[J]. High Voltage Technology, 2000(5): 74-75.
- [2] 律方成,王永强,李和明. 基于环境因素影响规律分析的电容型设备绝缘状况诊断方法[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2009, 36(1): 5-9.
LU Fangcheng, WANG Yongqiang, LI Heming. Diagnosis method of insulation condition of capacitive equipment based on the analysis of the influence law of environmental factors[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2009, 36(1): 5-9.
- [3] 李峰,孙旭东,王红斌,等. 考虑气象环境影响的变压器套管介损监测预警策略[J]. 高压电器, 2017, 53(7): 159-166.
LI Feng, SUN Xudong, WANG Hongbin, et al. Monitoring and early warning strategy for dielectric loss of transformer casing considering the influence of meteorological environment[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(7): 159-166.
- [4] 刘欢,赵海涛,侯晓松,等. 浅谈温度对油纸电容型套管介质损耗的影响[J]. 湖北电力, 2013, 37(7): 33-34, 37.
LIU Huan, ZHAO Haitao, HOU Xiaosong, et al. Talking about the effect of temperature on the dielectric loss of oil-paper capacitor bushings[J]. Hubei Electric Power, 2013, 37(7): 33-34, 37.

- [5]王永强. 考虑环境影响的电容型设备绝缘监测与故障诊断研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2009.
- [6]刘希志, 高开健, 贾辉, 等. 基于温度变化的油-SF₆型套管介损值变化的研究[J]. 变压器, 2018, 55(1): 42-44.
LIU Xizhi, GAO Kaijian, JIA Hui, et al. Study on the change of dielectric loss of oil-SF₆ bushing based on temperature change[J]. Transformer, 2018, 55(1): 42-44.
- [7]陈利念. 110 kV 变压器套管介损偏大的原因分析[J]. 变压器, 2003(2): 41-42.
CHEN Linian. Analysis of causes of large dielectric loss of 110 kV transformer bushing[J]. Transformer, 2003(2): 41-42.
- [8]张鹏, 侯睿, 翟国柱. 对主变套管介损偏大故障现有理论解释的讨论[J]. 变压器, 2016, 53(8): 68-72.
ZHANG Peng, HOU Rui, ZHAI Guozhu. Discussion on existing theoretical explanation of large dielectric loss failure of main transformer casing[J]. Transformer, 2016, 53(8): 68-72.
- [9]田成凤. 变压器电容式套管电容量及介损的正确测量[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(4): 147-149.
TIAN Chengfeng. Correct measurement of capacitance and dielectric loss of capacitor casing of transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(4): 147-149.
- [10]吴鑫杰. 充氮气油浸式变压器取油样技术探讨[J]. 华电技术, 2018, 40(2): 46-47.
WU Xinjie. Discussion on oil sampling technology of nitrogen filled oil immersed transformer[J]. Huadian Technology, 2018, 40(2): 46-47.
- [11]于文涛, 黄文峰, 马欣. 500 kV 主变压器套管末屏漏油

原因分析与处理[J]. 华电技术, 2018, 40(2): 25-28.

YU Wentao, HUANG Wenfeng, MA Xin. Causes analysis and treatment of end shield oil leak in 500 kV main transformer bushing[J]. Huadian Technology, 2018, 40(2): 25-28.

- [12]马金平. 变压器油中含气量超标检查与处理[J]. 华电技术, 2018, 40(7): 35-37.

MA Jinping. Inspection and processing of excessive gas content in transformer oil[J]. Huadian Technology, 2018, 40(7): 35-37.

- [13]康振华. 大型电力变压器油色谱在线监测技术与案例分析[J]. 华电技术, 2018, 40(3): 17-20.

KANG Zhenhua. On-line monitoring technology and case analysis of large power transformer oil chromatography[J]. Huadian Technology, 2018, 40(3): 17-20.

- [14]吴冬文, 胡道明. 变压器高压套管介损现场试验的分析与探讨[J]. 江西电力, 2011, 35(4): 5-7.

WU Dongwen, HU Daoming. Analysis and discussion on dielectric loss field test of transformer HV bushing[J]. Jiangxi Electric Power, 2011, 35(4): 5-7.

(本文责编: 白银雷)

作者简介:

贾辉(1977—), 男, 吉林松原人, 高级工程师, 从事变压器检修及试验方面的工作(E-mail: jiahui291@163.com)。

曹浩(1996—), 男, 山东泰安人, 在读硕士研究生, 从事供热管网仿真方面的研究工作(E-mail: 1979780899@qq.com)。

(上接第67页)

- [12]钱冠军, 王晓瑜, 徐先芝, 等. 输电线路绕击分散性的试验研究[J]. 高电压技术, 1998, 24(3): 17-20.
QIAN Guanjun, WANG Xiaoyu, XU Xianzhi, et al. Study of scatter of shielding failure on transmission line[J]. High Voltage Technique, 1998, 24(3): 17-20.
- [13]陈维江, 贺恒鑫, 钱冠军, 等. 基于长间隙放电研究雷电屏蔽问题的进展[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 1-13.
CHEN Weijiang, HE Hengxin, QIAN Guanjun, et al. Review of the lightning shielding against direct lightning strokes based on laboratory long air gap discharges[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(10): 1-13.
- [14]陈维江, 陈家宏, 钱冠军, 等. 正极性上行先导特性的模拟试验方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 22-31.
CHEN Weijiang, CHEN Jianhong, QIAN Guanjun, et al. A simulation test method for positive upward leaders[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(10): 22-31.

- [15]谭启德, 潘超, 陈铁, 等. 风机桨叶雷击灾害问题研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(1): 44-49.

TAN Qide, PAN Chao, CHEN Tie, et al. Study on the problems of lightning disaster faced by wind turbine blades[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(1): 44-49.

- [16]GLUSHAKOW B. 风电机组叶片、电子器件及人员防雷研究[J]. 风能, 2018(12): 60-65.

- [17]李新凯, 石可重, 李苏威, 等. 风电叶片新型雷击防护系统的实验与模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(3): 529-536.

LI Xinkai, SHI Kezhong, LI Suwei, et al. Experimental and simulation study on a new lightning protection system for wind turbine blades[J]. Journal of engineering thermophysics, 2019, 40(3): 529-536.

(本文责编: 张帆)

作者简介:

李新凯(1984—), 男, 河北保定人, 博士, 工程师, 从事风电雷击防护安全工作(E-mail: lixinkai@checc.com.cn)。