

换流变压器网侧 1 100 kV 环氧树脂浸纸电容式套管 绝缘结构与校核

郭贤珊¹, 陈 力¹, 陕华平¹, 廖文锋¹, 王坤涵², 王 鑫¹, 张韵萱^{1*}

(1. 国家电网有限公司直流技术中心, 北京 100052;

2. 国网内蒙古东部电力有限公司电力科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘 要:换流站在运换流变压器网侧 1 100 kV 套管普遍采用油浸纸电容式套管技术, 异常产气问题突出, 易发生渗漏油和内部放电故障。为提升 1 100 kV 网侧套管的安全性及可靠性, 本文设计了一种换流变压器网侧 1 100 kV 环氧树脂浸纸电容式套管。首先, 对套管的绝缘材料、绝缘结构、绝缘配合及制作工艺等展开研究; 然后, 完成套管电容芯子的理论设计, 并运用有限元方法对设计产品进行仿真分析; 最后完成了样机制作并开展型式试验。结果表明: 新研制的 1 100 kV 环氧树脂浸纸电容式套管的电场分布、热点温度及机械应力仿真结果均满足应用要求, 其中电场安全裕度提升了 3%。该套管已顺利通过国内外标准的型式试验, 各项考核指标符合预期。

关键词:换流变压器网侧; 环氧树脂浸纸电容式套管; 绝缘设计; 绝缘校核; 试验考核

Insulation structure design and verification of 1 100 kV epoxy resin impregnated paper capacitive bushing at grid side of converter transformer

GUO Xianshan¹, CHEN Li¹, SHAN Huaping¹, LIAO Wenfeng¹,

WANG Kunhan², WANG Xin¹, ZHANG Yunxuan^{1*}

(1. DC Technical Center of State Grid Corporation of China, Beijing 100052, China;

2. State Grid East Inner Mongolia Electric Power Research Institute, Hohhot 010010, China)

Abstract: The 1 100 kV bushing at the grid side of converter transformer in the converter station commonly adopts oil-impregnated paper capacitive bushing technology, which has prominent issues with abnormal gas production, prone to oil leakage and internal discharge failures. In order to improve the safety and reliability of 1 100 kV grid side bushings, we designed an epoxy resin impregnated paper capacitive bushing at the grid side of converter transformer. Firstly, the insulating materials, insulation structure, insulation coordination, and manufacturing processes of the bushing were studied. Secondly, the theoretical design of the bushing capacitive core was completed, and the designed product was simulated and analyzed using the finite element method. Finally, the prototype was produced and type tests were conducted. The results show that the simulation results of electric field distribution, hot-spot temperature, and mechanical stress of the newly developed 1 100 kV epoxy resin impregnated paper capacitive bushing all meet the application requirements, with an improvement of 3% in electric field safety margin. This bushing has successfully passed the type tests according to domestic and international standards, and all assessment indicators meet expectations.

Key words: grid side of converter transformer; epoxy resin impregnated paper capacitive bushing; insulation design; insulation verification; test assessment

0 引言

目前, 换流站在运换流变压器网侧 1 100 kV 套管普遍采用油浸纸电容式套管技术, 异常产气问题突出, 易发生渗漏油和内部放电故障^[1-4], 且传统拉杆式连接结构容易松脱, 可能引发严重爆燃事故, 不仅威胁现场人员与设备安全, 也不利于跨区直流输电系统的安全稳定运行^[5-8]。

2019 年国家电网公司先后解体检查 4 支 1 100 kV GOE 型乙炔超标套管, 发现 4 支套管的放电部位基本一致, 在套管压紧弹簧下定位环与导流管间有明显放电烧融痕迹, 定位油密封管、定位补偿管和导流管间存在多处放电痕迹^[9]。油浸纸套管在运行过程中, 其内部潜伏性缺陷会在严苛条件下逐渐显现并发展, 进而产生放电, 严重时可能引发套管着

火甚至爆燃事故,威胁电力系统的安全稳定运行。因此,有必要研发一种阻燃抗爆的高可靠 1 100 kV 换流变压器网侧套管。

环氧树脂浸纸(ERIP)电容式套管的主绝缘是采用高电气性能的绝缘纸缠绕电容芯子后,再在真空状态下浸渍环氧树脂,然后固化而成。该套管具有结构紧凑、体积小、质量轻、无油、免维护、防爆、可任意角度安装、运行中无局部放电等特点,近些年已广泛应用于 550 kV 以下电力系统中,但在 550 kV 以上,尤其 1 100 kV 电力系统中尚未广泛应用。

本文将围绕换流变压器网侧 1 100 kV ERIP 电容式套管的设计展开,重点从套管的绝缘材料、绝缘结构、绝缘配合及制作工艺等方面进行研究。通过对 1 100 kV ERIP 电容式套管的核心部件(即电容芯子)进行理论设计,并运用有限元方法对设计产品进行仿真分析,从理论上验证其可靠性。基于设计结构制作实际套管,并开展型式试验。

1 套管芯体绝缘结构设计

1.1 ERIP 电容式套管的设计

ERIP 电容式套管的基本结构如图 1 所示,主要由外绝缘(瓷套或硅橡胶外套)、电容芯子、法兰、载流导体等部件组成。

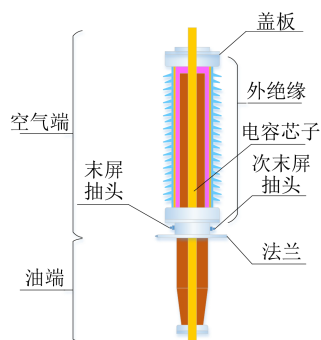


图1 环氧树脂浸纸电容式套管的基本结构

Fig.1 The basic structure of ERIP capacitive bushing

根据套管绝缘水平及结构配合尺寸要求,初步确定外绝缘(瓷套或硅橡胶外套)、电容芯子和导体的尺寸。然后进行套管的主绝缘即电容芯子的绝缘设计和校核,根据电容芯子绝缘结构校核情况,再基于其与外绝缘及导体等部件的配合调整尺寸,直至满足产品的技术要求,具体设计流程如图 2 所示。最后通过仿真计算优化下列项目:

(1)电场分布优化:采用计算机辅助设计并优化电容极板布置,改善径向和轴向电场分布,降低最大工作场强。

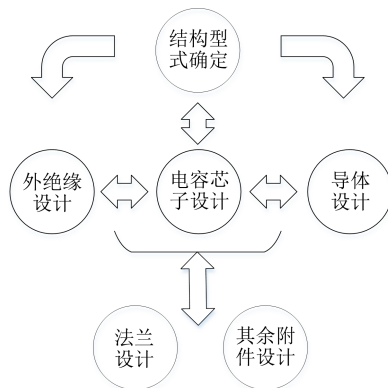


图2 环氧树脂浸纸电容式套管设计流程

Fig.2 The design process of ERIP capacitive bushing

(2)抗震设计优化:加强芯体上部卷制管区域的结构强度,通过增大壁厚和刚度提高抗震性能。

(3)模块化设计优化:实现芯体尾部与不同技术路线换流变压器的匹配,提高安装便利性和互换性。

ERIP 电容式套管设计的核心在于电容芯子的设计,它将直接影响套管的性能。一般来说,套管的直径主要取决于电容芯子绝缘材料的耐受电压,而长度则由套管表面的爬电电压决定^[10-13]。为保证套管的绝缘安全性,套管的绝缘性能必须满足以下条件:①正常服役期间不发生严重的局部放电;②1 min 工频交流耐压试验不发生滑闪放电;③雷电冲击和工频耐压试验后绝缘无破坏。

本文将对电容芯子的绝缘设计原理及产品仿真计算做详细阐述。

1.2 电容芯子(内绝缘)的设计原理

套管的主绝缘为多层同轴铝箔电极串联芯体结构,电容芯子中极板排列布置如图 3 所示,最内层极板又称零层极板,与导电管连通,最外层极板又称接地极板,与末屏抽头连通接地^[14-16]。

电容芯子的径向场强为 E_r ,沿芯子表面的轴向场强为 E_a 。径向场强过大会导致环氧浸纸绝缘材料击穿,轴向场强过大则会导致电容芯体表面发生滑闪。通过调节电容芯体中铝箔极板的半径和长度,使套管芯体实现等裕度设计,合理分布 E_r 和 E_a ,从而提高电容芯体的耐受电压,最大程度压缩套管体积。

2 套管的电、热、力场校核

2.1 电场仿真分析

ERIP 电容式套管油中界面简单,油中部分无瓷套,环氧材料直接与绝缘油接触,在满足现有换流

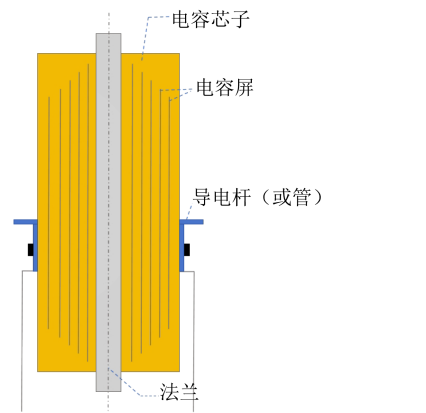


图3 套管芯子内部极板布置示意图
Fig.3 Schematic diagram of the layout of electrode plates in bushing core

变压器升高座尺寸的前提下,可充分利用油中尺寸增加绝缘厚度以提升其绝缘性能。将绝缘厚度增大15%,设计的1100 kV ERIP 电容式套管模型如图4所示。

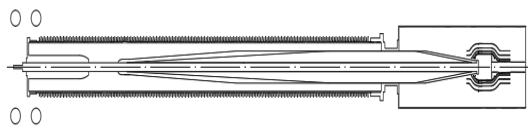


图4 1100 kV 环氧树脂浸纸电容式套管模型
Fig.4 1100 kV ERIP capacitive bushing model

设计的1100 kV ERIP 电容式套管在1200 kV工频电压下的电场仿真云图如图5所示。套管在1200 kV工频电压下的电场分布如图6所示,电容芯子沿径向的场强分布曲线如图7所示。

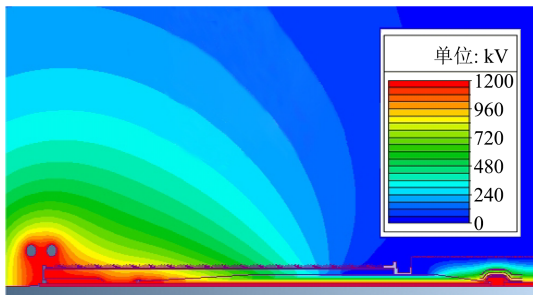


图5 1200 kV工频电压下套管的电场仿真云图
Fig.5 Simulation cloud image of electric field of the bushing under 1200 kV power frequency voltage

从图7可以看出,电容芯子的径向场强分布较为均匀,且最大径向场强为7.569 kV/mm(设计许可场强为10.445 kV/mm)。经计算新设计的套管径向电场安全裕度达到1.38倍。

设计的1100 kV ERIP 电容式套管在2400 kV冲击电压下的电场仿真云图如图8所示。套管在

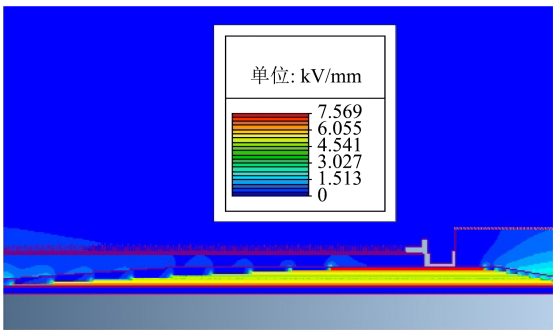


图6 1200 kV工频电压下套管的电场分布
Fig.6 Electric field distribution of the bushing under 1200 kV power frequency voltage

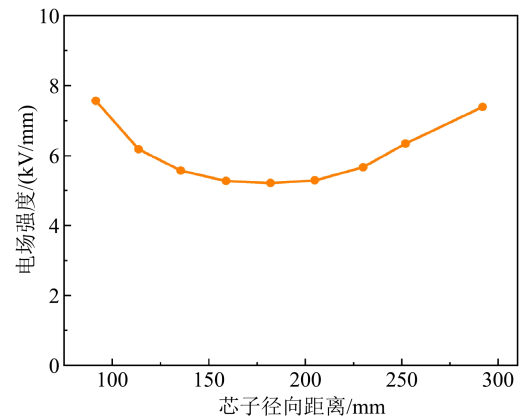


图7 1200 kV工频电压下电容芯子径向场强分布曲线
Fig.7 Radial field strength distribution curve of the capacitor core under 1200 kV power frequency voltage

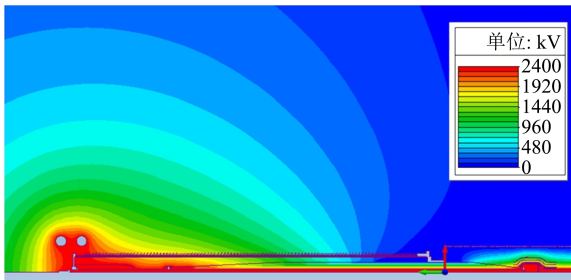


图8 2400 kV冲击电压下套管的电场仿真云图
Fig.8 Simulation cloud image of electric field of the bushing under 2400 kV impulse voltage

2400 kV冲击电压下的场强分布如图9所示。电容芯子沿径向的电场分布曲线如图10所示。

从图10可以看出,电容芯子的径向电场分布均匀,且最大电场强度为15.138 kV/mm(设计许可场强为21.799 kV/mm)。经计算新设计套管径向电场安全裕度达到1.44倍。

2.2 热点仿真分析

设计的1100 kV ERIP 电容芯子套管在交流1100 kV电压下极限载流能力超过4000 A,热点仿真选择3150 A作为激励电流,得到其热点温度分布云图如图11所示。

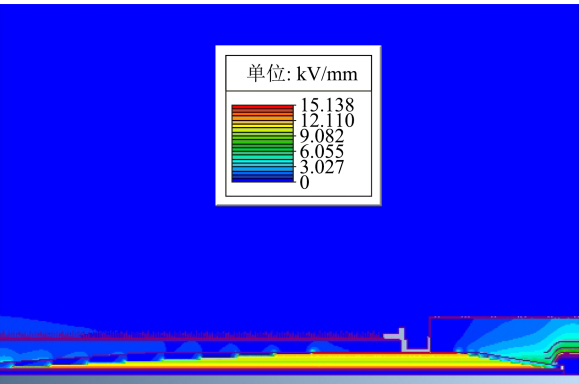


图9 2 400 kV冲击电压下套管的电场分布
Fig.9 Electric field distribution of bushing under 2 400 kV impulse voltage

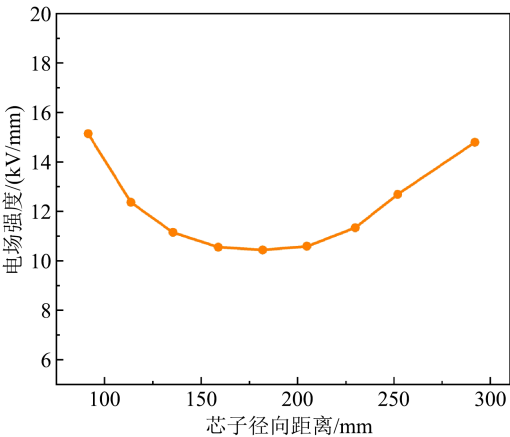


图10 2 400 kV冲击电压下电容芯子径向场强分布曲线
Fig.10 Radial field strength distribution curve of the capacitor core under 2 400 kV impulse voltage

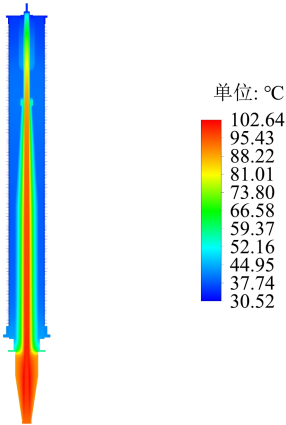


图11 套管热点温度云图
Fig.11 Cloud image of hot spot temperature of the bushing

从图11可以看出,套管的热点温度集中在套管导电管处,最高温度为102.64℃,满足设计要求(设计要求温度低于120℃)。

2.3 力学仿真分析

针对1 100 kV ERIP 电容式套管在竖直安装状

态下的力学性能进行仿真研究,仿真时套管底部通过法兰固定,同时承受多种载荷作用:上端接线端子施加2 500 N悬臂载荷、空气侧承受35 m/s风速产生的风压以及地震作用下的水平(0.4 g)与垂直(0.2 g)加速度载荷,结果如图12所示。

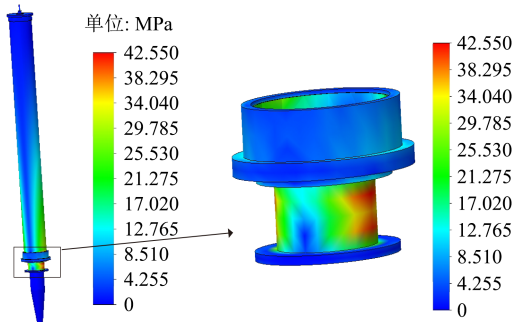


图12 套管的机械应力云图
Fig.12 Cloud image of bushing mechanical stress

从图12可以看出,硅橡胶外套的应力集中出现在法兰根部胶装区域,峰值应力为42.550 MPa,该数值显著低于材料的屈服强度阈值(80.000 MPa),表明套管在既定工况下具有足够的安全裕度。

3 套管与出线装置匹配校核

为保证新设计1 100 kV ERIP 电容式套管可与在运换流变压器的出线装置配合,需进行尺寸及电场校核。

3.1 套管出线装置尺寸校核

通过与在运换流变压器出线装置内均压球进行尺寸校核,发现新设计套管接线端可与均压球匹配,裕度足够,尺寸符合在运设备适配要求。新设计的1 100 kV ERIP 电容式套管的端部尺寸如图13所示。

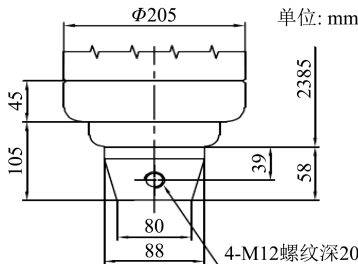


图13 新设计套管端部尺寸
Fig.13 Newly designed bushing end size

3.2 套管出线装置电场校核

图14为ERIP 电容式套管和油浸纸套管油侧电场的仿真计算结果。

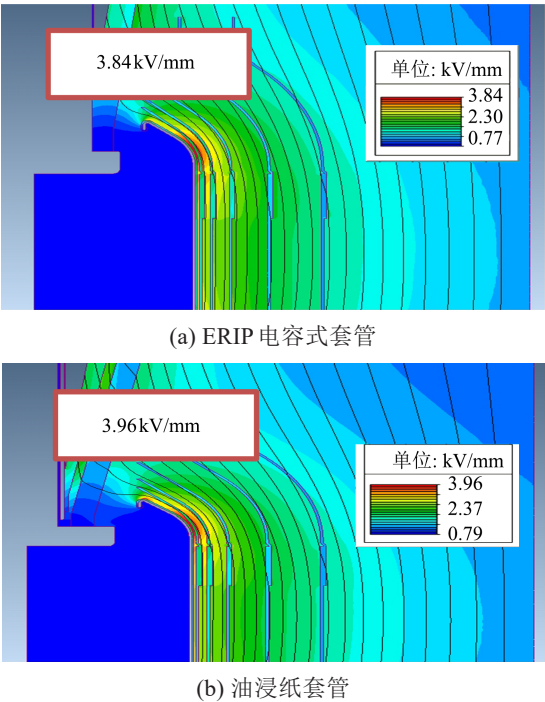


图 14 套管油侧电场仿真计算
Fig.14 Simulation calculation of electric field on the oil side of bushings

从图 14 可以看出，在 635 kV 交流运行电压下，ERIP 电容式套管均压环附近的最大场强为 3.84 kV/mm，油浸纸套管均压环附近的最大场强为 3.96 kV/mm。与油浸纸套管相比，新设计的 ERIP 电容式套管与换流变压器网侧出线装置的绝缘配合电场分布更加均匀，最大场强下降了 3%，电场安全裕度提升了 3%。

4 绝缘性能验证情况

在完成 1100 kV ERIP 电容式套管设计生产后，为进一步验证套管的性能，按照相关技术标准^[17-19]对套管开展试验考核。

新研制的 ERIP 电容式套管技术参数如表 1 所示。对比表 1 数据可知，新研制套管的各项指标整体上高于在运典型 1100 kV 套管水平。

4.1 雷电冲击干耐受电压试验

雷电冲击干耐受电压试验考核时，采用 100% 电压(2 550 kV)下正极性雷电冲击全波、110% 电压(2 805 kV)下负极性雷电冲击全波、121% 电压(3 086 kV)下负极性雷电冲击截波对新研制套管进行耐受试验。新研制套管的雷电冲击全波耐受电压为 2 550 kV(标准 2 400 kV)，试验过程中套管未发生闪络或击穿，试验结果合格。

表 1 套管技术参数

Table 1 Technical parameters of bushings

名称	在运典型 1100 kV 套管	新研套管
额定电流/A	1 165	2 500
温升电流/A	1 281	3 150
雷电冲击全波耐受水平/kV	2 400	2 550
雷电冲击截波耐受水平/kV	2 760	3 086
操作冲击耐受水平/kV	1 950	1 950
工频 5 min 短时耐受水平/kV	1 200	1 300
工频 60 min 耐受水平/kV	953	1 000
电容抽头工频 1 min 耐受水平/kV	2	3
水平地震加速度	0.2 g	0.4 g
弯曲耐受负荷/N	5 000	10 000

4.2 操作冲击耐受电压试验

选取 1 950 kV 作为新研制套管的操作冲击耐受电压目标值，套管通过湿操作冲击耐受试验后，又进行了 110%(2 145 kV)额定耐受电压下的负极性干操作冲击耐受试验，试验结果合格。

4.3 特殊工频耐压试验

对新研制套管增加特殊工频耐受电压试验，试验电压提高至 1 500 kV，持续时间为 5 min。试验期间未出现闪络或击穿，套管顺利通过试验。

4.4 温升试验

将套管油端浸入变压器油中，油温控制在(90±2)℃。当套管与油达到热平衡后，对套管连续施加 3 150 A 电流。导电管外壁布置 15 个热电偶，空气端金属部件上布置 4 个热电偶，油中布置 6 个热电偶。测试得到空气温度为 30.2℃，绝缘油温度为 89.4℃，空气侧镀银铜导杆头温度为 57.3℃，油中铜底盘温度为 94.8℃，内部导杆最高温度为 103.8℃，温升试验结果满足国家标准要求(低于 120℃)^[17-19]。

以上试验结果表明，新研制 ERIP 电容式套管在相同电压等级、相同额定电流、外形尺寸相近的情况下，其绝缘性能较以往结构的套管具有显著的提升。

新研制的 1100 kV ERIP 电容式套管尺寸与目前在运套管可完美互换。其中其空气侧尺寸限值不小于在运套管的干弧距离、爬电距离；ERIP 电容式套管无油枕，空气侧实际长度与在运套管一致；油侧尺寸在保证绝缘裕度情况下，满足与换流变压器出线装置的适配性；法兰、底座安装尺寸与在运套管一致；油中端部尺寸满足接线部位均压球尺寸

要求。新研制套管的照片与外形结构如图 15 所示。

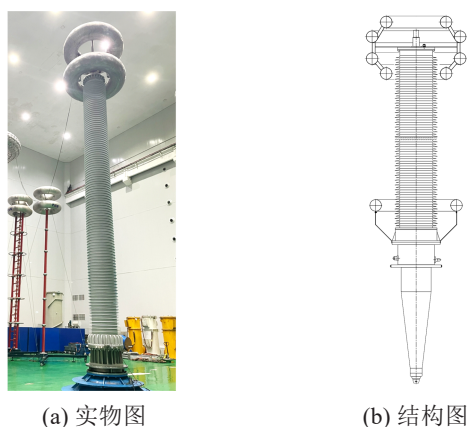


图 15 新研制套管实物和结构图

Fig.15 Newly developed bushing and its structure image

5 结论

(1)经试验验证,在满足现有换流变压器升高座尺寸的前提下,新研制 1 100 kV 换流变压器网侧环氧树脂浸纸电容式套管充分利用油中尺寸,绝缘厚度增大 15%。经电场仿真,在 1 200 kV 工频电压下,新研制套管径向最大场强为 7.569 kV/mm,电场安全裕度达到 1.38 倍。在 2 400 kV 冲击电压下,径向最大场强为 15.138 kV/mm,安全裕度达到 1.44 倍。经温度场仿真,在 3 150 A 电流激励下,套管热点温度集中在导电管上,最高温度为 102.64℃,满足设计要求。经机械应力仿真,当上部接线端子加载 2 500 N 的悬臂负荷,空气侧加载 35 m/s 的风载,地震载荷水平地面加速度为 0.4 g,垂直地面加速度为 0.2 g 时,新研制套管硅橡胶外套的最大应力约为 42.55 MPa,远小于材料的屈服极限。新研制套管设计满足应用要求。

(2)校核新研制套管与在运换流变压器出线装置尺寸配合及电场裕度情况,新研制套管的尺寸满足要求,电场安全裕度相比在运油浸纸套管提升了 3%。新研套管通过型式试验,考核指标整体上高于现行国内外标准。与在运套管技术参数比较,新研制套管的各项指标整体上更优。

参考文献 References

- [1] 徐鹏. 一起油浸式套管事故分析[J]. 电瓷避雷器,2021(3): 200-204.
XU Peng. Fault analysis of an oil-immersed bushing[J]. Insulators and Surge Arresters,2021(3):200-204.
- [2] 戴佳民. 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):181-189.

DAI Quanmin. Discharge process and characteristics of the poor impregnated defect of capacitor core in oil-immersed paper bushing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017,32(7):181-189.

- [3] 胡自书,韩丹丹. 变压器油浸纸套管色谱分析方法诊断效果的对比分析[J]. 变压器,2021,58(5):73-76.

HU Zishu, HAN Dandan. Comparative analysis of DGA methods for casing of transformer OIP bushing[J]. Transformer,2021,58(5): 73-76.

- [4] 徐海军,陕华平,王庆,等. 特高压换流变压器网侧高压套管胶浸纸技术应用研究[J]. 高压电器,2020,56(5):182-187.

XU Haijun, SHAN Huaping, WANG Qing, et al. Research on application of resin-impregnated paper technology for UHV converter transformer grid-side high-voltage bushings[J]. High Voltage Apparatus,2020,56(5):182-187.

- [5] 许佐明,胡伟,罗晓庆,等. 典型缺陷油浸纸套管绝缘劣化特性研究[J]. 高压电器,2022,58(5):112-120.

XU Zuoming, HU Wei, LUO Xiaoqing, et al. Study on insulation degradation characteristics of oil impregnated paper bushing with typical defects[J]. High Voltage Apparatus,2022,58(5):112-120.

- [6] 王欣,施勇,邹德旭,等. 550 kV 油浸纸套管缺陷仿真分析[J]. 电瓷避雷器,2025(1):118-126.

WANG Xin, SHI Yong, ZOU Dexu, et al. Simulation analysis of defects in 550 kV OIP transformer bushing[J]. Insulators and Surge Arresters,2025(1):118-126.

- [7] 戴佳民. 油浸纸套管受潮缺陷劣化过程及诊断的研究[D]. 北京: 华北电力大学,2019.

DAI Quanmin. Deterioration process and diagnosis of moistened defect in oil-impregnated paper bushing[D]. Beijing: North China Electric Power University,2019.

- [8] 陕华平,吴天博,陈晓东. 换流变压器网侧 550 kV 环氧树脂浸纸套管绝缘结构与校核[J]. 电瓷避雷器,2023(4):165-172,180.

SHAN Huaping, WU Tianbo, CHEN Xiaodong. Insulation structure design and check of 550 kV epoxyresin impregnated paper bushing at gridside of converter transformer[J]. Insulators and Surge Arresters,2023(4):165-172,180.

- [9] 张毅涛. 油纸绝缘套管典型缺陷放电及产气规律研究[D]. 北京: 华北电力大学,2021.

ZHANG Yitao. Study on discharge and gas generation characteristics of typical defects in oil-impregnated paper bushing[D]. Beijing: North China Electric Power University,2021.

- [10] 陈瑾希. 63 kV 高压交流套管的绝缘设计[D]. 大连:大连理工大学,2015.

CHEN Jinxi. An insulation design of 63 kV high voltage AC bushing[D]. Dalian:Dalian University of Technology,2015.

- [11] 张施令,彭宗仁. 换流变压器套管的电气绝缘结构研究与设计优化[J]. 绝缘材料,2020,53(12):65-72.

ZHANG Shiling, PENG Zongren. Study on electrical insulation structure of converter transformer bushing and design optimization[J]. Insulating Materials,2020,53(12):65-72.

- [12] 邓江. 干式 SF₆ 气体绝缘特高压直流套管的电热场分布特性及

- 内绝缘结构优化设计研究[D]. 成都:西南交通大学,2020.
- DENG Jiang. Study on electric temperature field distribution characteristics and optimal design of internal insulation structure in dry-type SF₆ gas insulated UHVDC bushing[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2020.
- [13] 罗宇,王翰,吴细秀,等. 油路隔离型变压器用套管的设计与验证研究[J]. 高压电器,2025,61(6):138-148.
- LUO Yu, WANG Han, WU Xixiu, et al. Study on the designing of transformer bushing with oil-separated structure and its verifying[J]. High Voltage Apparatus,2025,61(6):138-148.
- [14] 张西元,焦芳,王文奎,等. 油-油、油-SF₆胶浸纸电容式变压器套管的研制[J]. 电瓷避雷器,2004(6):1-4.
- ZHANG Xiyuan, JIAO Fang, WANG Wenkui, et al. Development of oil-oil and oil-SF₆ resin impregnated paper capacitance graded transformer bushing[J]. Insulators and Surge Arresters, 2004(6):1-4.
- [15] 吴跃,戴萍. 220 kV 电容套管主绝缘的改进设计[J]. 高压电器, 2002,38(5):54-55.
- WU Yue, DAI Ping. Improved on the dominant insulation of 220 kV capacitor bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38 (5):54-55.
- [16] 谢恒堃. 电气绝缘结构设计原理-下册[M]. 北京:机械工业出版社,1993.
- XIE Hengkun. Design principle of electrical insulation structure -volume II[M]. Beijing:China Machine Press,1993.
- [17] International Electrotechnical Commission. Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V:IEC 60137:2017[S]. Geneva,Switzerland:IEC,2017.
- [18] 全国绝缘子标准化技术委员会. 交流电压高于1000 V的绝缘套管:GB/T 4109—2022[S]. 北京:中国标准出版社,2022.
- National Technical Committee 80 on Insulator of Standardization Administration of China. Insulation bushing with AC voltage higher than 1000 V: GB/T 4109—2022[S]. Beijing: Standards Press of China,2022.
- [19] 全国特高压交流输电标准化技术委员会. 1000 kV 交流系统用套管技术规范:GB/T 24840—2018[S]. 北京:中国标准出版社, 2018.
- National Technical Committee 569 on Ultra-High Voltage AC Transmission of Standardization Administration of China. Technical specification for bushings of 1000 kV AC system: GB/T 24840—2018[S]. Beijing: Standards Press of China,2018.

收稿日期:2025-05-28;修回日期:2025-08-15。

作者简介:

郭贤珊(1972—),男(汉族),湖北黄陂人,正高级工程师,研究方向为高压直流输电技术与工程运行管理;

通信作者:张韵莹(1999—),女(汉族),江苏南京人,助理工程师,研究方向为高压直流输电技术。