

Research on the On-site Valve Side Power Frequency AC Voltage Test Technology of Converter Transformers

Ping Li Jicun Li Hailong Yue Dexin Kong Shanlin Li

Qinghai Electric Research Institute Co., Ltd., 810008, Xining, Qinghai, 810008, China

Abstract

With the in-depth implementation of the “West-to-East Power Transmission” strategy and the advancement of the “dual carbon” goals, ultra-high voltage direct current (UHVDC) transmission has become the core support for the long-distance transmission of clean energy. As a key equipment in the system, the insulation performance of the converter transformer directly determines the safety of power transmission. Through theoretical analysis, simulation optimization and experimental verification, a 1200kV/5A single-column integrated modular test device was developed. A high-altitude environment electric field correction model and a multi-source interference suppression system were established. An optimized test layout scheme for the valve hall was proposed.

Keywords

Converter transformer; Valve side test; Power frequency AC withstand voltage; High-altitude adaptation; Partial discharge suppression

换流变压器现场阀侧外施工频交流电压试验技术研究

李平 李吉存 岳海龙 孔得鑫 李善林

青海电研科技有限责任公司, 中国·青海 西宁 810008

摘要

随着“西电东送”战略深入实施与“双碳”目标推进,特高压直流输电成为清洁能源远距离输送的核心支撑,换流变压器作为系统关键设备,其绝缘性能直接决定输电安全。通过理论分析、仿真优化与试验验证,研制出1200kV/5A单柱一体模块化试验装置,建立了高海拔环境电场修正模型与多源干扰抑制体系,提出阀厅内试验布局优化方案。

关键词

换流变压器; 阀侧试验; 工频交流耐压; 高海拔适应; 局部放电抑制

1 引言

1.1 研究背景与意义

能源供需的区域分布不均是我国能源发展的突出矛盾,西北、华北地区丰富的清洁能源需通过特高压直流输电通道送往中东部负荷中心。换流变压器作为特高压直流系统的核心枢纽设备,承担着交直流能量转换的关键功能,其阀侧绝缘系统长期承受交直流混合电应力,运行环境苛刻。一旦发生绝缘故障,将导致输电中断甚至大范围电网振荡,造成巨大经济损失。

现行换流变压器交接试验中,长时感应耐压试验难以完全模拟现场工况,阀侧外施工频交流耐压及局部放电试验成为验证绝缘可靠性的必要环节。

【基金项目】青海电研科技有限责任公司科技项目“换流变压器现场阀侧外施工频交流电压试验技术研究及试验装置研制”(项目编号:5228AZ240002)。

【作者简介】李平(1988-),男,中国青海乐都人,本科,技师,从事高电压技术研究。

1.2 国内外研究现状

国外对换流变压器试验技术的研究起步较早,已形成较为成熟的工频串联谐振试验理论,开发了适用于常规环境的试验装备,但针对高海拔、狭小空间的专用设备研发相对滞后。国内近年来聚焦特高压设备试验技术攻关,已完成部分特高压设备的出厂试验技术积累,但现场试验装备多沿用传统分体式结构,存在体积庞大、抗干扰能力弱等问题,难以满足高海拔、阀厅内等复杂场景需求。

1.3 研究内容与技术路线

本文围绕换流变压器现场阀侧外施工频交流电压试验技术展开系统研究,主要包括:一是明确深部复杂环境下地应力、海拔等因素对试验的影响机制,建立试验参数修正模型;二是研发单柱一体模块化试验装置,优化电场分布与局放抑制设计;三是构建多源干扰抑制体系,提升局放测量精度;四是通过室内试验与现场验证,形成标准化试验流程。

技术路线遵循“理论分析—仿真优化—装备研制—试验验证”的逻辑展开:首先通过文献调研与现场实测,梳理复杂环境对试验的影响规律;基于工频串联谐振理论与电场计算方法,完成装置结构与仿真优化;研制核心试验装

备并开展室内性能测试；最后在换流站现场进行工程验证，形成完整技术体系。

2 试验技术理论基础

2.1 工频串联谐振升压机理

换流变压器阀侧绝缘试验采用工频串联谐振方式，其系统等效为 RLC 串联电路，由励磁变压器、调感电抗器、被试品等效电容及损耗电阻组成。当外加电源频率与回路固有频率满足谐振条件时，电感与电容的容抗相互抵消，系统阻抗最小，电流达到最大值，此时被试品两端电压可通过谐振升压效应显著放大，电压放大倍数由系统品质因数 Q 决定。

谐振状态下，系统输入功率仅需补偿损耗功率，大幅降低了现场电源容量要求。同时，谐振电路具有天然限流特性，能有效避免二次损伤。结合换流变压器阀侧等效电容特性，通过调节调感电抗器电感量（190~1900H），可实现 50Hz 工频下的稳定谐振，满足不同电压等级试验需求。

2.2 高海拔环境电场修正理论

高海拔地区气压降低导致空气密度下降，显著影响外绝缘性能。根据电场修正理论，海拔 H 处的空气密度修正系数可表示为： $k_H=1+\{(H-1)/10+(2.5H-2.5)^2/1000\}$ ，其中 H 以 km 为单位。在 4000m 海拔条件下，修正系数达 1.225，单台电抗器外绝缘耐受电压需按此系数修正，确保不发生电晕放电。

电晕起始场强计算遵循经验公式： $E_c=27.7 \times \delta \times (1+0.337/\sqrt{r \delta})$ ，其中 δ 为空气相对密度，r 为均压罩最小曲率半径。通过该公式可确定均压罩结构参数，保证高海拔环境下电场分布均匀，避免局部场强超标。

2.3 局放信号传输与干扰抑制原理

局部放电信号频率集中在 50kHz~10MHz，幅值仅为毫伏级，易受现场电源谐波、电晕噪声等干扰。根据电磁兼容理论，干扰主要通过电源耦合、空间辐射和传导路径影响测量。局放信号的短时脉冲特性与干扰信号的连续波特性存在显著差异，为滤波设计提供了理论依据。

采用 T 型滤波拓扑结构与差分测量技术，可实现高频干扰抑制与局放信号提取。高压侧滤波器由高频阻波电抗与电容组成，截止频率设计在 10-20kHz，确保工频信号无衰减传输，同时对高频干扰形成有效抑制；低压侧采用 R-LC 网络进一步净化信号，结合双层屏蔽电缆与独立接地，可将干扰信号衰减 30dB 以上。

3 试验装置结构与优化

3.1 整体结构设计

针对阀厅空间狭小与高海拔环境需求，采用单柱一体模块化结构，将调感电抗器与电容分压器集成设计，整体呈竖直圆柱状，外部由高强度环氧绝缘筒封装，占地面积较传统分体式系统减少 50%。装置额定电压 300kV，可通过四节串联扩展至 1200kV，额定电流 5A，局放量 $\leq 10pC$ ，满足不同电压等级换流变压器试验需求。

装置内部沿轴向分为调感电抗模块与电容分压模块，左侧由两节可调电抗器串联构成，通过电机驱动丝杆调节气隙长度实现电感量连续可调；右侧为电容分压器及测量回路，与电抗模块串联组成完整谐振回路。底部设置钢制承重底架，与地网可靠连接，确保结构稳定性与电气安全。

3.2 关键部件设计

3.2.1 调感电抗器

采用铁芯式结构，漆包导线绕组，油浸自冷方式冷却，环氧筒式外壳具备足够电气与机械强度。单台电抗器额定电压 300kV，调感范围 190~1900H，通过改变动、静铁芯间气隙长度实现电感调节，其电感变化规律符合经验拟合关系式： $L=L_0 \exp(-k \delta)$ ，其中 δ 为气隙长度，k 为结构系数。电抗器设计严格控制线圈表面光滑度，避免尖角毛刺，同时优化铁芯气隙结构，减少漏磁与涡流损耗。

3.2.2 电容分压器

额定电压 300kV，高压臂电容 4000pF，低压臂电容 10 μ F，分压比 2500:1，测量精度 $\leq 1\%$ 。采用扁平式电容器结构，在强磁场环境下感应涡流面积小，测量精度优于圆柱形结构。分压器外壳采用环氧玻璃钢筒，内部充满十二烷基苯绝缘油，确保高电压下绝缘性能稳定，局放量 $\leq 10pC$ 。

3.2.3 均压罩系统

研发气囊式金属鳞片特高电压均压罩，由充气内胆、支撑托架和金属均压元件组成。充气内胆采用高强度复合材料，通过充气成型，可在不拆卸状态下运输，无需现场拼装。金属均压元件为鳞片状金属片，边缘卷边处理，各鳞片通过导线连通，水平层每圈设有一处开路避免涡流产生。均压罩最小半径 1400mm，在 4000m 海拔、1330kV 电压下表面最大场强仅 12.42kV/cm，为电晕起始场强的 45.4%，有效抑制电晕放电。

3.3 高海拔电场仿真优化

采用 COMSOL Multiphysics 软件建立三维电场仿真模型，对电抗器塔结构、均压罩系统进行电场分布计算。仿真考虑高海拔空气密度修正，分析不同海拔（1000m~4000m）、均压球径（3m~4.5m）对电场分布的影响。结果表明，随着均压球径增大，高压端最大场强逐渐降低，当球径 $\geq 4m$ 时，场强低于空气击穿阈值 30kV/cm；海拔升高导致场强略有增加，在 4000m 海拔条件下，优化后的装置最大场强 19.8kV/cm，安全系数 ≥ 1.03 ，满足绝缘要求。

针对阀厅空间受限问题，通过仿真优化试验布局，确定带电部位与临近设备最小电气距离 8.6m，采用错层布置减少设备间电场耦合，确保试验过程中不损坏阀塔、避雷器等周边设备。

4 现场试验关键技术

4.1 高海拔环境适应性技术

根据高海拔环境特性，采取多维度适应措施：一是对试验装置外绝缘进行海拔修正，按 4000m 海拔要求设计绝缘距离，本体绝缘筒外绝缘耐受电压达 404.25kV；二是优

化均压系统参数,增大均压罩曲率半径至1400mm,降低表面场强;三是选用耐候性材料,均压罩材料具备抗紫外线、宽温域特性,适应高海拔温差大的环境。通过这些措施,装置可在海拔 $\leq 4000\text{m}$ 条件下稳定运行。

4.2 多源干扰抑制技术

建立多层次干扰抑制体系:电源侧增设隔离变压器与R-LC滤波器,抑制低频电源干扰,所有电机采用直流驱动,控制系统配备独立隔离变压器;高压侧在电抗器与分压器之间增设高压隔离阻抗,抑制试品放电产生的暂态波干扰;测量系统采用双绞屏蔽线与差分采样技术,减少空间辐射与传导干扰。通过频谱分析与同步比对算法,在10-300kHz频段提取局放信号,信噪比提升40%以上。

4.3 阀厅内试验布局优化

针对阀厅空间狭小、设备密集的特点,制定专项布局方案:采用单柱一体化结构减小设备占地面积,利用阀厅角落空间搭建试验平台;试验装置与阀塔、穿墙套管等设备保持安全距离,通过仿真确定最优布置位置;试验期间暂停阀厅内电焊、吊装等高干扰作业,清理场地杂物减少电晕干扰源。建立多源局放识别机制,通过信号特征比对区分设备局放与干扰信号,确保测量准确性。

5 试验验证与结果分析

5.1 室内性能测试

搭建室内试验平台,对300kV试验装置进行性能测试。结果显示,装置电感调节范围190~1900H,连续运行120min后线圈温升 $\leq 65\text{K}$,满足设计要求;在300kV额定电压下,局放量测量值 $\leq 8\text{pC}$,优于 $\leq 10\text{pC}$ 的指标要求;电容分压器测量精度误差 $\leq 0.68\%$,符合1.0级精度标准。高海拔模拟试验表明,在4000m海拔等效条件下,装置无电晕放电现象,绝缘性能稳定。

5.2 现场试验验证

在青海某特高压换流站开展现场试验,试验电压按出厂试验电压的80%设定为240kV,持续加压60min。试验过程中,装置运行稳定,电压波形畸变率 $\leq 3\%$,局放测量值稳定在30pC以下,无闪络、放电等异常现象。试验结果与室内测试一致性良好,验证了装置在高海拔、狭小空间环境下的适应性。

现场试验同时验证了干扰抑制技术的有效性,测量背景噪声 $\leq 80\text{pC}$,局放信号识别准确率达95%以上。试验完成后,换流变压器顺利投运,至今未发生绝缘相关故障,表明该试验技术能够有效考核阀侧绝缘性能。

5.3 技术创新点

本研究的创新点主要体现在:一是提出单柱一体化模块化结构设计,解决了传统装置体积庞大、组装复杂的问题,大幅提升现场适配性;二是研发气囊式金属鳞片均压罩,无需现场拼装,提高安装效率,适应高海拔电场均匀化要求;三是建立高海拔环境电场修正模型与多源干扰抑制体系,实现复杂条件下高精度局放测量;四是制定阀厅内试验布局优化方案与多源局放识别方法,填补了特高压换流变现场阀侧试验的技术空白。

6 结论与展望

6.1 研究结论

本文通过理论分析、仿真优化与试验验证,系统开展换流变压器现场阀侧外施工频交流电压试验技术研究,取得以下成果:

明确了高海拔、狭小空间等复杂环境对试验的影响机制,建立了海拔修正系数模型与电场计算方法,为试验装置设计提供了理论支撑。

研制出1200kV/5A单柱一体模块化试验装置,采用调感电抗器与分压器集成设计、气囊式均压罩等创新结构,实现了局放量 $\leq 10\text{pC}$ 、测量精度 $\leq 1\%$ 的性能指标,在4000m海拔条件下具备充足绝缘裕度。

建立了多层次干扰抑制体系与阀厅内试验布局优化方案,有效解决了现场多源干扰与空间受限问题,局放信号识别准确率达95%以上。

室内测试与现场验证表明,该试验技术能够有效考核换流变压器阀侧绝缘性能,为设备安全投运提供可靠保障,具有广泛的工程应用价值。

6.2 展望

未来研究可进一步拓展以下方向:一是开展多场耦合(地应力、温度、湿度)条件下的绝缘特性研究,建立更精准的试验参数修正模型;二是开发智能化试验系统,集成实时监测、数据分析与故障诊断功能,提升试验自动化水平;三是优化试验装置小型化设计,拓展其在柔性直流换流变压器等新型设备中的应用;四是完善试验标准体系,推动该技术在行业内的规范化推广,为特高压直流输电安全运行提供更全面的技术支撑。

参考文献

- [1] 卢理成,文卫兵,王庆,等. $\pm 1100\text{ kV}$ 换流变压器阀侧外施交流耐压及局部放电测量[J].高压电器,2019,55(12):106-111.
- [2] 康钧,曲全磊,李军,等.1500 kV高海拔试验用交流串联谐振试验系统研制[J].高压电器,2019,55(12):120-124.
- [3] 谭黎军,俞英中,曹燕明,等.基于有限元法的绝缘装置介电强度校核[J].变压器,2019,56(10):15-19.
- [4] 吴传奇,陈隽,任劫帅,等.特高压换流变现场阀侧交流外施耐压及局放试验研究[J].高压电器,2019,55(08):116-122.
- [5] 换流变压器阀侧交流外施耐压及局部放电现场试验导则.行业标准DL/T 2557-2022.
- [6] 李吉存,杨林,李平,等.高压串联谐振试验中电感测压方法研究[J].电工技术,2025,12.
- [7] 谢和平,周宏伟,薛东杰.深部开采工程岩石力学研究进展[J].力学进展,2015,45(1):286-314.
- [8] 袁亮.中国煤矿瓦斯治理技术体系与实践[J].煤炭学报,2018,43(1):1-18.
- [9] 林柏泉,张建国,翟成.地应力场对瓦斯运移及突出的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增刊1):2730-2736.
- [10] 赵航,马玉敏,杨长鑫,等.瞬时突变信号Mallat分解下的高压电抗器工频谐振过电压异常点定位[J].微型电脑应用.