

220kV电力变压器引线绝缘分析及优化

王智峰

内蒙古电力集团有限责任公司呼和浩特供电分公司 内蒙古 呼和浩特 010010

摘要: 220kV电力变压器引线绝缘对变压器稳定运行至关重要。本文深入剖析其绝缘结构与原理,结合电场仿真分析引线绝缘的电场分布特性,精准识别绝缘薄弱点。针对发现问题,从结构设计、材料选择、制造工艺及运行维护等方面提出系统优化方案,为提升220kV电力变压器引线绝缘性能与可靠性提供理论依据与实践指导,保障电力系统安全稳定运行。

关键词: 电力变压器; 引线绝缘; 电场分析; 温升分析

引言: 电力变压器作为电力系统中的关键设备,其运行稳定性和可靠性对于整个电网的安全至关重要。220kV电力变压器作为高压输电的重要一环,其引线绝缘性能直接影响到变压器的运行效果和寿命。然而,在实际运行中,引线绝缘失效导致的变压器故障时有发生,严重影响了电网的安全稳定运行。本文基于电场仿真和理论分析,对220kV电力变压器引线绝缘的结构特性、电场分布规律及失效机理进行了详细阐述,并提出了针对性的优化方案。

1 220kV 电力变压器引线绝缘结构与原理

1.1 变压器引线绝缘结构

220kV电力变压器引线作为连接绕组与外部电路的关键部件,其绝缘结构的合理性与可靠性直接关乎变压器的安全稳定运行。引线绝缘结构主要由内到外包含导体、匝绝缘、层绝缘以及外绝缘保护层。导体通常采用高电导率的铜或铝材质,承担电流传输功能。匝绝缘围绕导体,一般选用电缆纸或聚酯薄膜等材料,主要作用是隔离相邻导线匝,防止匝间短路。层绝缘则在匝绝缘基础上,通过多层绝缘材料的叠加,进一步提升绝缘性能,增强对电场的耐受能力,常见的层绝缘材料有皱纹纸、Nomex纸等。外绝缘保护层则是引线绝缘结构的最外层防护,多采用绝缘护套或绝缘胶带缠绕,起到机械保护和防潮防尘作用,避免外界因素对内部绝缘材料的破坏。在实际设计中,引线绝缘结构还需考虑变压器的整体布局与安装空间限制。不同位置的引线,如高压侧引线和低压侧引线,其绝缘结构会因电压等级和电场环境的差异而有所不同。高压侧引线由于承受电压高,绝缘层数和厚度相对较大,且会采用更为复杂的绝缘结构,如增设静电板、应力锥等部件,以改善电场分布,降低局部电场强度;而低压侧引线的绝缘结构则相对简单,但同样需满足相应的绝缘要求。

1.2 引线绝缘的电场分布特性

220kV电力变压器引线绝缘的电场分布特性受多种因素影响,呈现出复杂的分布状态。从电场分布的空间特性来看,引线绝缘中的电场并非均匀分布。在引线与绕组的连接部位、绝缘层的分界面以及绝缘结构存在几何突变的位置,如拐角、弯折处,电场会发生畸变,出现局部电场强度集中的现象。这是因为这些部位的电场线分布发生改变,导致电场强度高于其他区域^[1]。从电场分布与电压的关系分析,随着施加电压的升高,引线绝缘内部的电场强度也会相应增大,且电场分布的不均匀程度会加剧。在交流电压作用下,引线绝缘中的电场分布还会受到介质极化的影响。绝缘材料在电场作用下会发生极化现象,极化电荷的分布会改变原有的电场分布,使得电场分布更加复杂。不同绝缘材料的介电常数差异也会影响电场分布,介电常数较大的材料会分担相对较小的电场强度,而介电常数较小的材料则会承受较大的电场强度。在直流电压下,引线绝缘的电场分布主要取决于材料的电导率。电导率较高的区域电场强度较低,电导率较低的区域电场强度较高。

1.3 绝缘失效机理

220kV电力变压器引线绝缘失效是一个复杂的过程,通常由多种因素共同作用导致,其失效机理主要包括电击穿、热击穿和化学老化。电击穿是引线绝缘失效的重要原因之一,当引线绝缘内部的局部电场强度超过绝缘材料的击穿场强时,绝缘材料中的电子会在强电场作用下获得足够的能量,与绝缘材料分子发生碰撞电离,产生大量的自由电子和离子,形成导电通道,最终导致绝缘材料被击穿。电击穿的发生速度极快,往往在瞬间就会造成绝缘失效,严重影响变压器的正常运行。热击穿则是由于引线在运行过程中,电流通过导体产生焦耳热,同时绝缘材料存在介质损耗也会产生热量。当这些

热量无法及时散发出去时,会导致绝缘材料温度不断升高。随着温度的升高,绝缘材料的电导率会迅速增大,产生更多的热量,形成恶性循环。当温度达到一定程度时,绝缘材料的物理和化学性能会发生不可逆的变化,最终导致绝缘失效。化学老化是引线绝缘失效的长期影响因素。绝缘材料在长期运行过程中,会受到氧气、水分、温度以及电场等多种因素的综合作用,发生氧化、水解等化学反应,导致绝缘材料的分子结构被破坏,性能逐渐下降。另外,局部放电产生的臭氧、氮氧化物等活性气体会加速绝缘材料的化学老化过程。

2 220kV 变压器引线绝缘的电场仿真分析

2.1 仿真模型建立

为准确分析220kV变压器引线绝缘的电场分布情况,需要建立合理的仿真模型。在建模过程中,首先要对变压器引线绝缘结构进行简化和抽象,忽略一些对电场分布影响较小的细节结构,如微小的表面粗糙度等,以提高计算效率,同时又能保证模型的准确性。根据变压器的实际结构和尺寸参数,利用专业的电磁场仿真软件,如ANSYS Maxwell、COMSOL Multiphysics等,构建三维几何模型。模型中要精确设置引线导体、匝绝缘、层绝缘以及外绝缘保护层等各部分的几何形状和尺寸,同时还要考虑引线与绕组、油箱等其他部件的相对位置关系^[2]。在设置材料参数时,需要准确输入各绝缘材料的介电常数、电导率等特性参数。这些参数通常可以通过查阅材料手册或进行实验测量获得。对于不同类型的绝缘材料,如电缆纸、Nomex纸等,其性能参数会有所差异,要确保输入的参数符合实际情况,还需要设置边界条件,如施加的电压值、接地条件等。对于220kV电力变压器引线,通常在引线一端施加额定电压,另一端接地,以模拟实际运行中的电气环境。

2.2 电场分布计算结果

通过仿真软件对建立的模型进行计算,得到220kV变压器引线绝缘的电场分布计算结果。从整体电场分布来看,在正常运行电压下,引线绝缘中的电场强度呈现出从导体向外部逐渐减弱的趋势。在引线与绕组的连接部位,由于电场线的集中,电场强度相对较高;在绝缘层的分界面处,也会出现电场强度的突变。具体来看,在高压侧引线的绝缘层中,靠近导体的内层绝缘所承受的电场强度较大,随着绝缘层数的增加,电场强度逐渐减小。在引线的弯折部位,电场畸变明显,局部电场强度远高于其他区域,这与理论分析中几何突变处电场会集中的结论相符。不同绝缘材料交界面处的电场分布也存在差异,介电常数差异较大的两种材料交界面,电

场强度会发生明显变化。通过对计算结果的分析,还可以得到不同位置处的电场强度数值,绘制出电场强度分布曲线和云图,直观地展示引线绝缘内部的电场分布情况,为后续分析绝缘薄弱点提供依据。

2.3 绝缘薄弱点识别

基于电场分布计算结果,能够有效识别220kV变压器引线绝缘的薄弱点。首先,引线与绕组的连接部位是明显的绝缘薄弱点,该部位由于电场线集中,局部电场强度高,容易发生电晕放电甚至电击穿现象。特别是在连接部位存在接触不良、焊接缺陷等情况时,会进一步加剧电场畸变,降低绝缘性能。其次,引线的弯折处也是绝缘薄弱环节,在弯折过程中,绝缘材料可能会受到机械损伤,导致绝缘性能下降,同时弯折处的电场畸变使得该部位承受的电场强度远高于正常部位,更容易引发绝缘失效。不同绝缘材料的交界面由于材料性能差异,在电场作用下会产生应力集中,也是潜在的绝缘薄弱点^[3]。另外,在引线绝缘结构中存在气隙或杂质的位置,同样是绝缘薄弱点。气隙的介电常数远小于绝缘材料,在电场作用下,气隙内的电场强度会显著增大,导致气隙放电,放电产生的高温和活性气体会加速绝缘材料的老化和劣化,最终引发绝缘失效。杂质的存在也会改变电场分布,降低绝缘材料的电气性能。通过准确识别这些绝缘薄弱点,为后续采取针对性的绝缘优化措施提供了重要参考。

3 220kV 电力变压器引线绝缘优化方案

3.1 结构优化设计

针对220kV电力变压器引线绝缘存在的问题,结构优化设计是提升绝缘性能的关键措施之一。在引线与绕组的连接部位,可以采用增设静电板的方式来改善电场分布。静电板能够使电场线均匀分布,降低连接部位的局部电场强度,减少电晕放电和电击穿的风险。优化连接部位的形状和尺寸,避免出现尖锐的棱角和突变,使电场分布更加平滑。对于引线的弯折处,应尽量增大弯折半径,减小电场畸变程度。在弯折部位采用应力锥结构,通过合理设计应力锥的形状和尺寸,使电场在弯折处能够逐渐过渡,降低局部电场强度。在绝缘结构设计中,合理调整绝缘层的层数和厚度分布,根据电场分布情况,在电场强度较高的区域增加绝缘层数和厚度,在电场强度较低的区域适当减少,以实现绝缘结构的优化配置,提高绝缘材料的利用效率。还可以考虑采用复合绝缘结构,将不同性能的绝缘材料组合使用,充分发挥各材料的优势。

3.2 材料选择与改进

材料选择与改进对提升220kV电力变压器引线绝缘性能至关重要。在绝缘材料的选择上,应优先选用电气性能优良、机械强度高且耐老化性能好的材料。新型绝缘材料如纳米复合绝缘材料,因其独特的纳米结构,具有更高的电气击穿强度和更好的耐热性能,可以有效提高引线绝缘的可靠性。对于传统的绝缘材料,如电缆纸,可以通过改性处理来提升其性能。例如,对电缆纸进行化学浸渍处理,填充纳米颗粒或添加阻燃剂、抗氧化剂等,改善电缆纸的电气性能、机械性能和耐老化性能。在绝缘材料的组合使用方面,合理搭配不同介电常数的材料,使电场在绝缘层中分布更加均匀,降低局部电场强度。还应关注绝缘材料的吸水性和透气性,选择吸水性低、透气性好的绝缘材料,能够有效防止水分侵入绝缘内部,避免因水分导致的绝缘性能下降和化学老化加速。同时,材料的环保性能也不容忽视,应尽量选用环保型绝缘材料,减少对环境的影响。

3.3 制造工艺优化

制造工艺的优劣直接影响220kV电力变压器引线绝缘的质量。在引线制造过程中,应严格控制绝缘材料的绕包工艺。确保绝缘材料绕包紧密、均匀,避免出现气泡、褶皱等缺陷。采用高精度的绕包设备和先进的绕包技术,如自动绕包机,能够提高绕包的精度和质量。在绝缘材料的干燥处理环节,要严格控制干燥温度和时间,确保绝缘材料中的水分充分去除。采用真空干燥、真空浸漆等工艺,可以有效提高绝缘材料的干燥效果和浸渍质量,增强绝缘材料的电气性能和机械性能。对于引线与绕组的连接工艺,要保证焊接质量,采用合适的焊接方法和焊接参数,避免出现虚焊、假焊等焊接缺陷,确保连接部位的电气接触良好,减少因接触不良导致的电场畸变和发热问题。在制造过程中,还应加强质量检测环节。通过采用局部放电检测、绝缘电阻测试等手段,对引线绝缘的质量进行实时监测和控制,及时发现和处理制造过程中出现的质量问题,确保每一个生产环节都符合质量要求。

3.4 运行维护建议

为保障220kV电力变压器引线绝缘的长期可靠运行,合理的运行维护措施必不可少。在变压器运行过程中,

应加强对引线绝缘的温度监测。通过安装温度传感器,实时监测引线绝缘的温度变化情况,一旦发现温度异常升高,及时分析原因并采取相应的措施,如加强通风散热或调整负荷等,避免因过热导致绝缘老化加速。定期对变压器进行局部放电检测也是重要的维护手段。局部放电是绝缘劣化的早期征兆,通过检测局部放电信号,可以及时发现引线绝缘内部存在的潜在缺陷,如气隙、杂质等,并采取相应的修复措施,防止缺陷进一步发展导致绝缘失效^[4]。还应定期检查引线的外观,查看是否存在绝缘护套破损、绝缘胶带老化等情况,及时进行修补和更换。在变压器的检修过程中,要对引线绝缘进行全面的检查和测试,包括绝缘电阻测试、介损测试等,评估引线绝缘的性能状况。根据测试结果,对绝缘性能下降的引线及时进行处理,如重新绕包绝缘层或更换引线等。同时还应注意保持变压器运行环境的清洁干燥,避免灰尘、水分等外界因素对引线绝缘造成不良影响。

结束语

本文通过对220kV电力变压器引线绝缘的深入剖析,结合电场仿真分析与实际运行经验,揭示了引线绝缘的电场分布特性及失效机理,并针对性地提出了结构优化设计、材料选择与改进、制造工艺优化以及运行维护建议等一系列优化方案。这些措施的实施将显著提升220kV电力变压器引线绝缘的性能与可靠性,为电力系统的安全稳定运行提供有力保障。未来,随着技术的不断进步,将继续探索更高效、更环保的绝缘技术,推动电力变压器绝缘技术的创新发展。

参考文献

- [1]殷连开,刘文秋,赵伟娟,等.220kV电力变压器引线绝缘分析及优化[J].机电工程技术,2022,51(1):226-229. DOI:10.3969/j.issn.1009-9492.2022.01.058.
- [2]张东.电力变压器电气高压试验技术要点分析[C]//2021年电力行业技术监督优秀论文集.[出版者不详],2021:62-64.
- [3]叶岸基.电力变压器电气高压试验技术要点分析[J].电气开关,2021,59(04):96-98.
- [4]秦伟.电力变压器电气高压试验的技术与要点分析体会[J].装备维修技术,2020(02):277.