

Analysis of Protection Against Winding Deformation Faults in Power Transformers Under Lightning Impact

Guangming Xi

Weiyuan Energy Technology Co., Ltd., Xiangtan, Hunan, 450000, China

Abstract

As critical equipment in power systems, the operational status of power transformers directly impacts the safety and stability of transmission and distribution networks. In environments characterized by frequent thunderstorms and increasing grid overvoltages, lightning strikes serve as a major factor contributing to transformer insulation aging, turn-to-turn damage, and winding mechanical deformation. Winding deformation reduces the transformer's capacity to withstand short-circuit electrodynamic forces and voltage surges, potentially leading to insulation breakdown, partial discharges, and abnormal temperature rises, thereby compromising equipment lifespan and power supply reliability. This paper analyzes transformer winding deformation under lightning strikes, examines the primary causes, typical manifestations, and operational risks by integrating overvoltage propagation mechanisms with winding stress characteristics, and proposes protective measures encompassing equipment design, insulation configuration, grounding protection, online monitoring, and operation and maintenance management, providing insights for enhancing transformers' lightning protection capabilities and operational safety.

Keywords

lightning surge; power transformer; winding deformation; overvoltage; fault protection; condition monitoring

雷电冲击作用下电力变压器绕组变形故障防护分析

席光明

惟远能源技术股份有限公司, 中国·湖南湘潭 450000

摘要

电力变压器作为电力系统关键设备,其运行状态关系到输配电网络的安全与稳定。在雷雨频发及电网过电压增多的环境下,雷电冲击成为引发变压器绝缘老化、匝间受损及绕组机械变形的重要因素。绕组变形会削弱其承受短路电动力和电压冲击的能力,可能进一步导致绝缘击穿、局部放电及温升异常,影响设备寿命和供电可靠性。文章分析雷电冲击下变压器绕组变形问题,结合过电压传播机理与绕组受力特征,梳理主要成因、典型表现及运行风险,并从设备设计、绝缘配置、接地保护、在线监测及运维管理提出防护对策,为提升变压器防雷能力和安全运行提供参考。

关键词

雷电冲击; 电力变压器; 绕组变形; 过电压; 故障防护; 状态监测

1 引言

在现代电力系统中,变压器承担电能升降压、功率传输及电网联接,其可靠运行是保障供电连续性和系统稳定的基础。随着电网规模扩大和运行环境复杂,雷电冲击引发的暂态过电压问题愈发突出。雷击通过架空线路、变电站进线及感应耦合进入系统,形成高幅值、陡波头冲击电压,对主绝缘和绕组机械结构产生复合作用。雷电冲击持续短、上升速度快、局部电场集中,使绕组在电磁力和电压梯度作用下易出现匝间位移、轴向压缩失稳、径向鼓包及局部松动。绕组变形虽未必立即停运,却会降低后续承受短路和绝缘应

力能力,属于隐蔽但危害大的故障类型。因此,系统研究其形成机制与防护措施具有重要工程意义。

2 雷电冲击作用下变压器绕组变形的机理基础

2.1 雷电冲击过电压的传入与传播特征

雷电对电力系统的影响并不局限于直接击中变压器本体,更常见的是雷击架空线路、杆塔或邻近区域后形成行波过电压,并沿线路向变电站传播。当冲击波进入变压器套管和绕组时,由于设备内部结构复杂、阻抗分布不均以及匝间电容、对地电容和漏感共同存在,电压不会均匀分配在整个绕组上,而是更容易集中在靠近首端的若干线匝和局部绝缘薄弱区域。对于波头陡峭的雷电冲击来说,这种非均匀分布现象尤为明显。部分匝间在极短时间内承受远高于工频运行条件下的电场应力,使局部绝缘介质处于高压梯度状态。若

【作者简介】席光明(1982-),男,本科,工程师,负责公司变压器产业总经理,从事电气工程及其自动化研究。

站内避雷器选型不匹配、线路保护配合不合理或接地电位抬升明显,冲击电压幅值还会进一步增大,导致绕组内部电场分布更为恶化,为后续机械变形与绝缘损伤埋下隐患。

2.2 绕组在雷电冲击下的电磁力响应机制

变压器绕组本质上是多匝导体按一定结构紧密排列形成的电磁部件。当雷电冲击电流通过绕组时,会在局部瞬间形成较强的电动力作用。虽然雷电冲击持续时间较短,但其电流陡度大、峰值高,容易使绕组中部分匝段承受突发的径向力与轴向力。若绕组夹件压紧力不足、垫块支撑不均或长期运行后结构预紧程度下降,绕组便可能在冲击应力作用下发生局部位移。尤其对于高压绕组首端、线饼转折区及机械支撑相对薄弱部位,最容易出现应力集中和瞬态形变。一次冲击未必立即造成严重几何畸变,但多次雷击或雷电与操作过电压叠加后,机械累积效应会逐步削弱绕组整体稳定性,使原本微小的松动演变为可检测的变形故障。

2.3 电应力与机械应力耦合作用的故障特性

雷电冲击导致绕组变形,是电应力与机械应力共同作用的结果。冲击电压使首端绝缘、匝间及层间绝缘承受瞬态高电场,引发介质极化、局部放电甚至微通道损伤;冲击电流产生的电动力又导致绕组振动、压缩和位移。当绝缘因电应力局部弱化,绕组刚度下降,机械稳定性减弱;机械位移改变匝间距离和电场分布,使绝缘薄弱区域进一步集中。这种耦合作用赋予绕组变形隐蔽性、累积性和后发性。设备遭雷击后表面可继续运行,但内部结构已发生细微变化,若未及时发现,易在短路或长期热应力作用下演化为更严重故障。

3 雷电冲击作用下绕组变形故障的主要成因

3.1 绝缘配合不合理削弱了冲击承受能力

变压器防雷能力的核心之一在于绝缘配合是否合理。若设备额定绝缘水平与系统实际雷电环境不匹配,绕组首端在冲击来临时便可能承受超出设计裕度的过电压。部分工程中虽然配置了避雷器,但其保护水平、安装位置和响应特性未与变压器冲击耐受能力形成有效协调,导致残压仍偏高,无法充分限制进入绕组的波头幅值。对于老旧变压器而言,长期运行还会引起油纸绝缘老化、含水率升高和介质性能下降,使原有的冲击耐受能力进一步减弱。在这种情况下,即使雷击强度未明显超标,设备内部也更容易在重复冲击中发生绝缘局部损伤,并逐渐诱发绕组几何结构变化。由此可见,绝缘配合不足并不只是绝缘击穿风险增加的问题,也会间接提高绕组变形发生概率。

3.2 绕组机械结构强度不足或预紧力衰减

绕组能否抵抗雷电冲击带来的瞬态电动力,很大程度上取决于其机械结构的完整性与支撑刚度。若制造阶段在绕组压装、垫块设置、夹件固定或端部支撑方面控制不到位,设备投运后便可能存在先天性的受力薄弱点。运行年限增加

后,绕组受热胀冷缩、振动和电动力反复作用,压紧结构可能逐步松弛,垫块老化变脆,夹件受力不均,进而导致整体抗冲击能力下降。特别是在多次故障电流冲击和雷电暂态扰动后,原本尚可维持的结构平衡会被进一步打破。当雷电冲击再次到来时,局部绕组更容易出现径向鼓胀、轴向位移和端部压缩变形。因此,机械强度问题往往不是一次冲击独立造成的,而是在制造、安装和长期运行共同影响下逐渐积累的结果。

3.3 站内接地与防雷设施运行状态不佳

雷电防护体系的有效性不仅取决于单台设备本身,更依赖于变电站整体防雷设计和接地系统状况。若站内接地电阻偏大、接地网腐蚀严重或连接点接触不良,雷电流泄放能力就会下降,导致接地电位抬升,使变压器套管端部和对地绝缘承受更高冲击应力。避雷器若存在老化、受潮、动作特性劣化或长期未检测等问题,也会降低对冲击过电压的限制效果。除此之外,进线段保护角设置不合理、屏蔽接地措施薄弱以及线路绝缘子污闪后绝缘水平下降,都会使雷电过电压更容易侵入站内并传递至变压器。很多绕组变形问题上表现为设备内部故障,实际上与站内外整体防雷失配关系密切。因此,从系统角度分析雷电冲击来源和泄放路径,是查明故障成因的重要前提。

4 雷电冲击下绕组变形故障的表现与风险

4.1 绕组变形具有隐蔽性强和早期不易识别的特点

与明显的击穿、闪络或油温突升相比,绕组变形在故障早期往往并不直接表现为设备停运。部分变压器在遭遇雷击后,绝缘电阻、直流电阻甚至常规油化化验结果都可能暂时保持在允许范围内,但内部匝间几何关系和机械支撑状态已经出现变化。这种变化可能体现在局部压紧力下降、线饼轻微错位、匝间间隙改变或端部支撑松动等方面,常规巡视难以发现。由于故障具有潜伏性,设备在短期内仍可带病运行,容易给运维人员造成误判,认为雷击过后设备未出现明显异常即可继续长期使用。实际上,这种“隐性受损”状态往往比显性故障更具危险性,因为它会在后续运行中逐步累积并放大。

4.2 变形绕组会削弱绝缘稳定性和抗短路能力

绕组一旦发生几何畸变,其危害绝不仅限于结构形状改变。匝间距离、层间距离和绕组对地距离的变化,会直接影响内部电场分布,使局部区域电压梯度增大,局部放电风险上升。若首端匝间已经因雷电冲击造成微损伤,变形后绝缘弱点更易在后续运行电压和操作过电压作用下进一步发展。同时,绕组机械强度下降后,对短路电力的承受能力也会明显减弱。原本在设计工况下可以承受的外部短路冲击,可能在变形后造成更严重的位移和绝缘破坏,甚至引发匝间短路、层间短路或套管引线受损。由此可见,绕组变形是一类兼具电气风险与机械风险的复合性故障。

4.3 雷击后的累积效应会放大后续运行风险

在雷电活动频繁地区，变压器并不一定只遭受一次冲击。即使单次雷击未造成显著故障，重复雷电应力也会使绕组内部损伤持续累积。每一次冲击都可能在绝缘中留下微观裂纹、在机械结构中留下微小位移，这些变化单独看似不大，但在多次叠加后会明显改变设备内部稳定状态。与此同时，运行中的热循环、负载波动和系统暂态事件会对这些潜在弱点形成进一步刺激，使局部松动向整体失稳演变，最终转化为可见故障。因此，雷击后变压器即便短时间内运行正常，也不能简单认定设备已经完全恢复，而应将其视为状态评估和重点监测对象，防止后续事故在无预警状态下发生。

5 雷电冲击作用下绕组变形故障的防护对策

5.1 优化防雷设计与绝缘配合方案

降低绕组变形风险，首要工作是从源头减少进入变压器的雷电冲击强度。设计阶段应根据地区雷暴日、线路走廊环境、变电站电压等级和设备绝缘水平，合理确定防雷方案，确保避雷器保护水平与变压器冲击耐受特性相协调。避雷器应尽量靠近被保护设备安装，缩短连接引线，降低引线残压附加效应。对于雷电活动频繁的站点，还应加强进线段保护、优化架空线屏蔽措施和进站电缆接地处理，减小行波侵入幅值。在变压器本体设计方面，应改善绕组首端电压分布，合理配置静电屏、均压结构和绝缘裕度，避免局部电场集中。通过系统化绝缘配合，可显著降低冲击过电压直接作用于绕组薄弱部位的可能性。

5.2 提升绕组结构强度与制造安装质量

防止雷电冲击诱发绕组变形，还必须提高变压器本体的机械承载能力。制造环节应严格控制绕组压装工艺、端部支撑结构和垫块材质性能，保证绕组轴向压紧力和径向约束力满足设计要求。对大容量和重要等级变压器，可结合有限元受力分析结果，对绕组端部、引线转折区和高压首端等易受力集中部位进行加强设计。安装与检修过程中，则应防止运输振动、吊装冲击和拆装不当对绕组预紧结构造成损伤，必要时进行紧固状态复核。对于长期运行设备，应结合检修周期评估压紧力衰减情况，及时处理垫块老化、夹件松动等隐患。绕组机械结构更稳固，设备抵御瞬态冲击的能力才更可靠。

5.3 加强状态监测与运行维护管理

考虑到绕组变形早期隐蔽性较强，仅依靠传统定期巡视难以及时发现问题，因此需要建立更加主动的状态监测与运维机制。对于遭受过雷击、处于重点防雷区域或运行年限较长的变压器，应加强频响分析、短路阻抗测试、油中溶解气体分析和局部放电监测，综合判断绕组几何状态和绝缘变化趋势。在线监测系统可用于记录雷击事件前后设备的暂态响应、套管泄漏电流变化和局放特征变化，为故障追溯提供依据。运维管理中还应重视雷雨季节前的专项检查，包括避雷器试验、接地网测试、套管外绝缘清扫和接头复核等。对于雷击后设备，不宜仅凭表面无异常就恢复常态管理，而应安排针对性试验和动态跟踪。通过监测与维护并重，可提高故障早发现、早处置能力，避免绕组变形进一步发展。

6 结语

雷电冲击作用下的电力变压器绕组变形故障，是电气暂态应力和机械冲击应力共同作用形成的复杂问题。其发生机理涉及冲击过电压侵入、绕组电场分布畸变、瞬态电动力作用以及绝缘与机械结构的耦合退化，具有较强的隐蔽性和累积性。若对这一问题认识不足，设备在雷击后即使未立即停运，也可能因内部结构受损而埋下更大运行风险。面向电网安全运行需求，绕组变形防护不能局限于单一设备或单一环节，而应从防雷设计、绝缘配合、结构制造、接地系统、状态监测和运维管理等多个方面统筹推进。只有将外部雷电防护与内部机械电气可靠性提升结合起来，才能有效降低雷电冲击对变压器绕组造成的损伤，延长设备服役寿命，保障电力系统稳定、连续和安全运行。

参考文献

- [1] 苏培宇.基于雷电和振荡冲击电压激励的变压器绕组故障诊断[D].重庆大学,2018.
- [2] 刘晓航.220kV变电站雷电入侵波作用下变压器绕组电压分布特征分析[D].天津大学,2021.
- [3] 汤曼丽.雷电冲击下变压器绕组中暂态过电压的分析研究[D].华中科技大学,2012.
- [4] 胡丁滋.高海拔地区升压站雷电侵入下变压器绝缘故障分析及保护配置[D].重庆大学,2022.
- [5] 普子恒,张宇娇,方春华,等.雷电冲击下变压器绕组故障仿真模型研究[J].太原理工大学学报,2018,49(02):252-257.