

电力电缆接头温度场特性与绝缘性能演变的关联性研究

叶君勇

华东送变电工程有限公司 上海 20000

DOI:10.12238/ems.v7i7.14328

[摘要] 随着城市电网的迅猛发展,电力电缆作为输电和配电的关键环节,其安全稳定运行至关重要。电缆接头作为系统中公认的薄弱点,其温度场分布特性直接决定了电缆的绝缘性能和使用寿命。本文综合运用理论分析与实验研究方法,系统探讨了电力电缆接头的温度场分布规律及其对绝缘性能的作用机制。研究揭示,接头内部温度分布不均匀性是诱发绝缘材料加速老化、性能劣化的核心因素之一。通过优化接头结构设计、采用高性能绝缘材料以及实施合理的运行控制策略,可有效改善温度场分布的均匀性,从而显著延长电缆使用寿命,为电网的安全可靠运行提供坚实保障。

[关键词] 电力电缆; 接头温度场; 绝缘性能; 分布特性; 寿命评估

1 引言

在现代城市电网中,电力电缆的可靠运行对保障电力传输的安全性与稳定性发挥着关键作用^[1]。电缆接头作为系统中的潜在弱点,其温度场分布的不均匀性会引起局部过热,加速绝缘材料的老化,从而影响电缆的整体绝缘性能和使用寿命^[2]。鉴于此,本文通过理论与实验相结合的研究方法,深入探究电力电缆接头的温度场分布特性,并分析其对绝缘性能的影响。

2 电力电缆接头温度场分布特性

2.1 温度场基本概念与理论基础

温度场是物理场的一种表现形式,它指的是在某一时刻或连续时间段内,空间中各点的温度分布状况。温度场可以根据其时间依赖性和空间分布特性分为稳态温度场和非稳态温度场。在电缆接头中,温度场的分布受到多种因素如电流的热效应、材料的导热性能、接头结构的几何形状以及周围环境的影响。由于电力电缆在运行中会持续产生热量,特别是在接头处,如果散热不良,将导致接头温度升高,形成局部高温区域。这些高温区域的温度场分布不均可能引发绝缘材料性能下降,进而影响电缆系统的可靠性和寿命。因此,研究电缆接头的温度场分布对于指导接头设计、优化材料选型和改进运行维护具有重要的工程意义。

2.2 电力电缆接头的结构特点与热特性

电力电缆接头作为连接两段电缆的重要部件,其结构设计对温度场分布有着显著影响^[3]。常见的接头类型包括热缩接头、预制接头和冷缩接头等,每种接头的设计在材料选择、加热方式、以及内部结构上各不相同。例如,热缩接头利用热缩材料的收缩特性来紧固和密封电缆端部,而预制接头则采用现场应用高温固化胶的方式。这些不同的接头设计导致热量在接头内部的传导和散发效率存在差异,从而形成不同

的温度场分布。优化接头结构设计,如增加散热层、使用高导热材料、改善接头内部结构布局等,可以有效均匀温度场分布,减少局部过热,延长电缆使用寿命。

2.3 温度场分布的主要影响因素

电缆接头温度场分布是多种内外部因素综合作用的结果,主要可归纳为:

1. 运行电流(I): 这是最核心的因素。导体发热功率与运行电流的平方成正比($P_{\text{joule}}=I^2R$, 其中R为导体电阻)。电流增大,单位时间内在接头内部产生的焦耳热量急剧增加,整体温度水平显著上升。过载运行是导致接头过热的最常见原因。

2. 接触电阻(R_c): 导体连接点(压接管或焊接点)的接触电阻至关重要。不良的压接工艺、表面氧化、松动或腐蚀都会导致接触电阻远大于理想值。接触电阻处的发热功率同样遵循 $P_c=I^2R_c$,即使整体电流不大,过高的接触电阻也能在局部产生足以烧毁接头的热量,形成显著的高温热点。

3. 材料热物性参数:

导热系数(λ): 决定了热量从高温区向低温区传导的速率。接头各部分材料(导体、绝缘、半导体层、填充物、外壳)的导热系数直接影响热量散逸的难易程度。高 λ 值的材料有利于热量快速扩散,降低局部温度。

比热容(c)与密度(ρ): 共同决定了材料的热容(ρc)。热容大的材料温度变化相对缓慢,对瞬时过载或短时大电流冲击有一定的缓冲作用,但也可能导致热量更易积聚。

4. 结构设计: 接头的几何形状、尺寸、各功能层的厚度、界面设计等直接影响热流路径和热阻分布。紧凑的设计可能限制散热空间,而过大的体积可能增加内部热阻路径。良好的结构设计应确保热量能通过最短、最低热阻的路径有效地传递到外部环境。应力控制结构的设计也需考虑其对散热的

影响。

5. 散热条件:

敷设环境: 直埋、排管、隧道、桥架、空气中敷设等不同方式, 其散热条件差异巨大。直埋电缆受土壤热阻和土壤湿度影响; 排管敷设散热条件通常较差, 且多根电缆相互热影响; 隧道或空气中敷设对流散热效果相对较好。

环境温度 (T_a): 环境温度是散热的基础温度。环境温度越高, 散热温差 ($T_{\text{junction}} - T_a$) 越小, 散热效率越低, 导致接头运行温度越高。

周围介质: 土壤的导热系数和热容、空气的流动速度(自然对流或强制通风)、管道填充物的导热性等都显著影响散热效率。

6. 外部热源: 邻近运行的其他电缆、热力管道或其他发热设备产生的热量, 会提高接头所处微环境的温度, 间接恶化其散热条件。

2.4 温度场分布的测量与模拟技术

为了准确评估电力电缆接头的温度场分布, 研究者采用了多种技术和方法。实验测量方面, 热电偶和红外热像仪是常用的工具, 它们能够提供接头温度的实时数据和可视化分布图。在模拟方面, 有限元分析是一种强大的工具, 通过建立接头的数学模型, 可以模拟其不同工作条件下的温度响应。此外, 通过实验与模拟的结合, 研究者们可以验证模拟结果的准确性, 并进一步优化接头设计。这些方法的应用有助于更好地理解接头温度场的分布特性, 从而指导实际工程中的电缆接头设计和运行维护。

3 温度场分布对绝缘性能的影响

3.1 绝缘材料热老化机理

高温对绝缘材料的影响主要表现为加速其老化过程, 这一过程被称为热老化。温度升高会增强材料内部分子的运动, 导致材料微观结构的变化, 如分子链的断裂、交联或重新排列。这些变化会导致材料性能的退化, 如弹性降低、硬度增加、电气性能下降等。在电力电缆接头中, 由于温度场分布不均, 局部高温区域尤其容易发生热老化, 从而影响整个接头的绝缘性能。研究表明, 温度每升高 10°C , 绝缘材料的老化速率可能加倍, 这意味着温度场分布的均匀性对电缆接头的使用寿命和稳定性至关重要。因此, 理解和控制接头的温度场分布, 特别是在设计和应用阶段, 是延长电缆使用寿命、保障电网安全运行的关键。

3.2 温度场分布不均对绝缘性能的影响机制

温度场分布不均(即存在显著的温度梯度或局部热点)对绝缘性能的负面影响是多方面且相互关联的:

1. 加速局部热老化: 如前所述, 热点区域的温度远高于

接头平均温度, 该区域绝缘材料的老化速率遵循 Arrhenius 定律呈指数级加速。这导致热点区域的绝缘材料在远低于预期寿命的时间内就发生严重的机械性能(变脆、开裂)和电气性能(介质损耗增加、局部放电起始电压降低、体积电阻率下降)劣化。

2. 诱发局部放电 (Partial Discharge, PD): 高温会显著降低绝缘材料的局部放电起始电压 (PDIV) 和熄灭电压 (PDEV)。在温度场不均形成的热点区域:

材料高温劣化可能产生微孔、裂纹或界面脱粘, 形成气隙或缺陷。

高温下绝缘材料内部电导率增加, 电场分布可能畸变。

高温导致气隙内气体密度降低, 分子电离能下降。

这些因素共同作用, 使得热点区域更容易激发局部放电。持续的局部放电会进一步侵蚀绝缘材料, 产生新的缺陷并扩大原有缺陷, 形成“热点-PD-劣化-更热”的正反馈恶性循环, 急剧加速绝缘失效。

3. 热机械应力损伤: 温度场不均意味着接头内部不同区域存在显著的温度差异。由于不同材料(甚至同种材料的不同部位)的热膨胀系数不同, 温度差异会导致热膨胀/收缩量不同, 从而在材料内部和界面处产生热应力。这种循环变化的应力(尤其在负荷波动导致温度变化时)会导致:

绝缘材料内部产生微裂纹或疲劳损伤。

不同材料界面(如导体-绝缘、绝缘-半导电层)发生脱粘, 形成气隙或分层。这些缺陷不仅是电场畸变点(易引发局部放电), 也是新的热阻点(阻碍散热, 可能加剧局部过热)。

4. 水分树与电树引发与生长: 高温会降低绝缘材料的憎水性(尤其是 XLPE), 增加其吸湿性。如果接头密封不良或受潮, 水分更容易侵入绝缘层内部。在电场和高温的共同作用下, 侵入的水分极易在绝缘缺陷处(如微孔、杂质、界面)引发水树(Water Treeing)或促进电树(Electrical Treeing)的生长。水树和电树是导致聚合物绝缘电缆长期运行后发生绝缘击穿的主要劣化形式, 而高温和温度梯度是加速其生长的重要因素。

5. 热分解与碳化: 在极端过热情况下(如接触电阻极大或严重过载), 热点区域的温度可能超过绝缘材料的热分解温度, 导致聚合物分子链断裂, 释放出小分子气体(如甲烷、乙烯、乙炔等), 材料发生化学分解、碳化。碳化通道具有导电性, 会进一步集中电流、加剧发热, 最终引发热击穿或闪络。

综上所述, 温度场分布不均不仅仅是热量分布的问题, 它通过加速热老化、诱发局部放电、产生热应力、促进水/电树生长等多种物理化学过程, 从多维度、协同性地破坏绝缘材料的完整性, 最终导致绝缘性能的全面劣化直至失效。

3.3 实验研究与分析验证

实验研究在温度场分布对绝缘性能影响的分析中扮演着至关重要的角色。通过使用高精度的热电偶和红外热像仪,研究者能够定量地测量电缆接头在不同工作条件下的温度分布。这些测量结果揭示了温度峰值位置和温度梯度,为理论分析提供了实验依据。在定性分析方面,研究者观察到在高温区域,绝缘材料表现出更快的老化速率和更显著的性能退化。此外,实验数据还显示,温度场的不均匀分布会导致局部应力集中,进一步促进材料疲劳和结构损伤。

为了更准确地评估温度场分布的影响,采用一系列先进的实验技术。例如,通过在电缆接头上布置多个热电偶,可以实时监测接头在不同位置的温度变化。这些数据有助于绘制出接头的温度场图,从而识别出潜在的热点区域。同时,红外热像仪提供了一种非接触式的测温方法,能够在不干扰电缆运行的情况下,获取接头表面的温度分布图像。

除了基本的测温设备,研究者还利用了环境模拟箱等实验装置,模拟不同的环境条件对电缆接头温度分布的影响。这些模拟实验有助于评估在极端气候条件下,如高温、高湿或低温环境中,接头绝缘性能的变化。

通过对比不同设计和材料的电缆接头,研究者能够评估各种改进措施对温度场分布和绝缘性能的实际影响。例如,通过改变接头的散热结构或使用导热性能更好的材料,可以显著改善温度分布,减少局部过热问题。

这些实验研究不仅验证了理论模型的准确性,还为电缆接头的设计优化和寿命评估提供了宝贵的数据支持。通过系统地分析实验数据,研究者能够提出具体的设计改进建议,如增加散热层、优化接头形状或选择更适合的材料。这些改进措施有助于提高电缆接头的热稳定性,延长其使用寿命,并确保电力系统的可靠运行。

4 结束语

电力电缆接头的温度场分布特性是决定其运行可靠性和使用寿命的核心因素之一。本文通过系统的理论分析与实验研究,深入剖析了接头内部温度场的形成机制、分布规律及其关键影响因素。研究明确揭示,温度场分布不均导致的局部过热是加速绝缘材料热老化、诱发局部放电、产生热机械应力损伤、促进水/电树生长等系列问题的根源,最终导致绝缘性能的急剧劣化和接头失效风险的显著升高。绝缘材料的热老化遵循 Arrhenius 定律,局部温度的小幅升高即可导致其老化速率成倍增长。

针对这一关键问题,改善接头温度场分布、抑制局部过热是提升电缆线路安全性的根本途径。实践表明,通过以下综合措施可取得显著成效:

1. 优化接头结构设计: 重点在于降低热阻、构建高效散热路径。包括: 优化导体连接结构确保低接触电阻; 设计合理的散热结构(如散热鳍片、风道); 优化应力控制元件形状减少损耗; 确保填充饱满消除气隙; 简化结构减少界面热阻。

2. 选用高性能材料: 采用高导热率的绝缘材料(如高热 XLPE、硅橡胶)、半导体材料和填充物; 选用电气性能和热稳定性优异的材料; 确保材料间的热膨胀系数匹配性。

3. 提升制造与安装工艺: 严格控制导体压接质量; 确保界面处理清洁、光滑、紧密; 保证填充材料充分注入并固化良好; 遵循严格的安装规程,避免引入缺陷。

4. 实施合理的运行监控与维护:

在线温度监测: 推广应用光纤光栅测温(FBG)等技术,对接头温度(特别是潜在热点)进行实时在线监测和预警。

负荷管理: 避免电缆长期过载运行,控制运行电流在安全范围内。

环境改善: 改善敷设通道的通风散热条件; 对直埋电缆关注土壤热阻和湿度。

定期巡检与诊断: 利用红外热像仪进行定期巡检,发现表面过热点; 结合局部放电检测、介质损耗测试等评估绝缘状态。

5. 基于温度场的寿命评估: 将温度场(尤其是监测到的热点温度)作为关键输入参数,结合材料老化模型(如 Arrhenius 方程)和实际运行工况,发展更精确的电缆接头剩余寿命评估方法,指导预防性维护和更换决策。

本文的研究深化了对电力电缆接头温度场分布特性及其与绝缘性能退化内在关联的认识,为接头的优化设计、状态评估、寿命预测和智能运维提供了重要的理论依据和实验支撑。通过持续的技术创新和精细化管理,不断提升电力电缆接头的热稳定性和运行可靠性,为城市电网的安全、高效、智能运行奠定坚实基础。

[参考文献]

- [1] 卫世超, 孟晓凯, 芦竹茂. 电缆中间接头温度场仿真分析[J]. 科技创新与应用, 2023, 13 (35): 15-18
- [2] 蔡涛. 不同状态下电缆接头温度分布对比研究[J]. 江西电力, 2023, 47 (03): 21-24
- [3] 王卫东, 徐政, 刘亚东, 等. 交联聚乙烯电缆绝缘热老化研究进展[J]. 高电压技术, 2020, 46 (06): 1879-1891
- [4] 曲乐斌, 王明. 加强电缆运行的可靠性途径与管理措施[J]. 住宅与房地产, 2017, (06): 190.
- [5] 卫世超, 孟晓凯, 芦竹茂. 电缆中间接头温度场仿真分析[J]. 科技创新与应用, 2023, 13 (35): 15-18.

作者简介: 叶君勇 (1992.4-), 男, 汉族, 安徽, 本科, 工程师, 研究方向: 电力施工。