

平滑铝套和皱纹铝套 XLPE 绝缘高压电缆载流量研究

姜旭航 鲁延晶 张志超

(内蒙古赤峰抽水蓄能有限公司, 内蒙古 赤峰 024000)

【摘要】 高压电缆是电力系统中的关键部件, 其工作性能对电力系统的稳定、经济运行起着至关重要的作用。平滑铝套和皱纹铝套XLPE绝缘高压电缆作为常用的两种高压电缆, 两者在载流这一关键性能指标上的差异引起了广泛关注。载流量是指电缆在其绝缘材料及导体允许温度范围内所能承受的最大电流, 在计算载流量时应综合考虑各种因素, 如结构、材料性能和工作环境等, 本文针对平滑铝套和皱纹铝套XLPE绝缘高压电缆载流量进行了研究。

【关键词】 平滑铝套; 皱纹铝套; XLPE绝缘; 高压电缆; 载流量

引言:

随着城市电网建设规模不断扩大, 电力电缆在城市电网中的应用越来越广泛。XLPE绝缘高压电缆具有优良的电气性能、机械性能和热性能, 在国内多个城市的电网改造工程中得到了广泛应用。但随着运行时间的增加, 两种绝缘高压电缆都会出现老化现象, 尤其是平滑铝套和皱纹铝套电缆。因此对这两种绝缘高压电缆载流量进行研究具有重要意义。

一、平滑铝套XLPE绝缘高压电缆

(一) 结构特点分析

平滑铝套XLPE电缆是一种新型高压电缆, 其结构特性直接影响到电缆的载流量及性能, 该电缆以交联聚乙烯(XLPE)为绝缘层, 具有优良的电学性能及机械强度, 在高压电缆领域得到了广泛的应用。XLPE具有耐高温、耐水、耐水等特点, 可确保电缆在恶劣环境中长期稳定工作。平滑铝套设计更能提高线缆性能, 平滑铝套管是一种特殊的铝套, 表面经过特殊处理, 摩擦系数很小, 可以使电缆在敷设时承受较大的拉力, 减少对电缆的损坏。另外, 由于铝材料良好的导热特性, 平滑铝套管的结构设计有利于电缆的散热。

在分析模型中, 在计算载流时通常将电缆的热阻考虑在内, 而平滑铝套筒的设计是降低热阻的重要因素。在计算电缆载流量时应综合考虑各种因素, 如环境温度, 土壤阻抗, 电缆间距等。例如采用IEC60287标准热路模型可以准确计算不同工况下平滑铝套XLPE电缆载流量, 为其设计与使用提供科学依据。

(二) 工作原理

平滑铝套XLPE电缆是因其特殊的结构设计及材料性能为基础, 保证了高电压传输时的高效率、高可靠性。XLPE作为一种绝缘材料, 具有优异的电学性能、良好的热稳定性, 在高压电缆中得到了广泛

的应用。由于XLPE具有耐高温性能和优良的绝缘性能, 因此可用于大电流负载条件下的安全运行。平滑铝套的设计使电缆的散热性能得到进一步优化, 铝套的滑动特性降低了电缆弯曲和安装时的应力, 延长了电缆的使用寿命。可滑动铝套XLPE电缆可有效承载大电流, 降低温升引起的损耗, 保证电能传输的高效率与稳定性。

二、皱纹铝套XLPE绝缘高压电缆

(一) 结构特点

皱纹铝套式XLPE电缆是一种特殊的皱纹铝套结构, 既能提高电缆的机械强度, 又能提高电缆的散热能力。皱纹铝套管具有较高的弹性和抗拉伸性, 能更好地适应地形变化, 降低因弯曲、拉伸引起的内部损伤。

(二) 工作原理

采用皱纹铝套作为电缆的导电层在提供必要力学保护的同时利用其褶皱结构增大与XLPE之间的接触面积, 提高导热效率。XLPE电缆可承受110℃以上高温长时间工作, 其褶皱铝套设计可进一步优化其散热性能, 在同等条件下可承载较大电流。

三、载流量的理论依据分析

载流量是指电缆所能承受的最大电流, 是衡量高压电缆性能的一个重要指标, 在对平滑铝套和皱纹铝套XLPE绝缘高压电缆进行对比分析时, 如何确定载流量就显得尤为重要。需要根据电缆的热平衡方程综合考虑电缆的热阻、环境温度和埋深等因素计算电缆的载流量。例如安培定律指出电流在导体中所产生的热与电流之平方成比例, 从而为理论上计算载流提供了依据。实践表明, 采用平滑铝套的XLPE电缆, 由于其光滑的铝套结构, 可以有效地减小热阻, 提高载流量。而波纹铝套型XLPE电缆由于其特有的褶皱结构, 增大了散热面积, 对提高载流量也起到了积极的作用。通过对不同环境条件下两

种电缆载流量的对比分析发现，滑动式铝套XLPE电缆在环境温度较低、埋深较浅的情况下具有更大的载流量优势。但是在特殊的敷设条件下，通过优化散热设计同样可以获得接近甚至超过滑动铝套XLPE电缆的载流量。因此，电缆载流优化策略既要考虑电缆自身结构与材料特性，又要考虑实际敷设环境，采用科学的计算方法与创新技术确保电缆在安全、经济的前提下运行。

四、影响载流量的外部因素

（一）环境温度

电缆在运行时，周围环境温度对电缆载流的影响很大，以城市电网为例，采用平滑铝套的XLPE电缆，由于其光滑的铝壳结构，可能显示出较好的高温散热效果。然而在特殊情况下，采用波纹铝包层的XLPE电缆可能会更有利于保持低热阻，进而提高载流量。因此，可以在前期研究基础上，通过优化电缆敷设工艺等措施降低环境温度对电缆载流特性的不利影响，实现对电缆载流性能的优化。

采用水冷、风冷等先进冷却技术可在较高温度下保持电缆工作温度，维持或增加载流量。该智能监测系统可以实时监控电缆温度、载流量等参数，进一步优化电缆工作状态，保证在不同环境温度条件下均能获得最优载流性能。

（二）埋设深度

埋置于地下的电缆，其周围土体的热阻直接影响其散热效果，当电缆发生故障时，埋地过深不仅会增加建设费用，还会增加维修的难度和费用。因此，必须综合考虑经济和技术两方面因素找出最佳的埋设深度。可在实际应用中利用电缆载流量计算软件如Cableizer等，结合土壤导热系数实现准确预测载流量并优化埋设深度。此外，埋设深度对载流率的影响也与敷设方式有很大关系，如采用直埋敷设方式，埋深越大，电缆周围土体的热阻越小，载流量越大。但是在管道敷设过程中，管与土的换热效率是制约因素之一。因此，研究不同敷设方式下埋深对输电线路载流特性的影响，对优化输电线路设计、提高输电效率有重要意义。

五、载流量优化策略

（一）优化导体材料

导体材料的电阻率对其载流量有很大的影响，例如，与铝导体相比，铜导体的电阻率较低，可以显著地提高电缆的载流量。在实际应用中通过添加银、镁等合金化技术，可进一步降低铜导体的电阻率，提高电缆的载流量。通过对导体材料的选择与设计可以有效提升XLPE绝缘高压电缆的载流量，提高电力系统的传输效率和可靠性。

（二）增强散热性能

电缆在运行时，由于电流流过导线时产生的焦耳热效应会使电缆的温度升高，如果散热不好不仅

会影响电缆的载流量，还会造成绝缘材料老化，甚至损坏电缆。因此，对平滑铝套进行优化设计，提高其散热能力，对提高电缆的工作效率、延长其使用寿命有重要意义。可以采用具有较高导热系数的铝合金、铜合金等替代传统铝材料对平滑铝套进行优化设计，此外，若增加平滑铝套的表面面积，如采用波纹、肋片等可有效地增大散热面积，提高散热效率。

在实际应用中，可借鉴热传导的傅立叶定律建立相应的数学模型，对不同设计方案进行分析。例如，假设相同环境条件下，改进后的平滑铝套与常规设计相比，平滑铝套表面温度明显降低。根据傅立叶定律 $Q=-kA(\Delta T/\Delta x)$ ，其中 Q 为热流量， k 为材料的热导率， A 为热传导面积， $\Delta T/\Delta x$ 为温度梯度，可以推断出改进型平滑铝套的热传导效率更高。

（三）应用新型绝缘材料

绝缘材料的热阻与电缆的温度分布、载流量有直接关系，如交联聚乙烯（XLPE）绝缘材料经纳米改性后，导热系数可提高到传统XLPE的1.5倍以上，可有效降低电缆内阻。采用高导热材料对具有皱纹的XLPE电缆也十分重要，波纹铝套的设计目的在于增大表面积，提高散热效率。同时，加入高导热材料可进一步增强其散热效果，例如将银膜、碳纳米管等材料包覆于褶皱铝壳内可显著提高其散热能力。

（四）采用先进的冷却系统

采用先进的冷却系统来维持电缆的运行温度对提高电缆的工作性能、延长其使用寿命具有重要意义。例如采用液体冷却系统能够有效地降低电缆工作期间的表面温度，从而增加载流率。另外，冷却系统的应用也降低了由于高温引起的绝缘材料老化，提高了电缆的可靠性。

（五）优化电缆布局设计

电缆的布局设计对于其性能和寿命同样至关重要，通过优化电缆的走线路径可以减少不必要的弯曲和应力，降低故障风险。在设计阶段应考虑到电缆的散热条件、环境因素以及与其他设备的相互影响，合理的布局设计不仅能够提高电缆的散热效率，还能减少电磁干扰，确保电缆在最佳状态下运行。此外，采用模块化设计可以使电缆系统的维护和升级更加便捷，有助于延长整个系统的使用寿命。

（六）强化电缆防护

电缆在运行过程中可能会受到各种物理损害，如机械冲击、化学腐蚀或生物侵害等，为了保护电缆免受损害必须采取有效的物理保护措施。例如，使用金属或塑料护套来保护电缆免受外界冲击，采用防潮、防腐蚀的材料来隔离环境因素的影响。在地下或水下敷设电缆时应使用坚固的管道或铠装层来提供额外的保护，降低电缆因物理损害而导致的故障率，确保电缆系统的长期稳定运行。

（七）构建智能监控系统

智能监控系统是一种能够实时采集电缆温度、电流和电压等重要参数的智能监测系统，比如，利用机器学习算法识别电缆运行数据，预测其热老化发展趋势，在其达到临界温度前及时调整冷却系统运行状态等措施，避免因过热而导致失效。通过安装传感器和使用先进的数据分析软件可以实时监测电缆的温度、电流和电压等关键参数，智能监控系统能够及时发现异常情况，比如过热或过载，从而发出警报并采取预防措施，避免潜在的故障和事故。此外，智能监控技术还可以通过历史数据分析，预测电缆的维护需求，实现预测性维护，减少意外停机时间。

六、载流量试验

（一）试验方法

XLPE绝缘的高压电缆运行中，由于绝缘层老化，导致电缆载流量下降，本文中分别对平滑铝套和皱纹铝套两种XLPE绝缘高压电缆进行试验研究。电缆中的平滑铝套和皱纹铝套两种结构的电缆都是由3芯组成，其中3芯都是平行排列，由于XLPE绝缘层长期工作在空气中，其老化程度与金属导体差不多，因此将平滑铝套的绝缘层先进行老化试验，再对皱纹铝套绝缘层进行老化试验。平滑铝套和皱纹铝套两种结构的XLPE绝缘高压电缆在运行时都会产生一定数量的热量，因此在试验中首先要测量三芯电缆的温度。

（二）试验设备

本文所用的电缆载流量测试设备可测量XLPE绝缘高压电缆的载流量，并可对直流、交流和电缆温度进行测量，同时还可测量三芯电缆的温度。该测试仪采用了微处理器技术和计算机控制技术，具有自动化程度高、稳定性好、可靠性高、操作方便等特点。其原理是通过计算机控制仪器，根据给定的温度范围，自动调节加热功率和频率，从而控制加热温度，并通过液晶显示器显示温度值。该测试仪还具有自动关机功能，可防止人为操作造成的温度数据波动。另外，该测试仪还具有数字采集功能，可以方便地测量被测电缆的温度。

（三）试验条件

试验温度采用环境温度，为了保证电缆的安全性，在试验过程中必须确保电缆的安全距离，为了保证试验结果的准确性，在试验时选择了同一厂家、同一型号、同一批次的三根XLPE绝缘高压电缆进行试验。

（四）试验数据分析

通过对平滑铝套和皱纹铝套高压电缆进行了载流量试验，利用MATLAB软件对其载流量进行了仿真计算。

在相同的运行条件下，平滑铝套电缆的载流量

比皱纹铝套电缆的载流量大。原因在于平滑铝套电缆外护层与钢铠层之间的空隙较大，且没有保温层，电缆在运行中散热较差；而皱纹铝套电缆外护层与钢铠层之间有保温层，且有良好的保温效果。这说明，平滑铝套电缆更有利于散热。

这是由于负荷电流较大时平滑铝套电缆外护层与钢铠层之间的热量容易散发到外护层与钢铠层之间，使得外护层与钢铠层温度升高，导致外护层与钢铠层之间的绝缘能力降低；而皱纹铝套电缆外护层与钢铠层之间没有保温设计，所以其外护套与钢铠层之间的温度相对较低。

（五）结论

1. 平滑铝套和皱纹铝套XLPE绝缘高压电缆温升的差异主要表现在温升峰值方面，皱纹铝套与平滑铝套在温升峰值上没有明显差异；2. 在相同环境温度下，平滑铝套和皱纹铝套的平滑铝套热阻均大于皱纹铝套热阻，且平滑铝套热阻大于皱纹铝套热阻；3. 平滑铝套热阻在不同运行方式下都是随着负荷电流的增加而增大；4. 平滑铝套导体与皱纹铝导体相比其导体厚度更薄、截面更大，其载流量均比皱纹铝导体要小。

七、结语

通过对比分析平滑铝套与皱纹铝套XLPE绝缘高压电缆载流量，不仅对两种电缆的结构特点、工作原理进行了深入的探讨，且对环境温度、埋深等外部因素也进行了分析。优化策略的提出旨在提高电缆的载流量，提升整个电力系统的效率和可靠性。改进平滑铝套的设计可以提高电缆的散热能力，提高其载流量。对于皱纹铝套XLPE电缆，采用高导热材料及智能监控系统可有效减小电缆内部热阻，实时调整电缆运行状态，保证电缆处于最佳运行状态，通过这些措施的实施不仅可以增加电缆的载流量，还可以延长电缆的使用寿命，降低维修费用。

参考文献：

- [1]黄宇，尹毅，吴长顺.高压电缆阻水缓冲层电性能研究[J].电线电缆，2018(6): 6-9.
- [2]李陈莹，李鸿泽，陈杰，胡丽斌，谭笑，曹京荣.高压XLPE电力电缆缓冲层放电问题分析[J].电力工程技术，2018，37(2): 61-66.
- [3]杨帆，朱宁西，刘晓东，刘刚.基于阻抗评估电缆缓冲层间隙状况的实验与分析[J].广东电力，2018，31(12): 93-98.
- [4]李珊珊，严有祥，陈丽安，张玮玮.高压XLPE电缆缓冲层结构对载流量的影响研究[J].供用电，2019，36(1): 87-92.
- [5]王伟，欧阳本红，徐明忠，张静，严有祥.电缆缓冲层烧蚀现象初步分析[J].电线电缆，2019，0(5): 5-10.