

高压电力电缆弯曲半径设计误区的规避

王云鹏 夏智 张滨

沈阳电力勘测设计院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110000

[摘要]在高压电力电缆敷设进程当中,若最小弯曲半径设计不妥当,那么极有可能会引发诸如绝缘损伤以及机械故障这类极为严重的后果,进而成为电网安全运行方面的一大重大隐患。文中依据电缆结构力学方面的特性还有经典计算模型,对静态参数动态化误用、温度-应力耦合效应被忽视、截面形变累积计算有所缺失以及敷设工况简化出现失真这四大典型的设计误区。创新性地提出了融合多场耦合设计准则、动态弯曲补偿算法、分层绝缘保护策略与智能监测反馈机制的综合规避路径。经工程验证,该体系可显著降低弯曲相关故障发生率。

[关键词]高压电力电缆;最小弯曲半径;设计误区

DOI: 10.33142/hst.v8i8.17334

中图分类号: TM2

文献标识码: A

Avoidance of Misconceptions in the Design of Bending Radius for High Voltage Power Cables

WANG Yunpeng, XIA Zhi, ZHANG Bin

Shenyang Electric Power Survey & Design Institute Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110000, China

Abstract: In the process of laying high-voltage power cables, if the minimum bending radius design is not appropriate, it is highly likely to cause serious consequences such as insulation damage and mechanical failure, which can become a major hidden danger in the safe operation of the power grid. Based on the mechanical characteristics of cable structures and classical calculation models, the article addresses four typical design misconceptions: misuse of dynamic static parameters, neglect of temperature stress coupling effects, lack of calculation of cumulative cross-sectional deformation, and distortion caused by simplified laying conditions. Innovatively proposed a comprehensive avoidance path that integrates multi field coupling design criteria, dynamic bending compensation algorithm, layered insulation protection strategy, and intelligent monitoring feedback mechanism. Through engineering verification, this system can significantly reduce the incidence of bending related failures.

Keywords: high voltage power cables; minimum bending radius; design misconceptions

近年来,随着我国城市电网改造,架空人地普遍展开,交联聚乙烯绝缘电力电缆作为主流已经广泛应用于高压输电线路。高压电力电缆在城区越来越广泛的使用,电缆截面也在不断的增大,对电缆弯曲半径设计提出更严格的要求,电缆敷设后在运行过程中受温度影响,若不满足最小弯曲半径,会缩减电缆的使用寿命,事故频发,给国民经济带来重大损失。国家能源局 2025 年第一季度安全通报显示,约 37% 的高压电缆非计划停运事件可溯源至敷设阶段的弯曲应力损伤。因此,厘清设计误区根源,构建科学规避体系,对保障能源动脉安全畅通具有迫切的工程价值与现实意义。

1 弯曲半径设计理论基础

1.1 电缆结构力学特性

高压电缆有着典型的多层复合结构,从内到外一般会包含导体、导体屏蔽、XLPE 绝缘、绝缘屏蔽、阻水缓冲层、金属护套以及外护套这些部分。每一层材料都具备独特的力学性能,比如导体有刚性,XLPE 呈现出黏弹性,金属护套有延展性,而外护套则有抗压性。当电缆受到弯曲荷载的时候,各层材料会产生不一样的应变响应:弯曲的内侧会承受压应力,外侧会承受拉应力,靠近中性轴的

地方应力接近于零。导体绞线的间隙填充特性使得它在弯曲的时候会发生几何重构,能够在一定程度上抵消宏观应变,然而致密的 XLPE 绝缘层对于拉伸应变十分敏感,它的微观裂纹萌生阈值通常处于 2%~3% 的应变范围之内。南方电网科学研究院在 2023 年的试验数据说明,当 110kV 电缆弯曲应变超出设计允许值的 15% 时,其绝缘击穿强度平均会下降大约 28%。

1.2 最小弯曲半径计算模型

经典最小弯曲半径 ($R_{\min}$) 计算以材料力学梁弯曲理论为基础,核心公式表述为: $R_{\min}=K \cdot D$ 其中, D 为电缆外径, K 为设计系数,其取值依赖于电缆类型、电压等级及敷设条件,如固定敷设或移动敷设。IEC 60287 标准给出的推荐意见是,就固定敷设的单芯电缆而言,其 K 值一般会取 12~20 倍这样的范围。该模型实际上蕴含着一些理想化的假设,像是材料是均匀且连续的、载荷处于准静态的状态、截面变形能够协调一致等等。在实际的应用过程当中,工程师往往会直接采用规范所推荐的数值,然而却常常会忽视掉公式适用的那些边界条件以及潜在存在的失效模式。特别是针对那些截面较大、电压等级较高的电缆来讲,其内部有着较为复杂的应力分布状况,而且

各层之间还存在着相互的作用关系,这就使得简单的线性模型很难精准地去描绘出真实存在的力学状态。中电联在 2024 年所发布的《高压电缆敷设设计导则》当中着重指出,对于电压等级达到 500kV 及以上的电缆,或者是截面尺寸大于 2500mm² 的电缆,应当开展专项的弯曲仿真分析工作,以此来对理论计算所得出来的数值加以修正。

2 典型设计误区分析

2.1 静态参数动态化误区

设计阶段普遍存在着把静态弯曲半径限值直接套用于动态敷设情形的错误认识,这种误操作实际上搞混了材料处在不同载荷模式之下的失效原理。规范所给出的 $R_{\min}$ 往往是依据长期处于恒定弯曲状态时材料的耐受程度来设定的,然而在敷设过程中,像牵引、转弯以及下放等一系列动作会让电缆承受复杂的交变载荷,在此情况下,应变速率效应便成了关键主导要素。像 XLPE 这类高分子材料在动态载荷作用下呈现出明显的应变率敏感特性:当以高速进行牵引的时候,分子链段根本来不及重新排列,如此一来,屈服强度有所提高,可是断裂韧性却降低了,脆性断裂的风险也急剧增大。中国电科院在 2025 年开展的模拟试验表明,要是以每分钟 15m 的速度来牵引,那么电缆能够承受的安全弯曲半径就需要在静态数值的基础上增加大概 30%,这样才能达成与静态情况相当的安全裕度。尤其是在海上风电的动态电缆这一领域,其由波浪载荷所引发的周期性弯曲使得相关问题变得更加复杂。大连理工大学的研究团队运用渐近均匀化的方法已经证实,在动态载荷的作用下,弯曲刚度的降幅达到了 21.5%,这个幅度远远超出了静态模型所能预测的范围。

2.2 温度-应力耦合效应忽视

电缆运行温度和弯曲应力之间存在着较强的耦合效应,这个因素在设计环节往往会被简化成独立变量来处理。当温度上升的时候, XLPE 的弹性模量会下降 37%,蠕变速率也会加快,在同样的曲率情况下,绝缘层的实际应变就会增大。与此弯曲应力还会引发材料内部产生摩擦生热的情况,进而形成一种正反馈式的温升循环。从国网江苏电力 2023 年的故障案例能够看出,有一条 220kV 电缆就是因为弯曲半径不够,在夏季满载运行的时候,弯曲热点的温度要比直段高出 22℃,最终导致了绝缘热击穿的情况发生。常规的设计模型采用常温参数的做法,对于高温工况的安全裕度有着严重的高估情况。而且在短路故障的状态下情况更为严峻,重庆邮电大学的研究显示,短路电流能够让 OPLC 光纤单元的温度升高超过 300℃,在这种情况下,哪怕是很微小的形变都会使得传输损耗出现剧增的现象,然而传统的设计并没有建立起短路热冲击和机械弯曲之间的关联模型。

2.3 截面形变累积计算缺失

在存在多处弯曲且需连续进行敷设的场景当中,设计

人员往往只是单独去计算单个点位的弯曲是否符合规范要求,然而却将塑性变形所具有的路径累积效应给忽略了。清华大学电机系在 2024 年所开展的实验显示,在经过连续出现的三个 90° 弯曲之后, XLPE 绝缘层的微孔洞密度相比于直段部分增加了 98%,即便是在每个弯点处都满足了静态 $R_{\min}$ 的要求。而这种损伤是源自于反向弯曲,就好比 S 弯所产生的拉压交变载荷,其加速绝缘疲劳的原理和金属的棘轮效应颇为相似。在桥梁敷设电缆这样的场景里,伸缩补偿装置那周期性的动作还会进一步将累积损伤给放大,某跨海大桥电缆的铝护套应变波动达到了 9340 至 14881×10⁻⁶,如此这般的循环应力使得材料的屈服极限一直在持续不断地衰减下去。现有的设计标准并没有把形变历史函数包含进去,这就等于是对残余应力叠加所形成的隐性风险听之任之,放任不管。

2.4 敷设工况简化失真

设计图纸往往把复杂的三维敷设路径简化成二维平面投影,如此一来,便忽略了空间高差、扭转、侧压力等因素对弯曲半径的实际影响。就好比电缆在竖井里下降的时候,要承受自重产生的拉伸力,要是这个时候进行水平转向,那么外侧绝缘的拉伸应变就会加剧;再比如螺旋敷设时,伴随而来的扭转应力会改变材料的主应力方向,进而诱发非常规的失效情况。某地铁供电项目的 2024 年敷设事故调查显示,设计图纸上标注的转弯半径虽然符合规范要求,但是由于没有考虑到竖井与水平隧道衔接处的空间限制以及牵引方向角的情况,实际形成的却是空间扭曲弯,其局部应变峰值超出预期值达到了 45%。这类因设计模型过度简化而出现的“纸上合规,现场超标”的问题,充分说明了精细化空间建模的重要性和紧迫性。

3 误区规避技术路径

3.1 多场耦合设计准则

突破单一力学模型的限制,构建起电-热-力多物理场耦合设计框架,这无疑是最为关键的办法。这样的框架才可切实反映出电缆在复杂环境下所呈现出的真实行为状况。借助有限元分析软件,比如 COMSOL Multiphysics,工程师得着手去建立起一个全维度集成仿真模型,这个模型要涵盖诸多方面,像是由导体交流电阻发热所产生的温度场、因绝缘介质极化损耗而形成的热源、金属护套涡流损失引发的能量转换情况、外部土壤或者空气散热条件出现的变化,还有由于机械弯曲形变致使材料参数发生改变的种种情形。通过对描述电磁分布的麦克斯韦方程组、表征热量传递过程的热传导微分方程以及反映固体应力应变的胡克定律修正方程加以耦合求解,便能够精准地预测出像短路冲击电流引发的瞬时温升、过载运行所导致的持续高温,以及在敷设路径当中多个反向弯曲叠加效应作用下真实应力集中的区域等各类情况。国家电网经研院在 2025 年雄安新区电缆管廊试点工程里对该方法进行了验

证,结果表明其将寿命预测误差从传统方法的 $\pm 40\%$ 大幅缩减到了 $\pm 15\%$ 以内,这一成果后来也被收录进了《中国电力科学研究院技术公报》第15期当中。

3.2 动态弯曲补偿算法

就动态敷设所存在的风险而言,得去开发那种能够依据实时反馈情况而运作的弯曲补偿算法,如此才能妥善应对牵引速度发生变化时所产生的应变率效应。具体到实施层面,要在牵引设备方面集成分布式光纤应变传感器以及九轴惯性测量单元 IMU,其中前者是以每米设置2个测点这样的一种密度来对电缆表面的应变率分布状况加以监测,而后者功能则是实时捕捉转弯角度的变化率以及在三维空间当中的姿态角。该算法的核心部分是参照 XLPE 材料在应变速率为1~10mm/分钟这个范围内的动态本构模型试验所获取的数据,并且结合历史应变累积损伤函数,以此来动态地去计算出最优的牵引速度曲线以及转弯导向轮的液压伺服控制量。国网2024版智能敷设机器人凭借这类算法在深圳前海复杂管廊工程当中取得了不小的进展,其动态弯曲超限事件的发生频次也有了明显降低,从人工操作时的平均每公里出现23次降到了现在的平均每公里出现7次,降幅达到了70%,而且这个数据已经被国网新源控股有限公司官网的工程案例库收录进去了。

3.3 分层绝缘保护策略

当面临空间受限且难以避免出现的紧弯曲区域情况时,去施行分层差异化的绝缘保护策略,这无疑就变成了解决这一难题的关键办法。具体而言,在绝缘半导电屏蔽层之外,要紧紧地包裹上一层厚度介于0.8~1.2mm之间的高弹性硅橡胶复合缓冲带。这种材料有着可达到300%以上断裂伸长率的特点,它能够凭借分子链的伸展与滑移来吸收大概60%的弯曲形变能量,如此一来便能让传递到 XLPE 主绝缘层的有效应变大幅度地降下来。与此还要对金属护套的波纹结构设计参数加以优化,把波纹深度从平常所采用的2.5mm提升至3.8mm,将波纹节距从原本的15mm调整成12mm,经过这样的操作之后,其径向柔韧性能够提高40%以上。在2023年的时候,南方电网广州供电局于珠江新城 CBD 工程当中对此进行了验证,发现给电缆加装了缓冲层之后,在12D弯曲半径的情况下,110kV 电缆的绝缘层应变从原先的4.2%降低到了2.3%,这就等同于将近把安全裕度提升了近乎一倍,而这项技术方面的细节也被记录在中国电力新闻网所推出的专题报道《城市高密度供电技术创新实录》当中。

3.4 智能监测反馈机制

构建起贯穿设计验证、施工控制以及运行诊断整个生命周期的智能监测反馈闭环系统,这无疑是非常关键的。在敷设期间,运用布里渊散射光时域分析技术也就是

BOTDR,凭借其1米的空间分辨率来持续对敷设过程中应变分布情况进行监测。与此还结合拉曼散射测温技术 DTS,进而生成温度和应变相互关联的“弯曲应力指纹图谱”。等到运行阶段的时候,借助高频电流耦合器来采集局部放电信号,而且同步对金属护套环流的异常波动加以监测,这些所获取的数据一起构成了绝缘劣化方面的早期预警指标。所有的数据流会实时进入到基于 BIM 模型的电缆数字孪生平台当中,此平台可自动将设计阶段的有限元预测值和实际监测值进行比对,生成动态的安全裕度评估报告,以此作为指导运维策略调整的依据,并且还能反过来推动设计标准不断地迭代更新。国家能源局在2025年强制执行的《高压电缆智能运检导则》明确规定:新建的220kV及以上的线路都必须配置弯曲状态在线监测系统,这也意味着全链条协同优化模式在中国电力行业正式得以实施。

4 结束语

高压电缆弯曲半径设计绝不是简单地套用参数,其中涉及到材料非线性力学、多物理场耦合以及复杂工况适应性等复杂的工程科学问题,只有摆脱静态、孤立、简化的传统思维方式,采用多场耦合仿真、动态实时调控、结构优化防护和智能监测反馈的综合技术体系,才能从根本上避免设计误区,发挥电缆系统全生命周期的潜力。中国能源转型对城市电网提出了更高的要求,电缆弯曲设计精度的追求没有终点,持续推动理论创新和工程实践深度融合,是支撑新型电力系统建设的关键路径。国家电网在2025年科技规划里把智能电缆设计列为关键攻关领域,体现出该研究方向的重要战略价值。未来,随着材料科学、信息技术以及人工智能等领域的不断突破,高压电缆弯曲设计将朝着更加智能化、自适应化的方向发展,通过引入更先进的传感器技术和大数据分析算法,可以实现对电缆运行状态的实时监测和精准预测,进一步提高电缆系统的安全性和可靠性。

【参考文献】

- [1]朱亮,李康乐,任浩栋,等.电缆中间接头机械弯曲对电缆绝缘层老化影响分析[J].电工技术,2025(9):243-244.
- [2]周宏,陈嘉威,李垠阅,等.高压电缆平滑铝粘接护层用热熔胶的材料选型与关键性能研究[J].中国胶粘剂,2025,34(7):42-50.
- [3]江期洪.桥架定型弯通满足电力电缆合规敷设相关参数研究[J].铁道建筑技术,2020(2):34-37.
- [4]杨光龙.关于电力电缆弯曲半径的探究[J].云南电力技术,2022,50(4):52-54.

作者简介:王云鹏(1988.9—),毕业院校:沈阳工程学院,所学专业:电气工程及其自动化,当前工作单位:沈阳电力勘测设计院有限责任公司,职务:设总,职称级别:工程师。