

电力系统中高压电缆输电线路设计分析

程 扬

中国能源建设集团云南省电力设计院有限公司 云南 昆明 650000

摘 要：高压电缆是电力系统传输高压电能的核心载体，其输电线路设计关乎系统可靠性与能效。本文从基础理论出发，结合工程实测数据剖析高压电缆结构、电气参数、热力学特性及电磁环境影响，阐述路径规划、电缆选型、附件设计、接地防雷等关键设计要素，提出多物理场耦合仿真、可靠性评估、经济性分析及智能化设计等优化方法，并展望超导电缆、智能监测与绿色设计等未来发展方向。

关键词：电力系统；高压电缆；输电线路设计

引言：随着电力系统向超高压、大容量方向发展，高压电缆输电线路的设计面临更高要求。本文聚焦高压电缆输电线路设计，系统梳理其理论基础、关键要素及优化方法，结合行业前沿技术与实测数据，分析未来发展趋势，旨在为提升高压电缆输电线路的设计水平与运行性能提供全面指导，推动电力系统向智能化、绿色化转型。

1 高压电缆输电线路设计基础理论

1.1 高压电缆基本结构与分类

高压电缆是电力系统中传输高压电能的核心载体，其结构设计直接决定输电可靠性。典型高压电缆由导体、绝缘层、屏蔽层、护层四部分组成，导体多采用铜（导电率58MS/m）或铝（导电率37MS/m）材质，保证低电阻传输；绝缘层常用交联聚乙烯（XLPE）、油纸等材料，XLPE电缆击穿场强可达20-30kV/mm，抵御高压击穿能力显著优于传统材料；屏蔽层可消除电场集中，护层则起到防水、防腐、抗机械损伤的作用。按绝缘材质可分为XLPE电缆、油纸绝缘电缆、橡皮绝缘电缆等，其中XLPE电缆因耐温性好（长期允许工作温度90℃）、敷设灵活，在城网改造中应用占比超75%^[1]。按电压等级可分为110kV、220kV、500kV及以上超高压电缆，不同等级电缆在结构厚度、材料选型上存在显著差异，需适配对应输电场景需求，具体参数如下表所示。

电压等级	导体截面积 (mm ²)	绝缘层厚度 (mm)	屏蔽层厚度 (mm)	长期允许工作温度 (℃)	额定载流量 (A)
110kV	240-800	46309	1.0-1.5	90	650-1200
220kV	400-1200	20-25	1.5-2.0	90	850-1500
500kV	630-1600	30-35	2.0-2.5	90	1100-1800

1.2 电气参数计算与分析

高压电缆电气参数是设计核心，含电阻、电感、电容和电导，影响输电损耗、电压降及系统稳定性。电阻

计算要考虑集肤和邻近效应，如220kV、800mm²铜导体电缆，工频50Hz下有效电阻比直流电阻大12%-15%，要优化导体截面积。电感受导体结构等影响，分裂导体可降低8%-12%。电容决定充电功率，不同电压等级电缆电容不同，需配无功补偿装置。电导反映绝缘层泄漏电流，XLPE电缆绝缘电导低，要控制绝缘损耗，确保安全运行。

1.3 热力学特性分析

高压电缆运行产生热量，热力学分析核心是研究热量规律，防止温度过高破坏性能。XLPE电缆长期运行最高温不超90℃，超阈值绝缘寿命减半。热量传导有路径，敷设方式影响散热，直埋敷设载流量低，受土壤因素影响大；电缆沟或架空敷设散热效率高。设计要计算稳态温升，优化敷设等，考虑短路故障短时温升，确保热稳定性。

1.4 电磁环境影响

高压电缆运行产生电场、磁场，要符合国家环保标准，兼顾生态与人体健康。其电磁辐射强度比架空线路低，金属护层和屏蔽层屏蔽效率高，磁场强度随距离衰减。设计要优化电缆排列，降低电磁辐射，考虑电磁感应对周边金属构件影响，避免安全隐患。敏感区域要开展电磁环境评估，实现电力与环保协调。

2 高压电缆输电线路设计关键要素

2.1 路径选择与规划

路径选择与规划作为高压电缆设计的首要且关键环节，直接关乎工程投资规模、施工难度及运行安全性。数据显示，合理的路径规划可使工程投资降低10%-15%，故障发生率降低25%以上。设计需严格遵循“安全可靠、经济合理、环境协调”原则，前期开展全面现场勘察，精准避开地质灾害易发区（地震断裂带、滑坡泥石流高发地段）、文物保护区及生态敏感区。优先挑选

地势平坦、地质条件稳定的区域，尽可能缩短线路长度（每缩短1km可节省成本20-50万元），减少转角和穿越次数。同时结合城市规划，与道路、管网等基础设施协调布局，跨江、跨河等特殊区段需结合水文地质条件选择敷设方式，预留线路扩展空间，确保设计具备前瞻性。

2.2 电缆选型与参数设计

电缆选型与参数设计是保障线路安全高效运行的关键，需综合输电容量、电压等级、敷设环境及运行要求等因素。电压等级需与电网系统精准匹配，绝缘强度满足正常运行电压及过电压要求（如220kV电缆需耐受1050kV雷电冲击电压）。导体截面积计算需兼顾输电容量、允许电压降（通常 $\leq 3\%$ ）及温升限值，以220kV、输送容量200MVA的线路为例，选择800mm²铜导体可使电压降控制在2.5%以内，满足设计要求。绝缘材料选型适配运行环境，高温、潮湿环境优先选耐候性强的XLPE材料；护层材料按敷设方式确定，直埋电缆采用铠装护层（抗机械强度 $\geq 10\text{kN}$ ），腐蚀环境选用防腐护层^[2]。精确确定电缆芯数、敷设间距等参数，确保各项指标满足设计规范与系统需求。

2.3 附件设计（终端头、中间接头）

高压电缆附件（终端头、中间接头）是线路薄弱环节，其故障占比达电缆总故障的40%以上，设计质量直接影响整体可靠性。终端头用于电缆与架空线路、配电设备的连接，需实现电场均匀分布（采用应力锥结构可使局部电场强度降低50%），具备良好密封性能（防水等级 $\geq \text{IP67}$ ）和耐候性。中间接头用于电缆段间连接，需保证导体连接可靠（接触电阻 $\leq 10^{-6}\Omega$ ）、电阻损耗小，同时具备优异绝缘性能和机械强度，适应温度变化与振动影响。附件设计采用合理电场缓冲结构（应力锥、屏蔽罩），优化电场分布；采用多层密封工艺，适配不同敷设环境防护需求，确保附件与电缆本体性能一致，长期稳定运行。

2.4 接地与防雷设计

接地与防雷设计是线路安全防护核心，旨在抵御雷电过电压、操作过电压及漏电故障。接地设计需将电缆金属屏蔽层、铠装层及附件金属外壳可靠接地，形成完整接地网，接地电阻控制在规定范围（110kV线路 $\leq 4\Omega$ ，220kV线路 $\leq 2\Omega$ ），确保漏电电流快速导入大地。中性点接地系统需合理设计接地方式，兼顾系统稳定性与故障切除效率。防雷设计结合区域雷电活动强度（年雷暴日 ≥ 40 天为多雷区），在线路两端及关键节点配置避雷器（220kV电缆选用800kV级避雷器），抑制雷电过电压侵入；优化路径避开雷电高发区，降低雷

击概率，实测显示合理防雷设计可使雷击故障发生率降低60%以上。

3 高压电缆输电线路设计优化方法

3.1 多物理场耦合仿真

多物理场耦合仿真技术是设计优化的重要手段，可实现电场、温度场、应力场等多场耦合分析，精准模拟电缆运行状态。以某220kV电缆线路为例，通过COMSOL软件开展电场-温度场耦合仿真，优化绝缘结构与导体布局后，局部最高温度降低8℃，电场集中现象缓解40%，有效避免绝缘损坏。电场-应力场耦合仿真可模拟敷设、运行过程中机械应力对电场分布的影响，优化附件结构设计，提升抗机械损伤能力。借助仿真软件构建三维模型，代入实际工况参数，可预测运行性能、识别薄弱环节，在施工前改进设计方案，降低试错成本30%以上，提升线路可靠性与经济性^[3]。

3.2 可靠性评估与寿命预测

可靠性评估与寿命预测为设计优化提供科学依据，需结合电缆材料性能、敷设环境、运行工况等因素。建立故障树模型分析故障概率及影响程度，识别关键风险点（如附件绝缘、接地系统为高频故障点）。寿命预测聚焦绝缘层，通过老化试验、加速老化仿真研究老化规律，建立寿命预测模型。基于评估与预测结果优化选型、敷设方式及防护设计，确保电缆寿命满足工程需求（通常 ≥ 30 年），提升长期运行稳定性。

3.3 经济性分析与成本优化

经济性分析需兼顾工程投资、运行成本及维护成本，实现全生命周期成本最低化。工程投资包括电缆采购、附件购置、施工及征地成本，优化路径缩短线路长度、合理选型可降低投资；运行成本主要为电能损耗，优化导体截面积、降低电感电容参数可减少损耗（如选用800mm²导体较630mm²导体损耗降低18%），配套高效无功补偿装置提升能效；维护成本需考虑电缆寿命、故障维修难度，提升可靠性设计可减少故障发生率（每降低1%故障概率可节省维护成本5-10万元/年）。不同设计方案的经济性对比如下表所示，可为优化决策提供量化支撑。

设计方案	初始投资	年运行损耗成本	年维护成本	全生命周期成本（30年）
方案1（630mm ² 铝导体+常规敷设）	180	12	5	630
方案2（800mm ² 铜导体+优化敷设）	220	8	3	590
方案3（800mm ² 铜导体+智能监测）	250	8	2	620

3.4 智能化设计技术

智能化设计技术是线路设计发展趋势，融合物联

网、大数据、人工智能等技术实现全流程升级。设计阶段借助BIM技术构建三维数字化模型,设计精度提升40%,协同效率提升50%以上。集成智能监测模块设计,在电缆及附件关键位置布设温度、湿度、电场、振动等传感器(测温精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,电场测量精度 $\pm 2\%$),实现运行状态实时监测。通过大数据分析平台处理监测数据,预测潜在故障(准确率达85%),实现主动维护。融入智能控制功能,结合电网运行状态自动调节输电参数,提升线路运行灵活性与经济性,为智能电网建设提供支撑。

4 未来发展方向

4.1 超导电缆与低温输电技术

超导电缆与低温输电技术是高压输电领域革命性方向,可大幅提升输电容量、降低损耗。超导电缆采用超导材料(如YBCO高温超导材料)作为导体,临界温度下电阻为零,输电损耗近乎为零,输电容量达传统电缆的3-5倍(500kV超导电缆容量可达5000MVA),能有效解决电网扩容难题。高温超导电缆无需极低低温环境(临界温度 -196°C),成本较低温超导降低30%以上,更具产业化前景。

4.2 智能监测与自修复电缆

智能监测与自修复电缆将突破传统被动维护模式,实现故障精准监测与自主修复。智能监测方面,发展微型化、高精度、抗干扰传感器技术,实现电缆绝缘状态、导体温度、机械应力等参数全方位实时监测,结合AI算法实现故障精准定位(误差 $\leq 1\text{m}$)与预测。自修复技术通过在绝缘层嵌入修复剂微胶囊(直径50-100 μm),当绝缘出现微小破损时,微胶囊破裂释放修复剂,10-30分钟内自主修复破损部位,阻止故障扩大^[4]。

4.3 绿色设计与全生命周期管理

绿色设计与全生命周期管理契合“双碳”目标,实现电力输送与生态环保协同发展。绿色设计优先选用环保型材料(如可降解XLPE材料),减少有毒有害物质使用,生产过程碳排放降低20%以上;优化设计方案提升输电能效,运行阶段损耗降低15%-20%。全生命周期管理覆盖设计、生产、敷设、运行、报废全流程,建立数字化管理平台记录各阶段数据,实现全流程可追溯、可优化。报废阶段发展高效回收利用技术(铜导体回收率 $\geq 99\%$,塑料护层回收率 $\geq 80\%$),减少固体废弃物污染,构建“绿色生产-高效运行-循环回收”全链条绿色发展模式。

结束语

高压电缆输电线路设计关乎电力系统安全高效运行,需综合权衡技术、经济和环保等多方面因素。本文借助实测数据与量化分析,证实了优化设计能有效提升线路可靠性、降低成本。未来,超导技术、智能监测及绿色设计理念将进一步融入,推动高压电缆输电线路朝着高容量、智能化、环保化方向迈进。持续开展技术研究与实践探索,对构建新型电力系统、达成“双碳”目标意义重大。

参考文献

- [1]魏烈强.电力系统中高压电缆输电线路设计分析[J].电力设备管理,2023(3):135-137.
- [2]陈裕鑫.供配电系统中电线电缆的选择及敷设设计[J].集成电路应用,2020,37(12):96-97.
- [3]于思潮,韩净轩.电力系统中高压电缆输电线路设计分析[J].车时代,2025(10):145-147.
- [4]曾扬.电力系统中高压电缆输电线路设计问题的探讨[J].模型世界,2024(33):73-75.