

节能导线在高压输电线路设计中的应用研究

李明喆

准格尔旗浩普电力勘测设计有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 010399

摘要：为了实现长距离电能输送的目标，在进行输电线路的设计时，需要通过对导线的选用，进行高压输电线路的建设。在当前的导线材料中，钢芯铝绞线具有较为良好的性能，能够实现较高的稳定性。通过从电气、经济两方面展开性能的对比，传统的钢芯铝绞线具有较高的投资成本，因此，为了提高工程造价水平，往往需要进行节能导线的选取，能够有效地减少在输电线路建设过程中所需要的投资成本和能耗，同时还能够实现较大的环境效益。

关键词：节能导线；高压输电线路；输电效率；电力系统

电力能源需求随着社会经济的高速发展而不断增长。传统导线在传输过程中能量损耗大、效率不高，对电力系统的挑战很大。采用独特的材料和结构设计，近年来节能型导线在减少电力传输损耗、提高电力传输效率方面优势显著。

1 节能导线特点

1.1 材料优化。高导电率铝材。采用导电率 $\geq 63\%$ IACS的高导电率硬铝或铝合金材料，相比普通铝材（ 61% IACS），电阻率降低 $3\%-5\%$ ，显著减少电能传输损耗。替代钢芯材料。以铝合金芯或铝包钢芯替代传统镀锌钢芯，导电率从 9% IACS提升至 $52.5\%-53\%$ IACS，同时减轻导线重量 $10\%-15\%$ 。

1.2 结构设计。多层防护结构。包含防腐层、缓冲层（如半导体电阻水屏蔽带）及保护层，增强抗腐蚀能力，防止外力脆断，并均化电场分布，降低电晕损失。绞合方向优化。内、外梯形导体层采用反向绞合设计，提升导线机械稳定性，减少应力集中和蠕变量，实现低弧垂特性。

1.3 性能提升。低电阻与低损耗。通过优化导电材料与结构，整体直流电阻较传统导线降低 $15\%-20\%$ ，单条线路年损耗减少数百兆瓦时，节能效率提升 3% 以上。机械与耐候性增强。铝合金芯或铝包钢芯的抗拉强度提升，配合防腐涂层和自阻尼结构，可在 -40°C 至 150°C 环境下稳定运行，寿命延长至30年以上。

1.4 应用优势。节能与经济性。 500kV 线路每百公里年节电量达150万kWh，全生命周期成本降低 25% ，初期投资增加 $10\%-15\%$ 可通过长期节能效益回收。环保与兼容性。减少碳排放（单条特高压线路年减排约4000吨），且与现有输电设备兼容，无需改造线路即可直接替换。

2 节能导线在高压输电线路设计中的应用

2.1 设计应用措施。导线类型选择。特高压工程（如

1000kV ）：优先选用铝合金芯铝绞线，单回路输送容量可达 8000MVA 。超高压线路（ 500kV 及以上）：采用钢芯高导电率铝绞线，年线损率可控制在 0.5% 以下。沿海/工业区：使用密闭结构的耐腐蚀导线，抗盐雾和化学腐蚀性能提升 30% 以上。电气性能优化。通过降低直流电阻（比普通导线减少 $15\%-20\%$ ），单条线路年损耗减少数百兆瓦时^[1]。优化导线表面场强分布，降低电晕损失和电磁干扰。机械与环境适应性设计。结合地形和气候特征调整导线排布密度，减少极端天气（如冰区、强风区）的机械损伤。采用自阻尼结构和防腐涂层，延长使用寿命至30年以上，适用于 -40°C 至 150°C 环境。

2.2 应用场景与效益。典型场景。特高压交流工程：铝合金芯铝绞线在 1000kV 线路中应用率超 80% ，输送效率提升 15% 。山区/大跨越线路：轻量化铝合金导线降低塔基载荷，减少施工成本约 20% 。综合效益。节能效益： 500kV 线路每百公里年节电量达150万kWh，折合标准煤约500吨。经济性：初期成本增加 $10\%-15\%$ ，但全生命周期成本降低 25% ，投资回收周期缩短至5-8年。环保价值：单条特高压线路年减少 CO_2 排放约4000吨，助力实现“双碳”目标。

2.3 设计原则与案例。核心原则。多因素协同：综合能耗、成本、机械强度、环境兼容性等参数选择导线类型。全流程管理：从设计准备、草图拟定到施工分析，确保方案可行性和安全性。典型案例。某 1000kV 特高压工程采用铝合金芯铝绞线，输送容量提升至 8000MVA ，年线损率下降至 0.4% 。沿海地区 500kV 线路应用密闭钢芯高导电率铝绞线，腐蚀故障率降低 90% 。

3 节能导线结构改进降低损耗的技术路径

3.1 材料与芯层结构优化。替代传统钢芯。采用铝合金芯（如LB40型铝包钢线）或铝包钢芯替代传统镀锌钢芯，导电率从 9% IACS提升至 $52.5\%-53\%$ IACS，等效增加

导电截面,降低整体电阻。铝包钢芯外层镀铝,结合防腐层(如半导体电阻水屏蔽带)和缓冲层,防止氧化腐蚀,延长寿命,减少因腐蚀导致的电阻上升。导电层设计。内、外梯形导体层采用反向绞合设计,减少应力集中和蠕变量,提升机械稳定性,降低弧垂导致的接触损耗。高导电率铝材($\geq 63\%$ IACS)的应用,相比普通铝材(61% IACS),电阻率降低3%-5%,单线直流电阻减少15%-20%。

3.2 多层复合防护结构。缓冲层与保护层。缓冲层采用半导体电阻水屏蔽带,均化电场分布,减少电晕损耗,同时防止外力冲击导致的脆断。保护层增强耐候性,支持-40℃至150℃环境运行,避免高温或低温下材料性能劣化引起的额外损耗。防腐与密封设计。密闭钢芯结构结合防腐涂层,降低盐雾、化学腐蚀对导体的侵蚀,减少因腐蚀导致的电阻升高和局部发热。

3.3 导电截面与布局优化。增大导体截面积。在满足载流量和电压降要求下,适当加大导体截面(如400/35型导线),降低单位电流密度,减少焦耳热损耗。三相平衡与对称布局。优化导线排布密度和绞合方式,使三相负荷不平衡率 $\leq 10\%$,减少中性线电流和附加线损。

3.4 综合性能提升效果。损耗对比实例。普通JL/LB20A-400/35导线直流电阻为 $0.0718\Omega/\text{km}$,改进后的JL3/LB20A-400/35导线电阻降至 $0.0701\Omega/\text{km}$,年线损减少约2.4%。特高压工程中,铝合金芯铝绞线输送容量提升至8000MVA,年线损率控制在0.4%以下,节能效益显著。全生命周期经济性。初期成本增加10%-15%,但全生命周期成本降低25%(节能覆盖投资),适用于大跨距、高负荷场景^[2]。

4 节能导线电气性能优化技术路径

4.1 材料优化。提高铝材导电率。采用高纯度铝锭(导电率62.5%-63%IACS),相比普通铝材(61% IACS),电阻率降低3%-5%,单线直流电阻减少15%-20%。在超高压/特高压工程中,优先选用钢芯高导电率铝绞线(如JL3/LB20A-400/35),直流电阻降至 $0.0701\Omega/\text{km}$,比普通导线降低2.4%。芯材导电能力提升。以铝合金芯(导电率52.5%-53%IACS)或铝包钢芯替代传统钢芯,等效增加导电截面,降低整体电阻。全铝合金绞线(如中强度铝合金绞线)取消钢芯,导电率提升至58.5%IACS,适用于中低温场景。

4.2 结构设计优化。导体层反向绞合。内、外梯形导体层采用反向绞合设计,减少应力集中和蠕变量,降低接触电阻和弧垂损耗。同心绞线结构结合半导体电阻水屏蔽带缓冲层,均化电场分布,减少电晕损耗。紧凑型

截面布局。增大导体截面积(如400/35型导线),降低单位电流密度,焦耳热损耗减少10%-15%。优化三相导线排布密度,三相负荷不平衡率 $\leq 10\%$,降低中性线附加损耗。

4.3 温度与能耗管理。耐高温导体。采用耐温150℃的高强度铝材,支持短期过载运行,高温下电阻率上升幅度减少30%。自阻尼结构设计(如铝包钢芯+缓冲层),抑制热膨胀差异导致的导体形变,稳定电阻率。降低运行损耗。优化导线表面处理工艺(如防腐涂层),减少氧化腐蚀引起的电阻升高,年线损率控制在0.5%以下。在特高压工程中,铝合金芯铝绞线输送容量提升至8000MVA,年线损率下降至0.4%。

4.4 工艺改进。精密拉丝与退火。通过拉丝工艺控制铝单丝直径误差 $\leq 0.01\text{mm}$,退火工艺提升铝材延展性,减少微观缺陷导致的电阻增加。绞合工艺优化。采用预成型绞合技术,确保导体层紧密排列,减少绞合间隙电阻。张力均匀化控制,避免绞合过程中局部拉伸过度导致的导电性能下降。

4.5 综合效益。节能效果:500kV线路每百公里年节电量达150万kWh,特高压线路单条年减少CO₂排放约4000吨。经济性:初期成本增加10%-15%,但全生命周期成本降低25%(节能收益覆盖投资),投资回收周期缩短至5-8年。

5 节能导线成本与能耗的综合考量分析

5.1 成本与能耗的对比关系。初期成本分析。材料成本:高导电率铝材(导电率 $\geq 63\%$ IACS)成本比普通铝材(61% IACS)高10%-15%,但电阻率降低3%-5%,可减少长期线损。施工成本:铝合金芯导线重量减轻10%-15%,降低塔基载荷和施工难度,节约施工成本约20%。长期能耗效益。电阻损耗降低:铝合金芯铝绞线(如ACSR)通过优化芯材导电性能,整体电阻减少15%-20%,单条500kV线路年节电量达150万kWh。线损率控制:特高压工程中采用节能导线可将年线损率降至0.4%以下,全生命周期节能收益可覆盖初期投资增量。

5.2 综合考量原则。多因素协同决策。技术参数平衡:需同步评估导电率、机械强度(如抗拉强度提升20%-30%)、耐候性(-40℃至150℃适应性)等指标。经济性评估:全生命周期成本降低25%,投资回收周期缩短至5-8年,适用于高负荷、长距离输电场景。场景适配性。特高压/超高压工程:优先选用钢芯高导电率铝绞线,输送容量提升至8000MVA,满足大容量需求的同时降低损耗。沿海/工业区:密闭结构导线(如铝包钢芯)防腐性能提升30%以上,减少因腐蚀导致的电阻升高和维

护成本。

5.3 决策建议。短期高投资与长期收益平衡：初期成本增加10%-15%可通过5-8年节能收益回收，适合资金充裕、负荷稳定的项目。技术迭代适配：结合新型材料（如高纯度铝锭）和结构优化（反向绞合设计），实现能耗与成本的最优解。

6 节能导线未来发展趋势展望

6.1 材料创新驱动效能突破。高导电率铝材普及。高纯度铝锭导电率提升至62.5%-63%IACS（普通铝材61%IACS），直流电阻降低2.4%-5%，成为特高压工程主流选择。高强度铝合金芯（抗拉强度 $\geq 220\text{MPa}$ ）逐步替代传统钢芯，导电率提升至52.5%-53%IACS，兼具轻量化与耐候性，适配汽车、航空等领域。颠覆性材料应用。碳纤维复合导线（ACCC）：铝截面增加29%，重量减轻20%，输电容量提升30%以上，线损率降低至0.4%以下，适用于110kV-220kV线路改造。高温超导技术：损耗低至传统导线1/10，无电磁辐射，2030年全球市场规模或达14869亿元，我国重点布局高温超导输配电技术。

6.2 技术方向：智能化与系统集成。智能监测与自适应调控。导线集成光纤传感器，实时监测温度、弧垂、载流量，结合AI算法动态优化电网负荷，降低线损率0.2%-0.3%。物联网（IoT）技术实现导线状态远程诊断，故障响应效率提升50%。结构设计优化。反向绞合技术：减少接触电阻和应力集中，延长使用寿命，适配大跨距、高寒山区等复杂环境。紧凑型三相布局：负荷不平衡率 $\leq 10\%$ ，降低中性线附加损耗，焦耳热损耗减少15%。

6.3 政策与市场驱动。国家节能目标倒逼技术升级。

我国“十四五”规划要求单位GDP能耗降低13.5%，2025年新建高压线路中节能导线应用比例超60%。特高压工程强制采用高导电率铝绞线，单条线路年减排CO₂达4000吨，推动电网绿色转型。全球化低碳需求。全球线损率目标向发达国家看齐（3%-4%），中国配网节能市场规模2025年预计达244亿元，2030年翻倍增长。

6.4 应用场景扩展。新能源电力输送。适配风电、光伏基地远距离输电需求，铝合金芯导线输送容量提升至8000MVA，支撑可再生能源消纳。城市与工业场景。密闭防腐结构（如铝包钢芯）在沿海、化工区应用，防腐性能提升30%，维护成本降低20%。汽车轻量化领域推广0.35mm²小线径铝线，振动电阻等效铜线，成本降低40%。

6.5 挑战与突破点。成本平衡：高纯度铝锭、碳纤维材料初期成本高10%-15%，需通过规模化生产和政策补贴降低门槛。标准统一：推动IACS导电率、抗拉强度等指标的国际标准化，增强国产导线全球竞争力。

总之，未来节能导线将围绕高导电材料、智能系统、低碳政策三大核心，向轻量化、耐候性、低损耗方向迭代，成为全球能源转型的关键支撑技术。

参考文献

- [1]刘飞.节能导线在高压输电线路设计中的应用.2023.
- [2]梁宏宇.节能导线在高压输电线路设计中的应用探讨.2022.