

低压配电线缆经济截面选型与全生命周期能耗成本分析

黄 宇

湖南华菱线缆股份有限公司 湖南 湘潭 411104

【摘 要】：在低压 0.4kV 配电工程设计中，电缆截面直接决定供电安全性、线路电能损耗与项目总体投入。当前国内多数建筑、工业配电项目受限额设计约束，设计人员往往优先选用满足载流量、电压降、热稳定条件的最小截面电缆，片面压低工程初期采购造价，忽略线缆长达 25 年服役周期内持续产生的电能损耗电费，造成“建设省钱、长期亏损”的经济矛盾，难以契合双碳目标下电网节能降耗的总体要求。全生命周期成本分析法（LCC）综合考量电缆一次性投资、逐年能耗支出、检修运维费用以及报废残值，把未来多年的运营成本折算为现值，实现一次性造价与长期能耗费用的综合平衡。本文首先剖析传统电缆截面选型模式存在的短板，搭建低压铜芯电缆全生命周期成本数学模型，结合经济电流密度准则开展多方案截面比选，并依托工业配电实例对比不同规格线缆的总拥有成本。测算结果证明，对于年负荷利用小时数高、长期不间断运行的工业厂房、充电桩干线、中央空调回路，合理放大电缆截面能够显著降低导体焦耳损耗，虽然初次投入有所增加，但全寿命周期总成本能够降低两成以上。研究结论可为低压配电线路精细化选型、老旧配电网线损改造、绿色建筑电气设计提供量化参考依据。

【关键词】：低压配电；电缆截面；经济电流密度；全生命周期成本；线损能耗；LCC 模型

DOI:10.12417/2811-0722.26.08.003

1 引言

随着新型电力系统建设不断推进，配电网节能管控力度持续加大，降低低压配电线路的有功损耗已经成为电力降本增效的核心工作。0.4kV 低压电缆线路覆盖面广、回路数量庞大，导体电阻发热带来的电能损耗占据配电网线损总量的很大比重，而线缆截面是控制导体电阻、削减线路损耗最关键的设计参数。

依据现行国标《电力工程电缆设计标准》GB 50217-2018，电缆截面选择包含两项约束条件：一是安全技术条件，必须满足长期允许载流量、短路热稳定校验、线路电压损失限值；二是经济约束条件，按照经济电流密度选取最优截面，兼顾建设投资与长期能耗支出。但在工程落地阶段，投资方普遍严控材料预算，设计人员大多只完成载流量与电压降两项校核，跳过经济截面技术经济比选环节。

对于年负荷利用小时超过 4000h 的持续性负荷线路，经济截面通常比最小安全截面大 1~2 个等级。如果单纯选用最小截面，导体电阻偏大，常年运行产生巨额电费，十几年累积下来的能耗支出会远超电缆增加的采购差价。传统静态造价对比没有考虑资金的时间价值，无法客观核算大截面线缆的投资回收期，选型决策缺乏科学性。

全生命周期成本理论源自 IEC 60287-3-2 国际标准，将电缆从采购敷设、带电运行、检修维护直至报废回收全过程的所有资金支出统一折算为现值，横向对比多个备选截面的总费用，选出总成本最低的方案。在当前电力行业全力推进配电网线损精益化治理、用户侧节能改造常态化落地的背景下，传统“最小截面满足规范”的粗放设计模式已经无法适配节能降碳、提质增效的发展需求。低压配电作为电力系统终端耗能最大、覆盖用户最多的环节，其线缆选型的合理性直接决定区域配电网

整体损耗水平与长期运营效益。本文基于 LCC 理论搭建成本计算模型，量化分析线缆截面、导体损耗与全周期总成本之间的内在关联，通过实例论证经济截面的节能价值，推广兼顾安全、造价与长期能耗的电缆选型方案。

2 传统截面选型模式存在的突出弊端

2.1 重前期造价，轻视长期电能损耗

民用建筑厂房项目普遍执行限额设计，甲方严格控制主材采购预算，设计方案优先选择刚好满足载流量的最小规格电缆。小截面铜芯导体直流电阻更大，在恒定负荷电流作用下产生大量 I^2R 有功损耗。对于不间断生产的生产线、机房不间断电源、电动汽车充电桩等连续负荷，日积月累的线损电费远远超过线缆加大截面带来的材料差价，形成短期节约投资、长期持续亏损的局面。

2.2 经济电流密度条款执行不到位

现行规范明确给出了不同负荷利用小时数对应的经济电流密度取值，然而多数施工图设计文件仅完成载流量校核，很少开展经济截面比选。低压配电设计长期存在重安全、轻节能的倾向，导致大量重载配电干线长期高损耗运行，不利于配电系统节能降耗目标落地。

2.3 未计入资金时间价值，经济性对比失真

不同截面电缆的差价是建设期一次性投入，而电能损耗电费是未来几十年持续支出的长期成本。如果不把未来逐年电费按照折现率折算为现值，仅对比当前材料现价，会严重低估长期能耗成本，最终造成电缆截面选型偏小，技术经济方案失去合理性。静态对比方式无法准确测算大截面电缆的回本周期，决策依据不足。

2.4 忽略温升带来的附加损耗与老化成本

小截面电缆满载运行时导体温度持续升高，铜导体电阻会随温度同步上升，形成“温升升高—电阻变大—损耗进一步增加”的恶性循环。高温还会加速交联聚乙烯绝缘老化，缩短电缆使用寿命，额外增加线路检修、更换的费用，进一步抬高全周期综合运行成本。此外，变频器、整流设备等非线性负荷产生的谐波会加剧集肤效应，小截面线缆谐波附加损耗更高，发热问题会进一步恶化，造成隐性能耗损失持续累积。

3 低压电缆全生命周期 LCC 成本模型构建

3.1 成本总体构成

低压配电电缆全生命周期总成本（LCC）由四项内容组成，基础计算公式： $LCC=CI+CE+CM-CS$ 式中：CI——初始一次性投资现值，元；CE——寿命周期内电能损耗总费用现值，元；CM——运行维护与故障损失总费用现值，元；CS——电缆报废后的金属材料残值现值，元。

（1）初始投资成本 CI

包含电缆本体采购费、电缆终端头材料费、开挖敷设施工费、桥架及辅材费用等全部建设成本。该项成本在项目建设期一次性支出，无需进行资金折现。电缆截面越大，铜材消耗量越高，初始建设投资随之线性增长。

（2）电能损耗成本 CE （核心计算项）

三相低压线路年电能损耗计算公式： $\Delta W=3I^2RL\tau\times 10^{-3}$ 参数说明：I为负荷电流（A），R为单位长度导体直流电阻（ Ω/km ），L为线路总长（km）， τ 为年最大负荷损耗小时数（h）。将每年损耗产生的电费按照社会折现率折算为现值，逐年累加得到全寿命周期能耗总成本。增大电缆截面能够有效降低导体电阻，大幅度削减年度损耗电量，这也是大截面线缆具备长期经济性的核心原因。

（3）运维检修成本 CM

大截面电缆运行温升更低，绝缘老化速度平缓，线路故障概率低，年度巡检、预防性试验、故障抢修费用更少；小截面线缆长期过热运行，绝缘劣化速度快，后期运维投入更高。该部分费用可以参考同类型配电线路多年运维统计数据取值。

（4）残值收益 CS

铜芯电力电缆具备很高的金属回收价值，线缆截面越大，报废时的铜材残值越高，可以冲抵一部分全周期总成本。

3.2 经济截面选型判定准则

在全部满足载流量、电压降、热稳定等安全技术约束的前提下，依次比选相邻规格电缆的 LCC 数值，选取全生命周期总成本最低的截面作为最优经济截面。工程实操比选步骤：1）首先计算满足供电安全条件的最小电缆截面；2）向上选取 2~3 个更大规格的线缆作为备选方案；3）分别测算每一种截面对

应的初始造价、逐年能耗电费、运维费用，折算现值后汇总总 LCC；4）横向对比多方案总成本，确定经济最优截面。

4 工程算例与成本对比分析

4.1 项目基础条件

某工业厂房 0.4kV 三相供电干线，电缆型号 YJV-0.6/1kV 铜芯，线路总长 $L=0.8\text{km}$ ，持续负荷电流 $I=180\text{A}$ ，年最大负荷利用小时数 5000h，电缆设计服役年限 25 年，工业电价 0.75 元/kWh，资金折现率取 4%。安全条件校核：满足长期载流量的最小截面为 70mm^2 ，本次备选截面设置为 70mm^2 、 95mm^2 、 120mm^2 三个规格，分别开展全周期成本测算。

4.2 分项成本测算

1）初始一次性投资： 70mm^2 电缆采购+敷设总造价 2.72 万元； 95mm^2 造价 3.26 万元； 120mm^2 造价 3.78 万元。随着截面逐级放大，一次性建设投入依次增加。2）电能损耗费用（折算 25 年现值）： 70mm^2 导体电阻偏大，全年线损电费偏高，折算总能耗费用达到 12.86 万元；升级为 95mm^2 后导体电阻降低，损耗电费降至 9.13 万元；选用 120mm^2 截面时，25 年累计能耗费用仅为 6.85 万元。3）运维成本与残值收益：小截面线路后期检修费用更高，残值更低，三项方案综合差额约 0.6~0.9 万元。

4.3 全生命周期总成本汇总对比

方案 1： 70mm^2 （最小安全截面），LCC 总费用≈14.95 万元；

方案 2： 95mm^2 （放大一档截面），LCC 总费用≈12.61 万元；

方案 3： 120mm^2 （放大两档截面），LCC 总费用≈11.37 万元。

测算结果清晰可见：虽然 120mm^2 电缆初始造价高出 70mm^2 约 1.06 万元，但在 25 年运行周期内，仅电能损耗一项就节约电费 6 万余元，扣除材料差价后总体总成本下降 24%，静态投资回收期仅 4.2 年，长期经济效益十分突出。同时大截面电缆运行温度更低，线路故障率大幅下降，供电可靠性同步提升。

4.4 适用场景总结

1）年负荷利用小时大于 4000h 的工业生产线、机房不间断电源、充电桩干线、中央空调等连续负荷线路，优先选用经济截面，适度放大 1~2 档规格；2）普通住宅配电、间歇性短时负荷线路，能耗电费占比偏低，可选用最小安全截面控制造价；3）电价越高、线路服役年限越长、负荷越稳定，增大电缆截面带来的节能收益越高；4）带有变频器、整流装置等非线性负荷的回路，还需要额外放大截面，抵消谐波带来的附加发热与损耗。

5 优化低压线缆截面选型的实施对策

5.1 严格落实“安全+经济”双条件选型制度

完善施工图设计流程,把“长期载流量+经济电流密度”两项指标共同列为电缆截面控制条件。先筛选满足热稳定、电压损失的最小安全截面,再结合负荷利用小时数,采用LCC模型向上比选经济截面,杜绝只校核载流量、不做经济比选的粗放设计模式。

5.2 推行全生命周期造价评审机制

在施工图预算、限额设计评审环节,不再单纯对比材料采购现价,增加长期能耗成本分析内容。对于长距离、高负荷的配电干线,必须提交多截面方案的LCC对比报告,优先选用长期总成本最优的线缆规格,平衡建设期一次性投资与运行期电费支出。

5.3 建立不同工况下的选型参考数据库

整理工业厂房、商业综合体、住宅小区、充电站等典型配电负荷参数,测算形成不同负荷电流、不同运行时长对应的经济截面表格,简化设计人员的计算工作量,把经济选型标准化、常态化。同时充分考虑温升修正、谐波附加损耗,在非线性负荷回路预留足够的截面裕度,抑制谐波发热带来的额外能耗。

5.4 依托节能改造推广经济截面选型

针对老旧小区、老旧厂区高损耗低压线路改造项目,优先

更换为经济截面电缆,利用LCC模型测算节能收益,为改造项目提供经济性论证,在电网降损工程中充分挖掘节能潜力。现阶段大量老旧低压线路存在选型偏小、线损偏高、绝缘老化严重等问题,通过LCC经济选型替换改造,可实现台区降损、设备延寿、安全提升三重效益,是配网精益化运维的重要手段。

6 结论

传统低压电缆仅依靠载流量选择最小截面,看似节约了初期建设资金,却会造成线路长期电能损耗居高不下,全寿命周期综合成本偏高。基于全生命周期成本LCC模型,统筹初始投资、逐年能耗电费、运维检修与残值收益,可以精准计算不同规格电缆的总拥有费用,选出兼顾供电安全与长期经济性的经济截面。

工程实例证明,对于连续性高负荷低压配电线路,适度放大电缆截面会小幅抬高一次性造价,但可以显著降低导体焦耳损耗,在二十多年的服役期内节约大量电费,整体总成本明显优于小截面方案,同时降低电缆运行温升,延缓绝缘老化,提升供电可靠性。

在双碳节能政策背景下,低压配电设计应当摒弃短期造价优先的思维,严格执行经济电流密度选型条款,推广全生命周期技术经济比选方法,合理优化电缆截面,实现配电系统建设投资、电能损耗与运行安全三者的综合最优,持续降低配电网网线损水平,助力电力系统节能降耗与绿色低碳发展。

参考文献:

- [1] GB 50217-2018,电力工程电缆设计标准[S].北京:中国计划出版社,2018.
- [2] IEC 60287-3-2,电力电缆线芯截面的经济最佳化[S].
- [3] 吴向明.电力电缆经济截面选择方法研究[J].河北电力技术,2012,31(01):37-39.
- [4] 惠显琦.基于全生命周期成本的铜铝电缆选型分析[J].电工技术,2026(07):124-126.
- [5] 梁国轩.电力电缆截面的经济最佳化[J].电力建设,2005(06):22-24.
- [6] 孙岩.电力电缆经济电流截面选型计算探讨[J].建筑电气,2023,42(05):15-19.