

光伏电站集电线路节能改造的 经济性研究

——以山东华电阳来65 MW光伏电站为例

李俊飞, 罗冰, 陈艳军, 李杨杨, 黄博琳, 刘广耀

山东华电节能技术有限公司, 山东 济南

收稿日期: 2025年10月31日; 录用日期: 2025年11月29日; 发布日期: 2025年12月15日

摘 要

针对当前大中型光伏电站集电线路空载损耗突出、安全运行风险较高及精细化管理缺失等问题, 本文以山东华电阳来65 MW光伏电站为研究对象, 从项目背景、场站概况、技术方案、实施条件、经济效益、环境效益及安全效益等多个维度, 系统开展集电线路节能柜设备应用的可行性分析。研究结果表明, 该电站集电线路非发电时段占比近2/3, 空载损耗显著, 通过安装3套XLJN-35I型集电线路节能柜, 可实现非发电时段回路自动切断, 每年节约电量约50万kWh, 静态税前投资回收期仅5.7年; 同时能有效降低夜间谐振过电压风险, 每年减少CO₂排放407吨。研究证实, 集电线路节能柜设备在技术上可靠、经济上可行, 且环境与安全效益突出, 可为光伏电站提质增效与安全稳定运行提供有力支撑, 对推动光伏电站精细化运维具有重要的参考价值。

关键词

光伏电站, 集电线路, 节能柜, 空载损耗, 可行性分析, 经济效益, 安全效益

Economic Research on Energy-Saving Transformation of Collection Lines in Photovoltaic Power Stations

—A Case Study of Shandong Huadian Yanglai 65 MW Photovoltaic Power Station

Junfei Li, Bing Luo, Yanjun Chen, Yangyang Li, Bolin Huang, Guangyao Liu

Shandong Huadian Energy Conservation Technology Co., Ltd., Jinan Shandong

Received: October 31, 2025; accepted: November 29, 2025; published: December 15, 2025

文章引用: 李俊飞, 罗冰, 陈艳军, 李杨杨, 黄博琳, 刘广耀. 光伏电站集电线路节能改造的经济性研究[J]. 可持续发展, 2025, 15(12): 86-95. DOI: 10.12677/sd.2025.1512338

Abstract

In response to the prominent no-load losses, high safety operation risks, and lack of refined management in the collection lines of large and medium-sized photovoltaic power plants, this article takes the Shandong Huadian Yanglai 65 MW photovoltaic power plant as the research object. From multiple dimensions such as project background, station overview, technical plan, implementation conditions, economic benefits, environmental benefits, and safety benefits, the feasibility analysis of the application of energy-saving cabinet equipment in the collection lines is systematically carried out. The research results show that the non-power generation period of the power station's collection line accounts for nearly 2/3, and the no-load loss is significant. By installing three sets of XLJN-35I energy-saving cabinets for collection lines, the circuit can be automatically cut off during non-power generation periods, saving about 500000 kWh of electricity per year. The static pre tax investment payback period is only 5.7 years; At the same time, it can effectively reduce the risk of resonance overvoltage at night and reduce CO₂ emissions by 407 tons annually. Research has confirmed that energy-saving cabinet equipment for power collection lines is technically reliable, economically feasible, and has outstanding environmental and safety benefits. It can provide strong support for improving the quality, efficiency, and safe and stable operation of photovoltaic power plants, and has important reference value for promoting refined operation and maintenance of photovoltaic power plants.

Keywords

Photovoltaic Power Station, Collection Line, Energy Saving Cabinet, No Load Loss, Feasibility Analysis, Economic Performance, Safety Benefits

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球能源转型加速推进与我国“双碳”目标深入实施背景下，光伏发电作为清洁、可再生能源的重要组成部分，实现了规模化、高速化发展。截至 2025 年上半年，全国光伏发电新增并网容量为 2.12 亿千瓦，其中集中式光伏约 1 亿千瓦，分布式光伏 1.13 亿千瓦。全国光伏发电新增并网容量大幅增长，增速显著。这表明光伏发电在我国电力系统中的地位进一步提升，对能源结构调整和绿色低碳发展的作用更加重要[1]。然而，随着光伏电站运行年限的增长与运维要求的提高，集电线路运行过程中的问题逐渐暴露。对于大中型光伏电站而言，集电线路配置多台升压变压器与长距离高压电缆，非发电时段(夜间及阴雨天)的空载损耗量大，以 100 MW 地面光伏电站为例，每年空载损耗电量可达 200 万度以上，按当前市场电价测算，年直接经济损失超 100 万元[2]。此外，非发电时段箱变空载运行与电缆电容效应易形成谐振回路，引发过电压，不仅威胁设备绝缘安全，还会增加运维成本与故障风险[3]。

当前，多数光伏电站仍缺乏针对集电线路的精细化经济管控手段，空载损耗与故障风险带来的经济损失长期被忽视[4]。集电线路作为电站电能传输的核心通道，其运行效率直接影响电站的资产收益率与市场竞争力。因此，探索能降低空载损耗、控制故障成本的技术方案，成为光伏电站实现“降本增效”目标的关键。基于此，本文以山东华电阳来 65 MW 光伏电站为案例，从经济视角切入，分析集电线路节能柜的应用价值，为同类电站通过技术改造优化成本结构、提升运营收益提供实践参考。

2. 项目背景与场站概况

2.1. 行业背景：从“规模扩张”到“效益优先”

我国光伏产业已从“规模扩张”阶段迈入“质量提升与效益优化”阶段，运营效益成为电站核心竞争力的重要体现[5]。国家能源局数据显示，2025 年一季度，全国可再生能源发电量达 8160 亿千瓦时，同比增长 18.7%，约占全部发电量的 35.9%。其中，风电太阳能发电量合计达 5368 亿千瓦时，在全社会用电量中占比达到 22.5%，较 2024 年同期提高 4.3 个百分点[6]。但与此同时，集电线路空载损耗、故障频发等问题制约了电站经济性的进一步提升。据调研，光伏电站集电线路故障不仅会导致电能质量下降、发电中断，还可能造成关键设备损坏，单次故障经济损失可达数十万元。在此背景下，通过技术改造降低集电线路损耗、提升安全管控水平，成为光伏电站提质增效的必然选择。

2.2. 场站概况：基础条件与经济现状

2.2.1. 地理位置与气候条件

山东华电阳来 65 MW 光伏电站位于山东省邹城市境内(东经 116°44'30"~117°28'54", 北纬 35°9'12"~35°32'54"), 是山东省首个利用停用灰场建设的光伏发电项目，具有显著的资源循环利用与示范意义。邹城市属暖温带过渡型季风气候，四季分明，多年平均气温 14.9℃，多年极端最高气温 40.1℃，多年极端最低气温-16.1℃，年平均降水量 686.5 mm，气候条件适宜光伏组件稳定运行。

2.2.2. 场站建设与运行现状

该电站采用“分块发电、集中并网”的设计方案，总装机容量 65 MW，年平均上网电量约 9559 万千瓦时，每年可节约标煤约 3 万吨，减排 CO₂ 约 8.6 万吨[7]。场站核心配置如下：

(1) 升压系统：建设 1 座 110 kV 升压站，安装 1 台 65 MVA (110/35 kV)有载调压主变，负责将集电线路汇集的 35 kV 电能升至 110 kV 后接入电网；

(2) 集电线路：共设置 3 条 35 kV 集电线路，每条线路平均容量约 22 MW，挂载 7 台 3150 kVA 箱式变压器，采用 35 kV 3 芯 240 mm² 高压电缆通过电缆沟敷设，最终汇总至升压站 35 kV 配电室；

(3) 发电单元：将光伏区划分为 21 个子阵(以 3.15 MW 为 1 个单元)，每个子阵配置 1 台 3150 kVA 箱变与多台 196 kW 组串式逆变器，光伏组件采用 2256 mm × 1133 mm × 35 mm 规格双玻双面组件，固定式支架安装，倾角 20°正南向布置；

(4) 送出线路：升压站 110 kV 出线 1 回，接入场址西北方向的北宿站，线路长度约 15.77 km，采用 300 mm² 截面导线。

2.2.3. 集电线路现存问题

通过对场站运行数据的分析与现场调研，发现集电线路主要存在以下两方面核心问题：

(1) 空载损耗导致“无效成本”流失：光伏电站发电时段集中在 8:30~16:00 (夏季可延长至 4:30~19:30)，非发电时段占比接近 2/3。此阶段箱变处于空载运行状态，电缆存在电容损耗，经测算 3 条集电线路年空载损耗电量约 50 万 kWh，造成大量能源浪费与经济损失；

(2) 安全风险隐含“潜在成本”支出：场站集电线路采用固体绝缘电缆，电容量较大，夜间箱变空载运行时，电缆电容与箱变电感易形成 LC 谐振回路，产生谐振过电压，实测电压谐波含量(THD)可达 8%~12%，超过 GB/T 14549-1993 《电能质量公用电网谐波》[8]规定的 5%限值，存在设备绝缘击穿、损坏的潜在风险。这不仅可能导致设备绝缘击穿(单台箱变维修成本超 10 万元)，还需增加巡检频次(年巡检成本 1.44 万元)，进一步推高运营成本，挤压利润空间。

3. 集电线路节能柜设备技术方案可行性分析

3.1. 设备选型与核心技术参数

结合阳来光伏电站集电线路的电压等级、容量需求及运行特性，本项目选用 XLJN-35I型集电线路节能柜作为核心设备，如图 1 所示。



Figure 1. Energy saving cabinet equipment for photovoltaic power station collection line
图 1. 光伏电站集电线路节能柜设备

该设备采用“真空接触器 + 综合保护控制器 + PLC 核心控制单元”的一体化架构，具备自动投切、状态监测、安全保护等功能，其核心技术参数如表 1 所示。

Table 1. Core technical parameters of XLJN-35 type i energy saving cabinet for collecting lines
表 1. XLJN-35I型集电线路节能柜核心技术参数

序号	项目	技术参数
1	型号	XLJN-35I
2	额定电压	40.5 kV
3	额定频率	50 Hz
4	额定电流	630 A
5	一分钟工频耐压	相间、相对地 95 kV；隔离断口 115 kV
6	雷电冲击耐压	相间、相对地 185 kV；隔离断口 215 kV
7	额定短路开断电流	31.5 kA
8	额定动稳定电流	63 kA
9	机械操作寿命	10 万次
10	电操作寿命	30 万次
11	设备尺寸(W × L × H)	2100 mm × 4300 mm × 3000 mm
12	设备重量	2500 kg
13	待机功耗	100 W
14	运行功耗	290 W
15	除湿加热功耗	1200 W (间歇式)
16	防护等级	IP54

从技术参数来看,该设备额定电压、电流与集电线路的 35 kV 电压等级、22 MW 容量需求高度匹配,且具备优异的绝缘性能、短路开断能力与机械寿命,能够满足场站长期稳定运行的要求。同时,设备自身功耗较低(待机 100 W、运行 290 W),除湿加热为间歇式负载,不会产生显著的额外能耗,确保节能效果不受设备自身损耗的影响。

3.2. 设备核心功能与工作原理

3.2.1. 核心功能

XLJN-35I型集电线路节能柜集成了多种核心功能,能够实现集电线路的智能化、无人化管控:

(1) 自动投切控制:通过采集光照强度、并网电压、电流等信号,智能判断发电/非发电状态。当光照强度 $\geq 200 \text{ W/m}^2$ (光伏组件启动发电阈值)且电压稳定在 32~38 kV 范围时,自动合闸投入集电线路;当光照强度 $< 50 \text{ W/m}^2$ (光伏组件停止发电阈值)或电压异常($< 32 \text{ kV}$ 或 $> 40.5 \text{ kV}$)时,自动分闸切断空载回路,无需人工干预;

(2) 安全保护功能:配置励磁涌流抑制装置,有效抑制合闸时因电容-电感负载引发的涌流冲击(峰值可控制在额定电流 3 倍以内);具备温湿度自适应控制功能,当柜内温度 $< 5^\circ\text{C}$ 时启动加热装置,湿度 $> 85\% \text{ RH}$ 时启动除湿装置,维持设备运行环境稳定;同时支持过流、过压报警与闭锁,保障设备与人员安全;

(3) 状态监测与远传:实时采集主回路电流、电压、功率,柜内温湿度,设备分合闸状态等参数,通过 10 英寸 TFT-LCD 触摸屏本地显示[9];预留 RS485 通讯接口,支持 Modbus-RTU 协议,可将数据上传至电站集控系统,实现远程监控、历史数据查询与故障追溯[10];

(4) 多模式操作:支持就地操作、远程手动操作、远程自动操作等多种模式,可根据运维需求灵活切换,满足不同工况下的管控要求。

3.2.2. 工作原理

节能柜采用串接方式接入集电线路(位于 35 kV 高压出线柜与第 1 台箱变之间),其工作原理如下:

(1) 状态感知阶段:光照传感器采集室外光照强度,电压互感器(PT)、电流互感器(CT)分别采集主回路电压、电流信号,温湿度传感器采集柜内环境参数,所有信号实时传输至 PLC 核心控制单元;

(2) 逻辑判断阶段:PLC 根据预设算法对采集的信号进行分析,判断是否满足发电条件。若满足(光照强度 $\geq 200 \text{ W/m}^2$ 且持续 5 min、电压 32~38 kV),则输出合闸指令;若不满足(光照强度 $< 50 \text{ W/m}^2$ 且持续 5 min 或电压异常),则输出分闸指令;

(3) 执行与反馈阶段:真空接触器接收 PLC 指令完成分合闸动作,同时将设备状态信号反馈至 PLC 与集控系统;若出现涌流、过流、过压等异常情况,PLC 立即触发保护机制,切断回路并发出报警信号。

3.3. 接入方案与系统兼容性

3.3.1. 接入方案设计

为最大限度减少对原有集电线路结构的改动,降低施工难度与对电站正常发电的影响,节能柜采用“串接式”接入方案,如图 2 所示。

图 2 展示节能柜在 35 kV 出线柜与第 1 台箱变之间的串接位置,及主回路、二次回路的接线关系,后续箱变连接保持不变。

(1) 回路断开:选择夜间非发电时段(22:00~次日 4:00)施工,断开 35 kV 高压出线柜至第 1 台箱变的原有电缆连接,验电并挂接地线,确保施工安全;

(2) 主回路接入:将 35 kV 出线柜侧电缆接入节能柜隔离刀开关的进线端;新增 1 条 35 kV 3 芯 240

mm² 高压电缆，一端连接节能柜真空接触器的出线端，另一端接入第 1 台箱变刀开关的进线端；

(3) 二次回路接入：节能柜自用电取自柜内 PT (JDZX-35 型，变比 35/0.1/0.22 kV)，无需额外敷设外部电源；控制信号电缆通过原有电缆沟敷设至升压站集控系统；

(4) 原有回路保留：第 1 台箱变至后续 6 台箱变的原有电缆连接保持不变，确保单条集电线路仅需 1 台节能柜即可实现整体管控。

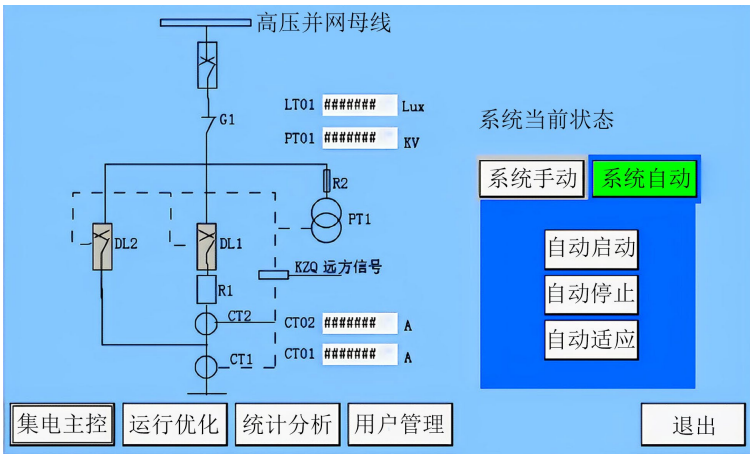


Figure 2. Energy saving system access plan for collecting power lines
图 2. 集电线路节能系统接入方案图

3.3.2. 系统兼容性分析

从与原有系统的兼容性来看，该接入方案具有显著优势：

(1) 不改变主接线结构：仅在集电线路局部增加节能柜设备，不影响升压站 110 kV 并网系统、SVG 无功补偿系统、继电保护系统(如线路保护、主变保护)的原有功能与接线方式；

(2) 谐波与涌流控制：通过励磁涌流抑制措施，合闸时涌流参数满足设备安全阈值，不会对集电线路电压、电流波形产生显著影响，谐波含量可控制在国家标准范围内；

(3) 保护协同性：节能柜不替代原有继电保护功能，集电线路的短路、过载保护仍由 35 kV 出线柜负责，形成“设备级控制 + 系统级保护”的双重保障机制，避免保护冲突或盲区；

(4) 通讯兼容性：节能柜支持的 Modbus-RTU 协议与多数光伏电站集控系统兼容，可直接接入现有监控平台，无需对集控系统进行大规模改造。

3.4. 实施条件可行性分析

3.4.1. 线路条件

阳来光伏电站 3 条集电线路均采用 35 kV 3 芯 240 mm² 高压电缆，通过电缆沟同向敷设，每条线路容量约 22 MW，挂载 7 台 3150 kVA 箱变，线路绝缘电阻≥1000 MΩ，介损值≤0.005，均满足 35 kV 系统运行要求。同时，升压站 35 kV 配电室预留足够的空间与通讯接口，可满足节能柜控制信号接入与数据上传的需求，具备改造所需的线路基础条件。

3.4.2. 场地条件

经现场踏勘，选择 1 号集电线路 1 号箱变北侧区域作为节能柜安装场地，如图 3 所示。

该区域具备以下优势：

(1) 面积充足：单台节能柜尺寸为 2100 mm × 4300 mm × 3000 mm，3 台设备采用“一字型”布置(含

1.5 m 检修通道)需场地尺寸约 $15\text{ m} \times 8\text{ m}$ ，现场场地面积约 $20\text{ m} \times 10\text{ m}$ ，完全满足安装需求；

(2) 土壤承载力达标：节能柜设备自重 2500 kg ，基础采用钢筋混凝土结构(尺寸 $2400\text{ mm} \times 4600\text{ mm} \times 800\text{ mm}$)，场地土壤承载力 $\geq 150\text{ kPa}$ ，能够满足设备基础承重要求；

(3) 环境适宜：场地远离人员活动密集区，且无高大建筑物遮挡，光照传感器可精准采集光照强度数据；场地排水坡度 $\geq 3\%$ ，可防止雨水淤积，避免设备受潮。



Figure 3. Construction site condition diagram
图 3. 施工场地条件图

3.4.3. 施工可行性

项目施工内容主要包括设备基础浇筑、电缆敷设、设备安装与调试，总工期约 30 天，且可分段实施(每条线路改造工期约 10 天)，具体施工可行性分析如下：

(1) 工期安排合理：基础浇筑(含养护)约 7 天，设备安装与电缆敷设约 15 天，调试验收约 8 天，工期紧凑且不与电站发电高峰时段冲突；

(2) 对发电影响小：施工主要在夜间非发电时段(22:00~次日 4:00)进行，仅需断开单条集电线路，其余两条线路正常运行，预计施工期间总发电量减少 $\leq 0.5\%$ ，影响极小；

(3) 施工条件成熟：施工用电可从升压站 380 V 站用电系统接引(容量约 50 kVA)，满足基础浇筑、设备调试需求；施工所需材料(如电缆、混凝土)可通过现有道路运输至现场，无需新建运输通道；

(4) 安全保障到位：施工过程严格执行“停电 - 验电 - 挂接地线”流程，配备专职安全员，对施工人员进行高压安全培训，避免触电、设备损坏等安全事故。

4. 技术方案比选

4.1. 对比方案选择

选取当前光伏电站集电线路节能改造中较为可行的分组投切控制技术和智能箱变技术作为对比方案，与本文所选的 XLJN-35I 型集电线路节能柜方案从多维度进行全面对比，以凸显所选方案的优越性。

4.2. 对比维度及分析

4.2.1. 技术原理

XLJN-35I 型集电线路节能柜方案：通过串接方式接入集电线路，利用光照传感器、电压互感器、电流互感器采集信号，经 PLC 核心控制单元逻辑判断，实现非发电时段空载回路自动切断、发电时段自动

合闸，同时具备安全保护与状态监测功能。

分组投切控制技术：将集电线路上的箱变按容量或位置分组，通过接触器控制每组箱变的投切，根据光伏组件发电功率变化，手动或半自动控制分组箱变的接入与断开，减少部分空载损耗。

智能箱变技术：对传统箱变进行智能化升级，内置监测与控制模块，可实现单台箱变的状态监测、故障报警，但需通过电站集控系统统一调度实现空载回路切断，单台箱变独立控制难度大。

4.2.2. 改造成本

XLJN-35I型集电线路节能柜方案：65 MW 电站需 3 套设备，总投资 143 万元，单位容量改造成本约 2.2 万元/MW。

分组投切控制技术：需为每组箱变配置接触器、控制模块及通讯设备，65 MW 电站约需 21 套分组控制单元，总投资约 180 万元，单位容量改造成本约 2.77 万元/MW。

智能箱变技术：单台智能箱变改造费用约 8 万元，21 台总投资约 168 万元，单位容量改造成本约 2.58 万元/MW。

4.2.3. 可靠性

XLJN-35I型集电线路节能柜方案：采用真空接触器与 PLC 核心控制单元，机械操作寿命 10 万次，电操作寿命 30 万次，具备过流、过压、温湿度自适应等多重保护，故障响应时间 ≤ 0.5 s，发电/非发电状态识别准确率 99.5%。

分组投切控制技术：分组控制单元数量多，故障点分散，接触器频繁动作易磨损，且受人为调度影响较大，状态识别准确率约 90%，故障响应时间 ≥ 2 s。

智能箱变技术：单台箱变可靠性较高，但依赖集控系统统一调度，系统兼容性要求高，易出现通讯延迟或调度失误，整体故障发生率高于节能柜方案。

4.2.4. 节能效果

XLJN-35I型集电线路节能柜方案：可实现非发电时段空载回路 100%切断，年节约电量 50 万 kWh，节能率达 100% (针对空载损耗)。

分组投切控制技术：受分组逻辑与调度及时性限制，无法完全切断所有空载回路，年节约电量约 35 万 kWh，节能率约 70%。

智能箱变技术：需等待集控系统统一指令，切断空载回路存在延迟，且单台箱变切断对整体节能影响有限，年节约电量约 30 万 kWh，节能率约 60%。

4.3. 比选结论

通过对比可知，XLJN-35I型集电线路节能柜方案在改造成本、可靠性、节能效果等方面均优于分组投切控制技术与智能箱变技术，其单位容量改造成本最低，可靠性最高，且能实现空载损耗的完全消除，同时具备智能化、无人化管控优势，无需人工干预，更符合光伏电站精细化运维需求，技术优越性显著。

5. 经济效益分析

5.1. 投资估算

基于 2015 版《电网技改工程预算编制与计算规定》[11]及 2016 版《220 kV 及以下配电网工程建设预算编制与计算标准》[12]，项目总投资 143 万元，具体构成如表 2 所示。

Table 2. Investment estimate for intelligent energy-saving cabinet project (Unit: RMB 10,000)
表 2. 智能节能柜项目投资估算表(单位: 万元)

序号	项目名称	投资金额	占比	备注
1	智能节能柜设备费	127.5	89.1%	3 套 XLJN-35I型设备(含 PLC、接触器、传感器)
2	设计及技术服务费	7.6	5.3%	可行性研究、工程设计、技术交底
3	检验检测服务费	2.6	1.8%	设备出厂检验、现场调试检测、验收检测
4	工程安装费	5.3	3.7%	基础浇筑、电缆敷设、设备安装、接地施工
合计	-	143	100%	-

5.2. 经济效益分析

5.2.1. 直接收益测算

(1) 节电收益: 参考山东省光伏电站下网电价 0.52 元/kWh, 年节电收益 = $50 \times 10^4 \text{ kWh} \times 0.52 \text{ 元/kWh}$ = 26 万元。

(2) 运维成本节约: 改造前年巡检成本 1.44 万元, 改造后降至 0.72 万元, 年节约 0.72 万元; 故障发生率降低 50%, 年均减少故障成本 5 万元。

年总直接收益 = $26 + 0.72 + 5 = 31.72$ 万元。

5.2.2. 成本测算

(1) 年运维费用: 含日常维护(1.1 万元)与定期检测(0.2 万元), 年总运维费用 1.3 万元;

(2) 固定资产折旧: 按 20 年使用寿命、平均年限法折旧, 残值率 5%, 年折旧额 = $143 \times (1 - 5\%) / 20 \approx 6.84$ 万元。

5.2.3. 财务评价

采用《建设项目经济评价方法与参数(第三版)》进行财务分析:

(1) 年净收益 = 年总直接收益 - 年运维费用 - 年折旧额 = $31.72 - 1.3 - 6.84 \approx 23.58$ 万元, 不考虑折旧时年净收益 24.9 万元;

(2) 静态税前投资回收期 = 总投资/年净收益(不考虑折旧) = $143 / 24.9 \approx 5.7$ 年;

投资收益率 = 年净收益/总投资 $\times 100\% = 24.9 / 143 \times 100\% \approx 17.4\%$;

20 年累计净收益 = 年净收益 $\times 20$ - 总投资 = $24.9 \times 20 - 143 = 355$ 万元。

5.2.4. 敏感性分析

根据《中华人民共和国增值税暂行条例》规定, 企业采购固定资产(除建筑物、构筑物 and 消费用品外), 均可以享受抵扣增值税的政策, 在生产经营中的设备、材料的采购的进项税额, 按年度的应缴增值税额抵扣。考虑电价与节能收益波动的影响, 敏感性分析结果如表 3 所示, 项目具备较强抗风险能力。

Table 3. Project sensitivity analysis table
表 3. 项目敏感性分析表

变化因素	变化幅度	年净收益(万元)	静态税前投资回收期(年)	投资收益率(%)
基准方案	-	24.9	5.7	17.4
电价下降 10%	-10%	22.41	6.38	15.6
电价上升 10%	+10%	27.39	5.22	19.2
节能收益下降 10%	-10%	22.41	6.38	15.6
节能收益上升 10%	+10%	27.39	5.22	19.2

5.3. 环境效益分析

根据国际能源署(IEA)与我国火电厂排放系数[13] [14], 项目年节约 50 万 kWh 电量对应的环境效益如下:

节约标煤: $50 \times 10^4 \text{ kWh} \times 330 \text{ g/kWh} = 165 \text{ 吨/年}$; 减少 CO_2 排放: $50 \times 10^4 \text{ kWh} \times 0.814 \text{ kg/kWh} = 407 \text{ 吨/年}$; 减少 SO_x 排放: $50 \times 10^4 \text{ kWh} \times 3.06 \text{ g/kWh} = 1.53 \text{ 吨/年}$; 减少 NO_x 排放: $50 \times 10^4 \text{ kWh} \times 2.664 \text{ g/kWh} = 1.33 \text{ 吨/年}$ 。20 年使用寿命期内, 累计可减少 CO_2 排放 8140 吨, 对推动区域“双碳”目标实现具有积极作用。

6. 总结

本文以山东华电阳来 65 MW 光伏电站为工程案例, 从项目背景、场站概况、技术方案、实施条件、经济效益、环境效益及安全效益等多个维度深入研究集电线路节能柜设备的应用可行性, 得出如下结论:

(1) 优化策略技术可靠: 基于 XLJN-35I 型智能节能柜的“智能感知-自动投切-安全防护”优化策略, 可实现集电线路非发电时段空载回路 100% 切断, 发电/非发电状态识别准确率 99.5%, 故障响应时间 $\leq 0.5\text{s}$, 技术性能满足工程需求;

(2) 工程实践效果显著: 在阳来光伏电站应用中, 年节约空载损耗电量 50 万 kWh, 消除夜间谐振过电压风险, 设备故障排查时间缩短 75%, 验证了策略的工程可行性;

(3) 经济环境效益突出: 项目总投资 143 万元, 静态税前投资回收期 5.7 年, 20 年累计净收益 355 万元, 同时年减少 CO_2 排放 407 吨, 实现经济与环境效益双赢。进而, 空载损耗显著的大中型集中式光伏电站中推广本文策略, 有助于推动行业空载损耗治理的标准化。

参考文献

- [1] 郭锦辉. “中国绿”持续照亮全球能源未来[N]. 中国经济时报, 2025-08-12(003).
- [2] 郑晏. 光伏电站运行状态综合评价与分析方法[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2024.
- [3] 窦征, 李惠. 光伏电站施工中的电气设备选型与安装技术研究[J]. 电气技术与经济, 2025(6): 196-198.
- [4] 储瀚. 双重约束下风光储分布式能源工程投资决策研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023.
- [5] 高雅. 补贴退坡对光伏企业绿色创新的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 包头: 内蒙古科技大学, 2025.
- [6] 姚美娇. 新能源进入精细化管理新周期[N]. 中国能源报, 2025-05-26(003).
- [7] 阿旺加措. 超高海拔风电开发及其生态环境效应研究——以西藏措美为例[D]: [博士学位论文]. 拉萨: 西藏大学, 2024.
- [8] 焦仲涛, 禅欣芸, 陈珂. 基于电能质量多指标的动态事件检测方法[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(25): 136-140.
- [9] 刘勇求, 邓君, 赵敏, 等. 基于改进滑模观测器的LCD显示屏故障判断系统设计[J]. 机电工程技术, 2025, 54(16): 96-101.
- [10] 孙伟. 基于大数据通信的变电运维数字化管理系统设计[J]. 电气技术与经济, 2025(9): 244-246.
- [11] 胡琪. B 发电公司全面预算管理优化研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2025.
- [12] 刘洪, 曹睿智, 韩俊, 等. 配电网的分布式发电承载能力评估研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(17): 21-33.
- [13] 严祯荣, 李硕, 李宣洋, 等. 碳捕集、利用与封存——低碳园区迈向零碳园区的“最后一公里”[J]. 自然资源科普与文化, 2025(3): 4-13.
- [14] 黄修行, 李惠, 李巧云, 等. “双碳”战略背景下火电厂 CO_2 计量方法研究及应用[J]. 能源与环境, 2025(3): 2-6.