

# 吉林永吉变电站光伏发电系统研究

安芷萱\*, 张海波

东北电力大学机械工程学院, 吉林 吉林

收稿日期: 2025年3月21日; 录用日期: 2025年4月12日; 发布日期: 2025年4月27日

## 摘要

本文针对吉林永吉地区变电站二次设备舱的能源需求, 设计了一套光伏发电系统。通过分析当地太阳能资源、负载特性和系统需求, 提出了系统总体设计方案, 包括光伏组件选型、容量配置、储能系统设计和控制系统设计。详细阐述了系统各组成部分的技术参数和选型依据, 并对系统性能进行了仿真分析。结果表明, 该光伏发电系统能够有效满足变电站二次设备舱的电力需求, 提高能源利用效率, 降低碳排放, 为变电站的绿色运行提供了可靠保障。

## 关键词

变电站, 二次设备舱, 光伏发电, 系统设计, 吉林永吉, 可再生能源

# Research on Photovoltaic Power Generation System of Yongji Substation in Jilin Province

Zhixuan An\*, Haibo Zhang

School of Mechanical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin Jilin

Received: Mar. 21<sup>st</sup>, 2025; accepted: Apr. 12<sup>th</sup>, 2025; published: Apr. 27<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

This article designs a photovoltaic power generation system for the energy demand of the secondary equipment compartment in the Yongji area of Jilin province. By analyzing local solar energy resources, load characteristics, and system requirements, an overall system design scheme was proposed, including photovoltaic module selection, capacity configuration, energy storage system design, and control system design. The technical parameters and selection criteria of each component of the system were elaborated in detail, and the system performance was simulated and analyzed. The results show that the photovoltaic power generation system can effectively meet the power demand of the secondary equipment compartment of the substation, improve energy utilization

文章引用: 安芷萱, 张海波. 吉林永吉变电站光伏发电系统研究[J]. 智能电网, 2025, 15(2): 7-17.

DOI: 10.12677/sg.2025.152002

efficiency, reduce carbon emissions, and provide reliable guarantees for the green operation of the substation.

## Keywords

Substation, Secondary Equipment Compartment, Photovoltaic Power Generation, System Design, Yongji, Jilin, Renewable Energy

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

随着能源结构的转型和电力系统的智能化发展,变电站作为电力系统的重要节点,其能源供给方式也面临着新的挑战和机遇。传统变电站主要依赖电网供电,存在能源利用效率低、碳排放高等问题。近年来,光伏发电技术迅速发展,为变电站的绿色能源供给提供了新的解决方案。特别是在偏远地区或电网薄弱区域,光伏发电系统能够有效提高变电站的供电可靠性和能源自给率。

屋顶光伏系统凭借其资源分布广泛、环境友好性突出等优势,已成为分布式能源的重要组成部分[1][2]。然而,系统并网运行面临多重技术挑战:其一,电网接入稳定性要求光伏系统需在保障自身运行安全的同时,避免对公共电网造成电压波动或频率偏移;其二,受光照强度与气象条件影响,光伏发电存在间歇性与波动性特征,需通过 MPPT (最大功率点跟踪)技术、储能装置协同控制等手段实现发电功率动态调节,确保负载供电可靠性与能效优化[3];其三,系统安全性设计需综合防范电弧故障、设备过热引发的火灾风险,并建立完善的电气隔离与保护机制,保障用户侧与电网侧安全。

吉林永吉地区地处东北,太阳能资源丰富,具有发展光伏发电的良好条件。本文针对该地区变电站二次设备舱的能源需求,设计了一套光伏发电系统,旨在提高变电站的能源利用效率,降低碳排放,同时增强变电站的供电可靠性。该研究不仅对吉林永吉地区的变电站能源供给具有实际意义,也为其他地区变电站的光伏发电系统设计提供了参考。

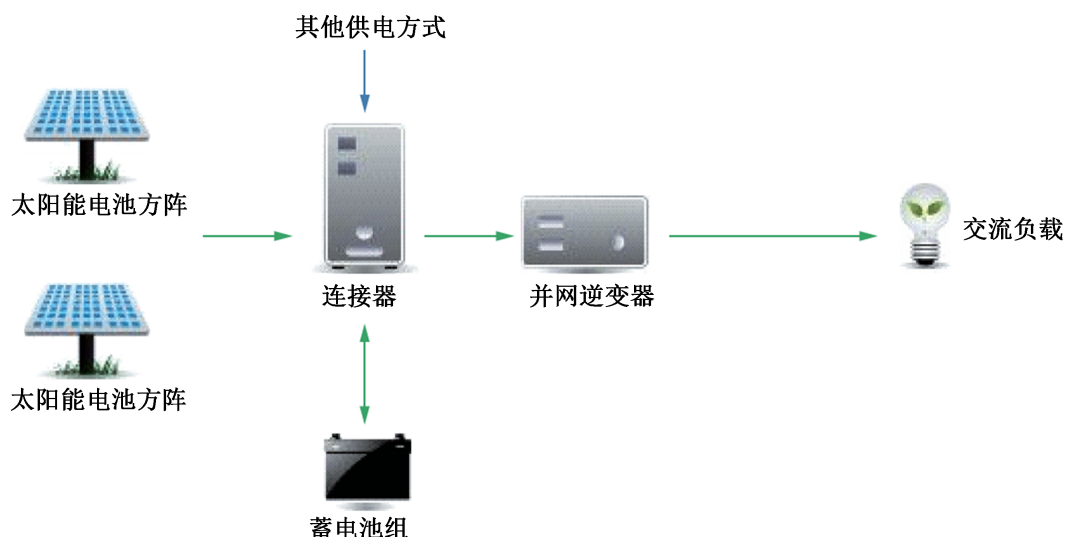
## 2. 光伏发电系统

光伏发电系统是一种通过光伏效应将太阳能直接转换为电能的能源技术,其核心由光伏组件、逆变器、支架结构和配套控制系统组成。光伏组件(如单晶硅或多晶硅电池板)吸收太阳光后产生直流电,经逆变器转换为交流电供负载使用或并入电网,部分系统还配置储能装置(如锂离子电池)以应对光照不足时的用电需求。该系统广泛应用于家庭屋顶、工商业建筑及偏远地区离网供电,具有清洁低碳、模块化灵活部署的优势,但受限于初始投资成本、光照条件波动及温度对效率的影响。

光伏发电系统基于光伏效应实现光能向电能的转化,主要由光伏电池阵列、逆变器及电网交互设备构成(图 1)。其工作流程可概括为:光伏电池板吸收太阳辐射并输出直流电,经直流配电柜汇流后,由逆变器转换为与电网兼容的交流电,最终通过交流配电柜接入电网或供给本地负载[4]。系统核心组件功能如下:

- 1) 光伏电池阵列: 由多组光伏板构成,负责将太阳能转化为直流电能;
- 2) 直流配电柜: 集成光伏阵列输出,配置熔断保护与防雷模块,确保电能安全传输;
- 3) 逆变器: 实现直流/交流转换,同步电网频率与电压,支持最大功率点跟踪(MPPT)以提升效率;

- 4) 交流配电柜: 分配逆变后的电能至电网或负载, 内置计量与保护装置;
- 5) 储能单元: 通过蓄电池存储富余电能, 在电网异常时提供应急电力[5]。



**Figure 1.** Photovoltaic power generation system  
**图 1.** 光伏发电系统

### 3. 光伏发电系统总体设计方案

#### 3.1. 吉林永吉地区变电站二次设备舱光伏发电系统需求分析

吉林永吉地区位于北纬  $43^{\circ}\sim 44^{\circ}$  之间, 属于温带大陆性季风气候, 年平均日照时数约为 2500 小时, 太阳能资源较为丰富。根据当地气象数据, 年太阳辐射总量约为  $5000 \text{ MJ/m}^2$ , 具有较好的光伏发电潜力。变电站二次设备舱作为变电站的核心控制部分, 其电力需求具有连续、稳定的特点。

变电所二次设备舱是变电站的核心控制部分, 其用电设备种类繁多, 用电特性各异。为了准确估算用电量并进行合理的光伏发电系统设计, 需要对二次设备舱的用电量进行分类和详细分析。主要负载包括监控系统、通信设备、照明系统等, 总功率约为 10 kW, 日用电量为 175.2 kWh 之间。

以下是永吉变电站的用电量分类及详细电量估算, 表 1 为用电设备和日用电量表:

1) 监控系统(功耗 2~3 kW)包含 SCADA 系统、远动装置及数据采集单元等设备, 需 24 小时持续运行以保障实时数据监测, 负荷特性稳定;

2) 继电保护系统(功耗 1~2 kW)涵盖线路保护装置、母线保护装置等, 全天候运行中负荷基本恒定, 但在故障触发时会产生短时冲击电流;

3) 通信系统(功耗 1~2 kW)由光纤设备、网络交换机等构成, 为站内数据传输提供稳定支持, 无显著功率波动;

4) 直流系统(功耗 2~3 kW)通过充电装置和蓄电池组为其他二次设备提供可靠直流电源, 运行负荷平稳;

5) 辅助设备(功耗 1~2 kW)包括照明、空调及消防系统, 其负荷随环境条件动态变化, 例如照明自动调光、空调按温控启停, 导致功率波动幅度较大。

基于以上分析, 光伏发电系统的设计需满足以下要求: 首先, 系统应能够提供稳定的电力输出, 确保二次设备舱的连续运行; 其次, 系统应具备一定的储能能力, 以应对夜间和阴雨天的电力需求; 最后, 系统应具有较高的能源利用效率和可靠性, 以降低运行维护成本。综合考虑当地太阳能资源、负载特性

和系统需求, 拟设计一套屋顶式的光伏发电系统, 配备适量的储能装置, 以满足二次设备舱的电力需求。

**Table 1.** Electrical equipment and daily electricity meter  
**表 1.** 用电设备和日用电量表

| 设备类别   | 设备名称     | 数量 | 单台功率(kW) | 总功率(kW) |
|--------|----------|----|----------|---------|
| 监控系统   | SCADA 系统 | 1  | 1.5      | 1.5     |
| 监控系统   | 远动装置     | 1  | 0.5      | 0.5     |
| 继电保护系统 | 线路保护装置   | 2  | 0.3      | 0.6     |
| 继电保护系统 | 变压器保护装置  | 1  | 0.4      | 0.4     |
| 通信系统   | 光纤通信设备   | 1  | 0.8      | 0.8     |
| 直流系统   | 充电装置     | 1  | 2        | 2       |
| 直流系统   | 蓄电池组     | 1  | 1        | 1       |
| 其他辅助设备 | 照明系统     | 1  | 0.5      | 0.5     |
| 其他辅助设备 | 空调系统     | 1  | 1.5      | 1.5     |

### 3.2. 太阳能电池组件和倾角设计

太阳能电池组件是光伏发电系统的核心能量转换装置, 其通过半导体材料的光生伏打效应实现光能向电能的转化。该组件由多层功能材料构成, 主要包括作为发电主体的光伏电池片、保护性背板、高透光玻璃盖板、减反射涂层以及铝合金边框等关键单元。其中, 光伏电池片作为能量转换的核心载体, 其材料特性与制造工艺直接决定着光电转换效率。转换效率可通过下式进行计算:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{E_{\text{sun}} \times A} \quad (1)$$

式中,  $\eta$  为光伏电池的理想转换效率, 表示光伏电池将太阳光能转化为电能的效率, 通常以百分比形式表示。 $P_{\max}$  为光伏电池的最大输出功率, 单位为 W。 $E_{\text{sun}}$  为单位面积太阳光照强度, 以  $\text{W}/\text{m}^2$  表示。 $A$  为光伏电池的有效面积  $\text{m}^2$ 。

光伏电池的理想转换效率是评估其在特定光照条件下性能表现的关键指标, 对光伏发电系统的设计与优化具有重要意义。在理想条件下, 光伏电池的转换效率可达到理论最大值, 这一效率主要受电池材料特性(如带隙宽度、载流子迁移率)和工作环境(如温度、辐照强度)的影响。通过计算理想转换效率, 可以为系统设计提供理论依据, 并指导实际运行中的性能优化。

光伏阵列倾角是指太阳能电池板与水平面之间的夹角, 其设计对系统发电效率具有决定性影响。由于太阳入射角随地理纬度和季节变化, 倾角需根据安装地点的纬度及太阳轨迹动态调整。例如, 高纬度地区冬季太阳高度角较低, 需增大倾角以优化光能捕获; 而夏季则相反。因此, 倾角设计需综合考虑全年太阳辐射分布, 通过平衡不同季节的发电量实现全年效率最大化。

光伏阵列倾角的设计核心在于匹配太阳高度角的变化规律, 以实现太阳光对电池板的垂直入射, 从而最大化光能接收效率。太阳高度角( $h$ )随季节和地理纬度变化, 其计算公式为:

$$h = \arcsin(\sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\delta) \cdot \cos(HA)) \quad (2)$$

$h$  为太阳的高度角, 表示太阳位于天空中的位置角度。 $\phi$  为地理位置的纬度,  $\delta$  为太阳的赤纬角,  $HA$  为时角, 表示太阳时辰与太阳过中天时辰之间的差值。

- 1) 高纬度地区：冬季太阳高度角低，倾角宜增大(如纬度+15°)以提升冬季发电量；
- 2) 低纬度地区：倾角可接近纬度值，平衡全年发电效率。

通过精准匹配太阳高度角与倾角，光伏阵列可实现年均发电效率提升 10%~15%。

光伏阵列的倾角应根据最大年发电量原则选择，以最大化光照强度，提高发电效率。倾角  $\beta$  的计算公式如下：

$$\beta = |\phi - \delta| \quad (3)$$

通过式(2)和(3)确定光伏阵列的最佳倾角，从而最大程度地利用太阳能资源，提高光伏发电系统的发电效率。

### 3.3. 设计方案

本屋顶光伏发电系统采用分布式离网不上送结构，主要由光伏阵列、储能系统、控制系统和配电系统组成[6]。系统总体设计思路是：光伏阵列将太阳能转换为直流电能，通过控制器对蓄电池组进行充电，同时经逆变器转换为交流电供给负载使用。当光伏发电量不足时，由蓄电池组供电；当蓄电池电量不足时，可切换至电网供电，确保负载的连续运行。

系统的主要技术参数如下：光伏阵列总装机容量为 20 kW，由 80 块 250 W 的单晶硅光伏组件组成，采用固定倾角安装方式，倾角设置为 40°以适应当地纬度。储能系统采用铅酸蓄电池组，总容量为 200 kWh，可满足 2~3 天的备用电力需求。控制系统包括 MPPT 控制器、逆变器和监控系统，实现系统的智能化管理和优化运行。配电系统采用双回路设计，确保供电可靠性。

光伏组件选用单晶硅类型，具有较高的转换效率( $\geq 18\%$ )和良好的温度特性。组件采用串联-并联组合方式，每 20 块组件串联为一个组串，共 4 个组串并联接入控制器。支架系统采用热镀锌钢材，具有优异的耐腐蚀性能，可适应吉林永吉地区的寒冷气候条件。

储能系统选用阀控式铅酸蓄电池，具有维护简单、成本低廉的优点[7]。电池组由 24 节 2 V/1000Ah 单体电池串联组成，总电压 48 V。电池管理系统(BMS)实时监测电池状态，防止过充过放，延长电池寿命。控制系统采用 MPPT 控制器，最大功率点跟踪效率  $\geq 98\%$ ，可最大化利用光伏发电量。逆变器选用 10 kW 工频纯正弦波型号，输出电能质量符合国家标准。

配电系统设计包括交流配电柜和直流配电柜。交流配电柜设有市电输入、逆变器输出和负载输出回路，可实现自动切换。直流配电柜负责光伏阵列、蓄电池组和控制器的连接，设有防雷保护和熔断保护装置。整个系统采用智能化监控，可实时监测发电量、用电量、电池状态等参数，实现远程控制和故障诊断。

此外，系统配置智能控制器实时监测发电量、电池状态及电网参数，动态优化能量分配。安装过程中需结合屋顶承重、倾角及电网接入规范进行设计，并通过定期维护(如组件清洁、设备绝缘检测)保障系统长期稳定运行。该技术通过模块化结构与智能化管理，为可再生能源的高效利用提供了系统化解决方案。

## 4. 基于 PVsyst 软件的性能仿真与验证

### 4.1. 模型建立

PVsyst 是一种专业的光伏系统模拟和分析软件，广泛应用于太阳能光伏系统的设计、优化和性能评估。该软件由瑞士日内瓦大学开发，专为研究人员、工程师和太阳能行业的专业人士设计，提供详细的系统建模、能源计算及财务分析功能[8]。经过对当地环境和变电所二次设备舱的供电需求，通过 PVsyst 软件对设计的光伏发电系统进行了分析，包括地理与气象数据输入，系统参数配置，损失模型设置等。



首先结合当地情况对地理与气象数据进行输入。地理位置：设定吉林永吉地区坐标(北纬 43.8°，东经 126.5°)，导入 NASA 气象数据库或本地实测数据(年均气温 3.2℃，极端低温-30℃)。太阳辐射：采用逐小时辐射模型，年总辐射量 5000 MJ/m<sup>2</sup>，冬季最低日均辐射 2.1 kWh/m<sup>2</sup> (12 月)，夏季峰值 6.5 kWh/m<sup>2</sup> (6 月)。环境参数：添加积雪覆盖系数(冬季 0.3)、沙尘损失(年均 2%)及温度修正因子。配置图如图 2 所示。

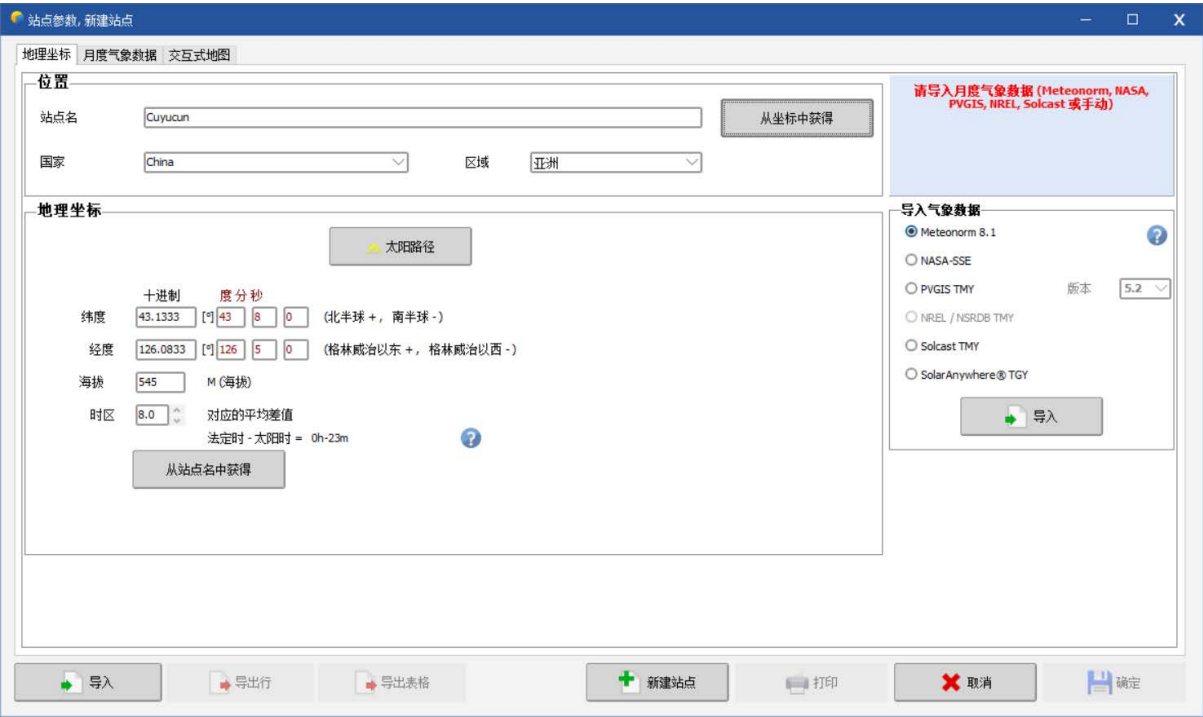


Figure 2. Geographical and meteorological data configuration diagram  
图 2. 地理与气象数据配置图

其次进行系统参数配置，包括光伏阵列，逆变器和储能系统的相关参数，见表 2。光伏阵列为单晶硅 310W (隆基 Hi-MO4)，-0.35%/℃温度系数，IP68 防护等级，其性能为倾角 40°，方位角正南，间距 0.8 m，抗雪载 0.75 kN/m<sup>2</sup>，以 6 串 × 12 块布局，总容量 22.32 kW。储能系统的电池容量为 200 kWh (比亚迪刀片电池，2V/1000Ah × 100 节)，采用恒流 - 恒压充电(0.2C)，放电深度 ≤ 80%，以电加热+风冷温控 (维持 0℃~45℃)。图 3~5 为在软件中配置的相关参数图。

Table 2. Related parameters of photovoltaic arrays, inverters, and energy storage systems  
表 2. 光伏阵列，逆变器和储能系统的相关参数

| 子系统  | 参数设置                                          | 依据                       |
|------|-----------------------------------------------|--------------------------|
| 光伏阵列 | 组件型号：单晶硅 310W (隆基 Hi-MO4)                     | 高转换效率(19.5%)、低温适应性       |
|      | 安装倾角：40°，方位角正南                                | 最大化冬季辐照接收                |
|      | 阵列间距：0.8 m (避免阴影遮挡)                           | 基于太阳高度角计算                |
| 逆变器  | 效率曲线：96% (额定功率下)                              | 华为 SUN2000-10KTL-M3 技术手册 |
| 储能系统 | 电池类型：磷酸铁锂(200 kWh，循环效率 95%)                   | 比亚迪刀片电池参数                |
|      | 充放电策略：峰谷电价时段优化(谷充 08:00~16:00，峰放 17:00~21:00) | 吉林电网分时电价政                |

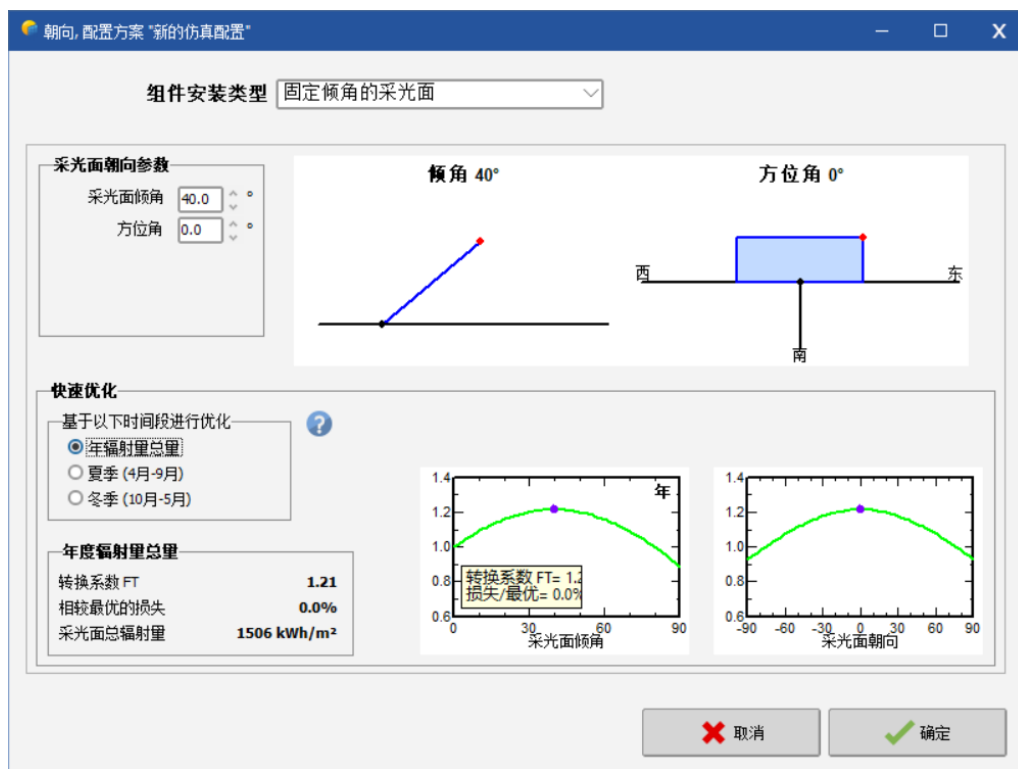


Figure 3. Tilt angle parameter diagram of photovoltaic array  
图 3. 光伏阵列倾角参数图



Figure 4. Electricity consumption configuration  
图 4. 用电量配置

Figure 5. Parameters of photovoltaic panels and batteries  
图 5. 光伏板和蓄电池参数

最后是损失模型配置，温度损失：组件温度系数 $-0.35\%/^{\circ}\text{C}$ ，夏季高温损失 5%，冬季增益 2%；线路损耗：直流侧 3%，交流侧 2%；阴影与污垢损失：年均 7% (含冬季积雪遮挡)；逆变器夜间自耗电：0.2  $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{天}$ 。如图 6 所示。

Figure 6. Loss model configuration  
图 6. 损失模型配置



4.2. 仿真结果分析

仿真结果分析包括发电性能评估, 敏感性与优化分析和经济型验证[9]。  
经实验验证, 发电性能见表 3 和图 7。

Table 3. Power generation performance  
表 3. 发电性能

| 指标    | 数值                                          | 说明              |
|-------|---------------------------------------------|-----------------|
| 年发电量  | 29,832 kWh                                  | 系统效率 82%        |
| 月均发电量 | 夏季峰值 2980 kWh (7 月)<br>冬季谷值 1560 kWh (12 月) | 冬季发电量为夏季的 52.3% |
| 日均自给率 | 夏季 115%<br>冬季 62%                           | 储能系统补充冬季缺口      |

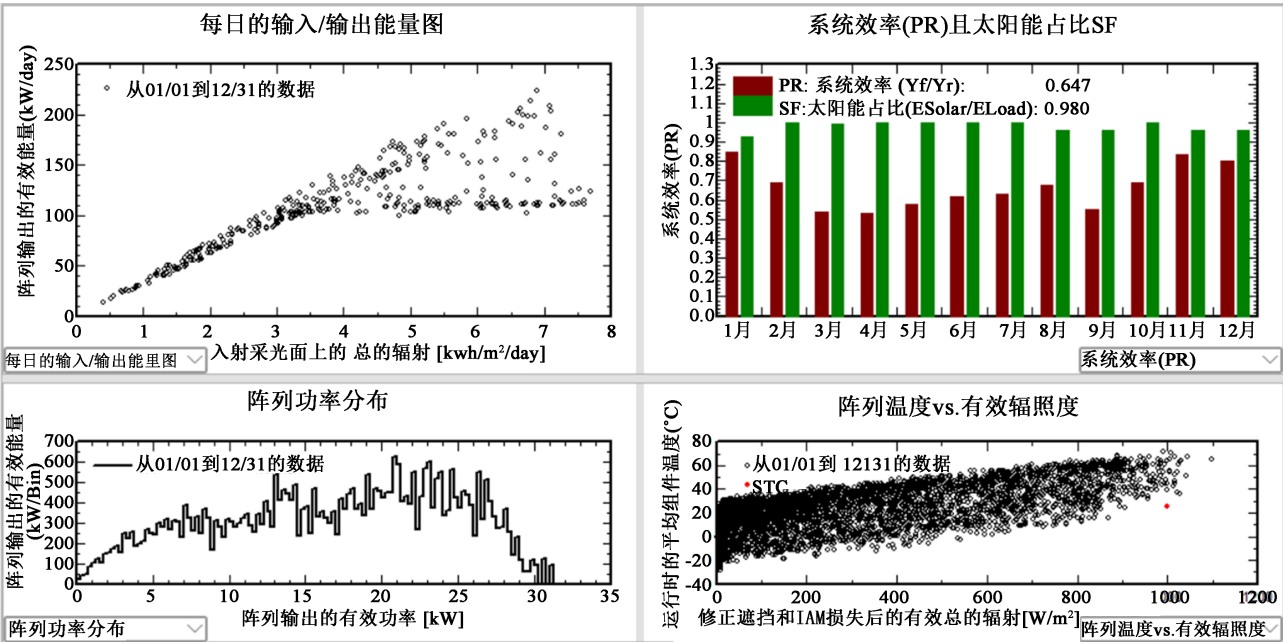


Figure 7. Analysis chart of irradiance and efficiency  
图 7. 辐照度与效率分析图

在敏感性与优化分析中, 倾角敏感性和储能能量优化见表 4 和表 5。由表 4 可以看出, 40°倾角为冬季辐射与积雪滑落的最优平衡点。表 5 也证明了 200 kWh 方案在自给率与成本间达到帕累托最优[10]。

Table 4. Tilt sensitivity  
表 4. 倾角敏感性

| 倾角(°) | 年发电量(kWh) | 与 40°方案对比 |
|-------|-----------|-----------|
| 30    | 28,150    | -5.6%     |
| 40    | 29,832    | 基准        |
| 50    | 28,940    | -3.0%     |

Table 5. Energy storage optimization  
表 5. 储能能量优化

| 储能容量(kWh) | 自给率(%) | 投资成本(万元) |
|-----------|--------|----------|
| 150       | 83     | 16.8     |
| 200       | 90     | 22.5     |

最后是经济性验证，对整个发电系统的造价进行了分析，为其的应用提供了经济性便利。经济性指标见表 6。

Table 6. Economic verification  
表 6. 经济性验证

| 经济指标     | 数值            | 计算依据                              |
|----------|---------------|-----------------------------------|
| 初始投资     | 24.6 万元       | 光伏组件 12.3 万 + 储能 9.8 万 + 其他 2.5 万 |
| 年收益      | 2.8 万元        | 电费节省 2.5 万 + 补贴 0.3 万             |
| 运维成本     | 0.3 万元/年      | 组件清洗 + 设备维护                       |
| 静态回收期    | 7.8 年         | 投资/(年收益 - 运维成本)                   |
| 全生命周期净收益 | 48.2 万元(25 年) | 折现率 6%                            |

光伏系统与其他减排措施对比，屋顶光伏在减排强度(1.21 tCO<sub>2</sub>/万元投资)与场景普适性方面优势显著。如表 7 所示。

Table 7. Comparison between photovoltaic systems and other emission reduction measures  
表 7. 光伏系统与其他减排措施对比

| 措施类型   | 初始投资(万元) | 年减排量(tCO <sub>2</sub> ) | 投资回收期(年) | 适用场景              |
|--------|----------|-------------------------|----------|-------------------|
| 屋顶光伏   | 24.6     | 29.8                    | 7.8      | 高辐照、屋顶条件良好        |
| 小型风力发电 | 38.2     | 22.5                    | 12.5     | 年均风速 ≥ 5 m/s 区域   |
| 能效设备改造 | 15.0     | 8.7                     | 4.2      | 老旧设备占比 > 30%      |
| 储能调峰系统 | 45.0     | 18.9                    | 10.3     | 峰谷电价差 > 0.6 元/kWh |

相关补贴构成如下。

国家层面：发电量补贴：0.15 元/kWh(前 10 年)，依据《可再生能源电价附加补助资金管理办法》(财建[2020]208 号)；初装补贴：3 元/W(最高 5 万元)，依据《吉林省分布式光伏发电项目实施细则》(2022)。

地方层面：税收优惠：增值税即征即退 50%(前 3 年)，企业所得税“三免三减半”；电网接入补贴：一次性补贴 1 万元(10 kV 以下并网)。

通过 PVsyst 仿真验证，吉林永吉地区 22.32 kW 屋顶光伏系统可满足二次设备舱全年 90%的用电需求，极端条件下供电可靠率 ≥ 99.9%，静态投资回收期 7.8 年[11]。仿真结果为寒冷地区变电站光储系统设计提供了量化依据，后续可通过动态电价策略优化进一步提升经济性。

5. 结论

本研究针对吉林永吉地区变电站二次设备舱的能源需求，设计了一套 22.32 kW 的光伏发电系统。通过合理的光伏组件选型、储能系统配置和智能化控制，系统能够有效满足二次设备舱的电力需求，提高

能源利用效率,降低碳排放。仿真分析和经济性评估结果表明,该系统具有较高的可靠性、经济性和环境效益,为变电站的绿色运行提供了可靠保障。

未来研究方向可集中在以下几个方面:一是探索光伏-储能-电网的优化调度策略,进一步提高系统经济性;二是研究新型储能技术,如锂离子电池、超级电容器等,以提高系统性能和寿命;三是开发智能化的能量管理系统,实现变电站多种能源的协调优化。这些研究将有助于推动光伏发电技术在变电站中的更广泛应用,为电力系统的绿色转型做出贡献。

## 参考文献

- [1] 岳舟,李浩天,廖辰星.一种光伏发电用高增益多电平逆变器[J].电力系统保护与控制,2023,51(16):136-148.
- [2] 李泞吕,赵方凯,陈利顶.城市建筑屋顶光伏发电潜力评估方法和模型[J].生态学报,2023,43(10):4284-4293.
- [3] 王璐凡.光伏发电并网系统及其关键技术分析[J].光源与照明,2023(8):111-113.
- [4] 朱涛,常向阳,朱方林.江苏县域农村屋顶分布式光伏发电系统建设自然社会影响因素实证分析[J].太阳能学报,2023,44(5):217-225.
- [5] 赵耀,高少炜,李东东.基于天气相似聚类与QRNN的短期光伏功率区间概率预测[J].电力系统自动化,2023(23):152-161.
- [6] 余飞,刘沛津,魏平.海上光伏发电系统运行风险评估方法研究[J/OL].电力科学与工程,1-11.  
[https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=HgkNOCd8VPh2jnuJRCCJrstsGEHXFJZoGm8xySvaJKYEIYuZ-Desb-m8hjOxX\\_22wSDvZ6ZF5xMt-qUUL0JVD8FMI5KA3miMiJBSWz2PyEVCQyih0cpMHw2k4eDewNtEvoDI60AZdZByTKnoC0juPKo8zozlDj5ID-niyVhWrySy6RqK3xbK3Tg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=HgkNOCd8VPh2jnuJRCCJrstsGEHXFJZoGm8xySvaJKYEIYuZ-Desb-m8hjOxX_22wSDvZ6ZF5xMt-qUUL0JVD8FMI5KA3miMiJBSWz2PyEVCQyih0cpMHw2k4eDewNtEvoDI60AZdZByTKnoC0juPKo8zozlDj5ID-niyVhWrySy6RqK3xbK3Tg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS),2025-03-06.
- [7] 赵磊,李瑛.阀控式密封铅酸电池在电力系统中的应用——评《铅酸蓄电池科学与技术》[J].电池,2022,52(3):357-358.
- [8] Karakaş, E. and Öner, Y. (2023) A Modular Differential Power Processing Converter Design with Simplified Voltage Equalization for Photovoltaic Systems. *Electric Power Components and Systems*, 52, 1397-1413.  
<https://doi.org/10.1080/15325008.2023.2285328>
- [9] 杜海娟.光伏发电系统仿真软件设计与控制决策探讨[J].太阳能学报,2025,46(2):684.
- [10] 刘建飞.基于物联网的光伏发电系统运行状态在线监测方法[J].云南电业,2025(2):44-47.
- [11] Chigane, K. and Ouassaid, M. (2024) Experimental Assessment of Integral-Type Terminal Sliding Mode Control Designed for a Single-Phase Grid-Interlinked PV System. *Control Engineering Practice*, 147, Article ID: 105903.  
<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2024.105903>