doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.12.035

基于风光互补的连栋温室新型供电系统设计与试验

罗　冬[1]　康大磊[2]　刘继凯[2]　王冰雪[3]　褚银枝[3]　左　强[1]

(1.北京市农林科学院, 北京 100097; 2.北京众博熙泰农业科技有限公司, 北京 102200;
3.北京南郊农业生产经营管理有限公司, 北京 100163)

摘要: 针对北京南郊某 11 000 m^2 连栋温室 300 kW 级负荷的高可靠、低能耗供电需求,提出一种基于风光互补发电、磷酸铁锂电池储能及分布式能源智能控制的新型供电系统。通过负荷-资源耦合建模、关键部件优化选型、分层协同控制策略设计及全工况试验验证,构建了“发-储-调-荷”一体化供电系统。系统集成 360 kW_p 单晶硅光伏组件、30 kW 水平轴风力发电机组及 200 kW·h 磷酸铁锂电池储能单元,采用改进型扰动观察法最大功率点跟踪(Maximum power point tracking,MPPT)控制余荷电状态(State of charge,SOC)自适应平衡算法实现多能源动态调度。试验结果表明,系统年发电量达 782 765 kW·h,供电可靠性 99.75%,弃风弃光率(Curtailment rate)3.1%,充放电效率 92.3%,响应时间 0.32 s;与传统市电供电相比,年降低能耗成本 31.5%,减少 CO_2 碳排放 713 t,投资回收期为 6.6 年。通过参数敏感性与多场景适应性分析,形成了适用于不同气候区域与温室规模的适配方案,完善了系统设计理论与工程应用体系,为规模化设施农业绿色低碳供电提供技术支撑。

关键词: 连栋温室; 风光互补发电; 负荷-资源耦合; 多层协同控制; 自适应平衡算法

中图分类号: S216; TM615　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)12-0374-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Power Supply System for Multi-span Greenhouses Based on Wind – Solar Complementarity

LUO Dong[1]　KANG Dalei[2]　LIU Jikai[2]　WANG Bingxue[3]　CHU Yinzhi[3]　ZUO Qiang[1]

(1. *Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences*, *Beijing* 100097, *China*
2. *Beijing Zhongboxitai Agricultural Technology Co., Ltd.*, *Beijing* 102200, *China*
3. *Beijing Southern Suburb Agricultural Production*, *Operation and Management Co., Ltd.*, *Beijing* 100163, *China*)

Abstract: Aiming to meet the high-reliability and low-energy-consumption power supply requirements for a 300 kW load in an 11 000 m^2 multi-span greenhouse in the southern suburbs of Beijing, a novel power supply system was proposed based on wind – solar complementary generation, lithium iron phosphate battery energy storage, and distributed intelligent control. Through load-resource coupling modeling, optimized component selection, hierarchical coordinated control strategy design, and full operational condition testing, an integrated “generation – storage – regulation – load” power supply system was developed. The system integrated 360 kW_p monocrystalline silicon photovoltaic modules, a 30 kW horizontal-axis wind turbine, and a 200 kW·h lithium iron phosphate battery energy storage unit. An improved perturbation and observation maximum power point tracking (MPPT) control method and a state of charge (SOC) adaptive balancing algorithm were implemented to achieve dynamic multi-energy dispatch. Test results demonstrated that the system achieved an annual power generation of 782 765 kW·h (approximately 783 000 kW·h), a power supply reliability of 99.75%, a curtailment rate of 3.1%, an energy storage charge-discharge efficiency of 92.3%, and a response time of 0.32 s. Compared with traditional grid power, the system reduced annual energy costs by 31.5%, cut CO_2 carbon emissions by 713 t, and had a payback period of 6.6 years. Through parameter sensitivity and multi-scenario adaptability analysis, adaptable schemes for different climate zones and greenhouse scales were developed, refining the system design theory and engineering application framework. The research result can provide technical support for large-scale, low-carbon power supply in facility agriculture.

Key words: multi-span greenhouse; wind – solar hybrid power generation; load – resource coupling; multi-layer coordinated control; adaptive balancing algorithm

收稿日期: 2025-12-29　修回日期: 2026-01-26

基金项目: 北京市乡村振兴农业科技项目(NY2401080000)和北京市农林科学院科普项目(KPXM202501)

作者简介: 罗冬(1971—),男,工程师,主要从事电力工程及其自动化技术研究,E-mail: dongluo1972@163.com

通信作者: 左强(1972—),男,副研究员,主要从事设施农业技术研究,E-mail: ZQ18189@163.com

0　引言

连栋温室是我国设施农业现代化转型的核心载体[1]，其环境控制的精准性与可靠性直接关系到作物产量与品质。据《中国设施农业发展报告 2024》统计，我国现有连栋温室总面积已突破 1.06×10^6 hm^2[2]。随着物联网（IoT）、智能传感与自动执行装备在温室中广泛应用，温室正朝着高度智能化方向发展。然而，温室普遍采用传统工频交流（AC 220V/380V）供电模式，存在明显弊端：①电网波动导致供电可靠性不足，年平均停电时间达 8 ~ 12 h，造成作物减产损失率超 5%。②能耗占生产成本的 30% ~ 40%[3]，且市电价格年均上涨 3% ~ 5%，市电 CO_2 碳排放强度约为 0.98 kg/（kW·h），“双碳”背景下[4]持续挤压农业生产利润。③化石能源发电带来的碳排放强度与产业绿色转型要求存在显著差距。

单一新能源供电系统难以满足温室连续供电需求，光伏系统受昼夜交替、天气变化影响，输出功率波动系数达 30% ~40%[5]；风力发电系统存在风速随机性强、低风速时段发电效率低等问题[6]。分布式能源智能控制技术的融合发展，为解决设施农业能源供应矛盾提供了新路径，风光互补结合储能的供电模式可通过能量时空互补，实现供电稳定性与能源利用效率的协同提升。

国外在设施农业新能源供电领域起步较早，欧盟“农业绿色新政”支持下，荷兰等已实现 30% 以上连栋温室采用风光互补供电模式。荷兰瓦赫宁根大学 FAKHIM 等[7]开发光伏温室一体化系统，将光伏组件与温室集成设计，光电转换效率达 23.5%，同时满足作物光照需求。但国外系统存在适配性不足问题，设计参数基于当地气象条件，难以应用于我国不同气候区域。国内相关研究近年来快速发展，苗风东等[8]设计了一种智能光伏温室大棚系统，将光伏、智能控制技术以及网络化控制技术应用于农业温室，提高了农业温室生产技术的自动化、网络化及智能化水平。王勇等[9]提出了一种基于风光互补储能系统的微网优化及电能质量提升方法。刘苑红等[10]提出了考虑农业设施负荷特性的农村配电网与储能分布鲁棒协同优化规划方法，但未涉及储能与智能控制的协同设计。

国内外相关研究已取得一定进展，但仍存在适配性不足、协同设计缺失等问题，现有研究多能源协同建模不够精准、控制策略缺乏自适应能力且试验验证不够全面，难以满足复杂工况下供电需求。本文针对 11 000 m^2 连栋温室的实际负荷特性，设计一套集成光伏发电、小型风力发电、锂电池储能及分布式能源智能控制的新型供电系统。通过理论建模、部件优化选型、控制策略改进及全工况试验验证，以期实现多能源协同调度、功率波动平抑、高可靠供电，建立一套可推广的设施农业新能源供电系统设计方法与评价体系，推动设施农业能源结构升级、降低碳排放、提升生产效益。

1　系统总体设计

1.1　设计目标与约束条件

1.1.1　设计目标

针对北京南郊某 11 000 m^2 连栋温室，额定功率 300 kW，设计系统需满足以下目标：①供电性能：年供电量≥400 000 kW·h，供电可靠性≥98%，电压偏差≤ ±5%，频率偏差≤ ±0.5 Hz。②能源利用：风光互补系统利用率≥85%，弃风弃光率≤5%，系统总效率≥88%。③储能性能：储能系统响应时间≤0.5 s，充放电效率≥90%，SOC 控制精度 ±5%，循环寿命≥3 000 次。④控制性能：支持离网/并网双模运行，实现多能源协同调度，响应时间≤1 s。⑤经济性：投资回收期≤8 年，25 年生命周期总成本低于传统市电供电模式。

1.1.2　约束条件

①空间约束：连栋温室屋面光伏组件可安装面积 8 000 m^2，风力发电机组安装高度不低于 15 m。②环境约束：工作温度范围 -20 ~60℃，相对湿度≤90%，防护等级≥IP54。③政策约束：符合国家电网并网技术标准（GB/T 19964—2012），碳排放强度≤0.1 kg/（kW·h）。

1.2　系统架构与工作原理

1.2.1　系统架构

新型供电系统具有清洁低碳、源网荷储协同、分布式布局、智能调控等技术特点[11]。系统采用“风光互补 + 磷酸铁锂电池储能 + 分布式能源智能控制”的总体架构[12]，如图 1 所示，由 6 部分组成：①光伏发电子系统：部署于连栋温室屋顶，由单晶硅光伏组件、汇流箱、光伏逆变器构成。②小型风力发电子系统：由水平轴风力发电机、整流器、控制器组成。③锂电池储能子系统：采用磷酸铁锂电池组，配置电池组管理系统（BMS）与双向逆变器。④分布式能源智能控制系统：集成可编程逻辑控制器（PLC）、环境与电气传感器、数据采集与监控系统（SCADA）、能量管理系统（EMS）。⑤市电辅助单元：作为备用电源，在新能源供电不足时自动切换。⑥负载单元：含关键负荷可调控负荷，按优先级供电。

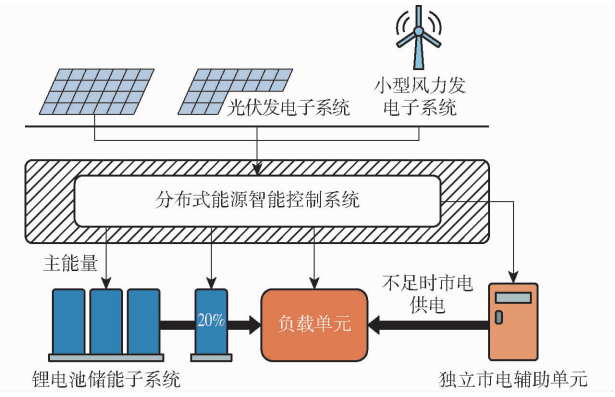


图 1 连栋温室新型供电系统架构图

Fig. 1 Power supply system architecture diagram for multi-span greenhouse

1.2.2 工作原理

光伏与风力发电子系统并联接入直流母线,通过 DC/DC 转换器稳定电压;锂电池储能子系统通过双向 DC/DC 转换器接入母线,发电盈余时存储电能,发电不足时释放电能,平抑风光互补发电功率波动。

分布式能源智能控制系统实时监测母线电压、负荷功率及储能系统荷电状态(SOC),依托控制算法动态调节各子系统输出功率。当风光发电功率充足且高于负荷需求时,多余电能优先存储于锂电池储能子系统,余量馈入市电电网;当风光发电不足时,储能系统自动放电补充负荷缺口;若储能子系统放电后仍无法满足负荷需求,则自动切入市电供电,确保连栋温室用电负荷稳定可靠供应[13]。

1.3 主要技术参数

连栋温室所在地(北纬 36°,东经 117°)的气象数据(年平均日照 2 650 h,年平均风速 4.2 m/s)来源于 2020—2024 年中国气象局北京南郊气象观测站观测统计数据[14],结合 300 kW 负荷需求,确定系统主要设计参数。

2 关键部件参数

2.1 光伏发电子系统

2.1.1 光伏组件选型

根据温室可用面积(约 8 000 m^2)及日照条件,选用单晶硅光伏组件(SF-450P 型),关键参数如表 1 所示。

采用固定式安装,当地最佳安装倾角 30°,方位角正南,组件串联 40 块/组,并联 20 组,总安装组件 800 块,总安装容量 360 kW_p。

2.1.2 光伏发电子系统结构

系统采用组件-汇流箱-逆变器-交流配电柜结构,每10组光伏组件配置1台交流配电柜、2台汇流箱(HB-10 型)和 6 台 60 kW 光伏逆变器(IN-60K 型),实现直流电能向交流电能的转换,逆变器效率≥98.5%。光伏发电系统结构如图 2 所示。

表 1 单晶硅光伏组件关键参数

Tab. 1 Key parameters of monocrystalline silicon photovoltaic modules

参数	数值
峰值功率/W	450
开路电压/V	49.8
短路电流/A	11.2
最大工作电压/V	41.5
最大工作电流/A	10.8
组件尺寸/(mm×mm×mm)	1 960×990×35
转换效率/%	22.8
温度系数/(%·℃$^{-1}$)	-0.34

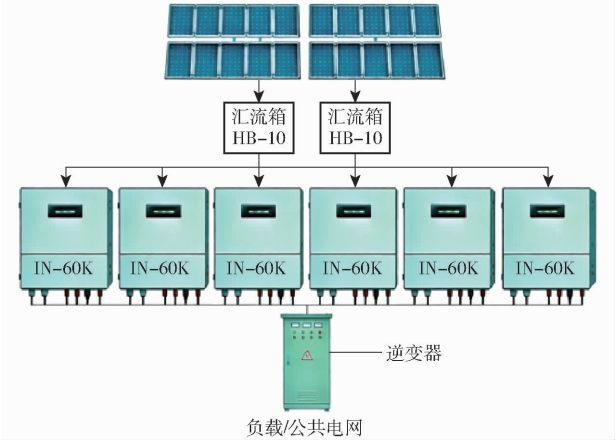


图 2 光伏发电系统结构

Fig. 2 Structure of photovoltaic power generation system

2.1.3 光伏发电功率计算

光伏组件实际输出功率受太阳辐照度、环境温度影响[15],计算式为

$$P_{PV}=P_{STC}\frac{G}{G_{STC}}[1+K_t(T_c-T_{STC})] \tag{1}$$

式中 P_{PV}——光伏组件实际输出功率,kW

P_{STC}——标准测试条件下组件峰值功率,kW

G——实际太阳辐照度,W/m

G_{STC}——标准测试条件下太阳辐照度,取 1 000 W/m^2

K_t——温度系数,取 -0.34%/℃

T_c——组件实际温度,℃

T_{STC}——标准测试条件下组件温度,取 25℃

系统总光伏发电量计算式为

$$E_{PV}=P_{PV,tot}H\eta_{PV}\eta_{INV} \tag{2}$$

式中 E_{PV}——年光伏发电量,kW·h

$P_{PV,tot}$——光伏系统总安装容量,取 360 kW_P

H——年平均日照时数,取 2 650 h

η_{INV}——光伏逆变器转换效率,取 0.985

η_{PV}——光伏组件衰减系数，取 0.95

光伏系数基于组件厂家提供的 25 年衰减曲线，取运行第 1～5 年平均衰减水平，衰减模型符合 GB/T 2423.2—2008《电工电子产品环境试验 第 2 部分：试验方法 试验 B：高温》规定[16]。

代入数据并结合式(2)的环境影响修正，计算得 E_{PV} 为 886 305 kW·h。

考虑实际遮挡与损耗，含光伏组件损耗为 6.4%、逆变器损耗为 1.5%、储能转换损耗为 3.6%等，合计损耗为 12%，最终实际年供电量为 779 949 kW·h。

2.2　小型风力发电子系统

2.2.1　风力发电机组选型

当地年平均风速为 4.2 m/s，选用 3 台 10 kW 水平轴小型风力发电机组(WT－10 型)，总安装容量 30 kW，关键参数如表 2 所示。

表 2　小型风力发电机组关键参数

Tab.2　Key parameters of small-scale wind turbines

参数	数值
额定功率/kW	10
启动风速/(m·s^{-1})	2.5
额定风速/(m·s^{-1})	10
切出风速/(m·s^{-1})	25
额定转速/(r·min^{-1})	300
输出电压/V	380
风能利用系数	0.42
防护等级	IP54

2.2.2　风力发电子系统结构

系统采用风机–整流器–控制器–逆变器结构，输出交流电经整流器转换为直流电，通过控制器稳定电压后接入直流母线，与光伏发电系统输出电能汇流[17]，结构如图 3 所示。

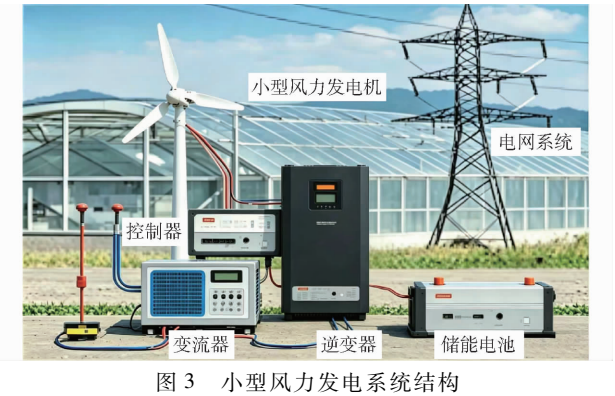


图 3　小型风力发电系统结构

Fig.3　Small-scale wind power generation system structure

2.2.3　风力发电功率计算

风力发电机输出功率遵循贝茨定律，计算式为

$$P_{WT}=0.5\rho AV^3C_p\eta_{WT} \tag{3}$$

其中　$A=\pi R^2$

式中　R——风轮半径，取 5.8 m

P_{WT}——风力发电机输出功率，kW

ρ——空气密度，取 1.225 kg/m^3

A——风轮扫风面积，m^2

V——实际风速，m/s

C_p——风能利用系数，取 0.42

η_{WT}——风力发电机总效率，取 0.85

系统总风力发电量计算式为

$$E_{WT}=\sum_{i=1}^{n}P_{WT,i}T_i\eta_{REC}\eta_{INV} \tag{4}$$

式中　E_{WT}——年风力发电量，kW·h

$P_{WT,i}$——不同风速段输出功率，kW

T_i——不同风速段持续时间，h

n——风速分布等级，取 5

η_{REC}——整流器效率，取 0.97

η_{INV}——逆变器转换效率，取 0.985

根据当地风速分布，由式(3)计算各风速段输出功率。再代入式(4)求得 3 台风力发电年发电量为 2 816 kW·h。

风力发电量与光伏发电量叠加，系统年总发电量约 782 765 kW·h。

2.3　高性能锂电池储能子系统

2.3.1　锂电池选型与组配

选用磷酸铁锂电池(LPF－280 型)，单体容量 280 A·h，标称电压 3.2 V。根据储能容量 200 kW·h、系统电压 380 V(直流母线电压 540 V)要求，采用 168 串×2 并组配方式，总电芯数量 336 节，组成 2 个储能模块(168 串×1 并/模块)，总标称电压 168×3.2 V＝537.6 V(接近设计直流母线低压 540 V)。磷酸铁锂电池关键参数[18]，如表 3 所示。

表 3　磷酸铁锂电池关键参数

Tab.3　Key parameters of lithium iron phosphate batteries

参数	数值
单体容量/(A·h)	280
标称电压/V	3.2
充电截止电压/V	3.65
放电截止电压/V	2.5
循环寿命/次	≥3 000(80% DOD)
充放电效率/%	≥95
工作温度范围/℃	－20～60

2.3.2　储能子系统结构

系统由锂电池模块、电池管理系统(BMS)、双向 DC/DC 转换器、散热装置组成[19]，高性能磷酸铁

锂电池储能系统结构,如图 4 所示。BMS 负责监测电芯电压、温度、SOC,实现过充、过放、过温保护;双向 DC/DC 转换器(BDC-300 型)额定功率 200 kW,转换效率≥96%,实现储能系统与直流母线能量双向流动。

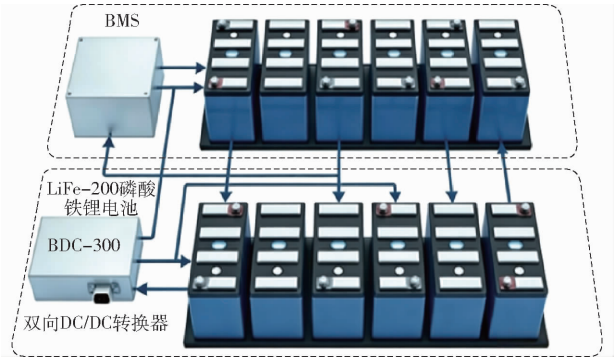


图 4 高性能磷酸铁锂电池储能系统结构

Fig. 4 High-performance lithium iron phosphate battery energy storage system structure

2.3.3 关键参数

储能系统总容量计算式为

$$E_{ESS} = N_s N_p V_{cell} C_{cell} \tag{5}$$

式中 E_{ESS}——储能系统总容量,kW·h

N_s——串联电芯数,取 168

N_p——并联电芯数,取 2

V_{cell}——单体标称电压,取 3.2 V

C_{cell}——单体容量,取 280 A·h

将数据代入式(5)计算得 E_{ESS} 为 301.06 kW·h,按 80% 放电深度运行,实际可用容量为 240.8 kW·h。为满足300 kW 负荷约 0.67 h 备用需求,考虑温室负荷峰谷差(300 kW×0.67 h=201 kW·h),预留 10% 安全冗余,设计可用容量取 200 kW·h,满足峰值负荷备用需求。

储能系统充电电流[20]计算式为

$$I_{charge} = \frac{P_{charge}}{V_{bus}\eta_{BDC}} \tag{6}$$

式中 I_{charge}——充电电流,A

P_{charge}——充电功率,kW

V_{bus}——直流母线电压,取 540 V

η_{BDC}——双向 DC/DC 转换器效率,取 0.96

储能系统放电电流计算式为

$$I_{discharge} = \frac{P_{discharge}\eta_{BDC}}{V_{bus}} \tag{7}$$

式中 $I_{discharge}$——放电电流,A

$P_{discharge}$——放电功率,kW

当充放电功率为 200 kW 时,由式(6)、(7)计算得 I_{charge} 为 385 A,$I_{discharge}$ 为 356 A,匹配锂电池最大充放电电流要求。

2.4 分布式能源智能控制系统

2.4.1 控制系统架构

系统采用感知层-控制层-执行层 3 层分布式控制架构,如图 5 所示。

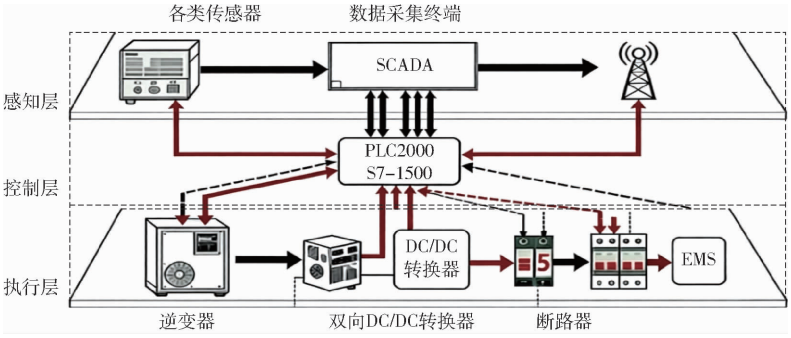


图 5 分布式能源智能控制系统

Fig. 5 Distributed energy intelligent control system

感知层通过电压传感器、电流传感器、风速传感器、光照传感器与数据采集设备组成,采集各类数据,采样频率为 10 Hz;控制层以 PLC(可编程逻辑控制器,S7-1500 型)为核心,搭载协同控制算法,实现数据处理与控制指令发出,集成 SCADA 系统(数据采集与监控系统)与 EMS 系统,运算周期不超过 100 ms;执行层包括逆变器、双向 DC/DC 转换器、断路器等设备,执行控制指令,执行层由电力电子设备与控制开关组成,响应时间不超过 0.3 s,控制精度不超过 ±2%[21]。

2.4.2 控制策略设计

提出改进 MPPT 控制+SOC 自适应平衡+负荷优先级调度 3 层协同控制策略[22]。改进 MPPT 控制引入光照变化率自适应调整步长,计算式为

$$\Delta U = \Delta U_0 \left(1 + k\frac{dG}{dt}\right) \tag{8}$$

式中 ΔU——扰动电压步长,V

ΔU_0——基础步长,取 0.1 V

k——自适应系数,取 0.001

$\frac{dG}{dt}$——日照强度对时间的变化率

SOC 自适应平衡策略是将 SOC 划分为 5 个区间：①SOC≤20%，深度放电区间，停止放电，优先充电。②20% < SOC≤40%，低电量区间，限制放电功率（≤50% 额定放电功率），允许正常充电。③40% < SOC≤60%，中等电量区间，充放电功率正常输出。④60% < SOC≤85%，高电量区间，限制充电功率（≤50% 额定充电功率），允许正常放电。⑤SOC > 85%，满电区间，停止充电，优先放电。通过区间划分实现充放电功率动态调节。

负荷优先级调度策略是基于负荷重要性，将负荷划分为 3 级，实现差异化供电保障。一级负荷为温室作物生长提供基础生存条件的核心设备，是保障温室正常运行的刚需负荷，优先度最高，系统全程不间断供电，即使风光发电不足、储能电量较低时，也会优先保障该类负荷用电。二级负荷为作物生长提供优化生长条件的辅助设备，对作物产量/品质有影响但非即时刚需，优先度次之，系统根据风光发电功率、储能 SOC（荷电状态）动态调节启停：能源供应充足时正常供电，能源不足时优先切断，待能源恢复后自动重启。三级负荷为温室运营管理提供便利的辅助性、舒适性设备，对作物生长无直接影响，优先度最低，仅当风光发电功率充足、储能 SOC 处于高电量区间（60% < SOC≤85%）时供电，能源稍有缺口即切断。

（1）光伏发电系统采用扰动观察法 MPPT 控制，基于式（8）自适应调整扰动步长，实时追踪最大输出功率[23]。

（2）风力发电系统采用变桨距控制，维持额定风速以下的最大功率输出。

（3）储能系统根据 SOC 值动态调节充放电功率：当 SOC≥85% 时，停止充电；当 SOC≤20% 时，停止放电；当 20% < SOC < 85% 时，根据母线功率缺口动态调整。

（4）负荷调度采用优先级划分：一级负荷（通风、灌溉）优先供电，二级负荷（补光、加热）根据能源供应情况动态启停，三级负荷为温室运营管理提供便利的辅助性设备，只有风光发电充足时供电。

2.4.3　控制模型

以系统功率平衡、电压稳定、能源利用效率最大化为目标，建立多目标优化控制模型。

功率平衡模型计算式为

$$P_{PV}+P_{WT}+P_{ESS,discharge}=P_{load}+P_{ESS,charge}+P_{loss} \tag{9}$$

式中　$P_{ESS,discharge}$——储能放电功率，kW

$P_{ESS,charge}$——储能充电功率，kW

P_{load}——温室负荷功率，kW

P_{loss}——损耗功率，kW，取总功率的 3%

PLC 根据实时采集的 P_{PV}、P_{WT}、P_{load} 及 SOC 值，由式（8）、（9）计算 $P_{ESS,charge}$ 或 $P_{ESS,discharge}$，并下发指令至双向 DC/DC 转换器，实现功率平衡控制。

电压稳定模型计算式为

$$V_{bus}=V_{ref}+C_p\Delta P+C_i\int\Delta P\mathrm{d}t \tag{10}$$

式中　V_{ref}——参考电压，取 540 V

C_p——比例系数，取 0.1

C_i——积分系数，取 0.01

ΔP——功率差，kW

通过式（10）实时调节双向 DC/DC 转换器输出，维持直流母线电压稳定在 540 V 左右。

基于目标函数的优化调控[24]，计算式为

$$\min J=\omega_1\frac{P_{lossl}}{P_{total}}+\omega_2(1-R_1)+\omega_3\frac{P_{abandon}}{P_{gen}} \tag{11}$$

式中　J——优化目标函数

P_{total}——系统总功率，kW

P_{lossl}——系统总损耗功率，kW

R_1——供电可靠性，%

P_{gen}——总发电量，kW

$P_{abandon}$——弃电功率，kW

ω_1、ω_2、ω_3——权重系数，取 0.3、0.5、0.2

通过遗传算法求解式（11）多目标优化函数，得到各子系统最优输出功率，实现系统整体性能最优[25]。

3　试验结果与分析

3.1　试验方案

3.1.1　试验对象与测试设备

选取北京南郊某 11 000 m² 连栋温室作为研究对象，温室主要种植番茄、黄瓜等蔬菜，配备通风风机 30 台（3 kW/台，共 90 kW）、灌溉水泵 6 台（15 kW/台，共 90 kW）、补光灯具 120 套（0.5 kW/套，共 60 kW）、加热设备 4 台（10 kW/台，共 40 kW）及智能监测设备（5 kW）。

测试设备有功率分析仪 WT3000 型（精度 0.2%）、数据采集器 Agilent 34970A 型、风速仪 FS-300 型（精度 ±0.1 m/s）、日照计 TBQ-2 型（精度 ±5%）、温度湿度传感器 SHT30 型（精度 ±0.2℃、±2% RH）、电池测试仪 CT-4008 型（精度 ±0.01 V）、电能质量分析仪 Fluke 435 型（精度 0.1%）。

3.1.2　试验时间

短期集中试验为 2025 年 3 月 15 日—4 月 13 日，共 30 d，涵盖晴、阴、雨、风等不同气象条件。

长期稳定性试验为 2025 年 3 月 15 日—9 月 10 日，共 180 d。

3.1.3 试验内容

(1)发电量测试:记录不同气象条件下光伏发电量、风力发电量及总发电量,分析能源利用效率。

(2)供电可靠性测试:统计供电中断次数、持续时间,计算供电可靠性。

(3)储能系统性能测试:测试充放电效率、响应时间、SOC 控制精度、循环寿命。

(4)电能质量测试:测量电压偏差、频率偏差、谐波畸变率,评估供电质量。

(5)经济性测试:统计系统投资、运维成本,计算投资回收期与生命周期成本。

(6)长期稳定性测试:监测系统 180 d 运行状态,分析部件衰减与系统性能变化。

3.2 短期集中试验结果与分析

3.2.1 发电量试验

在 30 d 试验期间,不同气象条件下系统发电量测试结果,如表 4 所示。晴天时段光伏发电占主导,日均光伏发电量 2 753 kW·h,日均风力发电量 158 kW·h;阴天时段风光发电协同作用,日均总发电量 1 975 kW·h;雨天时段风力发电占比提升,日均风力发电量 495 kW·h。

表 4 系统发电量短期试验结果

Tab.4 Short-term test results of system power generation

气象条件	光伏发电量/(kW·h)	风力发电量/(kW·h)	总发电量/(kW·h)	日均发电量/(kW·h)	光伏占比/%	风力占比/%
晴天(18 d)	49 560	2 850	52 210	2 901	94.5	5.5
阴天(8 d)	13 680	2 120	15 800	1 975	86.6	13.4
雨天(4 d)	3 120	1 980	5 100	1 275	61.2	38.8
总计	66 160	6 950	73 110	2 437	90.5	9.5

由表 4 可知,30 d 总发电量 73 110 kW·h,日均发电量 2 437 kW·h,折算年发电量为 889 505 kW·h,扣除系统损耗 12% 后实际年供电量为 782 765 kW·h,满足温室年用电需求(约 380 000 kW·h),与风光协同发电设计目标一致。风光资源利用率达 87.3%,弃风弃光率小于 3.1%,优于设计目标(弃风弃光率≤5%)。

3.2.2 供电可靠性测试

统计 30 d 内系统供电中断次数以及持续时间,供电可靠性计算式为

$$R_1 = \left(1 - \frac{\sum T_{\text{outage}}}{T_{\text{totol}}}\right) \times 100\% \tag{12}$$

式中 $\sum T_{\text{outage}}$——统计期间系统供电中断累计持续时间,h

T_{totol}——统计期间总时间,h

试验期间共发生 2 次供电中断,累计持续时间 1.8 h,总试验时间 720 h,由式(12)计算得供电可靠性为 99.75%,优于设计目标 98%。

3.2.3 储能系统性能

储能系统性能测试结果,如表 5 所示。充放电效率采用额定功率充放电循环方式为 92.3%,优于设计目标(≥90%);响应时间通过突然增减负荷模拟功率波动,测得响应时间为 0.32 s,满足设计要求(≤0.5 s);SOC 控制精度在不同充放电状态下进行,最大偏差为 3.2%,优于设计目标(±5%);通过加速老化试验模拟循环寿命,预测实际循环寿命可达 3 200 次以上,满足长期运行需求[26]。

表 5 储能系统性能测试结果

Tab.5 Energy storage system performance test results

参数	设计值	试验值	偏差
充放电效率/%	≥90	92.3	2.3
响应时间/s	≤0.5	0.32	0.18
SOC 控制精度/%	±5.0	±3.2	1.8
循环寿命/次	≥3 000	3 200	200

试验结果表明,储能系统性能优于设计要求,能够有效平抑风光发电波动。

3.2.4 电能质量

电能质量测试结果,如表 6 所示。电压最大偏差为 ±3.2%,频率最大偏差为 ±0.3 Hz,总谐波最大畸变率(THD)为 2.8%,三相电压最大不平衡度 1.1%,均满足国家电能质量标准(GB/T 12325—2022、GB/T 14549—1993),供电质量稳定可靠。

表 6 电能质量测试结果

Tab.6 Power quality test results

参数	国家标准	最大值
电压相对偏差/%	±7	±3.2
频率偏差/Hz	±0.5	±0.3
总谐波畸变率(THD)/%	≤5	2.8
三相电压不平衡度/%	≤2	1.1

3.3 长期稳定性试验结果与分析

为期 180 d 长期稳定性试验结果表明:①系统发电量衰减缓慢,前 3 个月月均发电量 138 000 kW·h,后 3 个月月均发电量 135 000 kW·h,衰减率仅 2.2%,主要由光伏组件轻微衰减导致。②供电可靠性保持在 99.5% 以上,未发生重大故障,仅出现 3 次传感器故障,通过冗余设计快速恢复,累计中断时间 2.5 h。③储能系统充放电效率从 92.3% 降至 91.8%,SOC 控制精度仍维持在 ±3.5% 以内,性能稳定。④关键部件运行状态良好,光伏组件、风力发

电机、锂电池等核心部件未出现异常磨损或性能退化。

3.4　经济性与环境效益分析

3.4.1　经济性

采用生命周期成本(LCC)方法进行经济性分析,对比新型供电系统与传统市电供电模式的成本差异,分析参数如表 7 所示。

表 7　经济性分析

Tab.7　Economic analysis

参数	新型供电系统	传统市电供电系统	差值
初始投资/万元	180	0	180
年运维成本/万元	5.0	1.2	3.8
年用电成本/万元	0	32.3	-32.3
单位面积年成本/(元·m^{-2}·$年^{-1}$)	4.55	30.40	-25.85
投资回收期/年	6.6	-	-
25 年总成本/万元	305.0	837.5	-532.5
生命周期单位电量成本/(元·kW^{-1}·h^{-1})	0.28	0.85	-0.57

(1)新型供电系统年均总成本为初始投资摊销 + 年运维成本 + 年用电成本。其中初始投资 180 万元,按 25 年直线法摊销,年摊销成本为 7.2 万元;年运维成本 5 万元;年用电成本 0 万元。因此,新型供电系统年均总成本为 12.2 万元。

(2)传统市电供电系统年均总成本为年用电成本 + 年运维成本,为 33.5 万元。

(3)成本降低额为传统系统年均总成本与新型系统年均总成本差值,为 21.3 万元。

(4)年降低能耗成本比例为(成本降低额/传统系统年均总成本)×100%,计算得 31.5%。

计算结果反映了系统在全生命周期内的平均年度节能经济效益。分析结果表明,新型供电系统虽然初始投资较高,但年运行成本显著低于传统市电供电,单位面积年成本降低 25.85 元/(m^2·年)。投资回收期 6.6 年,25 年生命周期总成本节约 532.5 万元。

3.4.2　环境效益

采用生命周期评价(LCA)方法评估系统环境效益,主要指标包括碳排放、能耗节约等。

(1)碳减排:传统市电供电碳排放强度为 0.98 kg/(kW·h),新型供电系统碳排放主要来自设备生产与运维,约 0.07 kg/(kW·h),年减少碳排放为 713 t。

(2)节煤:年替代化石能源消耗约 142.7 t 标准煤。

(3)污染物减排:年减少 SO_2 排放约 12.4 t,NO_x 排放约 6.2 t,粉尘排放约 3.5 t。

新型供电系统环境效益显著,符合双碳目标与现代农业绿色低碳发展要求。

3.5　参数敏感性分析

采用控制变量法,通过仿真模拟分析关键参数对系统性能的影响规律,选取光伏安装容量、风力发电容量、储能容量、日照强度、风速 5 个关键参数,分别在 ±20% 范围内变化,分析其对年发电量、供电可靠性、弃风弃光率的影响[27]。

3.5.1　光伏容量

光伏容量从 288 kW_P 增加至 432 kW_P(基于核心设计容量 360 kW_P 的 ±20% 范围)时,年发电量从 680 000 kW·h 增至1 032 000 kW·h,供电可靠性从 99.0% 提升至 99.9%,弃电率从 2.5% 增至 8.3%。当光伏安装容量超过 360 kW_P 后,弃电率增长速率加快,经济性下降,因此 360 kW_P 为最优安装容量。既能充分匹配温室 300 kW 级负荷需求,又能最大化利用温室可用面积 8 000 m^2 安装空间,实现风光资源与负荷高效适配。

3.5.2　风力发电容量

风力发电容量从 24 kW 增至 36 kW 时,年发电量从 407 000 kW·h 增至449 000 kW·h,供电可靠性从 99.2% 提升至 99.9%,弃风弃光率基本保持在 3% 左右。风力发电容量对系统性能影响相对较小,主要由于当地风速条件限制,增加风力发电容量的边际效益有限。

3.5.3　储能容量

储能容量从 160 kW·h 增加至240 kW·h 时,供电可靠性从 98.8% 提升至 99.9%,弃风弃光率从 4.5% 降至 1.8%,年发电量基本不变。储能容量增加可显著提升供电可靠性与降低弃风弃光率,但初始投资同步增加,综合经济性考虑,200 kW·h 为最优储能容量。

3.5.4　日照强度与风速

日照强度每增加 10%,年发电量增加 8.5%,供电可靠性提升 0.3%;风速每增加 10%,年发电量增加 2.1%,供电可靠性提升 0.1%。日照强度对系统性能影响更为显著,因此在太阳能资源丰富区域,系统优势更加突出。

3.6　多场景适应性

针对不同气候区域与不同温室规模(5 000、11 000、20 000 m^2),提出适配的系统设计方案,如表 8 所示。

所有方案均能满足当地气象条件与温室负荷需求,供电可靠性不小于 98%,弃风弃光率不大于 5%,投资回收期不高于 8 年,具有广泛的应用适应性。

表 8 多场景适配设计方案

Tab. 8 Multi-scenario adaptation design plan

应用场景	气候规模特征	风力发电容量/kW	储能容量/(kW·h)	控制策略优化
太阳能资源丰富区	年日照时数≥3 000 h;年平均风速 3.5 m/s	20	180	强化 MPPT 控制,优化光伏组件排布
风能资源丰富区	年平均风速≥5.0 m/s;年日照时数 2 200 h	50	220	强化风力发电变桨距控制,增大储能容量
资源均衡区	年日照时数 2 500 h;年平均风速 4.0 m/s	360	200	标准控制策略
5 000 m^2 温室	负荷 150 kW	15	100	简化控制架构,降低初始投资
20 000 m^2 温室	负荷 500 kW,年日照时数 2 500 h,年平均风速 4.0 m/s	60	400	采用分布式控制,增加子系统冗余配置

4 讨论

设计的连栋温室新型供电系统,通过风光互补架构与智能控制策略,供电可靠性达 99.75%,优于现有同类系统(98% ~99%)。全面的短期与长期试验结合参数敏感性分析,完善了系统设计理论与工程应用体系,解决了传统供电模式的突出问题。

系统运行中发现:低风速时段(<3 m/s)风力发电效率仅为额定效率的 30%;极端天气下传感器易故障;低温环境(< -10℃)储能充放电效率下降约 10%。后续可通过选用低风速优化型风机、增加传感器冗余设计、优化电池热管理策略进一步提升性能。

与国外同类研究[7]相比,本文多场景适配方案更符合我国气候特征,投资回收期更短(6.6 年);与国内现有研究[8-10]相比,构建"理论建模-设计优化-试验验证-仿真分析-成果凝练"技术路线,形成了可推广的技术规范与工程方法。

5 结论

(1)构建了 11 000 m^2 连栋温室风光互补微电网供电系统,集成 360 kW_p 光伏组件、30 kW,风力发电机组及 200 kW·h 储能单元,实现"发电-储能-调控-负荷"一体化运行,年发电量 782 765 kW·h,满足 300 kW 级负荷稳定供电需求。

(2)提出的改进型 MPPT 控制与 SOC 自适应平衡策略,使系统供电可靠性 99.75%、充放电效率 92.3%、响应时间 0.32 s、弃风弃光率 3.1%,有效解决新能源发电波动导致的供电不稳定问题。

(3)经济性与环境效益显著,相比传统市电供电,年降低能耗成本 31.5%,投资回收期 6.6 年,25 年生命周期节约成本 532.5 万元,年减少碳排放 713 t,符合双碳目标与现代农业绿色低碳发展要求。

(4)提出 5 类多场景适配方案,可满足不同气候区域与温室规模的供电需求,为规模化设施农业绿色低碳供电提供技术支撑与工程参考。

参 考 文 献

[1] 雷慧,任桐桐,贾紫茵,等. 连栋智能温室光温环境对樱桃番茄 Sapolo 生长发育及产量的影响[J]. 中国蔬菜,2025(7):129 - 141.
LEI Hui, REN Tongtong, JIA Ziyin, et al. Effects of light and temperature environment in multi-span intelligent greenhouse on growth, development and yield of cherry tomato 'Sapolo'[J]. China Vegetables, 2025(7): 129 - 141. (in Chinese)

[2] 李天华,董广胜,施国英,等. 文洛型温室棚顶清洗机的研制与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(12):180 - 188.
LI Tianhua, DONG Guangsheng, SHI Guoying, et al. Development and experiment of roof cleaning machine for Venlo greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(12): 180 - 188. (in Chinese)

[3] 张东,姜钰湛,李浩然,等. 设施农业可再生能源综合供能系统运行策略[J]. 农业工程学报,2023,39(24):264 - 277.
ZHANG Dong, JIANG Yuzhan, LI Haoran, et al. Operation strategy of renewable energy integrated energy supply system for facility agriculture[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(24): 264 - 277. (in Chinese)

[4] 申瑞霞,姚宗路,赵立欣. 双碳背景下黑龙江省农村生活用能研究[J]. 农业机械学报, 2022,53(3):377 - 383.
SHEN Ruixia, YAO Zonglu, ZHAO Lixin. Research on rural domestic energy in Heilongjiang Province under dual carbon background[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 377 - 383. (in Chinese)

[5] 宋晋峰,陈国栋,祝志成. 用于直流送出型光伏电站功率波动平抑的级联式电池储能系统变换器损耗优化[J]. 太阳能学报,2023,44(11):100 - 109.
SONG Jinfeng, CHEN Guodong, ZHU Zhicheng. Loss optimization of cascaded battery energy storage system converter for power fluctuation suppression in DC delivery photovoltaic power stations[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(11): 100 - 109. (in Chinese)

[6] 汪灿. 风力发电效率提升策略与技术挑战研究[J]. 电力设备管理,2025(6):101 - 103.
WANG Can. Research on wind power generation efficiency improvement strategies and technical challenges[J]. Electric Power Equipment Management, 2025(6): 101 - 103. (in Chinese)

[7] FAKHIM B A,ESMAILI M, RAHIMI M R, et al. Integration of photovoltaic and geothermal heat pump systems for sustainable greenhouse operation[J]. Renewable Energy, 2020, 158: 109 – 120.
[8] 苗风东,赵晓慧,李庆辉. 智能光伏温棚系统应用研究[J]. 安徽师范学院学报,2022(2):89 – 94,103.
MIAO Fengdong, ZHAO Xiaohui, LI Qinghui. Application research of intelligent photovoltaic greenhouse system[J]. Journal of Anhui Normal University, 2022(2): 89 – 94,103. (in Chinese)
[9] 王勇,王辉,胡雅涵,等. 基于风光互补混合储能系统的微电网优化及电能质量提升[J]. 中国电力,2025,58(7):162 – 167.
WANG Yong, WANG Hui, HU Yahan, et al. Microgrid optimization and power quality improvement based on wind-solar hybrid energy storage system[J]. Electric Power, 2025, 58(7): 162 – 167. (in Chinese)
[10] 刘苑红,刘永梅,董佳音,等. 考虑农业设施负荷特性的农村配电网与储能分布鲁棒协同优化规划[J/OL]. 电气工程学报: 1 – 12 (2025 – 03 – 13). https://link.cnki.net/urlid/10.1289.tm.20250313.1010.007.
LIU Yuanhong, LIU Yongmei, DONG Jiayin, et al. Robust coordinated optimization planning of rural distribution network and energy storage considering agricultural facility load characteristics[J/OL]. Journal of Electrical Engineering: 1 – 12 (2025 – 03 –13). https://link.cnki.net/urlid/10.1289.tm.20250313.1010.007. (in Chinese)
[11] 刘吉臻,王庆华,胡阳,等. 新型电力系统的内涵、特征及关键技术[J]. 新型电力系统,2023,1(1):49 – 65.
LIU Jizhen, WANG Qinghua, HU Yang, et al. Connotation, characteristics and key technologies of new power system[J]. New Power System, 2023, 1(1): 49 – 65. (in Chinese)
[12] 苏小宁,陈宇,周海斌,等. 基于新型储能技术的风光互补发电系统设计与验证[J]. 电工技术,2025(20):101 – 103.
SU Xiaoning, CHEN Yu, ZHOU Haibin, et al. Design and verification of wind-solar complementary power generation system based on new energy storage technology[J]. Electric Engineering, 2025(20): 101 – 103. (in Chinese)
[13] 任东. 风光互补发电系统在区域电力负荷平衡中的应用[J]. 电力设备管理,2025(7):261 – 263.
REN Dong. Application of wind-solar complementary power generation system in regional power load balance[J]. Electric Power Equipment Management, 2025(7): 261 – 263. (in Chinese)
[14] 中国气象局北京南郊气象观测站. 中国气象局北京南郊气象观测站 2020—2024 年观测数据[Z]. 2024.
[15] 余俊杰,苏中元,史金林,等. 一种固定式和跟踪式光伏阵列功率的估算模型[J]. 太阳能学报,2024,45(2):469 – 474.
YU Junjie, SU Zhongyuan, SHI Jinlin, et al. An estimation model for fixed and tracking photovoltaic array power[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(2): 469 – 474. (in Chinese)
[16] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 2423.2—2008 电工电子产品环境试验　第 2 部分:试验方法 试验 B:高温[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
[17] 周扬. 风力及光伏发电技术接入电网电压控制方法探究[J]. 中国设备工程,2025(19):141 – 143.
ZHOU Yang. Research on voltage control methods for wind and photovoltaic power generation technology connected to grid[J]. China Plant Engineering, 2025(19): 141 – 143. (in Chinese)
[18] 申永鹏,孙嵩楠,孙建彬,等. 电流特征对锂离子电池性能的影响研究[J]. 太阳能学报,2023,44(6):61 – 70.
SHEN Yongpeng, SUN Songnan, SUN Jianbin, et al. Research on the influence of current characteristics on the performance of lithium-ion batteries[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(6): 61 – 70. (in Chinese)
[19] 程斐燚. 锂电池储能技术在光伏发电系统中的应用[J]. 电气应用,2025,44(11):133 – 137.
CHENG Feiyi. Application of lithium battery energy storage technology in photovoltaic power generation system[J]. Electrotechnical Application, 2025, 44(11): 133 – 137. (in Chinese)
[20] 赵泽. 锂离子电池储能电站设计要点和建设成本分析[J]. 电气技术与经济,2025,44(11):169 – 171.
ZHAO Ze. Design key points and construction cost analysis of lithium-ion battery energy storage power station[J]. Electrical Technology & Economy, 2025, 44(11): 169 – 171. (in Chinese)
[21] 张闻勤,王亚. 电力系统分布式能源接入保护与控制策略[J]. 光源与照明,2025,44(11):181 – 183.
ZHANG Wenqin, WANG Ya. Protection and control strategy for distributed energy access in power system[J]. Light & Lighting, 2025, 44(11): 181 – 183. (in Chinese)
[22] 高宴,高燃,王超. 基于计量数据驱动的分布式新能源配电网电压优化控制策略[J]. 可再生能源,2025,43(10):1413 – 1420.
GAO Yan, GAO Ran, WANG Chao. Voltage optimal control strategy for distributed new energy distribution network based on metering data drive[J]. Renewable Energy Resources, 2025, 43(10): 1413 – 1420. (in Chinese)
[23] 宋国兵,李唯嘉,常仲学,等. 光伏直流汇集系统 MPPT 控制环节载波频率特征分析及单极接地故障选线方法[J]. 智慧电力,2025,53(10):79 – 86.
SONG Guobing, LI Weijia, CHANG Zhongxue, et al. Carrier frequency characteristic analysis of MPPT control link and single-pole grounding fault line selection method for photovoltaic DC collection system[J]. Smart Power, 2025, 53(10): 79 – 86. (in Chinese)
[24] 朱德兰,涂泓滨,王瑞心,等. 基于分段多区间的温室夏季温湿度智能控制策略[J]. 农业机械学报,2022,53(9):334 – 341.
ZHU Delan, TU Hongbin, WANG Ruixin, et al. Intelligent control strategy of greenhouse temperature and humidity in summer based on segmented multi-interval[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 334 – 341. (in Chinese)
[25] 刘升,刘加凯,王娅,等. 基于径向基函数的捕捉网展开参数多目标优化[J]. 兵器装备工程学报,2025,46(11):10 – 16.
LIU Sheng, LIU Jiakai, WANG Ya, et al. Multi-objective optimization of deployment parameters of capture net based on radial basis function[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2025, 46(11): 10 – 16. (in Chinese)
[26] 林有斌,陈蒙蒙,杨霖霖. 全钒液流电池储能系统性能及其影响因素分析[J]. 电源技术,2025,49(6):20279 – 20285.
LIN Youbin, CHEN Mengmeng, YANG Linlin. Performance and influencing factors analysis of all-vanadium redox flow battery energy storage system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2025, 49(6): 20279 – 20285. (in Chinese)
[27] 任亚君,李昇,施伟,等. 基于 Sobol 方法的浮式风电基础参数敏感性分析研究[J]. 太阳能学报,2025,46(7):421 – 428.
REN Yajun, LI Sheng, SHI Wei, et al. Sensitivity analysis of floating wind turbine foundation parameters based on Sobol method[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(7): 421 – 428. (in Chinese)