

考虑固定/移动储能的综合能源系统光伏消纳能力研究

张洋瑞¹, 王洪莹¹, 冯波¹, 宋亚奇², 韩桂楠¹, 张冰玉¹

(1. 国网河北省电力有限公司营销服务中心, 河北 石家庄 050021;

2. 华北电力大学 控制与计算机工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 为了最大化农业农村地区光伏发电消纳能力, 构建一个包含分布式光伏、微型燃气轮机及多种储能解决方案的综合能源系统(IES)。以光伏消纳率最高为目标, 同时考虑系统运行成本, 并结合能源平衡约束、能源购买约束、设备运行约束、固定式储能约束和电动汽车约束, 设立了考虑不同固定式储能容量配置和电动汽车数量的6种场景, 对比分析固定式储能和电动汽车对IES光伏消纳率的影响。结果表明: 借助固定式储能和电动汽车可以使光伏消纳率由67%提升到100%, 同时确保IES的经济性。

关键词: 光伏消纳; 综合能源系统; 固定式储能; 移动式储能; 电动汽车

中图分类号: TM615 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.05.013

[引用本文格式] 张洋瑞, 王洪莹, 冯波, 等. 考虑固定/移动储能的综合能源系统光伏消纳能力研究[J]. 热能动力工程, 2025, 40(5): 113-120. ZHANG Yangrui, WANG Hongying, FENG Bo, et al. Study on photovoltaic consumption capacity of integrated energy system considering stationary/mobile energy storage[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(5): 113-120.

Study on Photovoltaic Consumption Capacity of Integrated Energy System Considering Stationary/Mobile Energy Storage

ZHANG Yangrui¹, WANG Hongying¹, FENG Bo¹, SONG Yaqi², HAN Guinan¹, ZHANG Bingyu¹

(1. Marketing Service Center of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang, China, Post Code: 050021;

2. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003)

Abstract: In order to maximize the consumption capacity of photovoltaic power generation in rural areas, an integrated energy system (IES) including distributed photovoltaics, micro gas turbines, and various energy storage solutions was constructed. Taking the highest PV consumption rate as the target, the system operation cost was considered, and the energy balance constraint, energy purchase constraint, equipment operation constraint, stationary energy storage constraint and electric vehicle constraint were combined. In order to compare and analyze the impact of stationary energy storage and electric vehicles on the IES PV consumption rate, six scenarios were set up considering different stationary energy storage capacity configurations and the number of electric vehicles. The comparative analysis shows that the PV consumption rate can be increased from 67% to 100% with the help of stationary energy storage and electric vehicles, while ensuring the economics of the IES.

Key words: photovoltaic consumption, integrated energy system, stationary power storage, mobile energy storage, electric vehicle

收稿日期: 2024-09-23; 修订日期: 2025-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(51506052); 河北省自然科学基金面上项目(A2024502009)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (51506052); Natural Science Foundation of Hebei Province (A2024502009)

作者简介: 张洋瑞(1985-), 男, 国网河北省电力有限公司营销服务中心高级工程师。

通信作者: 宋亚奇(1979-), 男, 华北电力大学副教授。

引 言

随着光伏下乡项目的推广,农业农村地区的光伏装机量快速增长^[1-3]。然而,由于光伏出力的间歇性、波动性和随机性等特点,大规模并网将会直接影响电力系统的安全稳定运行^[4-5]。因此,促进光伏发电最大化就地消纳是目前重要的研究热点之一。

采用储能技术可有效提升可再生能源消纳率。文献[6]将储能系统作为柔性负荷介入配电网后,消纳能力提升了13.3%。文献[7]通过调节抽水蓄能出力避免弃风弃光,使可再生能源消纳增加226 MW·h,弃风弃光率降低0.7%。文献[8]以区间输电通道新增容量最小为目标,以我国6个区域电网为算例,设计了区间电力流优化模型,应用需求响应和储能技术削减区间输电通道新增容量需求,使典型日弃风弃光率降低为0.91%和3.15%。文献[9]以降低调度和转供难度、提高光伏消纳率为目标,以城市高压配电网为算例,提出了一种协同高压配电网拓扑转供及储能电站灵活充放的多时间尺度优化调度策略,光伏消纳率由90.34%提升至94.92%。

相对于上述固定储能技术,电动汽车通过移动储能方式和配网协同,实现能源的存储和调节,提高可再生能源的消纳率。文献[10]以西北地区某区域综合能源系统为算例,利用光热电站和电动汽车将风电消纳量提升了19.1%。文献[11]基于电动汽车和储能系统设计了兩阶段优化模型以促进新能源消纳。文献[12-14]利用电动汽车响应速度快、灵活、储能特性和可调控特性,通过优化电动汽车充放电功率,将充电负荷转移到风电出力值高的时段,促进可再生能源消纳。

上述研究关注固定式储能和电动汽车在可再生能源消纳方面的作用,但忽视了移动储能数量迅速增长对可再生能源消纳的影响。此外,固定式储能的容量配置与投资成本存在正相关关系,因此,需要对二者的独立影响和综合作用进行比较和分析,更全面地评估其在可再生能源消纳方面的综合效果。本文创新性地构建了一个包含分布式光伏、微型燃气轮机及多种储能解决方案的综合能源系统

(IES),以光伏消纳率最高为目标,同时考虑了系统运行成本,并结合能源平衡、设备运行、固定式储能和电动汽车等约束条件,通过设立不同固定式储能容量配置和电动汽车数量的场景,对比分析借助固定式储能和电动汽车的光伏消纳率,同时确保 IES 的经济性,为分布式光伏发电消纳与电动汽车协同发展提供了新的策略和决策借鉴。

1 IES 模型构建

综合能源系统(IES)主要由分布式光伏、微型燃气轮机、余热锅炉、燃气锅炉、电锅炉、电动汽车、固定式储能系统以及农业农村用户负荷构成,农业农村用户负荷包括主要电负荷和热负荷,IES 结构如图1所示。本文构建的 IES 实行“自发自用,最大化就地消纳,电网调剂”的运行策略,即光伏发电直接供本地负荷使用,当光伏发电不足时,从电网购电,满足 IES 内的负荷需求。

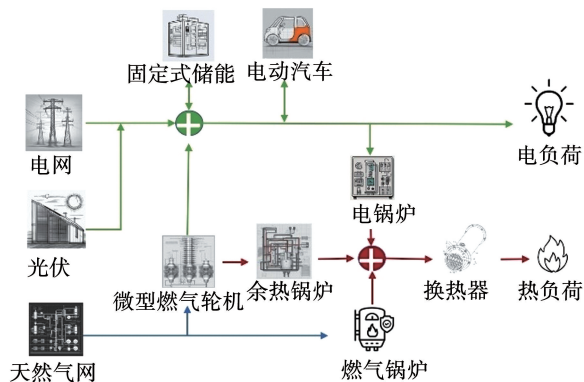


图1 IES结构示意图

Fig. 1 IES structure

1.1 光伏(Photovoltaic, PV)

光伏发电系统将太阳能转化为电能。光伏发电系统的发电功率与太阳辐射强度和环境温度有关,可表示为^[15]:

$$P_t^{PV} = f_{PV} \cdot P_{RPV} \cdot \frac{G_t}{G_{STC}} [1 + 0.005 \cdot (T_t^{cell} - T_{STC})] \quad (1)$$

$$T_t^{cell} = T_t^{amb} + \left[(T_s - 20) \times \frac{G_t}{800} \right] \quad (2)$$

式中: P_t^{PV} — t 时刻的光伏输出功率, kW; f_{PV} —功率降额系数, $f_{PV} = 0.9$; P_{RPV} —光伏额定功率, W; G_t — t 时刻实际的太阳辐射强度, W/m²; G_{STC} —标准测试

条件下的太阳辐射强度, $G_{\text{STC}} = 1\,000\text{ W/m}^2$; T_{STC} —标准测试条件下温度, $T_{\text{STC}} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$; T_t^{cell} — t 时刻光伏电池的表面温度, $^{\circ}\text{C}$; T_t^{amb} — t 时刻的实际环境温度, $^{\circ}\text{C}$; T_s —光伏电池的标称工作温度, $T_s = 47\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 微型燃气轮机 (Micro gas Turbine, MT)

微型燃气轮机是一种小型高效能源转换设备,通过燃烧燃料产生动力,用于发电和供热,其数学描述如下^[15]:

$$P_t^{\text{MT}} = V_t^{\text{MT,g}} H_g \eta_{\text{MT}} \quad (3)$$

式中: P_t^{MT} — t 时刻内微型燃气轮机的发电功率, kW; $V_t^{\text{MT,g}}$ — t 时刻内微型燃气轮机使用的天然气量, m^3 ; H_g —天然气低热值, $H_g = 35.6\text{ MJ/m}^3$; η_{MT} —微型燃气轮机的发电效率, $\eta_{\text{MT}} = 0.31$ 。

1.3 余热锅炉 (Heat Recovery Boiler, HRB)

余热锅炉的利用使微型燃气轮机发电过程中的余热得到有效回收,从而进一步提高能源利用效率,减少了能源的浪费,其数学描述如下^[15]:

$$Q_t^{\text{MT}} = \frac{P_t^{\text{MT}} (1 - \eta_{\text{MT}} - \lambda_{\text{loss}})}{\eta_{\text{MT}}} \eta_{\text{hrb}} \quad (4)$$

式中: Q_t^{MT} — t 时刻内微型燃气轮机所回收的未被直接利用的热能, kW; λ_{loss} —热电联产系统的散热损失系数, $\lambda_{\text{loss}} = 0.2$; η_{hrb} —微型燃气轮机的烟气热回收效率, $\eta_{\text{hrb}} = 0.8$ 。

1.4 燃气锅炉 (Gas Boiler, GB)

当余热锅炉供热量不能满足用户热负荷时,使用燃气锅炉补充热量,燃气锅炉的数学模型可表示为:

$$P_t^{\text{GB,h}} = V_t^{\text{GB,g}} H_g \eta_{\text{GB}}^{\text{h}} \quad (5)$$

式中: $P_t^{\text{GB,h}}$ — t 时刻内燃气锅炉的制热功率, kW; $V_t^{\text{GB,g}}$ — t 时刻内燃气锅炉使用的天然气量, m^3 ; $\eta_{\text{GB}}^{\text{h}}$ —燃气锅炉的热效率, $\eta_{\text{GB}}^{\text{h}} = 0.9$ 。

1.5 电锅炉 (Electric Boiler, EB)

电锅炉通过消耗电能产生热能,其数学模型可以表示为:

$$P_t^{\text{EB,h}} = P_t^{\text{EB,e}} \lambda_{\text{EB}} \quad (6)$$

式中: $P_t^{\text{EB,h}}$ 、 $P_t^{\text{EB,e}}$ — t 时刻电锅炉的制热功率和输入电功率, kW; λ_{EB} —电锅炉制热系数, $\lambda_{\text{EB}} = 0.95$ 。

1.6 固定式储能 (Energy Storage, ES)

固定式储能是一种能够存储和释放电能的系统,蓄电池作为固定式储能系统的一部分,能够将多余的电能转化为化学能并进行存储,在需要时将存

储的能量转化回电能供应给其他设备,其数学模型如下:

$$W_{t+1}^{\text{es}} = W_t^{\text{es}} \cdot (1 - \sigma^{\text{es}}) + \left(\eta^{\text{es,c}} P_t^{\text{es,c}} - \frac{P_t^{\text{es,disc}}}{\eta^{\text{es,disc}}} \right) \quad (7)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_t^{\text{es,disc}} \leq P_{\text{max}}^{\text{es,disc}} \cdot U_t^{\text{es,disc}} \\ 0 \leq P_t^{\text{es,c}} \leq P_{\text{max}}^{\text{es,c}} \cdot U_t^{\text{es,c}} \\ 0 \leq U_t^{\text{es,c}} + U_t^{\text{es,disc}} \leq 1 \\ W_{\text{min}}^{\text{es}} \leq W_{t+1}^{\text{es}} \leq W_{\text{max}}^{\text{es}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: W^{es} —固定式储能系统储存的电能, $\text{kW} \cdot \text{h}$; σ^{es} —自放电系数, $\sigma^{\text{es}} = 0.002$; $\eta^{\text{es,c}}$ 、 $\eta^{\text{es,disc}}$ —固定式储能系统的充、放电效率,取 0.9,主要依据行业标准、经验和一般电池及系统的平均性能确定; $P_t^{\text{es,c}}$ 、 $P_t^{\text{es,disc}}$ — t 时刻内固定式储能系统的充、放电功率, W; $U_t^{\text{es,c}}$ 、 $U_t^{\text{es,disc}}$ — t 时刻内固定式储能系统的充、放电状态标记位,为 0~1 变量,0 表示关闭,1 表示启动; $P_{\text{max}}^{\text{es,c}}$ 、 $P_{\text{max}}^{\text{es,disc}}$ —固定式储能系统的充、放电最大功率, W。

1.7 电动汽车 (Electric Vehicles, EV)

随着新农村建设的快速推进,农业农村地区电动汽车数量稳步增长。农业农村地区电动汽车充电十分便捷,且电动汽车可以发挥储能、平衡电网负荷、调峰填谷、增强电网稳定性以及供应家庭电能的作用。单辆电动汽车数学模型如下:

$$W_{t+1}^{\text{ev}} = W_t^{\text{ev}} \cdot (1 - \sigma^{\text{ev}}) + \left(\eta^{\text{ev,c}} P_t^{\text{ev,c}} - \frac{P_t^{\text{ev,disc}}}{\eta^{\text{ev,disc}}} \right) \quad (9)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_t^{\text{ev,disc}} \leq P_{\text{max}}^{\text{ev,disc}} \cdot U_t^{\text{ev,disc}} \\ 0 \leq P_t^{\text{ev,c}} \leq P_{\text{max}}^{\text{ev,c}} \cdot U_t^{\text{ev,c}} \\ 0 \leq U_t^{\text{ev,c}} + U_t^{\text{ev,disc}} \leq 1 \\ W_{\text{min}}^{\text{ev}} \leq W_{t+1}^{\text{ev}} \leq W_{\text{max}}^{\text{ev}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: W^{ev} —电动汽车储存的电能, $\text{kW} \cdot \text{h}$; $\eta^{\text{ev,c}}$ 、 $\eta^{\text{ev,disc}}$ —电动汽车的充、放电效率,取 0.9; $P_t^{\text{ev,c}}$ 、 $P_t^{\text{ev,disc}}$ —电动汽车的平均充、放电功率, W; $U_t^{\text{ev,c}}$ 、 $U_t^{\text{ev,disc}}$ — t 时刻内电动汽车的充、放电状态标记位,为 0~1 变量,0 表示关闭,1 表示启动; $P_{\text{max}}^{\text{ev,c}}$ 、 $P_{\text{max}}^{\text{ev,disc}}$ —电动汽车的充、放电最大功率, W。

2 综合模型

2.1 目标函数

本文以最小化系统运行成本和最大化分布式光

光伏发电消纳量为目标,优化 IES 调度,涵盖分布式光伏、固定式储能装置和电动汽车等组件,实现经济性和光伏发电消纳率的双重优化。

为确保电网的稳定可靠运行,将光伏发电的消纳量作为首要目标。目标函数设置如下:

$$\min \left[\sum_{t=1}^T (P_t^{\text{PV}} - \bar{P}_t^{\text{PV}}) + \varepsilon \sum_{t=1}^T C_t^{\text{total}} \right] \quad (11)$$

式中: T —调度周期, $T=24$; P_t^{PV} — t 时刻内光伏输出功率, kW; $\bar{P}_t^{\text{PV}}$ —光伏发电消耗量, kW; C_t^{total} —系统总运行成本, 元; ε —惩罚因子, 当光伏消纳量最大时, 可以将优化问题变为经济调度问题, 降低系统运行成本。 ε 的取值影响着目标函数中系统运行成本的比重, 本文以光伏消纳为重点, $\varepsilon = 10^{-3}$, 从而使系统运行成本的影响因子小于 1, 但又不至于忽略不计。

$$C_t^{\text{total}} = C_t^{\text{buy}} + C_t^{\text{om}} \quad (12)$$

$$C_t^{\text{buy}} = p_t^e E_t^{\text{buy}} + p_t^g Q_t^{\text{buy}} \quad (13)$$

$$C_t^{\text{om}} = p_{\text{omf},k} + \sum_{k=1}^K p_{\text{omw},k} P_t^k \quad (14)$$

式中: C_t^{total} —系统总运行成本, 元; C_t^{buy} — t 时刻内的能源购买成本, 元; C_t^{om} — t 时刻内的设备维护成本, 元; p_t^e 、 p_t^g — t 时刻内的电能和天然气价格, 元; E_t^{buy} — t 时刻内的电能购买量, kW·h; Q_t^{buy} — t 时刻内的天然气购买量, m³; k —维护单元总数; $p_{\text{omf},k}$ 、 $p_{\text{omw},k}$ —机组 k 的固定运维价格和可变运维价格, 元; P_t^k —机组 k 在 t 时刻内的输出功率, kW。

2.2 约束条件

约束条件包括能源平衡约束、能源购买约束、设备运行约束、固定式储能约束和电动汽车约束。

2.2.1 能源平衡约束

电平衡约束为:

$$L_t^e = P_t^{\text{buy}} + \bar{P}_t^{\text{PV}} + P_t^{\text{MT}} + P_t^{\text{es,disc}} - P_t^{\text{es,c}} - P_t^{\text{EB,e}} + P_t^{\text{ev,disc}} \cdot N_{\text{disc}} - P_t^{\text{ev,c}} \cdot N_c \quad (15)$$

热平衡约束为:

$$L_t^h = Q_t^{\text{MT}} + P_t^{\text{EB,h}} + P_t^{\text{GB,h}} \quad (16)$$

式中: L_t^e — t 时刻的电能负荷, kW; L_t^h — t 时刻的热能负荷, kW; N_{disc} 、 N_c —电动汽车充放电的二进制指示变量和无量纲, 取值 0 或 1。

2.2.2 设备运行约束

系统内部分设备约束如下:

$$\begin{cases} 0 \leq \bar{P}_t^{\text{PV}} \leq P_t^{\text{PV}} \\ 0 \leq P_t^{\text{MT}} \leq P_t^{\text{MT,max}} \\ 0 \leq P_t^{\text{GB}} \leq P_t^{\text{GB,max}} \\ 0 \leq P_t^{\text{EB}} \leq P_t^{\text{EB,max}} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_t^{\text{MT,max}}$ 、 $P_t^{\text{GB,max}}$ 、 $P_t^{\text{EB,max}}$ — t 时刻内微型燃气轮机、燃气锅炉和电锅炉的最大功率, kW。

固定式储能和电动汽车约束见式(8)和式(10)。

2.2.3 能源购买约束

由于电力质量和并网策略的限制, 本文没有考虑向电网售电。因此, 系统的能源购买限制如下:

$$\begin{cases} 0 \leq E_t^{\text{buy}} \leq E_t^{\text{buy,max}} \\ 0 \leq Q_t^{\text{buy}} \leq Q_t^{\text{buy,max}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $E_t^{\text{buy,max}}$ 、 $Q_t^{\text{buy,max}}$ — t 时刻内购电和购气量的最大值。

2.3 模型求解

本文研究的问题可以被描述为混合整数线性规划问题, 即在以最小化系统运行成本和最大化分布式光伏发电消纳量为目标函数和满足能源平衡约束、能源购买约束、设备运行约束、固定式储能约束和电动车约束的前提下, 寻找整数决策变量的最优取值, 使光伏发电消纳最大化和系统总运行成本最小化。模型求解基于 MATLAB 软件中的 Yalmip 工具箱调用 Cplex 求解器实现。具体求解流程如图 2 所示。

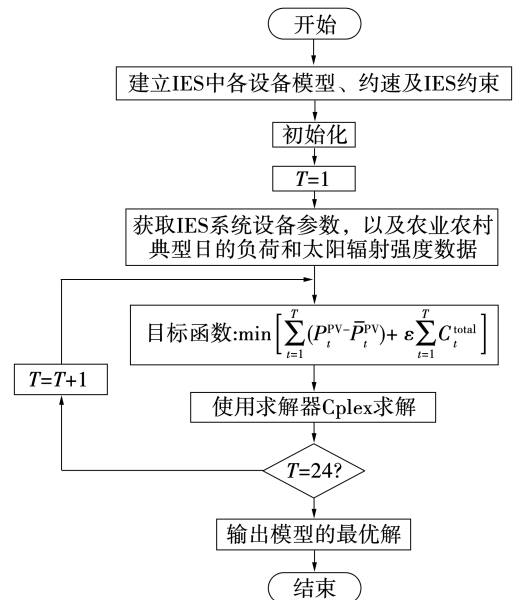


图 2 模型求解流程图

Fig.2 Flowchart of model solving

3 算例分析

3.1 算例参数

本文以河北地区某典型农业农村内建设的 IES 为例,系统各设备运行参数如表 1 所示,固定式储能系统仅考虑蓄电池一种类型,参数如表 2 所示。电动汽车充放电负荷的预测一直是一个难题,在此假定村庄内共有电动汽车 300 辆,电动汽车使用蓄电池作为内置电源,充放电效率取 0.9,所有电动汽车均可以参与充放电,电动汽车的平均充放电功率均是 10 kW,充电和放电频率均为每天一次,可用于充电和放电的电动汽车的最大数量在不同时间间隔内是恒定的,每个时段内可用于充电和放电的电动汽车百分比分别设置为 90% 和 40%;天然气价格为 2.7 元/m³;光伏装机面积为 50 000 m²。

表 1 设备参数

Tab. 1 Equipment parameters

参 数	MT	GB	EB	PV	电网
安装容量/kW	5 000	3 600	1 600	—	—
功率上限/kW	5 000	3 600	1 600	—	6 000
功率下限/kW	0	0	0	—	0
效率	0.31/0.5	0.9	0.95	0.157	—
固定运维单价/元·d ⁻¹	100	—	48	320	—
可变运维单价/元·(kW·h) ⁻¹	0.03	0.02	0.04	0.039	—

注:“—”表示没有数据。

表 2 固定式储能系统参数

Tab. 2 Parameters of stationary energy storage system

参 数	数 值
最大容量/kW	5 000
自耗率	0.002
充电效率	0.9
放电效率	0.9
爬坡功率上限/kW·h ⁻¹	3 000
爬坡功率下限/kW·h ⁻¹	0
固定运维单价/元·d ⁻¹	150
可变运维单价/元·(kW·h) ⁻¹	0.02
初始储能容量/kW	1 000

3.2 场景设置

为了研究固定式储能配置和电动汽车数量对光伏消纳的影响,设立了 6 种场景进行对比优化分析,如表 3 所示。

表 3 场景设置

Tab. 3 Scene setting

固定储能与电动 汽车配置场景	场景					
	1	2	3	4	5	6
储能装置/kW	—	11 250	—	11 250	5 000	11 250
电动汽车/辆	—	—	300	300	300	150

注:“—”表示未配备相应装置。

分时电价如图 3 所示,系统典型日太阳能辐射强度和居民用电及热负荷如图 4、图 5 所示。

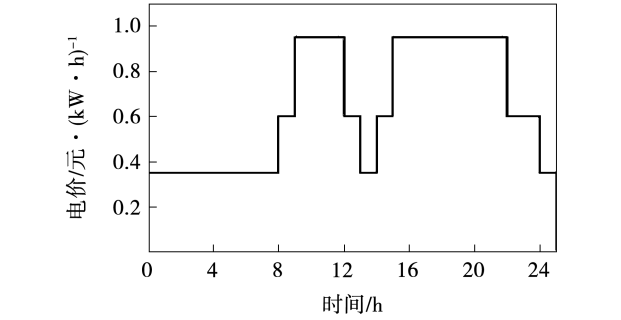


图 3 分时电价
Fig. 3 Time share tariff

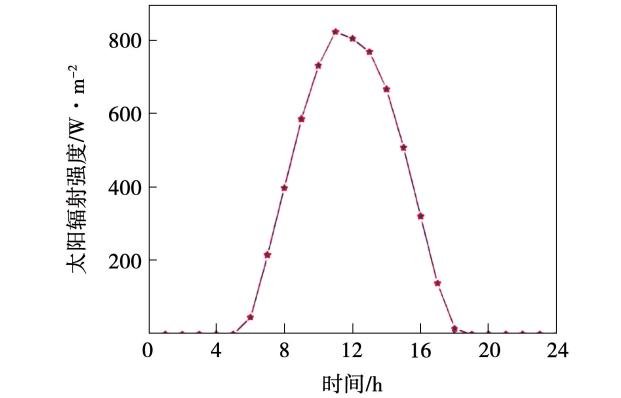


图 4 典型日太阳辐射强度
Fig. 4 Typical daily solar radiation intensity

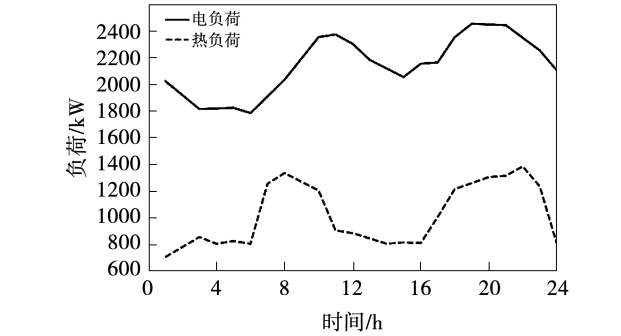


图 5 典型日居民负荷
Fig. 5 Typical daily residential load

3.3 固定储能系统结果分析

表 4 为不同场景下 IES 优化调度结果。对比场景 1 和场景 2 可知,引入固定式储能系统,IES 的光伏消纳率从原先的 67% 提高到 93.6%,电网购能成本从原先的 20 359 元降低到 14 513 元,系统总运行成本从原先的 23 347 元降低到 18 822 元,这表示固定式储能系统的参与可以使 IES 在一个调度周期内节省 4 525 元。而对比场景 4 和场景 5 发现,固定式储能系统的容量配置对 IES 光伏消纳率产生了明显的影响,固定式储能系统容量从 7 430 kW 变为 5 000 kW 时,光伏消纳率从 100% 降低到 94.45%,降低了 5.55%,系统总运行成本也从 17 217 元提高到 18 388 元,上涨了 1 171 元。由于固定式储能系统的建造和运行需要一定的成本,合理配置固定式储能系统可以最大程度地提高 IES 运行的经济性和可靠性。

表 4 不同场景下优化调度结果

Tabl.4 Optimized scheduling results for different cases

场景	光伏消纳率/%	系统总运行成本/元	购能成本/元	运维成本/元
1	67	23 347	20 359	2987.1
2	93.6	18 822	14 513	4 308.5
3	73.3	20 485	17 468	3 017.2
4	100	17 217	12 806	4 411.2
5	94.45	18 388	14 423	3 965.6
6	93.7	18 323	14 062	4 260.4

以场景 4 为例,固定式储能系统的充、放电情况如图 6 所示,充电表示为正,放电表示为负。

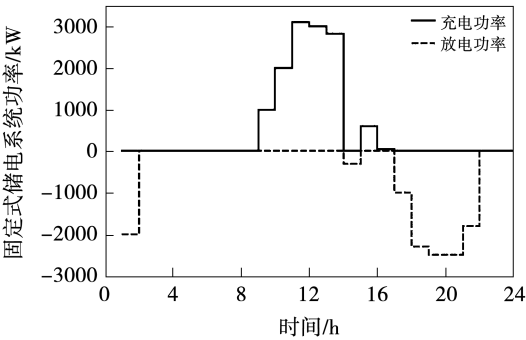


图 6 固定式储能系统充、放电情况

Fig.6 Charging and discharging situations of stationary energy storage system

由图 6 可知,固定式储能系统可以将白天光伏发电的多余能量存储起来,并在晚上光伏发电减少或停止时释放,供应 IES 负荷需求。在白天,当光伏出力大于负荷时,固定式储能系统开始充电,直到达到最大容量 11 250 kW。而在晚上,当光伏发电逐渐减少至零时,固定式储能系统开始放电,以满足 IES 负荷需求,如果能量不足,则从电网购买所需电量。放电过程中,固定式储能系统会保持放电,直至储能能量降至 2 250 kW。

3.4 电动汽车调度结果分析

对比场景 1 和场景 3 可知,引入电动汽车将 IES 的光伏消纳率从原先的 67% 提高到 73.3%,电网购能成本从原先的 20 359 元降低到 17 468 元,系统总运行成本从原先的 23 347 元降低到 20 485 元,这表示电动汽车的参与可使 IES 在一个调度周期内节省 4 525 元。而对比情景 4 和情景 6 发现,电动汽车数量对 IES 光伏消纳率产生了明显的影响,电动汽车数量从 300 辆减少到 150 辆时,光伏消纳率从 100% 降低到 93.7%,降低了 6.3%,系统总运行成本也从 17 217 元提高到 18 323 元,上涨了 1 106 元。由于农村地区电动汽车的数量逐年增多,合理利用电动汽车可以最大程度地提高 IES 运行的经济性和可靠性。

以场景 4 为例,电动汽车各时刻的充、放电数量如图 7 所示,充电表示为正,放电表示为负。

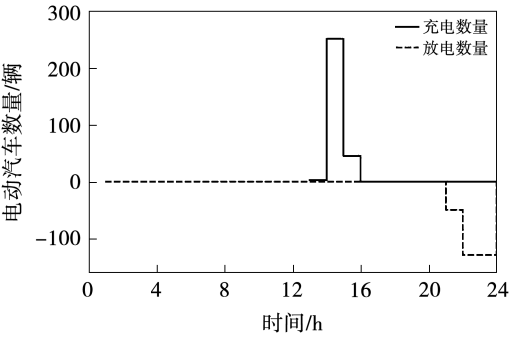


图 7 电动汽车充、放电情况

Fig.7 Electric vehicle charging and discharging situations

由图 7 可知,电动汽车接入 IES 系统和固定式储能系统作用相同,当白天固定式储能系统不能完全消纳光伏发电时,电动汽车将多余能量存储起来,并在晚上固定式储能系统不能供应 IES 负荷需求时

释放。电动汽车在 13:00 ~ 16:00 参与充电,并在 14:00 ~ 15:00 达到最大数量(256 辆)。电动汽车在 21:00 ~ 24:00 参与放电,并在 22:00 ~ 24:00 达到最大数量(120 辆)。

4 结 论

(1) 固定式储能的引入可以显著提升 IES 的光伏消纳率,从 67% 提升至 93.6%,减少对电网购电的需求,从而有效降低 IES 的运行成本,从 23 347 元降低至 18 822 元。另外,需要合理选择固定式储能系统容量,最大化消纳光伏发电量。

(2) 电动汽车作为一种移动式储能设备,接入 IES 中可以在一定程度上提高光伏消纳率,从 67% 提升至 73.3%。电动汽车可以充当移动能源储存单元,在需要时为 IES 提供能量,或者将多余的能量储存在车辆电池中,供以后使用。这种方式不仅可以解决光伏发电的消纳问题,还能提供车辆电池的二次利用,促进电动汽车与能源系统之间的互动和协调。

(3) 同时引入固定式储能和移动式储能(电动汽车)可以实现光伏消纳率最大化,从 67% 提升至 100%,并且能够使 IES 的投资和运行成本达到最优化,从 23 347 元降低至 17 217 元。通过固定式储能系统的调度和电动汽车的电池充放电,可以灵活调整能源供需平衡,提高光伏发电的利用效率,降低对传统电网的依赖。

本文虽然为 IES 中分布式光伏消纳提供了一种有效的配置方案,但也存在一定的局限性。首先,对电动汽车的充放电行为假设较为简化,未充分考虑用户行为模式和电动汽车实际运行中的复杂性。其次,固定式储能系统的经济性分析未考虑电池寿命、更换成本以及未来电池技术进步对成本和效率的影响。未来研究可以从以下几个方向进行拓展:电池技术进步对储能效率的影响、电动汽车用户行为模型、动态电价对 IES 运行和电动汽车充放电行为的影响以及大规模电动汽车接入对 IES 的影响。

参考文献:

[1] 韩梦瑶,熊 焦.中国光伏发电的时空分布、竞争格局及减排效益[J].自然资源学报,2022,37(5):1338 - 1351.
HAN Mengyao,XIONG Jiao. Spatio-temporal distribution, competi-

tive development and emission reduction of China's photovoltaic power generation[J]. Journal of Natural Resources,2022,37(5): 1338 - 1351.
[2] 刘钟淇,肖晋宇,吴佳玮,等.农村零碳能源系统构建框架研究[J].可再生能源,2023,41(4):538 - 545.
LIU Zhongqi,XIAO Jinyu,WU Jiaywei, et al. Research in construction of zero-carbon rural energy system[J]. Renewable Energy Resources,2023,41(4):538 - 545.
[3] 叶 红,程 露,何嘉琪,等.“碳中和-新乡村”视角下广东乡村分布式光伏构建模式探索[J].南方建筑,2021,204(4): 74 - 81.
YE Hong,CHENG Lu,HE Jiaqi, et al. Exploration of guangdong rural distributed photovoltaic construction model from the perspective of "innovative carbon-neutral rural area"[J]. South Architecture,2021(4):74 - 81.
[4] 罗 彬,陈永灿,刘昭伟,等.梯级水光互补系统最大化可消纳电量期望短期优化调度模型[J].电力系统自动化,2023,47(10):66 - 75.
LUO Bin,CHEN Yongcan,LIU Zhaowei, et al. Short-term optimal dispatch model for maximizing expectation of consumption power of accommodation hydro-photovoltaic complementary system [J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(10):66 - 75.
[5] 杨贤东,袁旭峰,熊 炜,等.考虑源荷不确定性的风光火储系统低碳经济调度[J].智慧电力,2022,50(8):22 - 29,53.
YANG Xiandong,YUAN Xufeng,XIONG Wei, et al. Low-carbon economic dispatch of wind-solar-fired-storage system considering source-load uncertainty [J]. Smart Power, 2022, 50 (8) : 22 - 29,53.
[6] 徐同庆,王树彪,赵浩君.计及光伏消纳与光储充配置的配电网联合优化策略[J/OL].电气工程学报:1 - 10[2023 - 07 - 05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1289.TM>.
XUTongqing,WANG Shubiao,ZHAO Haojun. Joint optimization strategy containing photovoltaic consumption and photovoltaic-storage-charging configuration in distribution network[J/OL]. Journal Of Electrical Engineering:1 - 10[2023 - 07 - 05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1289.TM>.
[7] 黄炜栋,李 杨,李璟延,等.考虑可再生能源不确定性的风-光-储-蓄多时间尺度联合优化调度[J].电力自动化设备,2023,43(4):91 - 98.
HUANG Weidong,LI Yang,LI Jingyan, et al. Multi-time scale joint optimal scheduling for wind-photovoltaic-electrochemical energy storage-pumped storage considering renewable energy uncertainty [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43 (4) : 91 - 98.
[8] 唐 健,李浩志,谢小荣.计及需求响应和储能技术发展的未来区间电力流规模分析[J].智慧电力,2022,50(7):58 - 64.
TANG Jian,LI Hanzhi,XIE Xiaorong. Analysis of future interre-

gional electricity flow model considering development of demand response and energy storage [J]. Smart Power, 2022, 50 (7) : 58 - 64.

[9] 曾 宇,刘友波,高红均,等. 基于模型预测控制的高压配电网负荷转供与储能电站协同运行 [J]. 电网技术, 2021, 45 (5) : 1902 - 1911.

ZENG Yu, LIU Youbo, Gao Hongjun, et al. Load transfer capability of HV distribution network and coordinated operation with energy storage power station based on model predictive control [J]. Power System Technology, 2021, 45 (5) : 1902 - 1911.

[10] 孟明, 腊志源, 王喜平, 等. 基于光热电站与电动汽车的综合能源系统风电消纳策略 [J]. 热力发电, 2022, 51 (9) : 42 - 53.

MENG Ming, LA Zhiyuan, WANG Xiping, et al. Wind power consumption strategy of integrated energy system based on concentrating solar power and electric vehicle [J]. Thermal Power Generation, 2022, 51 (9) : 42 - 53.

[11] 李清涛, 卢 钺, 刘 洋, 等. 计及电动汽车的有源配电网新能源消纳两阶段调度策略 [J]. 热力发电, 2022, 51 (9) : 54 - 62.

LI Qingtao, LU Yue, LIU Yang, et al. Two-stage dispatch strategy for new energy consumption in active distribution network considering electric vehicles [J]. Thermal Power Generation, 2022, 51 (9) : 54 - 62.

[12] 朱 磊, 黄 河, 高 松, 等. 计及风电消纳的电动汽车负荷优化配置研究 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41 (S1) : 194 - 203.

ZHU Lei, HUANG He, GAO Song, et al. Research on optimal load allocation of electric vehicle considering wind power consumption [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41 (S1) : 194 - 203.

[13] 陈浩然, 赵晓丽. 考虑分布式光伏发电的电动汽车充电策略研究 [J]. 中国管理科学, 2023, 31 (4) : 161 - 170.

CHEN Haoran, ZHAO Xiaoli. Research on electric vehicle charging optimization considering distributed photovoltaic power generation [J]. Chinese Journal of Management Science, 2023, 31 (4) : 161 - 170.

[14] 严 欢, 胡俊杰, 黄旦莉, 等. 考虑电动汽车虚拟电厂灵活性和高比例光伏接入的配电网规划 [J]. 电力建设, 2022, 43 (11) : 14 - 23.

YAN Huan, HU Junjie, HUANG Danli, et al. Distribution network planning considering the flexibility of EV virtual power plants and high penetration of PV [J]. Electric Power Construction, 2022, 43 (11) : 14 - 23.

[15] 王 智, 陶鸿俊, 蔡文奎, 等. 多时间尺度滚动优化在冷热电联供系统中的优化调度研究 [J]. 太阳能学报, 2023, 44 (2) : 298 - 308.

WANG Zhi, TAO Hongjun, CAI Wenkui, et al. Optimal scheduling research of multi-time-scale rolling optimization in CCHP system [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2023, 44 (2) : 298 - 308.

(王治红 编辑)