

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.04.015

计及经济性和低碳性的光储充一体化电站多目标优化配置

程杉, 刘延光, 刘炜炜, 王灿, 李振兴

(三峡大学(电力系统智能运行与安全防御宜昌市重点实验室), 湖北 宜昌 443002)

摘要:为充分挖掘光储充一体化电站经济效益及碳减排效益,实现站内组成单元合理配置,文中提出一种计及经济性和低碳性的光储充一体化电站多目标优化配置方法。首先,根据充电站内各模块的功能及需求,探究光储充电站中碳排放的来源,建立站内各模块成本、碳排放的数学模型。然后,以系统年投资运行成本和碳排放量最小为目标,使用基于三黑洞捕获策略的多目标粒子群算法,对不同负荷场景下电站各组成模块进行优化配置,得出各场景下电站各组成模块的最优配置方案。对比结果表明,文中所提方法可有效降低规划运行时的成本和碳排放量,提高电站经济及环境效益。最后,采用逼近理想解排序法得出最优场景下的折衷优化方案,可为当前光储充一体化电站的投资建设提供参考。

关键词:容量优化配置;车网互动;有序充放电;多目标优化;碳排放;逼近理想解排序法

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)04-0147-09

0 引言

光储充一体化电站(photovoltaic-storage-charging integrated station, PIS)可为电动汽车(electric vehicle, EV)供给绿色电能,实现电力削峰填谷等辅助服务功能,助力绿色交通发展^[1]。2023年6月19日,国务院办公厅印发《关于进一步构建高质量充电基础设施体系的指导意见》,其中明确加快推进智能有序充电、光储充协同控制等技术研究。为响应国家“30·60双碳目标”、满足EV绿色充电需求、调动其参与辅助服务积极性,首先需要解决的是PIS内各组成单元的优化配置及碳减排问题^[2-3]。

分布式风电、光伏与EV充放电设施有机集成是缓解大规模EV入网所带来的负面影响、就地消纳可再生能源的最有效途径之一^[4-6]。文献[7-8]以充电成本及储能全年收益为目标,分别对EV充电设施和储能单元进行优化配置;文献[9-11]以最小化投资运行成本为目标优化配置充电站容量;文献[12-13]证明同时优化配置充电站内光伏、储能是提高可再生能源利用率和经济性的有效方法;文献[14]建立以最小化配电系统网损为目标的光伏电站与EV充电站的联合规划模型。但上述文献均未考虑PIS内各组成单元的成本模型,经济效益有待进一步研究。

同时,已有相关研究表明,光伏、储能发电及电力设备的全生命周期仍会产生碳排放^[15],如何利用新能源发电以降低总的碳排放量已成为学者重点

研究的问题。文献[16-17]定量分析EV充电设施与分布式新能源集成协调运行的低碳效益;文献[18]证明光伏-储能系统可以增加经济效益、碳减排效益及能源效益;文献[19]建立以最小化投资运行成本和碳排放为目标的PIS多目标优化配置模型。但上述文献在提高PIS可再生能源利用率或最小化PIS的碳排放时,未充分挖掘PIS中碳排放的来源。

因此,首先,文中综合考虑PIS各组成单元在全生命周期内的碳排放以及PIS容量优化配置问题的多目标性,基于PIS各组成单元的数学模型,对PIS中碳排放的来源进行了探究和建模。其次,计及EV有序充放电,建立以最小化PIS规划运维成本和年碳排放量为目标的PIS多目标优化配置数学模型。为求解该数学模型并给决策者提供可供选择、分析的多样性解,文中采用基于三黑洞捕获策略的多目标粒子群优化(three-black-hole capturing strategy based multiple objective particle swarm optimization, MOPSO-TCS)算法^[6]求解PIS容量优化配置的Pareto解。最后,基于逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS),从Pareto解中得到最终的PIS容量优化配置方案。算例仿真结果及对比分析验证了所建优化模型及所提求解方法的合理性、有效性。

1 光伏充电站的结构

图1为PIS的结构。为了实现真正意义上的低碳,通过PIS直接建立EV充放电设施与光伏发电系统的关联,通过协调开发和科学配置提升系统运

收稿日期:2023-12-03;修回日期:2024-02-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52107108)

行效率和供能。PIS 的主要功能是通过光伏发电和 PIS 从电网购电满足 EV 充电需求, EV 也可以通过车网互动获取收益。储能电池组主要作用是通过低储高发实现功率平衡, 同时降低 PIS 购电成本。变流模块包括 DC-DC 变流模块和 AC-DC 变流模块, 前者作为储能电池组、光伏电池组和 EV 充电系统的变流单元, 后者作为 PIS 与交流电网的连接单元。中央能量控制系统协调控制 PIS 内各单元能量流动, 首先采集 PIS 内各部分信息, 如 EV 充电需求、储能荷电状态、光伏出力等, 其次通过优化计算得到可调控量值并下传至各单元。

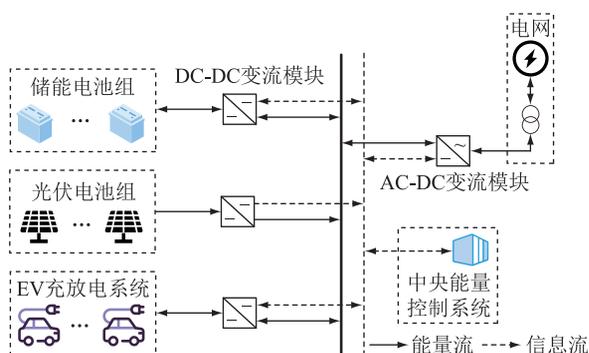


图 1 PIS 结构
Fig.1 Structure of PIS

2 PIS 容量多目标优化配置数学模型

2.1 目标函数

2.1.1 规划运行成本

(1) 光伏电池总成本 C_{pv} 。

$$C_{pv} = \frac{N_{pv} C_{\alpha} r_1 (1 + r_1)^{y_1}}{(1 + r_1)^{y_1} - 1} + \alpha \quad (1)$$

式中: N_{pv} 、 C_{α} 、 α 分别为光伏电池的数量、单价、运维费; r_1 、 y_1 分别为光伏电池的折现率、使用年限。

(2) 储能电池总成本 C_B 。

$$C_B = \frac{N_B C_{\beta} r_2 (1 + r_2)^{y_2}}{(1 + r_2)^{y_2} - 1} + N_B C_{\beta} w + \beta \quad (2)$$

式中: N_B 、 C_{β} 、 β 分别为储能电池的数量、单价、运维费; w 为每年淘汰的储能电池电量比例; r_2 、 y_2 分别为储能电池的折现率、使用年限。

(3) 储能 DC-DC 变流模块总成本 C_{B_DC} 。

$$C_{B_DC} = \frac{N_{B_DC} C_{\gamma} r_3 (1 + r_3)^{y_3}}{(1 + r_3)^{y_3} - 1} + \gamma \quad (3)$$

式中: N_{B_DC} 、 C_{γ} 、 γ 分别为储能变流模块的数量、单价、运维费; r_3 、 y_3 分别为储能变流模块的折现率、使用年限。

(4) 光伏 DC-DC 变流模块总成本 C_{pv_DC} 。

$$C_{pv_DC} = \lceil P_{pv_max} / P_{pv_DC} \rceil \frac{C_{\chi} r_4 (1 + r_4)^{y_4}}{(1 + r_4)^{y_4} - 1} + \chi \quad (4)$$

式中: P_{pv_max} 、 C_{χ} 、 P_{pv_DC} 、 χ 分别为光伏功率最大值、光伏变流模块的单价、额定功率、运维费; r_4 、 y_4 分别为光伏变流模块的折现率、使用年限; $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整函数。

(5) 充电 DC-DC 变流模块总成本 C_{EV_DC} 。

$$C_{EV_DC} = \lceil P_{EV_cmax} / P_{EV_DC} \rceil \frac{C_{\zeta} r_5 (1 + r_5)^{y_5}}{(1 + r_5)^{y_5} - 1} + \zeta \quad (5)$$

式中: P_{EV_cmax} 、 C_{ζ} 、 P_{EV_DC} 、 ζ 分别为 EV 充电功率最大值、充电变流模块的单价、额定功率、运维费; r_5 、 y_5 分别为充电变流模块的折现率、使用年限。

(6) 并网 AC-DC 变流模块总成本 C_{f_AD} 。

$$C_{f_AD} = \lceil P_{fmax} / P_{f_AD} \rceil \frac{C_{\tau} r_6 (1 + r_6)^{y_6}}{(1 + r_6)^{y_6} - 1} + \tau \quad (6)$$

式中: P_{fmax} 、 C_{τ} 、 P_{f_AD} 、 τ 分别为电网购电功率最大值、并网变流模块的单价、额定功率、运维费; r_6 、 y_6 分别为并网变流模块的折现率、使用年限。

(7) 充电桩总成本 C_z 。

$$C_z = \lceil P_{evmax} / P_z \rceil \frac{C_{\kappa} r_7 (1 + r_7)^{y_7}}{(1 + r_7)^{y_7} - 1} + \kappa \quad (7)$$

式中: P_{evmax} 为 PIS 充放电功率之和最大值; P_z 、 C_{κ} 、 κ 分别为充电桩的额定功率、单价、运维费; r_7 、 y_7 分别为充电桩的折现率、使用年限。

(8) PIS 的建设总成本 C_c 。

$$C_c = C_T + \omega P_{zmax} \quad (8)$$

式中: C_T 为 PIS 固定投资成本; P_{zmax} 为站内充电桩的总额定功率; ω 为与 P_{zmax} 有关的等效投资系数。

(9) PIS 向电网购电的成本 C_f 。

$$C_f = \int_0^{8760} g(t) P_f(t) dt \quad (9)$$

式中: $g(t)$ 、 $P_f(t)$ 分别为 t 时刻 PIS 向电网购电的单价、功率。

(10) PIS 补贴 EV 用户放电的成本 C_d 。

$$C_d = \int_0^{8760} h P_{EV_d}(t) dt \quad (10)$$

式中: h 、 $P_{EV_d}(t)$ 分别为 EV 用户放电补贴单价和 t 时刻 EV 的放电功率。

(11) PIS 向电网卖电的收益 R_m 。

$$R_m = \int_0^{8760} l P_m(t) dt \quad (11)$$

式中: l 、 $P_m(t)$ 分别为 PIS 向电网卖电单价和 t 时刻的卖电功率。

(12) PIS 的充电收益 R_{EV} 。

$$R_{EV} = \int_0^{8760} m(t) P_{EV_c}(t) dt \quad (12)$$

式中: $m(t)$ 、 $P_{EV_c}(t)$ 分别为 t 时刻EV充电的收费单价、总功率。

综上,以最小化PIS规划运维成本 C_{all} 为目标函数的数学表达式为:

$$\min C_{all} = \min(C_{pv} + C_B + C_{B_DC} + C_{pv_DC} + C_{EV_DC} + C_{L_AD} + C_z + C_c + C_f + C_d - R_m - R_{EV}) \quad (13)$$

2.1.2 碳排放量

PIS碳排放包括光伏板、储能、逆变器等设备在生产过程中产生的碳排放和PIS向上级电网购电产生的等效碳排放。光伏发电的度电碳排放可由光伏电池生命周期内的总发电量和电池生产运输、废弃处理所得的二氧化碳总排放量得出^[15]。根据统计数据,当前光伏度电碳排放量约为33~50 g^[20]。文中根据PIS的年光伏发电总量来计算其产生的年光伏发电总碳排放量 T_{pv} 。

$$T_{pv} = \rho_1 \sum_{t=1}^{8760} P_{pv}(t) \quad (14)$$

式中: ρ_1 为光伏发电系统的度电碳排放系数; $P_{pv}(t)$ 为 t 时刻光伏功率。

储能电池、变流模块、支架等设备生产时所产生的总碳排放量 T_0 与规划元件的容量有关^[18],即:

$$T_0 = \rho_2 E_{Bmax} + \rho_3 P_{DCmax} \quad (15)$$

式中: ρ_2 、 ρ_3 分别为生产每千瓦储能电池、变流模块及支架所产生的碳排放; E_{Bmax} 为储能电池总容量; P_{DCmax} 为站内所有变流模块的总容量。

上级电网发电机组主要为火电机组,火电机组一天的出力占比会根据时刻变化^[21]。每日火力发电占比可分为3个时段,如表1所示。

表1 上级电网各时段火力发电占比

Table 1 Proportion of thermal power generation in the power grid at different periods

分类	时间段	火力发电占比/%
火电低占比	23:00—次日07:00	65
火电中占比	11:00—19:00	80
火电高占比	07:00—11:00、 19:00—23:00	86

购电的碳排放计量模型如下:

$$T_f = \sum_{t=1}^{8760} \varepsilon(t) P_f(t) \quad (16)$$

式中: T_f 为PIS电网购电的等效碳排放量; $\varepsilon(t)$ 为 t 时刻碳排放计量因子,为该时刻火力发电占比与火电度电碳排放的乘积。

所以,PIS的总碳排放量 T_{all} 包括 T_{pv} 、 T_0 和 T_f ,最小化PIS碳排放量可以表示为:

$$\min T_{all} = \min(T_{pv} + T_0 + T_f) \quad (17)$$

2.2 约束条件

2.2.1 EV充放电时间约束

实施分时电价制度可以有效引导EV进行错峰充放电,将部分负荷从峰时转移到谷时。部分用户会选择调整到谷时段充电以降低充电成本,其开始充电时刻^[22]可表示如下:

$$t_{sc} = \begin{cases} \text{rand}(t_{eg} - t_{sg} - t_{char}) + t_{sg} & t_{char} \leq t_{eg} - t_{sg} \\ t_{sg} & t_{char} > t_{eg} - t_{sg} \end{cases} \quad (18)$$

式中: t_{sc} 为EV开始充电时刻; $\text{rand}(\cdot)$ 为随机数函数; t_{sg} 、 t_{eg} 分别为电价谷时段开始和结束的时间点; t_{char} 为EV的充电时长。

EV用户会选择在电价峰时段放电,以获取放电收益,其开始放电时刻可表示如下:

$$t_{sd} = \begin{cases} \text{rand}(t_{ef} - t_{sf} - t_{dis}) + t_{sf} & t_{dis} \leq t_{ef} - t_{sf} \\ t_{sf} & t_{dis} > t_{ef} - t_{sf} \end{cases} \quad (19)$$

式中: t_{sd} 为EV开始放电的时间; t_{sf} 、 t_{ef} 分别为电价峰时段开始和结束的时间点; t_{dis} 为EV的放电时长。

2.2.2 储能电池的充放电约束

PIS的储能系统在充放电时,储能电池的荷电状态 S_t^B 满足以下约束:

$$S_{min}^B \leq S_t^B \leq S_{max}^B \quad (20)$$

$$S_t^B = \frac{E_B(t)}{E_{Bmax}} \quad (21)$$

式中: S_t^B 为 t 时刻储能的荷电量与最大电池容量的比值,即电池的荷电状态; S_{min}^B 为最小荷电状态,取0.3; S_{max}^B 为最大荷电状态,取0.9; $E_B(t)$ 为 t 时刻储能电池的荷电量。

(1) 储能电池组充电。

$$E_B(t_2) = E_B(t_1)(1 - \theta)^{\Delta t} + P_B(t_2)\Delta t \quad (22)$$

式中: $E_B(t_2)$ 为下一时刻储能电池的荷电量; $E_B(t_1)$ 为上一时刻储能电池的荷电量; θ 为储能电池组的荷电保持能力; Δt 为相邻时刻时间间隔; $P_B(t_2)$ 为下一时刻储能电池的充放电功率。

(2) 储能电池组放电。

$$E_B(t_2) = E_B(t_1)(1 - \theta)^{\Delta t} - P_B(t_2)\Delta t \quad (23)$$

若储能电池组的电量不足以为下个阶段提供电能,或者储能已达到最大荷电量且在下个时段无需放电,则仅有自放电影响储能的电量变化,即:

$$E_B(t_2) = E_B(t_1)(1 - \theta)^{\Delta t} \quad (24)$$

2.2.3 功率平衡约束

光伏充电站在运行时,每个时刻的光伏电池功率 $P_{pv}(t)$ 、储能的充放电功率 $P_B(t)$ 、EV的充电功率 $P_{EV_c}(t)$ 、EV的放电功率 $P_{EV_d}(t)$ 、充电站向电网

购电的功率 $P_f(t)$ 及向电网卖电的功率 $P_m(t)$ 满足功率平衡条件。储能电池系统的最大充放电功率 P_{Bmax} 受储能变流模块的数量和额定功率制约,即:

$$P_B(t) \leq N_{B_DC} P_{DC} \quad (25)$$

$$N_{B_DC} P_{DC} = P_{Bmax} \quad (26)$$

式中: P_{DC} 为单个储能变流模块的额定功率。

(1) 储能电池处于充电状态。

$$\frac{P_m(t)}{\eta_d} + \frac{P_B(t)}{\eta_b} + \frac{P_{EV_c}(t)}{\eta_c} = P_{pv}(t)\eta_a + P_{EV_d}(t)\eta_c \quad (27)$$

式中: η_d 为并网变流模块的转化效率; η_b 为储能变流模块的转化效率; η_c 为充电变流模块的转化效率; η_a 为光伏变流模块的转化效率。此时, 光伏电池和 EV 放电给 EV 负荷充电, 同时, 富余电量可供储能电池充电, 若储能电池的电量或充电功率已达最大, 则 PIS 将富余电量卖给电网, 防止弃光。

(2) 储能电池处于放电状态。

$$P_f(t)\eta_d + P_{pv}(t)\eta_a + P_{EV_d}(t)\eta_c + P_B(t)\eta_b = P_{EV_c}(t)/\eta_c \quad (28)$$

此时, 光伏电池、储能电池、电网和 EV 放电给 EV 负荷充电。若储能电池足以支撑充电负荷, 则 PIS 无须向电网购电; 若储能电池不足以支撑充电负荷, 则 PIS 向电网购电来补足功率差额。

3 模型求解

为了解决粒子初始化过于集中导致种群快速陷入局部最优的问题, 文献[6]提出 MPSO-TCS 算法。由基于标准测试函数的对比分析和求解高维、非线性、多目标优化问题的应用结果可见, 该算法具有优良的收敛性和多样性。鉴于 MPSO-TCS 的优良性能, 文中将其应用于求解含多目标、多约束、高维变量的 PIS 容量优化配置问题, 流程见图 2。图中, k 为迭代次数, k_{max} 为迭代次数最大值。

4 算例分析

4.1 基础数据

以位于受端电网的居民区附近^[23-24]的北方某地(北纬 $36^{\circ}30'$) 为例进行 PIS 容量优化配置的数字仿真分析。假设该地区日均参与充放电的车辆为 300 辆, 充放电功率均为 7 kW, 效率为 0.9 ^[6,25]。典型日的光照分布如图 3 所示^[26-27]。

4.2 仿真分析

以 3 种场景为例进行对比分析: EV 无序充电(场景 1)、EV 有序充电(场景 2)和 EV 有序充放电(场景 3)。应用 MPSO-TCS, 得到 3 种场景下的优

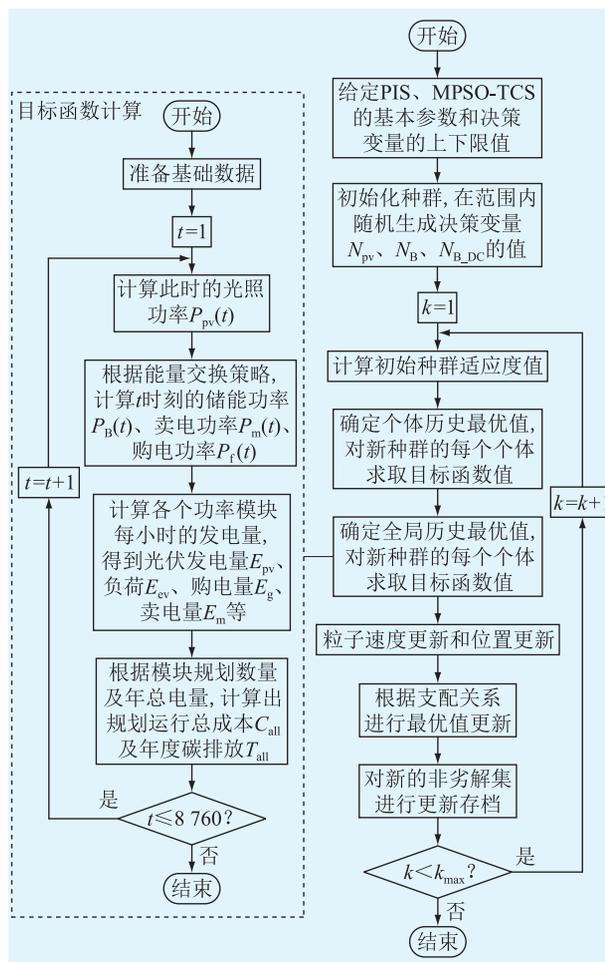


图 2 基于 MPSO-TCS 的优化模型求解流程

Fig.2 Flow chart for solving optimization model based on MPSO-TCS

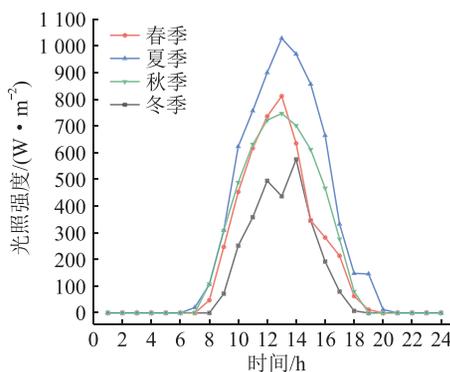


图 3 四季典型日光照强度随时间变化曲线

Fig.3 Time varying curves of typical daily sunshine intensity in four seasons

化配置方案 Pareto 前沿, 见图 4。可见: (1) 3 种场景下 MPSO-TCS 得到的 Pareto 解分布均匀, 显示了 MPSO-TCS 的多样性; (2) 最小化 PIS 规划运维成本与最小化 PIS 碳排放量这 2 个目标相互冲突, 无法同时达到最优; (3) 总体上, 场景 3 的优化目标小于场景 1 和 2, 场景 2 的优化目标小于场景 1, 证明了优化配置时计及电动汽车有序充电的必要性。

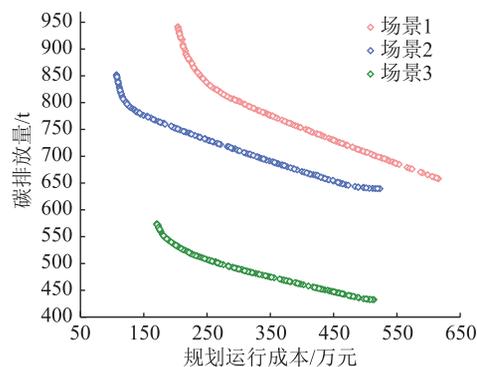


图4 3种场景的 Pareto 前沿

Fig.4 Pareto frontiers of three scenarios

为进一步分析,从 Pareto 前沿中选择规划运行成本为 200 万元和 300 万元时对应的 2 组典型 Pareto 解进行对比,如表 2、表 3 所示。可见:(1) 同一场景下,投资越大,相应的光伏电池、储能电池等能有效减少碳排放的设施数量越多,PIS 碳排放量就越少,这是符合实际的,说明文中优化数学模型合理;(2) 不同场景下,分析光伏板、储能等配置的不同,可剖析相互之间的关联性;(3) 光伏发电和其他设备所产生的碳排放远小于电网购电产生的碳排放,是因为 PIS 向电网购电具有持续性的特点,且度电碳排放远高于光伏发电,同时也说明,为了减少 PIS 碳排放,须减少 PIS 向电网购电量。

表 2 规划运行成本为 200 万元时优化配置方案及指标

Table 2 Optimized configuration plan and indicators with a planned operating cost of two million yuan

参数	场景 1	场景 2	场景 3
规划运行成本/万元	200	200	200
碳排放量/t	944	751	532
光伏电池数量	19	545	151
光伏电池额定功率/kW	6	174	48
储能变流模块数量	0	4	2
储能变流模块功率/kW	0	40	20
储能电池数量	0	13	4
储能电池额定容量/(kW·h)	0	130	96
充电桩数量	71	44	69
充电桩额定功率/kW	497	308	483
光伏变流模块数量	2	36	11
光伏变流模块额定功率/kW	10	180	55
充电变流模块数量	101	63	98
充电变流模块额定功率/kW	505	315	490
并网变流模块数量	99	61	61
并网变流模块额定功率/kW	495	305	305
光伏发电碳排放/t	1	16	4
购电等效碳排放/t	929	711	518
其他设备碳排放/t	14	24	10

表 3 规划运行成本为 300 万元时优化配置方案及指标

Table 3 Optimized configuration plan and indicators with a planned operating cost of three million yuan

参数	场景 1	场景 2	场景 3
规划运行成本/万元	300	300	300
碳排放量/t	803	708	489
光伏电池数量	644	961	350
光伏电池额定功率/kW	206	307	112
储能变流模块数量	5	9	7
储能变流模块功率/kW	50	90	70
储能电池数量	10	29	24
储能电池额定容量/(kW·h)	240	696	576
充电桩数量	71	44	69
充电桩额定功率/kW	497	308	483
光伏变流模块数量	43	63	24
光伏变流模块额定功率/kW	215	315	120
充电变流模块数量	101	63	98
充电变流模块额定功率/kW	505	315	490
并网变流模块数量	99	61	61
并网变流模块额定功率/kW	495	305	305
光伏发电碳排放/t	19	28	10
购电等效碳排放/t	757	621	433
其他设备碳排放/t	27	59	46

为深入探究 3 种场景下优化配置结果不同的原因,在每种场景中选择夏季和冬季典型日,进行功率平衡分析,如图 5、图 6 所示。图中,向 PIS 提供能量的为正值,包括 PIS 向电网购电功率 P_f 、储能电池充放电功率 P_B 、光伏电池发电功率 P_{pv} 、EV 放电功率 $P_{EV,d}$;消耗 PIS 能量的为负值,包括 EV 充电功率 $P_{EV,c}$ 、储能电池充放电功率 P_B 、PIS 向电网卖电功率 P_m 。

场景 1 中, EV 用户集中于傍晚充电,导致 EV 充电峰值负荷过高。从表 2、表 3 可知,场景 1 需要配置数量较多的充电桩、充电变流模块、并网变流模块等必备设施,对于预算较少的情况(200 万元),由于 PIS 没有富余的资金,所配置的光伏电池、储能电池等设施的数量几乎为 0。由图 5(a)可知,可再生能源没有参与负荷供给,PIS 依赖于电网购电来维持功率平衡,也不存在向电网卖电获取收益的情况,产生的碳排放量很大,购电成本也很高,经济性和低碳性均较差。

场景 2 中,在分时电价引导下,部分 EV 选择在凌晨谷时段充电,减少了傍晚充电的 EV 数量, EV 充电功率峰值有明显减小,减少了必备设施的规划数量。在相同预算下,场景 2 有更多的资金用来购买光伏电池、储能电池等设施。由图 5(b)、(e)可知,在夏季典型日,光伏电池不仅可为储能充电,还

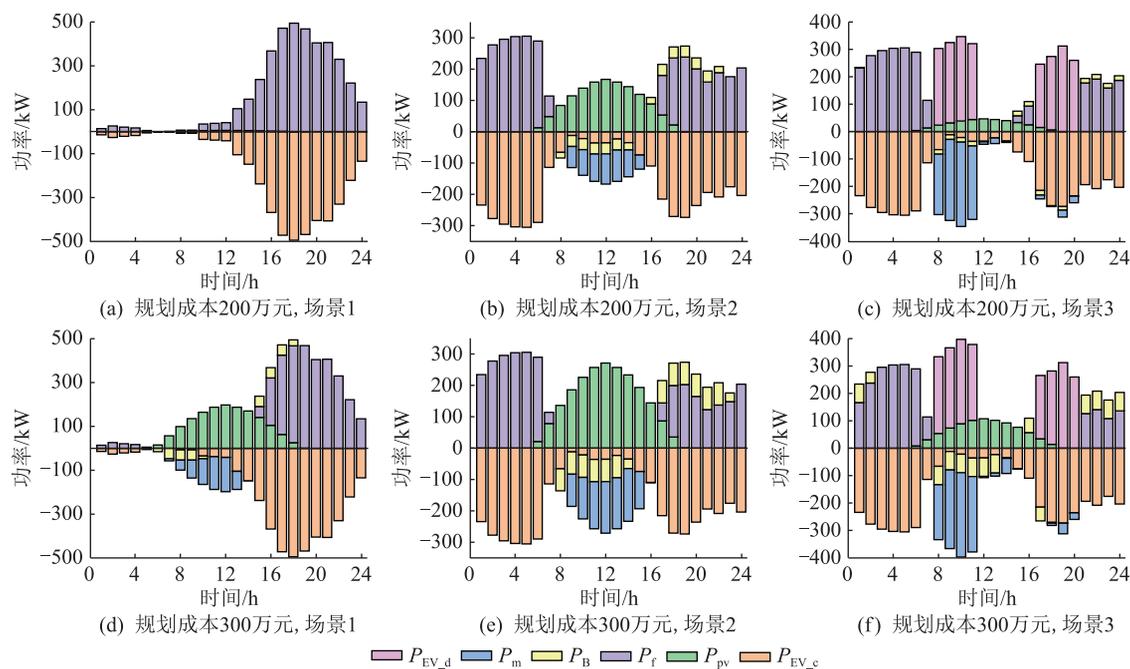


图5 不同规划成本及场景下夏季典型日功率平衡曲线

Fig.5 Typical daily power balance curves for summer under different planning costs and scenarios

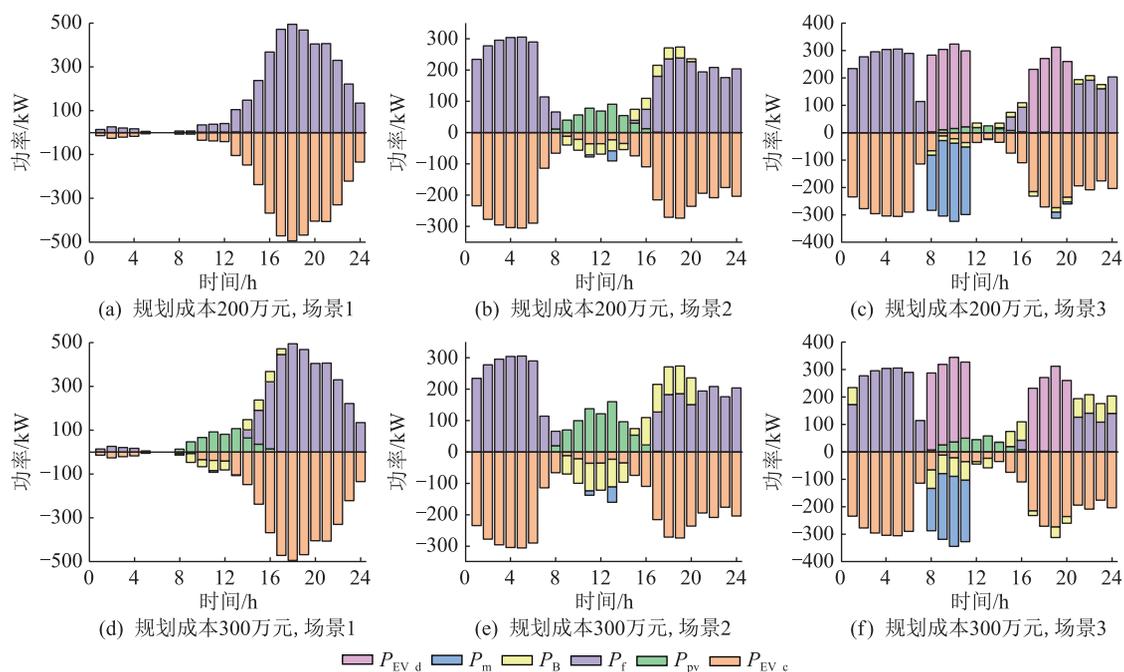


图6 不同规划成本及场景下冬季典型日功率平衡曲线

Fig.6 Typical daily power balance curves for winter under different planning costs and scenarios

能使 PIS 产生大量的卖电收益,降低了规划运行成本。由图 6(b)、(e)可知,在冬季典型日,光伏电池在白天可为储能电池充电,晚上储能电池放电,减少了电网购电量,间接减少了碳排放。综合来看,有序充电场景下的 PIS 容量优化配置,其经济性和低碳性明显优于无序充电场景。

在场景 3 中,PIS 在有序充电的基础上,允许 EV 用户在电价峰时段放电。由表 2、表 3 可知,为

满足特定时段多辆 EV 在站内充电和放电需求,需要更多的充电桩和充电变流模块,增加了必要设施的规划成本。与场景 2 对比,预算相同时,光伏电池、储能电池等设施的规划数量相对较少。由图 5 (c)、(f)可知,EV 在峰时段放电充当了电源作用,在负荷较低时期(8 时—12 时),EV 放电可给储能充电,剩下的电能由 PIS 卖给电网。在 EV 充电负荷高峰期(17 时—21 时),EV 用户向 PIS 放电获

取收益,相当于 PIS 购置了清洁能源给 EV 充电,大幅降低了 PIS 向电网购电产生的碳排放,此时储能的储电量得到补充,可以在 EV 放电时段结束后继续为 PIS 供电,进一步减少购电碳排放。综上,场景 3 兼顾了场景 2 的优点,在允许用户放电后,拥有更好的低碳效益和经济效益。由熵权 TOPSIS 法^[28]选取场景 3 的 Pareto 前沿中(267 万元,501 t)为折衷解,此解在整个 Pareto 解集中环境和经济效益综合表现最优,在规划运行预算成本期望值接近此解时,可以将此解作为规划参考,参考数据如表 4 所示。系统参数如表 5 所示。

表 4 折衷解参数

Table 4 Parameters of the compromise solution

参数	数值	参数	数值
碳排放量/t	501	规划运行总成本/万元	267
光伏电池数量	309	光伏电池额定功率/kW	99
储能变流模块数量	6	储能变流模块功率/kW	60
储能电池数量	17	储能电池额定容量/(kW·h)	408
充电桩数量	69	充电桩额定功率/kW	483
光伏变流模块数量	21	光伏变流模块额定功率/kW	105
充电变流模块数量	98	充电变流模块额定功率/kW	490
并网变流模块数量	61	并网变流模块额定功率/kW	305

表 5 系统参数

Table 5 System parameters

参数	数值	参数	数值
P_{pv_DC}/W	320	$C_k/万元$	0.4
$C_{\alpha}/万元$	0.064	$C_T/万元$	40
$E_B/(kW \cdot h)$	24	$\eta_a, \eta_b, \eta_c, \eta_d$	0.98
$C_{\beta}/万元$	3.984	θ	0.000 2
P_{DC}/kW	5	$h/[\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	0.7
$C_{\gamma}/万元$	0.8	$l/[\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	0.4
$C_{\chi}/万元$	0.8	$\rho_1/[\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	0.05
$C_{\xi}/万元$	0.8	$\rho_2/[\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	26.64
$C_{\zeta}/万元$	0.8	$\rho_3/[\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	452.4

5 结论

针对光储充一体化电站在建设运行过程中的经济性和低碳性问题,文中提出了考虑站内多个组成单元成本及碳排放的数学模型,并基于 MPSO-TCS 算法求解该模型,主要结论如下:

(1) 文中所提 PIS 碳排放模型,在考虑电网购电碳排放的基础上,考虑了光伏发电及站内其他设备产生的碳排放,使得 PIS 涉及的碳排放来源更加完善。

(2) 文中所提模型能有效反映站内各组成单元随规划成本和碳排放的变化情况,为决策者提供均

匀分布且多样的优化方案,实现了真正意义上考虑经济性和低碳性的 PIS 多目标容量优化配置。

(3) 在 EV 有序充放电场景中,所得优化配置结果的经济性和低碳性最优,文中采用 TOPSIS 给出了最优场景下的折衷优化配置方案,为光储充一体化电站的投资建设提供了理论依据。

致 谢

本文得到电力系统智能运行与安全防御宜昌市重点实验室开放基金(2020DLXY01)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 钱康,苗安康,周江山,等. “双碳”背景下多站融合方案及关键技术研究[J]. 供用电,2022,39(9):11-17,34.
QIAN Kang, MIAO Ankang, ZHOU Jiangshan, et al. Research on the fusion scheme and key technology of multi-station integration under the targets of carbon peak and carbon neutrality [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(9): 11-17, 34.
- [2] 陈赟,刘昌维,潘智俊,等. 新形势下智慧“能源+双碳”服务平台的建设与应用[J]. 供用电,2022,39(2):15-21.
CHEN Yun, LIU Changwei, PAN Zhijun, et al. The construction and application of a smart “energy+dual carbon” service platform under the new situation [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(2): 15-21.
- [3] 陈倩,朱婵霞,孙志胤,等. 面向双碳目标的典型园区碳排放计算分析[J]. 电力需求侧管理,2023,25(6):21-27.
CHEN Qian, ZHU Chanxia, SUN Zhihuang, et al. Dual-carbon-targets-oriented calculation and analysis of carbon emissions for typical parks [J]. Power Demand Side Management, 2023, 25(6): 21-27.
- [4] 陈先龙,王秀丽,陈洁,等. 考虑分布式可再生能源交易的风电商与电动汽车充电站协同优化调度[J]. 电网技术,2023,47(11):4598-4610.
CHEN Xianlong, WANG Xiuli, CHEN Jie, et al. Optimal collaborative scheduling of wind power operators and electric vehicle charging stations considering distributed renewable energy trading [J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4598-4610.
- [5] 程杉,杨堃,汪业乔,等. 含风力发电的电动汽车充电站区间优化调度[J]. 电机与控制学报,2021,25(6):101-109.
CHENG Shan, YANG Kun, WANG Yeqiao, et al. Interval optimization scheduling of electric vehicle charging station including wind power generation [J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(6): 101-109.
- [6] 程杉,汪业乔,廖玮霖,等. 含电动汽车的新能源微电网多目标分层优化调度[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(12):63-71.
CHENG Shan, WANG Yeqiao, LIAO Weilin, et al. Bi-level multi-objective optimization of a new energy microgrid with electric vehicles [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 63-71.

- [7] 尚夏,王美佳,许刘晓,等. 城市区域电动汽车充电设施配置优化[J]. 浙江大学学报(工学版),2020,54(6):1210-1217. SHANG Xia, WANG Meijia, XU Liuxiao, et al. Configuration optimization of electric vehicle charging facilities in urban areas [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020,54(6):1210-1217.
- [8] 李笑彤,宋宝同,吕风波,等. 基于负荷数据聚类的充电站储能容量规划方法[J]. 电网与清洁能源,2021,37(1):90-96. LI Xiaotong, SONG Baotong, LÜ Fengbo, et al. An energy storage capacity planning method of charging station based on load data clustering [J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(1):90-96.
- [9] 朱永胜,杨振涛,丁同奎,等. 考虑用户动态充电需求的电动汽车充电站规划[J]. 郑州大学学报(工学版),2023,44(2):82-90. ZHU Yongsheng, YANG Zhentao, DING Tongkui, et al. Electric vehicle charging station planning considering users' dynamic charging demand [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023,44(2):82-90.
- [10] WU S J, XU Q S, LI Q, et al. An optimal charging strategy for PV-based battery swapping stations in a DC distribution system [J]. International Journal of Photoenergy, 2017:1504857.
- [11] BHATTI A R, SALAM Z, SULTANA B, et al. Optimized sizing of photovoltaic grid-connected electric vehicle charging system using particle swarm optimization [J]. International Journal of Energy Research, 2019,43(1):500-522.
- [12] BAIK S, JIN Y, YOON Y. Determining equipment capacity of electric vehicle charging station operator for profit maximization [J]. Energies, 2018,11(9):2301.
- [13] DAI Q J, LIU J C, WEI Q S. Optimal photovoltaic/battery energy storage/electric vehicle charging station design based on multi-agent particle swarm optimization algorithm [J]. Sustainability, 2019,11(7):1973.
- [14] 姜柯柯,张新松,徐杨杨,等. 基于协同进化的光伏电站与电动汽车充电站联合规划[J]. 电力工程技术,2021,40(6):62-68,94. JIANG Keke, ZHANG Xinsong, XU Yangyang, et al. Joint planning of photovoltaic generation and electric vehicle charging station based on co-evolution [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021,40(6):62-68,94.
- [15] 何津津. 基于生命周期评价的光伏发电碳排放研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2017. HE Jinjin. Research on carbon emission of photovoltaic generation with life cycle assessment [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [16] 卢志刚,姜春光,李学平,等. 清洁能源与电动汽车充电站协调投资的低碳效益分析[J]. 电工技术学报,2016,31(19):163-171. LU Zhigang, JIANG Chunguang, LI Xueping, et al. Low-carbon benefit analysis on coordinating investment for clean energy and electric vehicle charging stations [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016,31(19):163-171.
- [17] 高菲. 含集中充电站的电力系统环境经济调度研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2017. GAO Fei. Research on environmental economic dispatch of power system with centralized charging station [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [18] 王小虎,楚春礼,曹植,等. 分布式光伏-储能系统经济-碳排放-能源效益实证分析:以山东省胶州光伏及其储能系统为例[J]. 中国环境科学,2022,42(1):402-414. WANG Xiaohu, CHU Chunli, CAO Zhi, et al. Empirical analysis of cost-CO₂-energy benefits of distributed photovoltaic-battery storage system-taking (PV-BSS) in a case study in rural Jiaozhou Shandong [J]. China Environmental Science, 2022,42(1):402-414.
- [19] 薛贵挺,汪柳君,刘哲,等. 考虑碳排放的光储充一体站日前运行策略[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(7):103-110. XUE Guiting, WANG Liujun, LIU Zhe, et al. Day-ahead operation strategy of an integrated photovoltaic storage and charging station considering carbon emissions [J]. Power System Protection and Control, 2022,50(7):103-110.
- [20] 李俊峰,常瑜. 中国光伏产业清洁生产研究报告[EB/OL]. (2012-03-27) [2024-01-15]. <https://www.greenpeace.org.cn/2012/03/27/solar-clean-production>. LI Junfeng, CHANG Yu. Clean production of solar PV in China [EB/OL]. (2012-03-27) [2024-01-15]. <https://www.greenpeace.org.cn/2012/03/27/solar-clean-production>.
- [21] 王雷雷,高红均,刘畅,等. 考虑分时碳计量的智能楼宇群电-碳耦合互动共享[J]. 电网技术,2022,46(6):2054-2064. WANG Leilei, GAO Hongjun, LIU Chang, et al. Electricity carbon coupling sharing among intelligent buildings considering time-of-use carbon emission measurement [J]. Power System Technology, 2022,46(6):2054-2064.
- [22] 夏娟娟,周明坚,袁帅,等. 电动汽车峰谷分时电价时段充电优化模型[J]. 电源技术,2016,40(9):1848-1850,1877. XIA Juanjuan, ZHOU Mingjian, YUAN Shuai, et al. Charging optimization model of peak-valley price period of electric vehicle [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016,40(9):1848-1850,1877.
- [23] 程杉,傅桐,赵子凯,等. 考虑电动汽车随机转移特性的充电站群两阶段优化调度[J]. 高电压技术,2023,49(10):4257-4266. CHENG Shan, FU Tong, ZHAO Zikai, et al. Two-stage optimal scheduling of charging and storage station clusters considering the random transfer characteristics of electric vehicles [J]. High Voltage Engineering, 2023,49(10):4257-4266.
- [24] 侯甜甜. “车-路-电”三网融合下的充电设施选址定容方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2022. HOU Tiantian. Research on the method of location and capacity determination of charging facilities under the integration of “vehicle-road-electricity” three networks [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.

- [25] 张谦,邓小松,岳焕展,等. 计及电池寿命损耗的电动汽车参与能量-调频市场协同优化策略[J]. 电工技术学报, 2022,37(1):72-81.

ZHANG Qian, DENG Xiaosong, YUE Huanzhan, et al. Coordinated optimization strategy of electric vehicle cluster participating in energy and frequency regulation markets considering battery lifetime degradation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 72-81.

- [26] MA R, LETU H S, YANG K, et al. Estimation of surface short-wave radiation from himawari-8 satellite data based on a combination of radiative transfer and deep neural network [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(8): 5304-5316.

- [27] ALSADI S Y, NASSAR Y F. Estimation of solar irradiance on solar fields: an analytical approach and experimental results [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(4): 1601-1608.

- [28] 林思宇,文娟,屈星,等. 基于 TOPSIS 的配电网结构优化及

关键节点线路识别[J/OL]. 复杂系统与复杂性科学:1-9 [2023-09-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1402.N.20230906.1742.004.html>.

LIN Siyu, WEN Juan, QU Xing, et al. Optimization of distribution network structure and identification of key nodes and lines based on TOPSIS method[J/OL]. Complex Systems and Complexity Science:1-9[2023-09-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1402.N.20230906.1742.004.html>.

作者简介:



程杉

程杉(1981),男,博士,教授,研究方向为电力系统与综合能源(E-mail: hpucquyzu@ctgu.edu.cn);

刘延光(1998),男,硕士在读,研究方向为电动汽车充换电设施与可再生能源集成;

刘炜炜(1999),女,博士在读,研究方向为新能源微电网运行优化与控制。

Multi-objective optimization based capacity accommodation of PIS considering its economic construction and low-carbon operation

CHENG Shan, LIU Yanguang, LIU Weiwei, WANG Can, LI Zhenxing

(China Three Gorges University (Yichang Key Laboratory of Intelligent Operation and Security Defense of Power System), Yichang 443002, China)

Abstract: In order to explore the economic and carbon reduction benefits of photovoltaic-storage-charging integrated stations and achieve reasonable configuration of internal components, a multi-objective optimization configuration method for stations that takes into account economic and low-carbon aspects is proposed. Firstly, based on the functions and requirements of each module in the charging station, the sources of carbon emissions generated by station is explored, and a mathematical model for the cost and carbon emissions of each module in the station is established. Then, with the goal of minimizing the annual investment and operating cost of the system and carbon emissions, a multi-objective particle swarm optimization algorithm based on three-black-hole capturing strategy is used to optimize the configuration of various modules of stations in different load scenarios, and the optimal configuration plan for each component module of the station under three scenarios is obtained. The comparative results show that the method proposed in this article can effectively reduce the cost and carbon emissions during planning and operation, and improve the economic and environmental benefits of stations. Finally, the technique for order preference by similarity to ideal solution is used to provide a compromise optimization plan for the optimal scenario, which can provide reference for the current investment and construction of photovoltaic-storage-charging integrated stations.

Keywords: capacity optimization configuration; vehicle to grid; orderly charging and discharging; multi-objective optimization; carbon emission; technique for order preference by similarity to ideal solution method

(编辑 方晶)