

# 分布式光储充系统配置优化研究

秦国辉, 刘伟, 王玉鹏, 苏小红, 陆佳, 罗向东, 周闯

(黑龙江省能源环境研究院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:** 分布式光储充体系能够有效解决电动汽车规模化发展与配网架构体系不匹配的问题, 是推动电动汽车从“低碳”向“零碳”发展的最佳路径之一。分析了光储充电站储能系统构成及运行模式, 解析了电动汽车充电负荷对光伏系统与储能系统平衡的影响, 构建以经济效益和新能源消纳作为多目标优化的协同配置优化模型, 加入量化指标和约束条件, 实现分布式光储系统的最优配置。通过仿真分析结果表明, 所提出的配置优化模型可以提高分布式光储充系统的整体经济性又可以助力绿色能源就近消纳。

**关键词:** 光储充系统; 优化模型; 协同配置; 多目标优化; 分布式光储充; 配网架构; 电动汽车; 新能源消纳

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2025)12-0014-04

## Research on configuration optimization of distributed PV-storage-charging systems

QIN Guohui, LIU Wei, WANG Yupeng, SU Xiaohong, LU Jia, LUO Xiangdong, ZHOU Chuang

(Energy and Environmental Research Institute of Heilongjiang Province, Harbin 150090, China)

**Abstract:** The distributed solar storage and charging system can effectively solve the problem of mismatch between the large-scale development of electric vehicles and the distribution network architecture system, and is one of the best paths to promote the development of electric vehicles from "low-carbon" to "zero carbon". This article first analyzes the composition and operation mode of the energy storage system of the solar storage charging station, analyzes the impact of electric vehicle charging load on the balance between the photovoltaic system and the energy storage system, constructs a collaborative configuration optimization model with economic benefits and new energy consumption as multi-objective optimization, and adds quantitative indicators and constraints to achieve the optimal configuration of the distributed solar storage system. The simulation analysis results show that the configuration optimization model proposed in this article can improve the overall economy of the distributed solar storage and charging system and assist in the nearby consumption of green energy.

**Keywords:** solar storage and charging; optimization model; collaborative configuration; multi-objective optimization; distributed solar storage and charging; distribution network architecture; electric vehicles; new energy consumption

### 0 引言

在“碳达峰、碳中和”战略背景下, 提升可再生能源发展和利用水平、实现能源可持续发展, 构建以可再生能源为主的新型电力系统将是国家当前及未来很长一段时间能源战略的主要发展方向<sup>[1]</sup>。分布式光储充系统既能实现新能源消纳, 又能有效缓解电动汽车充电负荷对电网的冲击, 打通能源调度通道, 将光伏发电、储能等源头能源高效高价值使用, 充分发挥了新能源的节能减排社会价值, 并通过区域调控, 降低高峰需量, 削峰填谷降低了电力使用成本, 为能源用户带来共赢的经济价值<sup>[2]</sup>。

目前已有学者针对充电站储能系统优化运行问题开展了相关研究。文献[3]提出了一种通过配置光伏和储能来提升充电场站的有效充电功率或服务能力的方法, 并通过动态调整储能充放电功率, 既可实现跟踪负荷功率、

降低负荷峰值, 又能达到灵活应对复杂、多变的电力需求侧和供给侧的动态变化场景的目的。文献[4]提出了光储充一体化解决方案, 通过能量存储和优化配置实现了本地能源生产与用能负荷基本平衡。文献[5]以光储充检放一体化充电站为出发点, 重点阐述了供配电、充电系统、整流器、储能系统等设计方案, 并分析了在配电网中的具体应用策略。文献[6]建立了光伏模型和基于寿命预测的储能模型, 以最大化光储充一体化电站的净收益为目标, 以设备运行和功率平衡为约束, 建立了光储充一体化电站设备优化配置模型, 并采用遗传算法进行求解, 最后通过算例验证了该方法的有效性。文献[7]分析了电动汽车充电负荷影响因素及基于蒙特卡罗法的电动汽车负荷预测方法, 建议采用多种优化方法, 并充分考虑一体化系统所带来的环境效益和社会效益, 以为容量配置提供更加全面科学的指导。文献[8]以光伏利用率最大和经济性最优为优化目标, 建立基于改进遗传算法的微电网光储容量优化配置模型, 研究结果表明优化后的光伏和储能系统可以有效提高微电网系统的光伏利用率和经济性。

\*基金项目: 黑龙江省省属科研院所科研业务费项目(CZKYF2022-1-B015)

收稿日期: 2024-02-06

为了更精确地规划光储充一体化系统容量配置,提升光储充一体化系统的利用率,本文在分析光储充系统结构与运行模式基础之上,提出了基于多目标的粒子群协同配置优化模型,获得全局最优配置,既实现绿色能源的分布利用,缩小充电站与绿色能源衔接距离,减少对电网的冲击影响,又方便新能源汽车使用者,进一步提高可再生能源的渗透率。

## 1 光储充系统

典型光储充系统主要由光伏发电单元、储能电池单元、充电终端、直流配电架构、储能流变器、光伏逆变器组成的直流微网系统,光储充系统典型系统结构如图1所示。当太阳能光照强度足够时,光伏发电单元自动工作,将产生的电能输送至储能系统,如锂离子电池、铅酸电池和钠离子电池等。储能系统将电能转化为化学能并存储起来,以备光伏发电间歇期使用。当太阳能光照强度不足或负荷需求较低时,光伏发电模块可能无法满足所有负荷需求,此时储能系统进入充电模式,通过电网获取电能输送至储能电池单元。以储能电池为核心,协调利用光伏发电与低谷电为电动汽车供给便宜、绿色和充足电能,支撑局部快充负荷需求,有效提高光储充系统运行效率。

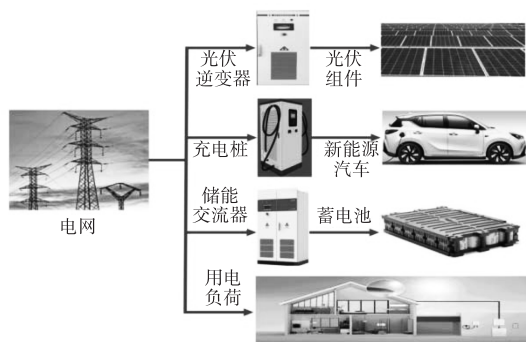


图1 典型光储充系统结构图

## 2 系统能量分析

在典型光储充系统中,系统的高效与稳定运行主要受到气象变化和充电需求的干扰,容易产生很大的波动和不确定性,而通过光伏发电、充电负荷与储能容量优化配置策略可以有效克服上述问题,其主要基于充电负荷和光伏发电模型优化储能系统,调节电网购电功率实现整体功率平衡,为电动汽车提供稳定可靠的充电服务。

在光储充系统中,储能电池的充电功率与放电功率达到平衡,才能使光储充系统整体功率平衡,具体计算过程为

$$P_{ba}(t) + P_{ev}(t) = P_{pv}(t) + P_G(t) \quad (1)$$

$$P_{ba}(t) = P_{ev}(t) + P_{pv}(t) + P_G(t) \quad (2)$$

其中,  $P_{ba}(t)$  为  $t$  时刻在充电站内储能电池的充放电功率(充电为正,放电为负);  $P_{ev}(t)$  为在  $t$  时刻在充电站内电动汽车的充电功率;  $P_{pv}(t)$  为光伏在  $t$  时刻的发电功率;

$P_G(t)$  为在  $t$  时刻从电网购买电力。

通过式(1)和式(2)可知,光储充系统的充放电功率平衡优化可以提高光伏系统的整体效率和性能,既可以通过调整利用储能电池充放电功率,可以实现最大限度的消纳光伏发电功率,降低绿色能源的浪费,又可以提高充电速度和效率,提高能源利用效率,实现节能环保目标。同时,以光储充系统充放电功率平衡方法为核心地进行光储充系统高效控制与储能管理,提高光储充系统的经济性与稳定性。

## 3 配置优化模型

基于光储充系统的运行模式与充放电功率平衡分析,以储能初始投资成本、弃光费用及电网购电费用作为光储充系统的优化目标。其光储充系统运行总费用为

$$\min C = \min(C_0 + C_a W_a + C_b P_b + C_c P_c + \mu P(t) \Delta t) \quad (3)$$

其中,  $C$  为光储充系统运行总费用;  $C_0$  为初始投资费用(不包含储能系统);  $C_a$  为储能单位容量的投资费用;  $W_a$  为储能系统额定容量;  $C_b$  为储能系统单位功率的充放电成本;  $P_b$  为储能系统额定充放电功率;  $C_c$  为弃光成本系数;  $P_c$  为光伏发电弃电功率;  $\mu$  为第  $t$  时段电网电价;  $P(t)$  为第  $t$  时段电网与系统的平均功率;  $\Delta t$  为第  $t$  时段的时长。

在光储充系统运行优化过程中,需要满足以下约束条件。1)以储能电池为核心的充放电功率平衡;2)系统实际波动率必须小于等于系统允许的最大波动率。

本文采用自适应策略的粒子群优化算法解决配置优化过程中的多目标优化难题,该方法既能够根据搜索过程中的表现动态调整算法的参数和策略,使其适应不同的问题特性和搜索状态,增强了算法的灵活性和鲁棒性,又能通过自适应策略的调整,在搜索过程中平衡探索和利用的能力,从而加速算法的收敛速度,可以更快地找到接近全局最优解的解决方案。具体计算过程如下所示。

1) 初始化。设置粒子个数、搜索空间范围和初始速度等参数。

2) 计算适应度。根据问题的目标函数,计算每个粒子的适应度值。

3) 更新全局最佳位置。选取适应度最优的位置作为全局最佳位置。

4) 更新速度和位置。根据速度更新公式,计算每个粒子的新速度和位置。

其速度更新公式为

$$v(t+1) = w \times v(t) + c1 \times (p_{best} - x(t)) + c2 \times (g_{best} - x(t)) \quad (4)$$

其中,  $v(t+1)$  表示新速度,  $w$  为惯性权重系数,  $c1$  和  $c2$  为学习因子,  $p_{best}$  为个体最佳位置,  $g_{best}$  为全局最佳位置,  $x(t)$  为当前位置。

5) 自适应策略调整。根据自适应策略,调整算法的参数和策略,如惯性权重  $w$ 、学习因子  $c1$  和  $c2$  等。

6) 更新个体最佳位置。计算每个粒子的适应度值,如果新的适应度值优于个体最佳位置的适应度值,则更新个体最佳位置。

7) 终止条件判断。判断是否满足终止条件,如达到最大迭代次数或目标函数值达到预定阈值。如果满足,则跳转到步骤 9;否则,继续进行下一步。

8) 返回步骤 3,重复步骤 3 至步骤 7,直到满足终止条件。

9) 输出结果。输出全局最佳位置所对应的解作为算法的结果。

## 4 算例分析

### 4.1 基础数据

光储充系统服务对象主要为电动汽车和居民用电,本文采用蒙特卡洛算法对电动汽车无序充电与居民用电行为进行模拟,获取的用电负荷数据如图 2 所示。从图 2 可知,电动汽车充电负荷峰值(负荷为 451.12 kW)出现在 5 点左右,低谷值(负荷为 386.78 kW)出现在 21 点左右;居民用电负荷曲线峰谷差值为 37.4 kW,曲线比较平滑。

### 4.2 算例参数

光储充系统中的储能包括初始投资与运行成本,在计算过程中假设储能额定放电功率在  $0.6 \sim 2.0 \text{ V} \cdot \text{A}$  之间、储能放电效率为 90%、储能额定放电循环次数为 4 000 次。同时,储能成本计算过程还涉及储能单位容量成本、储能放电效率等参数,具体参数如表 1 所示,其中分布式光伏上网电价为 0.42 元/kWh(包含上网电价与发电补贴)。

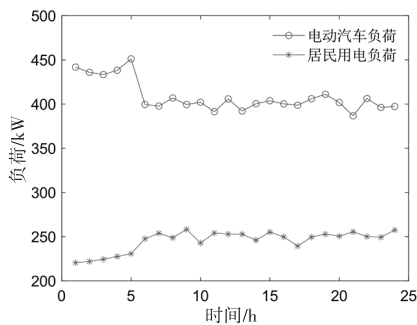


图 2 典型日负荷曲线

表 1 计算参数表

参量	单位	数值
储能单位容量成本	元/kWh	600
储能运行维护费用率	%	3
储能放电效率	%	90
储能额定放电功率	A · H	0.5~2.0
储能单位功率成本	元/kWh	300
储能充电效率	%	90
储能额定放电深度下循环次数	次	3 000
调度周期	h	1

### 4.3 优化结果

在光储充系统配置优化过程中,采用粒子群算法进行计算,在计算过程中设置粒子群为 20、迭代次数为 100、惯性

权重为 0.9、惯性权重结束值为 0.4。应用蒙特卡洛仿真获取的复合数据,共配置 8 台 50 kW 直流充电充电桩,设定光伏安装容量上限为 800 kW,储能容量上限为 1 500 kWh。应用 MATLAB 软件与算例参数获得的储能模型的配置分布见图 3 和图 4 所示。

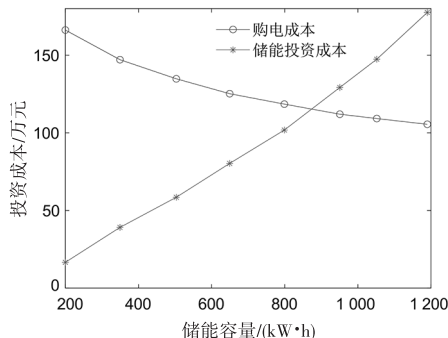


图 3 投资成本、购电成本与储能容量关系图

由图 3 可知,储能投资成本与储能容量成线性关系,购电成本在储能容量 200~600 kWh 时,购电成本随着储能容量增加而快速减少,在 600 kWh 以后购电成本减少缓慢,如果仅是以储能投资成本或购电成本为主要优化目标,会造成光储充系统购电成本或储能投资成本巨大,光储充系统的社会效益与经济效益比较差,不利于新能源的推广应用。

在光储充系统配置优化过程中,为了验证光储充系统中的光伏与储能配置关系,本文采用了粒子群算法求解配置模型,结果如图 4 所示,其展示了经过粒子群算法得到的光伏占比与储能投资成本的曲线。由图 4 可知,仅从投资成本考虑,光伏比例将会很小,不能提高绿色能源占比,造成光伏资源浪费;如果考虑绿色能源供给与弃光成本,配置合理的储能容量将会大幅提高光储充系统的经济效益。

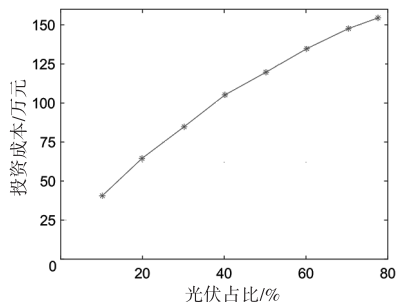


图 4 光伏占用比与储能投资成本的关系曲线

以光储充系统投资成本、弃光成本为配置优化目标,结合图 3 与图 4 结果,计算分析 3 种配置优劣,其结果如表 2 所示。

表 2 分析不同配置方案

参数	配置一	配置二	配置三
储能与光伏容量比	10	50	80
储能能量/(kW · h)	50	100	200
投运成本/万元	300	500	900
弃光成本/万元	50	5	4

(下转第 83 页)