

考虑电动汽车接入的微电网优化调度问题

闫雪凝, 马 良

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2024年4月15日; 录用日期: 2024年6月22日; 发布日期: 2024年6月30日

摘 要

现阶段能源供需和环保低碳问题受到了全球的广泛关注, 而可再生能源发电系统与电动汽车大规模接入电网面临着巨大的挑战。本文综合考虑电动汽车行驶特性和电池储能的折旧费用, 在考虑实时电价的前提下, 建立以最小化电网运行成本、最小化电动汽车车主充放电成本的微电网多目标优化调度数学模型。在NMAOA算法的基础上, 引入随机参数改进概率系数MOP, 提升寻优效果; 并引入多样性测度惯性权重, 优化探索性能。同时使用NMAOA-IW算法与MOPSO算法、MOAOA算法求解相同算例。最终实例结果验证了NMAOA-IW算法的有效性; 也证明了微电网在电动汽车有序充放电模式下的经济优势、柔性负荷调度的有效性; 从而验证了调度运行策略和优化调度模型的合理性。

关键词

电动汽车, 微电网优化调度, 多目标算术优化算法

Optimal Scheduling Problem for Microgrids Considering Electric Vehicle Access

Xuening Yan, Liang Ma

Business School, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai

Received: Apr. 15th, 2024; accepted: Jun. 22nd, 2024; published: Jun. 30th, 2024

Abstract

At the present stage, energy supply and demand and environmental protection and low-carbon issues have received extensive global attention, while renewable energy power generation systems and electric vehicles are facing great challenges for large-scale access to the power grid. In this paper, taking into account the driving characteristics of electric vehicles and the depreciation cost of battery storage, a mathematical model of multi-objective optimal scheduling for microgrids is established to minimise the operating cost of the grid and the charging and discharging cost of

the electric vehicle owners, under the premise of considering the real-time electricity price. On the basis of NMAOA algorithm, stochastic parameters are introduced to improve the probability coefficient MOP to enhance the effect of optimisation search; and diversity measure inertia weights are introduced to optimise the exploration performance. Meanwhile, the NMAOA-IW algorithm is used to solve the same instances with MOPSO algorithm and MOAOA algorithm. The final example results verify the effectiveness of the NMAOA-IW algorithm; they also demonstrate the economic advantages of microgrids in the EV orderly charging and discharging mode, and the effectiveness of flexible load scheduling; thus, they verify the reasonableness of the scheduling and operation strategy and the optimal scheduling model.

Keywords

Electric Vehicles, Microgrid Optimal Scheduling, Multi-Objective Arithmetic Optimization Algorithm

Copyright © 2024 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

随着电力系统的智能化发展和电动汽车的大量普及,使微电网成为未来能源发展的一个重要方向。电动汽车在微电网体系中扮演着革新性的角色,它不仅是一种创新的移动式储能单元,还在平衡电网负载等多个方面发挥着关键作用。但由于其不可预测性,对电网构成了挑战。不过,作为一种分布式电源,电动汽车可以与微电网进行互动,实现能源的双向流动,提高能源利用效率。因此,研究电动汽车参与的微电网对于提高电力系统的稳定性和可靠性、推动能源转型、实现双碳目标具有重要意义。

现已有许多文献深入研究电动汽车与微电网的交互机制、控制策略和优化算法等方面的问题,以促进微电网技术的发展和运用,实现清洁、高效、可持续的能源供应。文献[1]建立了包含微电网运行成本、电动汽车用户充放电成本的多目标函数,采用基于 Levy 飞行改进的 NSGA-II 算法对系统进行优化调度。文献[2]构建了在分时电价和需求侧响应机制下的光伏微电网多目标优化模型;文献[3]建立考虑电动汽车和各种柔性负荷的“源-网-荷-储”微电网典型拓扑结构,通过 CPLEX 工具箱仿真;文献[4]建立了基于峰谷分时电价的有序充放电负荷模型,采用改进遗传算法进行优化求解;文献[5]建立计及电动汽车有序充放电行为和车主综合满意度的 NEMG 多目标分层调度数学模型,并提出基于可信度的三黑洞系统捕获策略多目标粒子群优化算法;文献[6]提出了电动汽车入网技术下两阶段优化方法,并采用改进型多目标粒子群算法进行求解。此外结合天牛须算法的改进蜂群算法[7]、改进樽海鞘算法[8]、反向扰动学习布谷鸟算法[9]等算法也被用来求解考虑电动汽车接入的微电网优化调度问题。上述文献研究均展示了一定的研究成果,然而这些研究在考虑各种因素时存在一定的局限性,未能全面考虑电动汽车接入后的负荷变化、可再生能源的出力预测以及储能设备的运行策略等多种影响因素。因此,为更好地解决该问题,有必要充分考虑上述因素,建立更全面的模型,并通过优化更新方程和增加策略的方式改进算法,实现对最优解的快速寻找,从而提高微电网的运行效率和经济性。

本文以一个小型微电网为研究对象,该微电网包含光伏(PV)、风轮机(WT)、微型燃气轮机(MT)、蓄电池(BT)、电动汽车(EV)及基本用电负荷。深入分析电动汽车的充电使用特性,在考虑实时电价的前提下调度电动汽车的充放电以减少功率波动。同时,综合考虑微网总运维成本、环境影响和电动汽车车主

充放电成本, 以实现多目标优化调度。在满足各种约束条件下, 提出了含惯性权重的新型多目标算术优化算法(Novel multi-objective arithmetic optimization algorithm with inertia weights, NMAOA-IW)。引入随机参数改进概率系数 MOP, 提升寻优效果; 并引入多样性测度惯性权重策略, 优化探索性能。最后采用改进的新型算术优化算法进行仿真实验, 来计算每个可控发电单元的功率输出。以评估微电网在实施电动汽车有序充放电模式时的经济性, 从而验证了本文调度策略在实际环境中的有效性。

2. 电动汽车负荷建模

电动汽车将成为未来储能的重要组成。为了进一步降低微电网与上级电网并网功率的波动性、提升能源系统效率和降低成本, 考虑将电动汽车作为分布式储能设施。

本文聚焦于研究标准慢速充电的电动汽车, 选取了具有 25 kWh 容量的锂离子电池进行研究。为了优化电池寿命, 本文将电池荷电状态(SOC)的充电界限设定在 10%至 90%之间, 电动汽车充电示意图如图 1 所示。结合对电动车驾驶模式的深入分析, 采用蒙特卡洛方法对单个电动车的充电行为进行随机模拟, 并构建了电动汽车的充电优化调度模型。由于驾驶习惯对电动车每日行驶距离和充放电周期有显著影响, 因此, 通过数据拟合得出结论: 电动车的每日行驶距离呈对数正态分布, 其概率密度函数如公式(1)所示:

$$f_d(x) = \frac{1}{x\sigma_d\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu_d)^2}{2\sigma_d^2}\right] \quad (1)$$

式中: $\mu_d = 3.20$; $\sigma_d = 0.88$ 。

锂电池在充电至 90%的安全约束条件下, 用户的日常通勤需求便可得到高度满足。此外, 在缺乏有序充电策略的情况下, 电动汽车在充电行为中表现出明显的峰谷分布现象, 因直接受到用户充电习惯的影响: 其中上午 8 点至中午 12 点, 多数车辆需要停放且充电需求较为有限; 而晚间 18 点至 22 点则成为充电需求高峰时段, 此时许多用户已经从工作中返回家中准备为其车辆进行充电[6]。

参考电动汽车充电行为服从正态分布, 将电动汽车开始充电时刻用公式(2)表示如下:

$$f_s(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_s\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right], & \mu_s - 12 < x \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_s\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x + 24 - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right], & 0 < x \leq \mu_s - 12 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mu_d = 17.6$; $\sigma_d = 3.4$ 。

电动汽车接入微电网后, 当各分布式电源可满足负荷需求, 且电动汽车电池还未充满时, 电动汽车充电以补充电池的电量, 其荷电状态表示为公式(3); 当个分布式电源无法满足电网需求, 且电动汽车电池电量富足时, 电动汽车放电将储存的电能回馈给电网, 为电网提供电力支持, 其荷电状态表示为公式(4)。

$$SOC_{EV}(t) = SOC_{EV}(t-1) + \frac{t_c}{t_{\max_c}} SOC_{\max} \quad (3)$$

$$SOC_{EV}(t) = SOC_{EV}(t-1) - \frac{t_d}{t_{\max_d}} SOC_{\max} \quad (4)$$

式中: $SOC_{EV}(t)$ —— t 时刻电动汽车的荷电量; $SOC_{EV}(t-1)$ —— $t-1$ 时刻电动汽车的荷电量; $SOC_{\max}$ ——电动汽车充满电时的最大荷电量; t_c ——电动汽车的实际充电时长; $t_{\max_c}$ ——电动汽车的最大充电时

长; t_d ——电动汽车的实际放电时长; $t_{\max_d}$ ——电动汽车的最大放电时长。

电动汽车的实际充电时长 t_c 为式(5); 而电动汽车的实际放电时长 t_d 表示为式(6)。

$$t_c = \frac{L_{EV} W_{100}}{100 P_{\text{charge}} \eta} \quad (5)$$

$$t_d = \frac{SOC_{\max} - SOC_{EV,t}}{P_{\text{discharge}} \eta} C_{EV} \quad (6)$$

式中: L_{EV} ——电动汽车实际的日行驶里程; W_{100} ——每 100 千米的电动汽车耗电量; P_{charge} ——电动汽车的标准充电功率; $P_{\text{discharge}}$ ——电动汽车的标准放电功率; η ——电动汽车充放电效率; C_{EV} ——电动汽车的电池容量值。

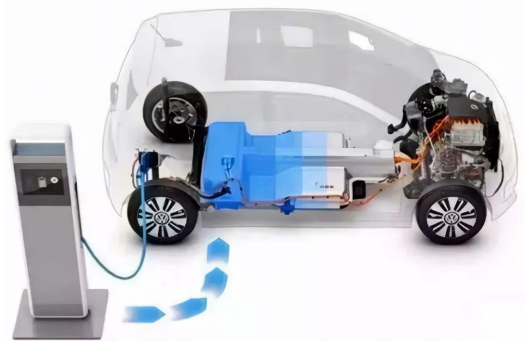


Figure 1. Electric vehicle charging schematic
图 1. 电动汽车充电示意图

3. 考虑电动汽车接入的微电网优化调度模型

3.1. 模型假设

基于以上对电动汽车接入微电网结构的分析, 建立相应优化调度问题模型, 总体原则及假设条件如下:

- 1) 假设微电网中的主要负荷及电动汽车负荷的分布特性已知;
- 2) 假设微电网与负荷侧利益一致, 因此将微电网和负荷侧视为一个统一的实体。基于这一假设, 微电网内部的能量转移不考虑成本核算, 仅将焦点放在该整体与外部配电网进行的电能买卖交易成本上;
- 3) 由于目前电动汽车充电普遍采用的是初始恒流阶段随后过渡到恒压阶段的模式, 且普遍情况下, 恒流充电阶段是荷电状态 SOC 增长的主要阶段, 充电功率基本维持不变, 所以本文以恒功率充电计算电动汽车充电功率;

4) 由于电池储能的放电深度会对其使用寿命产生直接影响, 放电深度的增加导致储能设备的使用寿命相应缩短, 这一过程会间接提高微电网系统的整体运行成本。因此, 本文将电池的损耗成本纳入到微电网的总运营费用中, 与运行成本共同考量, 以实现综合成本效益的最优化[10];

5) 电动汽车车主成本, 主要是由汽车充电所需电费减去将多余的电卖给电网的所获收益。这样可以使车主考虑电价, 而进行合理充放电, 因此将它构成多目标优化问题的另一个目标。

3.2. 目标函数

当电动汽车接入微电网的时候, 不光要考虑微电网本身的运行成本, 要考虑电动汽车车主的车辆充放电成本, 同时还要考虑到柔性负荷补偿。因此基于以上模型假设和因素考虑, 建立了如下微电网优化

模型。

公式(7)为最小化微电网综合运行成本函数; 公式(8)到式(13) C_{GRID} 、 C_{MT} 、 C_{OM} 、 C_{EV} 、 C_{LC} 、 C_{CE} 分别为微网与主电网交易成本、微型燃气轮机燃料成本、各发电装置的运维成本、电动汽车电池折旧费用、柔性负荷补偿成本及购售电偏差罚款; 公式(14)为最小化电动汽车车主充放电成本。具体公式如下:

$$F_1 = \min(C_{GRID} + C_{MT} + C_{OM} + C_{EV} + C_{LC} + C_{CE}) \quad (7)$$

$$C_{GRID} = \sum_{t=1}^T (p_{buy}(t)P_{buy}(t) - p_{sell}(t)P_{sell}(t)) \quad (8)$$

$$C_{MT} = \sum_t \frac{c_{fuel}P_{MT}(t)}{LHV\eta_{MT}} \quad (9)$$

$$C_{OM} = \sum_i \sum_t K_i^{OM} P_i(t) \Delta t \quad (10)$$

$$C_{EV} = \sum_j \sum_t c_{EV} (P_{EV,j}^{cha}(t) + P_{EV,j}^{dis}(t)) \Delta t \quad (11)$$

$$C_{LC} = \sum_t \left[0.5k_{shift}(t)(P_{shift}(t) - P_{load}(t)) + k_{il}(t)P_{il}(t) \right] \quad (12)$$

$$C_{CE} = 1000 \sum_t \left((p_{buy}(t) - p_{buyda}(t))^2 + (p_{sell}(t) - p_{sellda}(t))^2 \right) \quad (13)$$

$$F_2 = \min \sum_t \sum_j (p_{buy}(t)P_{EV,j}^{cha}(t) - p_{sell}(t)P_{EV,j}^{dis}(t)) \quad (14)$$

式中: $P_{buy}(t)$ —— t 时段微电网从主电网购入的电量; $P_{sell}(t)$ —— t 时段微电网给主电网售卖的电量; $p_{buy}(t)$ —— t 时段微电网从主电网购入的电价; $p_{sell}(t)$ —— t 时段微电网给主电网售卖的电价; $P_{MT}(t)$ —— t 时段微型燃气轮机发电功率的预测值; c_{fuel} ——燃料气体单价; LHV ——天然气低热值; η_{MT} ——微型燃气轮机的工作效率值, 其值与 $P_{WT}(t)$ 呈三次函数关系; K_i^{OM} ——第 i 个分布式电源的单位运行维护成本; $P_i(t)$ ——第 i 分布式电源的实际输出; J ——电动汽车数量; $P_{EV,j}^{cha}(t)$ —— t 时段第 j 个电动汽车的充电功率值; $P_{EV,j}^{dis}(t)$ —— t 时段第 j 个电动汽车的放电功率值; c_{EV} ——电动汽车储能电池补偿系数; $P_{shift}(t)$ ——柔性负荷中 t 时段的可转移负荷功率; $P_{il}(t)$ ——柔性负荷中 t 时段的可中断负荷功率; $P_{load}(t)$ —— t 时段的微电网预测的总负荷功率; k_{shift} ——柔性负荷中可转移负荷功率补偿价格; k_{il} ——柔性负荷中可中断负荷功率补偿价格; $p_{buyda}(t)$ ——通过日前调度预测, 在 t 时段微电网从主电网计划购入的电量; $p_{sellda}(t)$ ——通过日前调度预测, 在 t 时段微电网计划给主电网售卖的电量。

3.3. 约束条件

式(15)为功率平衡约束; 式(16)、(17)电网交互功率约束, 也就是对微电网对主电网购售电量进行限制; 式(18)、(19)为在微电网调度过程中对可转移负荷和可中断负荷, 这两种柔性负荷的功率约束; 式(20)为储能能量约束; 式(21)为电动汽车电池容量约束。具体公式如下:

$$P_{shift} + P_{sell} + \sum_j P_{EV,j}^{cha} = \sum_i P_i + \sum_j P_{EV,j}^{dis} + P_{il} + P_{buy} \quad (15)$$

$$0 \leq P_{sell}(t) \leq Q_{sellmax} \quad (16)$$

$$0 \leq P_{buy}(t) \leq Q_{buymax} \quad (17)$$

$$0 \leq P_{il}(t) \leq k_{il}pload(t) \quad (18)$$

$$0 \leq P_{shift}(t) \leq k_{shift}pload(t) \quad (19)$$

$$SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max} \quad (20)$$

$$SOC_{EV,\min} \leq SOC_{EV}(t) \leq SOC_{EV,\max} \quad (21)$$

式中: Q_{buymax} ——购电量的最大值; $Q_{sellmax}$ ——售电量的最大值; $SOC(t)$ —— t 时段储能装置的荷电状态值; $SOC_{\min}$ ——储能装置荷电状态的最小值; $SOC_{\max}$ ——储能装置荷电状态的最大值; $SOC_{EV}(t)$ —— t 时段第 j 个电动汽车的电池荷电状态值; $SOC_{EV,\min}$ ——第 j 个电动汽车储能电池荷电状态的最小值; $SOC_{EV,\max}$ ——第 j 个电动汽车储能电池荷电状态的最大值。

4. 改进多目标算术优化算法

改进多目标算术优化算法(NMAOA-IW 算法)是提出传统算术优化算法的多目标形式, 并优化改进而产生的一种新型启发式算法。通过算术运算实现全局搜索和局部开发的平衡, 具有简单、高效的特点。该算法在多目标优化问题中具有广泛的应用前景, 尤其适用于那些需要同时优化多个相互冲突的目标的问题。

4.1. 算术优化算法

在传统的算术优化算法中, 算法通过数学函数加速器(Math Optimizer Accelerated, MOA)选择优化策略, 与 MOA 类似, 算法中还添加了一个定义迭代过程中开发精度的概率系数(Math Optimizer probability, MOP)。在 MOA 和 MOP 更新到在勘探和开发之间的变化后, 创建一个名为 r_1 的随机数。将整个过程分为探索和开发, 即利用乘除运算进行全局探索, 利用加减运算进行局部开发。

$$MOA(t) = \min + t \left(\frac{\max - \min}{T_{\max}} \right) \quad (22)$$

$$MOP(t) = 1 - \frac{t^{\frac{1}{\alpha}}}{T_{\max}^{\frac{1}{\alpha}}} \quad (23)$$

$$X(t+1) = \begin{cases} X_{best}(t) \div (MOP + \varepsilon) \times ((UB - LB) \times \mu + LB), & r_2 < 0.5 \\ X_{best}(t) \times MOP \times ((UB - LB) \times \mu + LB), & r_2 \geq 0.5 \end{cases} \quad (24)$$

$$X(t+1) = \begin{cases} X_{best}(t) - MOP \times ((UB - LB) \times \mu + LB), & r_3 < 0.5 \\ X_{best}(t) + MOP \times ((UB - LB) \times \mu + LB), & r_3 \geq 0.5 \end{cases} \quad (25)$$

式(22)中 t 为最新迭代次数, $T_{\max}$ 为最大迭代次数, $\min/\max$ 为绑定数学优化加速系数的最小值和最大值; 式(23)中, α 是敏感参数; 式(24)和(25)中 r_2, r_3 均为 $[0, 1]$ 内一随机数, $X_{best}(t)$ 是最优个体的位置, UB, LB 分别为搜索空间内个体的上、下限。 μ 是调整搜索过程的控制参数, 通常取值为 0.499, ε 是一个非常小的整数值, 为随机比例系数。

4.2. 算法改进策略

为了避免算法过早收敛, 在策略中引入了由余弦系数控制的非线性惯性权重, 来动态调节算法的边界。改进后的算法将式(22)变为式(26):

$$MOA(t) = \max - \cos\left(\frac{2}{\pi} \times \frac{t}{T_{\max}}\right) (\max - \min) \quad (26)$$

针对寻优效率低的情况, 在全局勘探和局部开发这两轮搜寻过程之后, 引入了随机偏差扰动策略, 如式(27)和(28)所示。再次运用随即搜索策略寻找最优个体, 保证个体多样性。对于生成的邻域位置, 运用贪婪思想判断其保留的必要性, 对比下来如果发现附近有更优解, 那就将次优的位置替换掉, 反之保持不变[11]。

$$\tilde{X}(t) = \begin{cases} X_{best}(t) + \frac{\varepsilon}{2} X_{best}(t), & r_4 < 0.5 \\ X_{best}(t), & r_4 \geq 0.5 \end{cases} \quad (27)$$

$$X_{best}(t) = \begin{cases} \tilde{X}(t), & f(\tilde{X}(t)) < f(X_{best}(t)) \\ X_{best}(t), & f(X_{best}(t)) \leq f(\tilde{X}(t)) \end{cases} \quad (28)$$

传统算法具有调节参数少、结构简单、输出性强等特点, 在一些复杂环境中收敛精度低, 难以获取全局最优解。为了更有效地在搜索空间内获取可行解, 在算术优化算法中引入惯性权重。式(24)变为式(29):

$$X(t+1) = \begin{cases} X_{best}(t) \div (MOP + \varepsilon) \times ((UB - LB) \times \mu + LB) + (1 - \omega)(X_{best}(t) - X(t)), & r_2 < 0.5 \\ X_{best}(t) \times MOP \times ((UB - LB) \times \mu + LB) + (1 - \omega)(X_{best}(t) - X(t)), & r_2 \geq 0.5 \end{cases} \quad (29)$$

$$X_{best}(t) = \begin{cases} \tilde{X}(t), & f(\tilde{X}(t)) < f(X_{best}(t)) \\ X_{best}(t), & f(X_{best}(t)) \leq f(\tilde{X}(t)) \end{cases} \quad (30)$$

式(30)中, ω 为惯性权重, h 为多样性测度系数。

4.3. 算法流程

为了更加详细地描述算法, 下面对 NMAOA-IW 算法的流程进行展示, 该算法的具体流程包括以下几个步骤[12] [13]:

步骤 1: 初始化参数。首先确定微电网优化调度问题的目标函数和约束条件, 为每个目标函数和约束条件设定初始参数值。然后进行种群初始化, 随机生成初始种群并将其存储到矩阵中。

步骤 2: 计算目标函数值。根据当前的参数值, 计算每个目标函数的值。如果有多个目标函数, 则需要计算每个目标函数的值。

步骤 3: 确定非支配解。比较所有目标函数的值, 确定哪些解是支配解(即对应的目标函数值最优), 哪些解是非支配解(即存在更优的解)。确定初始种群中的非支配解集, 将这些解集合存入外部档案中。去除非 Pareto 解, 并检查外部档案的容量是否超出了预设的限制。若超过, 采用自适应网格法来计算个体的拥挤程度, 并基于这一度量筛选出适宜的个体。

步骤 4: 选择优化策略。根据解的支配关系, 选择合适的优化策略。如果当前解是支配解, 则选择开发策略; 否则, 选择探索策略。

步骤 5: 更新解。根据选择的优化策略, 利用改进的算术运算迭代方程对当前解进行更新。在全局搜索阶段, 探索策略主要通过乘除运算来扩大搜索范围, 而在局部搜索阶段, 开发策略则通过加减运算来细致地挖掘最优解。

步骤 6: 迭代更新。重复上述步骤, 直到达到终止条件, 如达到预设的最大迭代次数或解的质量满

足要求。

步骤 7: 输出结果。最终得到一组非支配解集, 为决策者提供多种选择。最后根据问题的目标性质, 选择在目标函数之间产生最佳权衡的解决方案作为最终解决方案。

5. 算例分析

5.1. 算例背景

本节以某面向居民住宅的小型微电网系统为研究对象, 调度周期设为 1 天(24 小时)。其中, 微电网系统包括:

- 1) 光伏电池、风力发电机, 由于均属可再生能源发电装置, 视为零发电成本且无污染排放。风机和光伏发电装置输出的有功功率由温度、光照强度和风速的不确定性预测数据计算。为着重研究算法调度过程, 本文将省略不确定性计算过程, 利用预测统计得到某日内输出功率分布如图 2 所示。
- 2) 储能装置, 微型燃气轮机等发电单元, 其输出功率上限分别为 2 MW, 3.3 MW。
- 3) 居民用电需求以及电动汽车的充电需求被纳入考量。V2G 模式下放电状态的电动汽车视为电源, 设该区域内共有电动汽车 4 辆, 充放电功率均为 2.5 kW。同时, 我们收集并分析了该住宅区在某一特定日子的用电负荷数据, 如图 3 所示。
- 4) 若微电网发电单元输出电能总和仍不能满足用户需求时, 用户需从主网购电。在没有动态电价机制的情况下, 用户的充电行为不受引导, 电动汽车将处于无序充电状态, 此时的购电价格被统一设定为 0.65 元/kWh; 而实施峰谷分时电价政策能有效地引导电动汽车进行有序的充放电, 根据不同时间段的电价分别设为 price-p = 1.041 元/kWh、price-f = 0.659 元/kWh、price-v = 0.277 元/kWh。

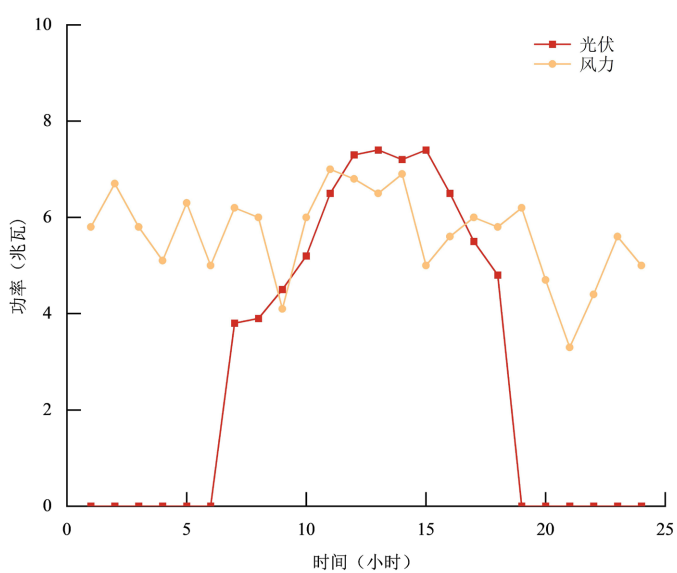


Figure 2. Photovoltaic and wind turbine power forecasts
图 2. 光伏和风机功率预测图

风力发电受自然条件的影响而产生的电力输出表现出显著的波动性, 这种波动性主要表现在电力输出的日内波动以及季节性变化上, 其中日变化率和季节变化率尤为突出。通过对风光发电的日前预测, 可以准确预估的风力发电量, 从而为电网调度提供有效的依据。优化的调度方案可以合理安排当日风力

发电的送电计划, 使得电网的运行更加稳定和可靠。

根据观察图 2 发现, 风力发电曲线符合夏季变化规律, 白天风速相对较为稳定而不大波动, 而在晚上相比也没什么变化, 波动不明显, 但在 22 点时达到预测低谷值。同时观察可发现, 光伏发电曲线也相对符合季节特征。由于人们的作息习惯通常是日出而作日落而息, 因此光伏发电设备的输出时间为 6:00~19:00, 峰值出现在 12:00 左右, 此时光照强度最大。

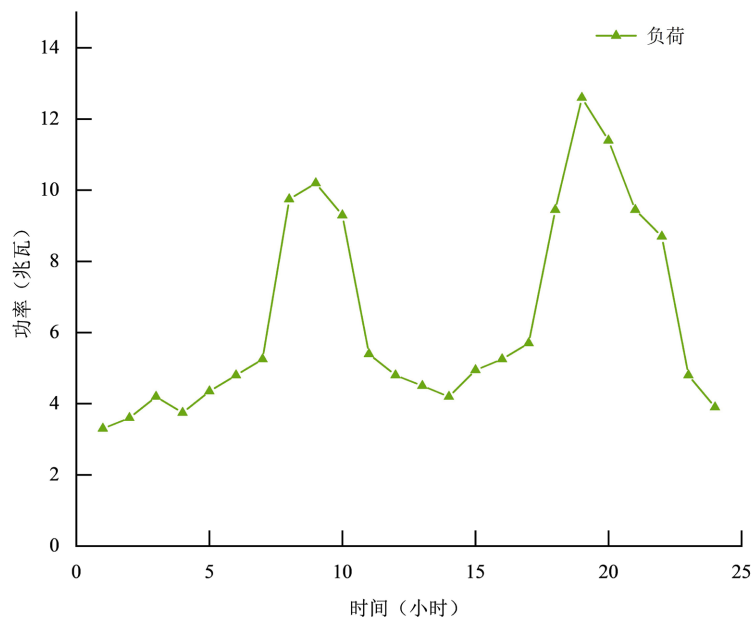


Figure 3. Daily load forecast curve
图 3. 日负荷预测曲线图

从图 3 可以观察到, 每天的负荷最值集中出现在上午 9 点和晚上 7 点之间, 这两个时段正处于上下班高峰期。电动汽车作为电力系统的一种负载, 其充电行为直接影响着电网的负荷曲线。在上下班高峰期, 电动汽车的集中充电可能导致电网负荷瞬间超过其承受能力。因此, 应当重视电动汽车充电的管理和调度, 以避免对电网造成过大的冲击, 保证电网的正常运行和可靠供电。

5.2. 算法比较

在上节中, 预测得到的基础负荷、光伏出力和风机出力共同构成净负荷。在确定总负荷的电能需求后, 将出力大小作为待求解变量, 采用改进算术优化算法对微电网优化调度运行问题进行求解。NMAOA-IW (算法 1) 相关参数设置如下: 种群数量 POP 为 100, 最大迭代次数为 200, 变异率为 0.1, 优化时间周期为 24 h。

为了验证算法的优越性, 本章选择用 MOAOA (算法 2) 和 MOPSO (算法 3) 作为对比算法, 对比算法的各项参数均与 NMAOA-IW 算法保持一致。求解得到的 Pareto 前沿如图 4 所示: 其中算法 1 的非支配方案所对应的电网综合成本分布在 500,000~730,000 元、电动汽车车主充放电成本分布在 -120~0 元, 即电动汽车车主参与电网调度充放电产生的收益分布在 0~120 元。

本文从经济性和有效性两个角度出发, 深入比较并探讨算法 1 相较于算法 2、3 的优势。从经济性的角度来看, 算法 1 在综合成本相等的情况下能够为车主带来更多的收益。这一优势能够激励电动汽车参

与电网互动, 根据电网的负荷情况调整充电时间或功率, 实现错峰充电, 从而有效减少对电网的冲击。此外, 算法 1 还能提高电网对电动汽车充电行为的适应性, 有效地避免了电网波动的潜在影响。

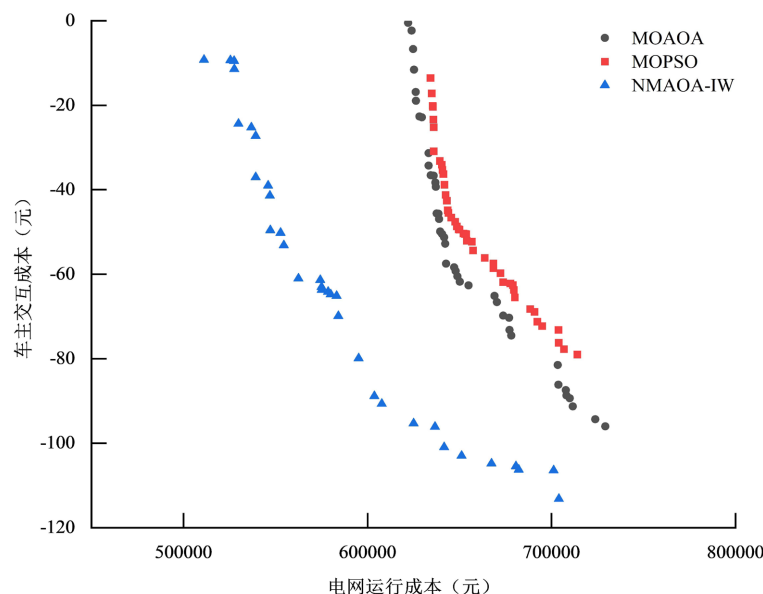


Figure 4. Basic scheduling results for aggregation units
图 4. 不同算法的帕累托最优前沿

其次, 从算法的有效性来看, 本文通过精确的实验设计验证了三种优化算法所产出的 Pareto 前沿解集的差异性和多样性。通过细致的比较和分析, 发现算法 1 能够探索更广泛的解空间, 这得益于其出色的搜索能力。此外, 算法 1 生成的 Pareto 解集分布更为均匀, 使得非支配解在目标函数空间中得到了更平均的覆盖。其次, 算法 1 在稳定性方面的表现也尤为突出。观察图 4 中蓝色曲线数据点的分布, 主要集中在较低的运行成本范围内, 表明该算法在大多数情况下都能实现较低的运行成本。随着迭代次数的增加, 算法 1 的解集中的非支配解逐渐收敛到同一个集合中, 表明其能够逐渐逼近多目标优化问题的最优解。

5.3. 实例分析

经过对 Pareto 前沿的筛选, 最终选取了(641676.02 元, -100.92 元)作为最优解, 根据该解进行电动汽车在实时电价下的有序充放电模式的微电网优化调度, 同时提出了储能优化方案和可转移负荷响应方案。其中, 微电网优化调度结果、储能优化结果、可转移负荷响应结果分别通过图 5~7 所示。通过对优化调度结果的分析可以看出, 所提出的方案在实现微电网优化调度的同时还最大程度地利用储能和可转移负荷资源, 降低能源消耗, 提高电网整体效率。

通过分析图 5, 我们可以清楚地看到, 聚合单元基本调度结果在算法优化后, 调度表现相对改善很多。在用电低谷阶段(23:00~6:00), 用电需求较少, 风光发电可以满足负荷需求, 大部分时间储能装置都处于充电状态。在用电高峰阶段(7:00~11:00; 18:00~22:00), 清洁能源的发电量无法满足实际需求, 柴油机装置也进入发电状态, 此时储能装置进行相应的放电来降低负荷尖峰。该操作可以帮助降低微电网的综合运行成本和污染气体的排放。在其他时段根据电网内需求关系, 配合其他组件自由调节充放电, 储能装置用以维持频率和电压来均衡供需[14]。

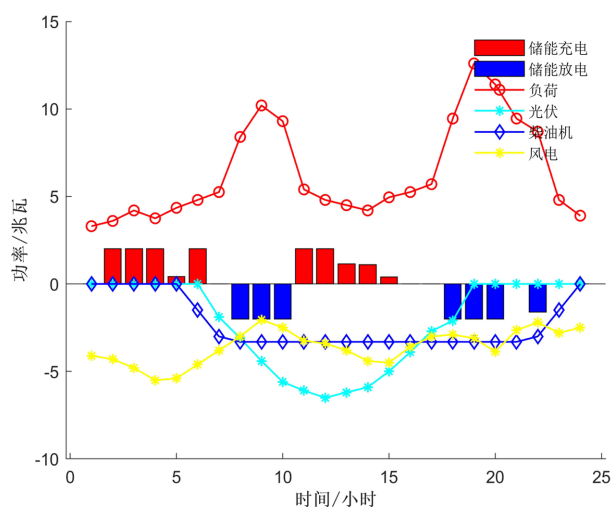


Figure 5. Basic scheduling results for aggregation units
图 5. 聚合单元基本调度结果

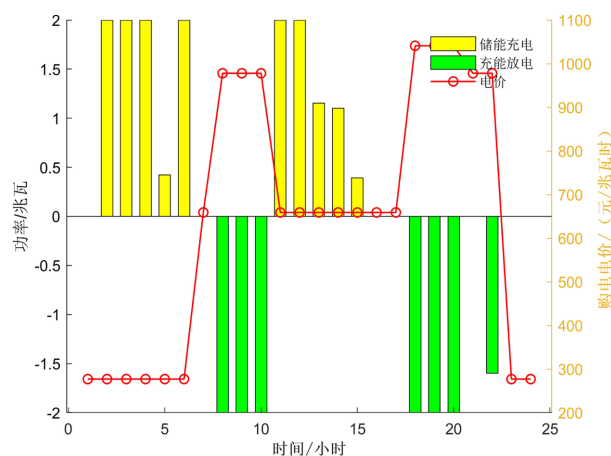


Figure 6. Energy storage optimization results
图 6. 储能优化结果

由图 6 可知, 分时电价的引入将有助于实现了负荷合理转移, 同时, 也能够有效对储能充放电策略进行地合理有序安排。这意味着分时电价可以促进能源的高效利用, 进一步提高电力系统的运行效率, 降低能源成本, 为能源结构的优化和可持续发展提供了有力的支持。也有效的降低了电网负荷峰值, 保障电力系统稳定和安全运行, 提升系统整体利用效率。充分利用电动汽车的电能双向性, 通过提倡用户在电力需求较低的时段进行充电, 并在需求高峰时放电, 以此策略避免在高峰时段发生电力过载现象。

同时观察图 7 发现, 当柔性负荷和电动汽车参与调度后, 观察到 EV 的充电高峰得到了有效转移, 同时, 柔性负荷也被策略性地集中到了夜间低电价时段(23:00~6:00)。此时, 转移后的负荷比转移前的负荷分布要多, 时间储能装置充电, 其他可转移负荷被用来调节电力。在用电高峰阶段(7:00~11:00; 18:00~22:00), 实时电价处于日内最高点, 电动汽车储能进行放电以满足储能充电需求和柔性负荷用电也帮助转移负荷, 进一步降低了微电网运行成本。总体来看通过对电动汽车等可调节资源进行优化调度, 提高了总负荷与风光出力的协同性, 稳定维持了联络线功率, 有助于新能源就地消纳和微网稳定运行。

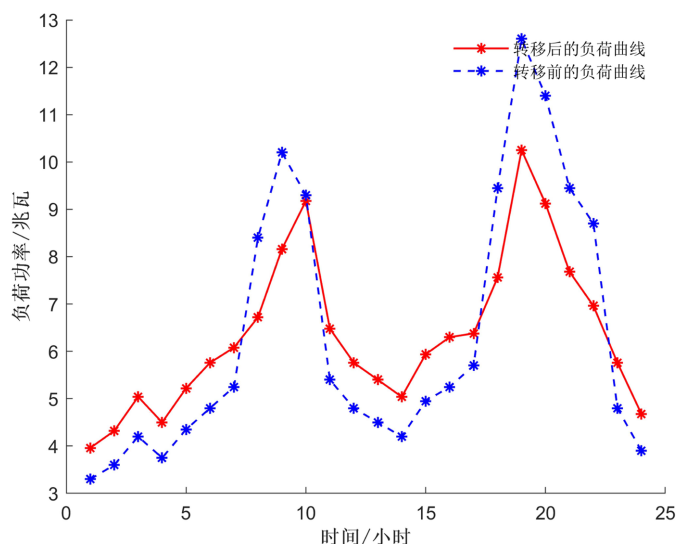


Figure 7. Transferable load response results
图 7. 可转移负荷响应结果

6. 结论

本文基于微电网经济调度的基本思想, 针对电动汽车普及的现状, 深入探讨了电动汽车接入微电网后的经济优化调度方案。在论文中, 首先学习电动汽车的行驶特性, 构建了考虑实时电价的电动汽车充放电模型。这一模型有助于明确电动汽车在日常用电负荷中的影响。

为了更全面地评估调度方案的经济效益和环境效益, 本文进一步建立了数学模型。该模型综合了微网运行的发电成本、环境效益以及电动汽车车主的充放电成本, 旨在实现多目标优化的目标。在满足各类约束条件的前提下, 采用基于惯性权重改进策略的多目标算术优化算法进行问题求解, 以确定最优的各可控分布式电源出力情况。

通过仿真实验, 本文验证了所提出的优化调度方法的有效性。该方法能够充分发挥电动汽车的能量双向性和主动性, 合理调度电动汽车的充放电行为, 避免无序充电引起的负荷高峰, 降低对主网的供电依赖。在实现较低的运行成本的同时, 也带来了显著的环境效益。此外, 多目标调度的考虑使得方案更加公平地对待电动汽车车主的充放电收益, 这一视角新颖且实用, 为微网优化调度的工程应用提供了有价值的参考。

基金项目

1) 教育部人文社会科学研究青年基金项目(21YJC630087); 2) 上海市哲学社会科学规划科课题(2019BGL014)。

参考文献

- [1] Huang, Y., Masrur, H., Lipu, M.S.H., Howlader, H.O.R., Gamil, M.M., Nakadomari, A., *et al.* (2023) Multi-Objective Optimization of Campus Microgrid System Considering Electric Vehicle Charging Load Integrated to Power Grid. *Sustainable Cities and Society*, **98**, Article 104778. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104778>
- [2] 张天旭. 多目标优化与决策及在微电网调度中的应用[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2023.
- [3] 周晨瑞, 盛光宗, 李升. 考虑电动汽车接入的微电网多目标优化调度[J]. 电气工程学报, 2023, 18(1): 211-218.
- [4] 禹威威, 刘世林, 陈其工, 等. 考虑电动汽车充电和需求侧响应的光伏微电网多目标优化调度[J]. 电力系统及其

- 自动化学报, 2018, 30(1): 88-97.
- [5] 颜湘武, 王庆澳, 卢俊达, 等. 计及电动汽车和柔性负荷的微电网能量调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(17): 69-79.
 - [6] 王璟, 王利利, 郭勇, 等. 计及电动汽车的微电网经济调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 111-117.
 - [7] 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.
 - [8] 徐嘉启, 郭红霞, 邹桂林. 基于实时电价的含电动汽车微电网两阶段优化调度[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(13): 5571-5578.
 - [9] Liu, C., Abdulkareem, S.S., Rezvani, A., Samad, S., Aljojo, N., Foong, L.K., *et al.* (2020) Stochastic Scheduling of a Renewable-Based Microgrid in the Presence of Electric Vehicles Using Modified Harmony Search Algorithm with Control Policies. *Sustainable Cities and Society*, **59**, Article 102183. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102183>
 - [10] 闫梦阳, 李华强, 王俊翔, 等. 计及综合需求响应不确定性的园区综合能源系统优化运行模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 163-175.
 - [11] 刘琨, 赵露露, 王辉. 一种基于精英反向和纵横交叉的鲸鱼优化算法[J]. 小型微型计算机系统, 2020, 41(10): 2092-2097.
 - [12] Khodadadi, N., Abualigah, L., El-Kenawy, E.M., Snasel, V. and Mirjalili, S. (2022) An Archive-Based Multi-Objective Arithmetic Optimization Algorithm for Solving Industrial Engineering Problems. *IEEE Access*, **10**, 106673-106698. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3212081>
 - [13] Premkumar, M., Jangir, P., Kumar, B.S., Sowmya, R., Alhelou, H.H., Abualigah, L., *et al.* (2021) A New Arithmetic Optimization Algorithm for Solving Real-World Multiobjective CEC-2021 Constrained Optimization Problems: Diversity Analysis and Validations. *IEEE Access*, **9**, 84263-84295. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3085529>
 - [14] 薛梦雅. 计及电动汽车与需求响应的微电网多目标经济调度[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.