

分类号: TM73

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220310109



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题目 光储充柔微电网
多时间尺度优化调度

论文作者 王青

指导教师 刘世林教授

学科(专业) 电气工程

研究方向 电力系统及其自动化

论文提交日期: 2025 年 5 月 15 日

分类号：TM73

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2220310109

题 目 光储充柔微电网多时间尺度优化调度

题 目 Optimal Scheduling of Microgrids Integrated
Photovoltaic-Storage-Charging-Flexible
Loads with Multiple Time Scales

学生姓名： 王青

指导教师： 刘世林

专 业： 电气工程

研究方向： 电力系统及其自动化

论文答辩日期： 2025 年 05 月 08 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：王青

日期：2025年5月15日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 ____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：王青

指导教师签名：[Signature]

日期：2025年 5月15日

日期：2025年 5月15日

光储充柔微电网多时间尺度优化调度

摘要

在“双碳”战略目标的指引下，大力推动分布式光伏和电动汽车（Electric Vehicle，EV）的发展已成为国家战略。然而，分布式光伏的大规模并网和 EV 数量的急剧增加，给电网安全稳定运行带来了很大的困难。为了减少分布式光伏和 EV 对电网的影响，将光伏发电系统、储能系统、EV 以及柔性负荷进行集成，构成运行灵活的光储充柔微电网是一个重要的解决方案。本文针对光储充柔微电网的优化调度问题，在对其各个组成单元运行特性分析的基础上，围绕 EV 车主差异化需求、光伏出力的不确定性以及柔性负荷多时间尺度响应特性等方面，开展了较为深入的研究工作。主要工作包括：

（1）光储充柔微电网的运行特性分析及数学建模。建立光伏发电系统的出力模型和储能系统的电源模型。通过分析 EV 出行特性，对 EV 开始、结束时间及出行距离进行建模，利用蒙特卡洛抽样方法得到 EV 充电负荷。接着，对微电网中的可削减负荷和可转移负荷的柔性负荷进行分析并建立相应的模型。最后，从经济性和安全性两方面切入，分析了 EV 自主充电负荷对微电网运行的影响。通过本章的研究，为后续光储充柔微电网优化调度模型的构建奠定了基础。

（2）研究了一种计及 EV 车主差异化需求的光储充柔微电网优化调度策略。针对车主的不同需求，分别建立了额定功率充电、灵活充电和灵活充放电三种 EV 模型，并综合考虑微电网中柔性负荷的

可削减和可转移特性，建立激励型需求响应机制的模型。以最小化微电网日运行成本和 EV 车主支付费用为目标函数，构建光储充柔微电网的优化调度模型。仿真结果显示，该模型在满足不同车主充电需求的同时，还可实现微电网经济性运行。

（3）针对光伏出力不确定性对光储充柔微电网优化运行的影响，采用信息间隙决策理论（Information Gap Decision Theory, IGDT）对光伏出力不确定性进行处理，并提出相应的日前优化调度策略，以解决光伏发电的不确定性问题。以系统总运行成本最小为目标，采用区间约束方法量化光伏出力的不确定性对调度结果的影响，分别构建鲁棒优化和机会寻求策略的调度模型。仿真结果显示，该优化策略能帮助决策者根据风险偏好选择调度方案，从而有效兼顾不确定性和经济性，并为后续进行日内、实时优化调度作铺垫。

（4）充分考虑源荷预测精度及柔性负荷响应特性在不同时间尺度上的差异性，提出了一种光储充柔微电网的多时间尺度优化调度策略。首先，探讨了可转移负荷在不同时间尺度下的响应特性；接着，以微电网运行成本最小为目标，分别构建日内、实时不同时间尺度的优化调度模型；最后，利用 CPLEX 求解器进行仿真模拟。仿真结果表明，多时间尺度源荷资源相配合，可以充分发挥各类灵活性负荷的调节能力，能够有效提升微电网运行的稳定性和经济性。

关键词：光储充柔微电网，差异化需求，分布式电源，柔性负荷，优化调度

Optimal Scheduling of Microgrids Integrated Photovoltaic-Storage-Charging-Flexible Loads with Multiple Time Scales

ABSTRACT

Under the guidance of the “dual-carbon” strategic goal, it has become a national strategy to vigorously promote the development of distributed photovoltaic (PV) and electric vehicle (EV). However, the large-scale grid-connection of distributed PV and the sharp increase in the number of EVs have brought great difficulties to the safe and stable operation of power grids. In order to reduce the impact of distributed PV and EV on the power grid, it is an important solution to integrate PV power generation, energy storage system, EV and flexible loads to form an operationally flexible photovoltaic storage-charging-flexible microgrid. In this paper, for the optimal scheduling problem of microgrids integrated photovoltaic-storage-charging-flexible loads, based on the analysis of the operating characteristics of its various constituent units, a more in-depth research work has been carried out from the consideration of the differentiated demand of EV owners, the uncertainty of PV output, and the response characteristics of flexible loads in multiple time scales, respectively. The main work includes:

(1) Operational characterization and mathematical modeling of microgrids integrated photovoltaic-storage-charging-flexible loads. The

output model of the photovoltaic power generation system and the power model of the energy storage system are established. By analyzing the travel characteristics of EVs, start and end time , modeling the travel distance of EVs, and using Monte Carlo sampling method, the EV charging load is obtained, and the influence of EV autonomous charging load on the operation of the microgrids integrated photovoltaic-storage-charging-flexible loads is deeply analyzed in terms of economy and security. Then, the flexible negative of curtailable and transferable loads in the microgrid is analyzed and modeled accordingly. The research in this chapter lays the foundation for the construction of the subsequent optimal scheduling model of microgrids integrated photovoltaic-storage-charging-flexible loads.

(2) An optimal scheduling strategy for microgrids integrated photovoltaic-storage-charging-flexible loads that takes into account the differentiated demands of EV owners is investigated. Three EV models, namely, rated power charging, flexible charging and flexible charging/discharging, are established according to the different demands of EV owners, and the incentive-based demand response mechanism is modeled by taking into account the curtailment and transferability characteristics of flexible loads in the microgrid. The optimal scheduling model of the microgrids integrated photovoltaic-storage-charging-flexible loads is established with the objective function of minimizing the daily

operation cost of the microgrid and the payment cost of the EV owner. The simulation results show that the model can not only satisfy the charging demands of different vehicle owners, but also make the microgrid operation cost lower.

(3) Aiming at the impact of PV output uncertainty on the optimal operation of microgrids integrated photovoltaic-storage-charging-flexible loads, Information Gap Decision Theory (IGDT) is used to deal with the PV output uncertainty and the corresponding day-ahead optimal scheduling strategy is proposed to solve the uncertainty problem of PV power generation. Based on the deterministic dispatch model, the uncertainty of PV output is modeled using the interval constraint method. In addition, the scheduling models of robust optimization and opportunity seeking strategies are constructed based on IGDT theory, respectively. Simulation results show that the optimization strategy can help the decision maker to select the scheduling plan according to the risk preference, so as to effectively balance the uncertainty and economy, and pave the way for the subsequent intraday and real-time optimal scheduling.

(4) A multi-time scale optimal scheduling strategy for microgrids integrated photovoltaic-storage-charging-flexible loads is proposed with full consideration of the source-load prediction accuracy and the variability of flexible load response characteristics at different time scales. Firstly, the response characteristics of transferable loads in different time scales are

explored, Then, the optimal scheduling models for the three time-scales of day-ahead, intra-day, and real-time are constructed with the objective function of minimizing the operating cost of microgrids integrated photovoltaic-storage-charging-flexible loads; and finally, simulations are conducted using CPLEX solver. The simulation results show that the matching of source and load resources in a multi-time scale can give full play to the regulation ability of various types of flexible loads and play a better role in improving the stability and economy of the microgrid.

Wang Qing(Electrical Engineering)

Supervised by Prof.Shilin Liu

KEY WORDS: microgrids integrated photovoltaic-storage-charging-flexible loads, differentiated demand, distributed power, flexible loads, optimal scheduling

目录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 微电网发展概况	2
1.2.2 微电网优化调度模型	3
1.3 本文的主要工作	7
第 2 章 光储充柔微电网系统建模.....	9
2.1 引言	9
2.2 基本结构	9
2.3 主要元件的数学模型	10
2.3.1 光伏发电	10
2.3.2 储能系统.....	10
2.3.3 电动汽车负荷	11
2.3.4 柔性负荷	14
2.4 算例分析	16
2.4.1 基础数据及模型参数	16
2.4.2 仿真结果与分析	17
2.5 本章小结	19
第 3 章 计及 EV 差异化需求的光储充柔微电网优化调度.....	20
3.1 引言	20
3.2 EV 充电模型.....	20
3.3 多目标优化调度模型	22
3.3.1 目标函数	22
3.3.2 约束条件	24
3.3.3 模型求解流程	24
3.4 算例分析	25
3.4.1 基础数据及模型参数	25
3.4.2 仿真结果与分析	27

3.5 本章小结	30
第 4 章 基于 IGDT 的光储充柔微电网日前优化调度	31
4.1 引言	31
4.2 IGDT 优化模型	31
4.2.1 系统模型与不确定集模型	31
4.2.2 决策模型	33
4.3 考虑光伏出力不确定性的日前优化调度模型	34
4.3.1 光伏出力预测不确定性模型	34
4.3.2 IGDT 调度优化策略	34
4.4 模型转化及求解流程	36
4.4.1 模型转化	36
4.4.2 模型求解流程	37
4.5 算例分析	38
4.5.1 基础数据及模型参数	38
4.5.2 仿真结果与分析	38
4.6 本章小结	42
第 5 章 计及柔性负荷响应特性的光储充柔微电网多时间尺度优化调度	44
5.1 引言	44
5.2 优化调度策略	44
5.3 优化调度建模	45
5.3.1 日内调度计划建模	45
5.3.2 实时调度计划建模	46
5.3.3 模型求解流程	47
5.4 算例分析	48
5.4.1 基础数据及模型参数	48
5.4.2 仿真结果与分析	50
5.6 本章小结	54
第 6 章 总结与展望	55
6.1 总结	55
6.2 展望	56
参考文献	57
攻读硕士期间取得的学术成果	64

致谢.....	65
---------	----

第 1 章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

随着全球工业化进程加速及社会经济的高质量发展转型，能源需求总量持续攀升，推动了能源行业的快速发展。图 1-1 展示了 2000 至 2023 年我国能源消费与生产总量统计数据。根据全球能源统计数据的深入分析表明，2020 至 2040 年间，全球对煤炭的需求将增长 15%，同期全球能源总需求将增长 25%。然而，煤、石油、天然气等化石能源持续大规模使用会产生过多二氧化碳，造成环境恶化^[1]。2020 年中国在联合国大会上宣布了碳减排目标，二氧化碳排放量力争于 2030 年前达到峰值，并致力于 2060 年前实现碳中和。电力系统低碳转型，构建以新能源为主体的新型电力系统将对我国碳达峰、碳中和战略目标的实现起到关键作用^[2]。由于新能源发电具有很强的不确定性^[3]，接入大电网时，可能会降低电能质量。分布式电源发电技术的出现和发展为新能源发电提供了重要的技术支撑，而微电网作为分布式电源领域一种高效且关键的组织形式，不仅促进能量的梯级利用，还显著提升了能源的吸收和利用效率。

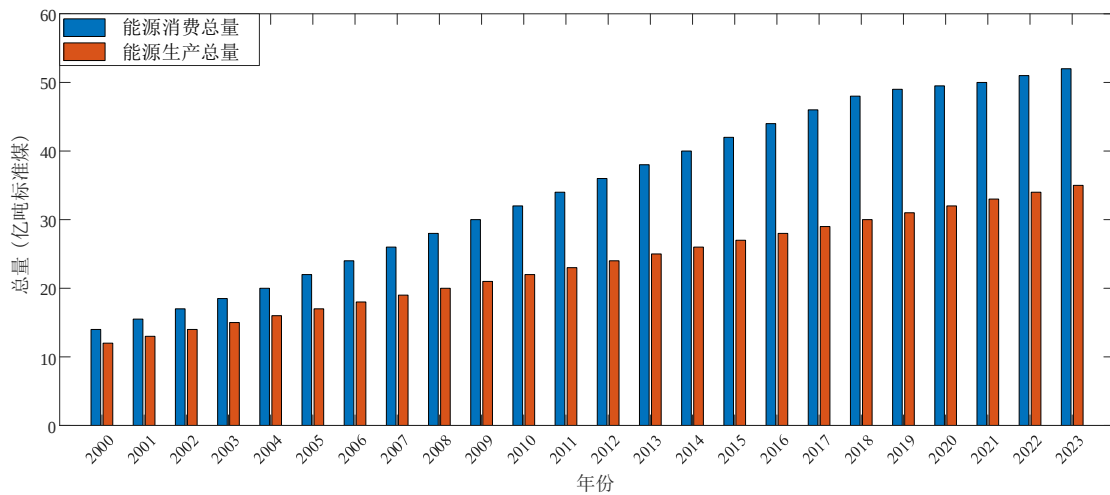


图 1-1 2000-2023 年我国能源消费与生产总量统计图

由于微电网内部分布式电源发电特性差异、负荷侧能量种类的多样性及多能耦合的复杂性，传统电网优化调度方法已难以满足微电网的运行要求^[4]，因此，推动微电网的优化调度研究具有重要意义。新能源发电具有波动性^[5-6]，这

种供给侧出力的随机性使得微电网优化调度面临很大的风险。同时，负荷侧不确定性的增加^[7]，直接影响到了微电网系统的经济可靠运行^[8-9]。随着锂离子电池快充技术迅速发展，EV 作为实现低碳转型的重要交通工具，其发展十分迅速。但当大规模 EV 无序接入时，会对微电网运行带来严峻挑战，主要体现在会增加用能侧电负荷的峰谷差，造成负荷侧“峰上加峰”的现象^[10]。因此，实施需求响应策略通过合理的激励对 EV 充放电进行引导，对于微电网的安全稳定运行具有重要的意义。

随着需求响应技术的发展，电力系统中柔性负荷的占比也大大提高，柔性负荷通过有效改善用户用电行为、进行一定程度的动态调整，从而使微电网运行更加稳定、可靠。此外，微电网中新能源发电和负荷的不确定性与时间尺度的选择有密切关系，这是因为源荷在不同时间尺度下预测精度存在差异性^[11]。通常情况下，源荷预测值的精确程度在长时间尺度下比较低，在短时间尺度下比较高。因此，不仅要制定长时间尺度下的日前调度计划，还需要整合短期预测数据，在日前方案的基础上对日内调度方案进行细化，这种策略能够降低供需两侧随机波动造成的影响。

综上所述，可再生能源的大力发展以及 EV 的广泛接入势必会影响微电网系统运行的经济性和可靠性。因此，如何整合柔性负荷和 EV 等可调度资源实现光储充柔微电网系统的整体优化成为了目前研究的核心内容。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 微电网发展概况

微电网这一概念最早是由美国于 2002 年提出来的^[12]。在 20 世纪与 21 世纪之交，随着能源结构转型的推进与电力系统的快速发展，欧洲、美国和日本等发达国家陆续开展对微电网的研究工作。欧洲国家为应对能源供应的可持续性和安全性挑战，解决大规模可再生能源接入问题，第六框架计划重点研究先进的微网控制策略、改善微网供电可靠性的技术等^[13]，目前已建成并投入运营多个微电网示范工程，如：希腊基斯诺斯岛微网、德国慕尼黑 Manheim 微网、英

国埃格岛微网等^[14]。2008 年，通过美国能源部的竞争性征集，选出了 9 个用于降低峰值负荷的可再生能源和分布式系统集成微电网项目^[15]。微电网作为天然的源网荷储一体化的分布式供电系统，能够实现新能源的最大化就地消纳，并根据负荷需求和能源供给情况进行动态调整，维持供需平衡，提高能源利用率^[16-17]，因此成为世界各国研究机构以及相关电力企业的研究热点课题^[18]。世界各国对微电网的研究在理论创新与工程实践方面均取得进展，并通过示范工程积累了实证经验，这些创新性研究成果对我国在微电网发展规划和运行方面极具指导意义和参考价值。

我国在微电网技术领域的探究较欧美等国家略显滞后，虽面临诸多挑战，但由于我国具有丰富的人才资源以及国家政策的坚实支撑，对微电网的研究工作一直在积极推进并呈现出快速发展的态势，微电网在我国的发展前景十分乐观。我国分布式能源系统的战略布局始于“973 计划”的专项支持，该项目标志着国家对分布式能源领域的高度重视。近些年来，我国建设了一批微电网示范项目：2011 年国家电网公司建设了西安世界园艺博览会园微电网项目，它是一个包括智能配电、风、光、储、微和电动汽车充电站等多种智能电网要素结合的系统。2014 年投运的温州南麂岛微电网示范工程，这是全球首个兆瓦级海岛型微电网系统^[19]。以分布式可再生能源发电为主导的微电网系统，将在我国新型电力系统构建以及能源结构转型进程中起着重要的作用^[20]。

1.2.2 微电网优化调度模型

微电网优化调度的核心是通过合理调度资源，实现经济性、可靠性的平衡，是一个重要的能源管理过程，如图 1-2 所示。能量管理系统（Energy Management System, EMS）作为调整和控制微电网中的可再生能源发电系统、储能系统和负荷的核心中枢，能够保障电力系统稳定运行和可靠的电力供应。它不但能够确保微电网中能源供需关系的动态平衡，而且可以以最小化运行成本为目标，实现系统的经济性运行。为了使这些目标得以实现，EMS 需要实时收集和分析可再生能源出力数据、负荷需求曲线以及分时电价等信息，并建立微电网的优化调度模型，该模型需综合考虑各种约束条件，并通过优化算法求

解。

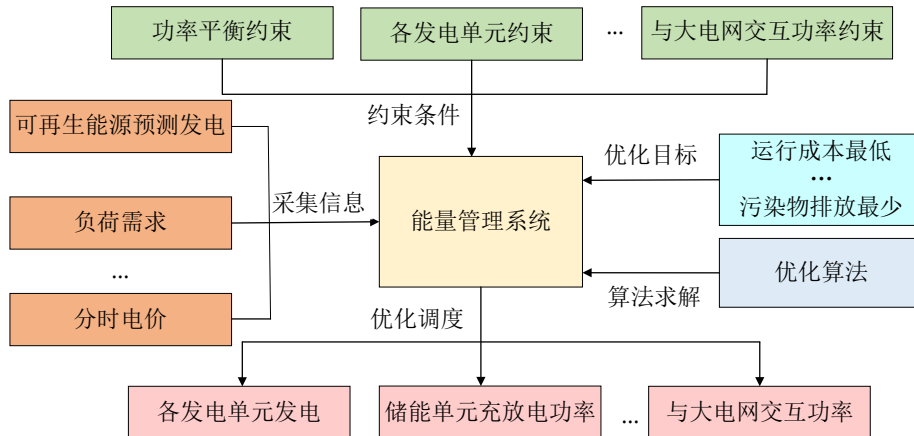


图 1-2 微电网优化调度框架

目前，关于微电网优化调度问题研究主要包括优化调度模型和求解算法两个方面。针对优化调度模型，又可以从优化对象、时间尺度、优化目标及不确定性处理方法等不同角度展开研究。

(1) 优化对象

当前的研究主要聚焦于EV和柔性负荷，深入探讨需求响应策略对微电网调度运行的效益影响。EV作为需求侧资源，其潜力不限于有序充电。有研究表明在电动汽车入网V2G（Vehicle-to-Grid）技术的支持下，EV作为移动储能单元，能够向电网返送电能并提供辅助服务^[21-23]，但是V2G涉及较为复杂的并网模块，因此，现阶段EV接入楼宇V2B（Vehicle-to-Building）模式更具有可行性。文献[24-25]针对商业建筑为研究背景，介绍了V2B模式的集成架构。在此基础上，文献[26]将V2B技术拓展至多建筑能源网络，将EV作为移动电源，在多个楼宇中实现了电能共享。文献[27]构建计及EV有序充放电行为和车主综合满意度的模型，并以分时电价为背景在日前阶段实现EV与微电网的分层调度。文献[28]提出了在极端场景下，电动汽车作为移动电源向孤岛微电网供电的调度策略。

除了EV资源，光储充柔微电网中还存在其他类型的可控柔性负荷。文献[29]将柔性负荷和可再生能源形成广义用户，在考虑用户舒适度和经济性的基础上，建立广义用户的多目标优化模型。文献[30]从用户利益角度出发，构建户用型微电网需求响应策略，该策略在实现用户用电经济性的同时，还能有效

减小峰谷差。文献[31]在分时电价的背景下，建立了考虑需求侧响应的双层微电网优化模型，采用分时电价引导可控负荷转移，实现经济性运行。文献[32-33]提出了一种考虑温控负荷和 EV 需求响应的微电网优化调度策略。虽然将 EV 和柔性负荷共同作为灵活性资源参与微电网优化调度的研究成果颇丰，但是在建立 EV 的调度模型时，鲜有研究考虑了 EV 车主的需求差异，因此不太符合实际情况。

（2）优化时间尺度

随着电力系统日益多元化和城市化进程的快速发展，人们不但对能源的需求日益提升，而且对能源使用安全性的要求也日益提高，这种趋势致使传统单一时间尺度调度方式下的方案在实际情况中难以满足经济高效运行的要求，因此诸多研究利用多时间尺度，逐级缩小新能源出力误差来的负面影响。文献[34]构建了两阶段分布鲁棒模型以提高日前调度的鲁棒性。文献[35]提出了一种改进的多时间尺度调度策略，通过日内滚动执行最佳调度，实时校正日前与日内的偏差。文献[36]为应对非计划性波动功率，提出源荷储短时分区协调控制技术，仿真表明短时分区控制能有效地应对非计划性功率的波动。文献[37]基于微电网机组出力和其他调度资源具有多时间尺度的特性^[38]，构建了日前及日内两阶段滚动优化调度模型。文献[39]针对可再生能源出力和负荷需求的不确定性，提出一种多时间尺度动态鲁棒最优调度策略。文献[40]提出一种多时间模型预测控制策略来处理源荷预测的不确定性。

（3）优化目标

在优化调度的目标方面，以微电网运行成本最小、污染物排放最少、稳定性最高等为目标的研究已有众多成果^[41]。文献[42]构建了以最小化微网运行经济成本和弃风量为目标的优化调度模型，分析得出电转气设备和固体燃料电池对微网调度运行策略所产生的经济效益。文献[43]依据负荷的重要程度进行分类，以微电网运行成本与环境治理费用为目标，建立了微电网多方利益主体的多目标调度计划。文献[44]针对 EV 数量增加时接入微电网造成的经济性和安全性问题，建立了考虑微电网经济性和联络线功率波动性的多目标调度模型。文献[45]将电动汽车和柔性负荷共同作为灵活性资源，设计了以最小化运行成本

为目标的调度策略，仿真表明，所提方案在保证经济性运行同时，能够降低联络线功率波动。文献[46]构建了含清洁能源、EV、变频空调的微电网系统，建立了兼顾用户体验的系统经济性运行的调度模型。文献[47]在充分考虑微网治理污染排放成本和系统运行成本的基础上，依据系统的可靠性指标、环境保护指标和经济效益指标，制定冷热电联供型微网的最佳经济运行调度策略。

（4）不确定性处理的方法

针对微电网可再生能源发电和负荷的不确定性问题，诸多学者采用的是随机优化以及鲁棒优化。其中，随机优化基于历史数据的概率分布构建场景集，通过分析各场景之间的概率差异来表征不确定性，从而构建以期望成本最小化为目标的优化调度模型并求解最优调度策略。文献[48]提出了两阶段随机优化方法，通过建立可再生能源出力不确定性的概率模型，有效解决了其对微电网运行的影响。文献[49]采用基于场景的随机优化方法，有效缓解了可再生能源发电与负荷需求两侧不确定性对于微网优化调度的不利影响。文献[50]为实现氢能耦合高效应用和应对源荷不确定性挑战，提出了三阶段调度随机优化模型。文献[51]构建了基于多场景技术的随机优化调度模型，有效解决了风光出力不确定性的问题。文献[52]考虑到可再生能源出力预测准确性与预测时间尺度有关，将机械学习概率预测与优化调度结合，并采用最佳滚动事视野策略进行随机优化。

与随机优化相比，鲁棒优化方法通过构建多种不确定集合来刻画变量的不确定性，旨在探索最不利条件下的最优解决方案。文献[53]考虑到可再生能源出力具有波动性的问题，采用两阶段鲁棒优化方法处理，从而减小对系统影响。文献[54]基于两阶段鲁棒优化方法，针对微电网可再生能源出力不确定性与需求响应波动性，构建了最优调度模型得出微电网的最佳调度计划。文献[55]建立了一种数据驱动鲁棒经济调度模型，从而能够保证微电网运行时的经济性和鲁棒性。

然而，在实际应用中，上述两种方法都存在一定局限性：随机优化方法需要历史数据的已知概率分布生成典型场景集合进行求解，这不仅会导致计算量过大，而且难以确定精确的概率分布函数。鲁棒优化通过分析不确定变量的区

间波动范围，从而得到最坏情况下的最优方案。由于极端情况发生的概率较低，得到的优化结果过于保守。因此一些学者运用 IGDT 来处理源荷不确定性问题。

文献[56]在针对电价的不确定性，构建了基于 IGDT 的调度模型。文献[57]采用 IGDT 处理居民参与需求响应不确定的问题，从而使负荷聚合商能合理进行决策以保证期望收益。文献[58]考虑了风光出力不确定性因素，采用 IGDT 建立了风险规避的优化调度模型。文献[59]在解决新能源机组发电量不确定性问题上，引入 IGDT 进行模拟分析，并采用改进混沌映射粒子群算法求解。文献[60]基于 IGDT 对考虑电-热负荷需求不确定性的系统进行建模，从而保证不确定因素的波动在可接受的范围内，仍能为调度决策提供合理的方案。

1.3 本文的主要工作

本文以光储充柔微电网为研究对象，为减小EV数量增加对电网安全运行的影响并解决车主充电需求存在差异的问题，同时降低光伏和负荷不同时间尺度预测精度不同带来的不确定性和波动性，本文构建了光储充柔微电网多时间尺度优化调度模型，该模型整合了储能系统、可削减负荷、可转移负荷以及EV等多种灵活性资源，共同参与优化调度过程。本文共分为 6 个章节，整体结构框架如图 1-3 所示，具体内容由以下六部分组成：

第 1 章介绍了课题研究背景及意义，并就此概述了微电网的发展历程，然后从微电网优化对象、优化时间尺度、优化目标及不确定性的处理方法方面对微电网优化调度研究现状进行了概述。最后，简要说明本文的研究内容以及主要章节安排。

第 2 章分析光储充柔微电网的运行特性并对相应单元进行建模。在本章节中，对光伏发电系统和储能系统进行了相关描述并建立了相关的数学模型，使用蒙特卡洛法抽样分析EV车主的出行数据和日行驶里程，得到办公楼宇在典型日下的充电负荷。接着，基于柔性负荷的灵活调节能力，建立了可削减负荷和可转移负荷模型。通过对EV充电特性进行仿真分析，探究了充电负荷对微电网运行的影响。

第 3 章研究计及 EV 车主需求差异的光储充柔微电网优化调度方法。在本章

节中，为解决EV车主充电需求存在差异的问题，将电动汽车分为三类并建立模型，即额定功率充电EV、灵活充电EV和灵活充放电EV。考虑到可削减和可转移的柔性负荷参与优化调度，进而建立激励型需求响应机制的模型，最后，以微电网日运行成本以及EV车主支付费用最小为目标函数，构建光储充柔微电网多目标优化调度模型。

第4章为减小光伏出力不确定性对光储充柔微电网优化运行带来的干扰，设计了基于IGDT处理光伏不确定性的日前优化调度策略。在本章节中，针对光伏出力具有不确定性的特点，采用区间约束描述不确定变量。接着采用IGDT理论构建鲁棒优化和机会寻求策略下的调度优化模型，并探究了光储充柔微电网运行商不同风险态度下的调度方案，最后采用CPLEX求解器进行仿真模拟。

第5章设计了考虑柔性负荷响应特性的光储充柔微电网多时间尺度优化调度模型。由于光伏出力、负荷需求的预测精度以及柔性负荷的响应潜力在不同时间尺度下存在时间特性，导致仅基于日前信息的调度计划可能不够精准。因此，以系统总运行成本最低为目标函数，对日内和实时调度进行建模，基于日前调度阶段得到的方案，在日内进行滚动调度，实时阶段对日内进行修正，从而制定出更贴合实际情况的出力计划。

第6章为总结与展望。在这一章节中，主要是对上述研究内容和研究成果进行概括性总结和进一步展望。

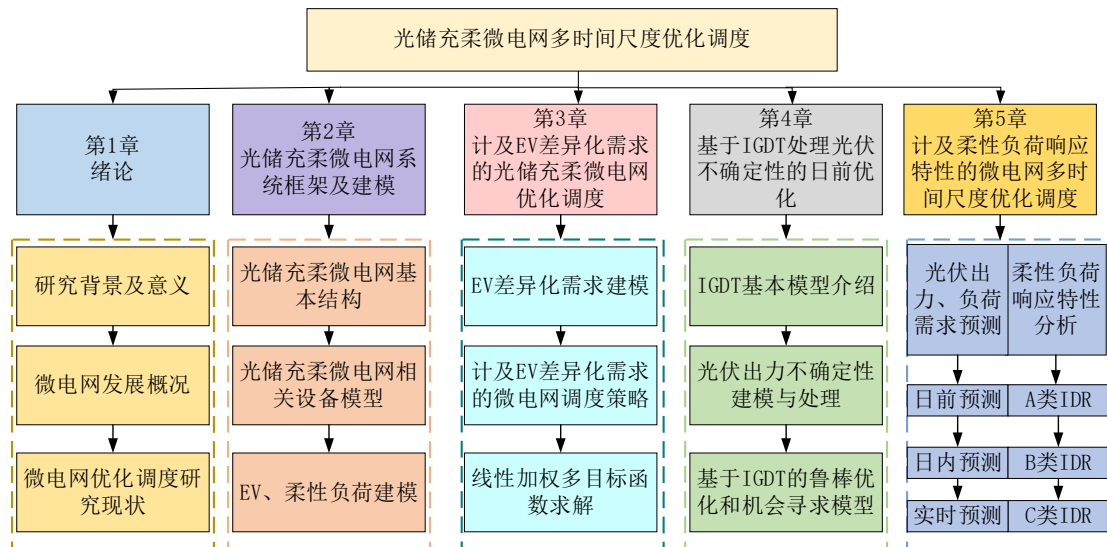


图 1-3 论文整体结构框架图

第 2 章 光储充柔微电网系统建模

2.1 引言

本文的光储充柔微电网系统由光伏发电系统、储能系统、EV 和柔性负荷组成。通过将分布式光伏发电技术、储能技术、V2B 技术以及需求响应技术应用与光储充柔微电网中，可以大大提高能源利用效率，降低运行成本。而在探讨光储充柔微电网优化调度问题时，构建合适的优化模型是基础。本章首先介绍光储充柔微电网系统的基本结构，然后对系统内光伏发电单元、储能单元进行建模，接着分析 EV 出行特性，对充电起始时间、结束时间以及日行驶里程进行建模分析，采用蒙特卡洛抽样技术计算充电负荷。然后，建立柔性负荷需求响应模型。此外，从经济性和安全性两个角度出发，着重分析了 EV 无序充电对微电网运行的影响。

2.2 基本结构

光储充柔微电网是一种将分布式发电单元、储能系统、EV 负荷和柔性负荷整合起来的小型发、输、配电系统，本文以光伏-建筑一体化办公楼宇为对象建立光储充柔微电网模型，其主体结构如图 2-1 所示。光伏发电系统中光伏电池将太阳能转化为电能，通过串并联方式形成光伏阵列，电流经汇流箱再通过相应的变流器装置接入光储充柔微电网中；储能系统是由多个储能电池组成，可以协助 EV 充放电，也可以在微电网并网切换和发生故障时，起到一定的缓冲作用；充电站单元作为 EV 充放电的主要场所，对站内停放的 EV 实时监控，实现能量流和信息流的相互流动；EV 单元因为自身的动力电池可作为移动储能，有研究表明，EV 大部分时间是停放的，因此可以参与到 V2B 中；楼宇负荷由基本负荷和柔性负荷组成；低压电网中直接和光储充柔微电网连接，两者之间可以进行功率的双向流动；能量管理系统能够对所有设备进行监测与控制，实现对光储充柔微电网中各模块进行集中优化管理。

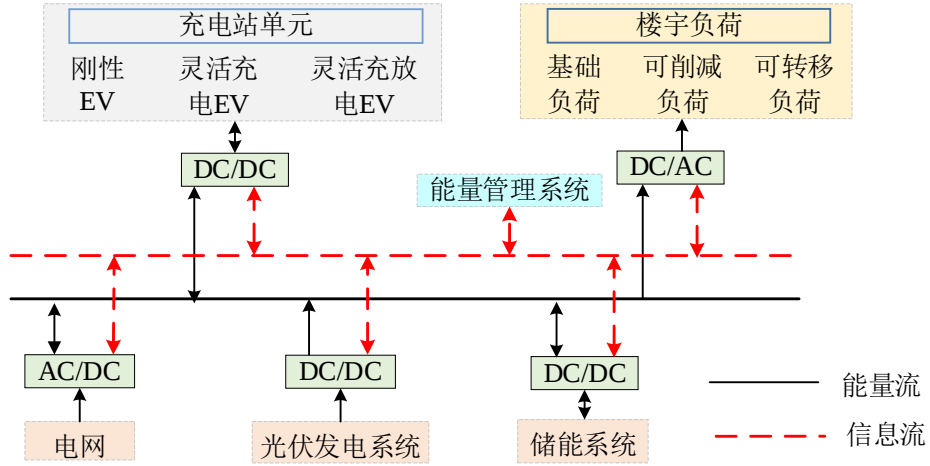


图 2-1 光储充柔微电网结构示意图

2.3 主要元件的数学模型

2.3.1 光伏发电

光伏发电系统通常采用半导体材料的光生伏特效应将光能转换为电能，主要部件包括太阳能电池板、控制器及逆变器^[61]。光伏在实际运行中的输出功率主要由太阳光辐射强度决定，两者的关系如下式所示：

$$P_t^{PV} = \frac{\eta_{PV} A_{PV} H_{s,t}}{H_{STC}} \quad (2-1)$$

式中， P_t^{PV} 为 t 时段光伏的输出功率； η_{PV} 为太阳能转换为电能的效率，本文取 50%； H_{STC} 、 $H_{s,t}$ 分别为标准测试条件下的光照辐射密度、 t 时段实际光照辐射密度； A_{PV} 为太阳能光伏板的安装面积。

2.3.2 储能系统

由于光伏出力具有明显的波动性和间歇性，光伏系统产生的电力与预测值之间会存在误差，从而加大了系统安全稳定运行的难度。而储能系统通过对输出功率进行有效的调节，可以消除光伏出力的间歇性带来的影响。因此，它可以作为微电网实现可再生能源高比例接入的重要组件。当源侧、荷侧之间的功率出现不平衡时候，可以由充当缓冲器的储能系统实现供需平衡。

储能系统的动态数学表达如下^[62-63]:

$$E_{t+1}^{\text{ESS}} = E_t^{\text{ESS}} + \eta_{\text{ch}}^{\text{ESS}} P_t^{\text{ESS,ch}} - P_t^{\text{ESS,dis}} / \eta_{\text{dis}}^{\text{ESS}} \quad (2-2)$$

$$\text{SOC}_t = E_t^{\text{ESS}} / E^{\text{ESS,max}} \quad (2-3)$$

$$0 \leq P_t^{\text{ESS,ch}} \leq P_{t,\text{max}}^{\text{ESS,ch}} \quad (2-4)$$

$$0 \leq P_t^{\text{ESS,dis}} \leq P_{t,\text{max}}^{\text{ESS,dis}} \quad (2-5)$$

$$\text{SOC}_{t,\text{min}} \leq \text{SOC}_t \leq \text{SOC}_{t,\text{max}} \quad (2-6)$$

式中, E_t^{ESS} 是 t 时段 ESS 的蓄电量; $P_t^{\text{ESS,ch}}$ 和 $P_t^{\text{ESS,dis}}$ 分别为 t 时段的充放电功率, kW; $P_{t,\text{max}}^{\text{ESS,ch}}$ 、 $P_{t,\text{max}}^{\text{ESS,dis}}$ 分别为 t 时段储能系统充放电功率的最大值; $\text{SOC}_{t,\text{min}}$ 、 $\text{SOC}_{t,\text{max}}$ 分别为 t 时段储能系统荷电状态的最小值和最大值。 $\eta_{\text{ch}}^{\text{ESS}}$ 和 $\eta_{\text{dis}}^{\text{ESS}}$ 分别为电池的充、放电效率; SOC_t 为 ESS 在 t 时段的荷电状态 (State of Charge, SOC); $E^{\text{ESS,max}}$ 为 ESS 的额定容量, kW·h。

2.3.3 电动汽车负荷

在研究电动汽车参与微电网优化调度时, 应对电动汽车无序充电产生的充电负荷进行建模和计算而影响电动汽车接入微电网充电负荷的因素有许多, 如接入规模、初始荷电状态、起始充电时间、充电功率大小等诸多方面^[64]。因此本文考虑随机因素的概率分布, 基于蒙特卡洛抽样方法模拟计算出电动汽车随机接入的无序充电负荷^[65]。

(1) 电动汽车开始充电时刻概率分布

在工作日的典型情况下, EV 车主抵达办公场所的时间即为其充电起始时间, 其概率遵循正态分布规律, 即 $T \sim N(\mu_r, \sigma_r^2)$ 。开始充电时间的概率密度函数如下:

$$f_r(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_r} \exp\left(-\frac{(x-\mu_r)^2}{2\delta_r^2}\right), 6 \leq x \leq 11 \quad (2-7)$$

式中, $\mu_r=8.38$, $\delta_r=3.4$ 。

由此能得到开始充电时刻的概率分布图，如图 2-2 所示。

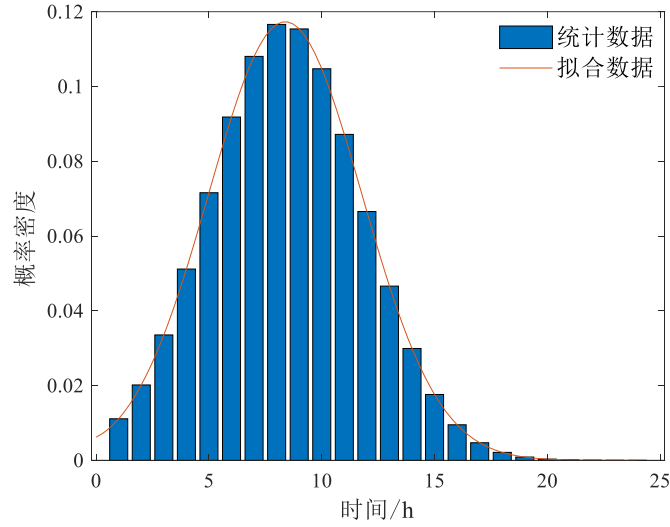


图 2-2 开始充电时刻的概率分布

(2) 电动汽车结束充电时刻概率分布

在典型日下，办公楼宇内 EV 车主离开楼宇结束充电的时间概率服从正态分布 $T \sim N(\mu_l, \sigma_l^2)$ 。它的概率密度函数如下：

$$f_l(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_l} \exp\left(-\frac{(x-\mu_l)^2}{2\delta_l^2}\right), 16.5 \leq x \leq 20.5 \quad (2-8)$$

式中， $\mu_l=17.76$ ， $\delta_l=0.75$ 。

图 2-3 展示了结束充电时刻的概率分布情况。

(3) 电动汽车每日行驶里程

通过美国交通部针对全国私人车辆的数据调查结果可知，在这些调查数据经过标准化处理后，采用极大似然估计办法得到每日行驶里程大致服从对数正态分布的规律 $s \sim \text{Log} - N(\mu_s, \sigma_s^2)$ ，其概率密度函数可表述为：

$$f_s(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s x} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (2-9)$$

式中， $\mu_s=3.2$ ， $\sigma_s=0.88$ 。

图 2-4 描述的是每日行驶里程的概率密度函数曲线。

为了便于分析，假设电动汽车在每次行驶前电池都处于充满状态，利用已获得的日行驶里程的概率分布就能推导出电动汽车返回时候荷电状态的分布。

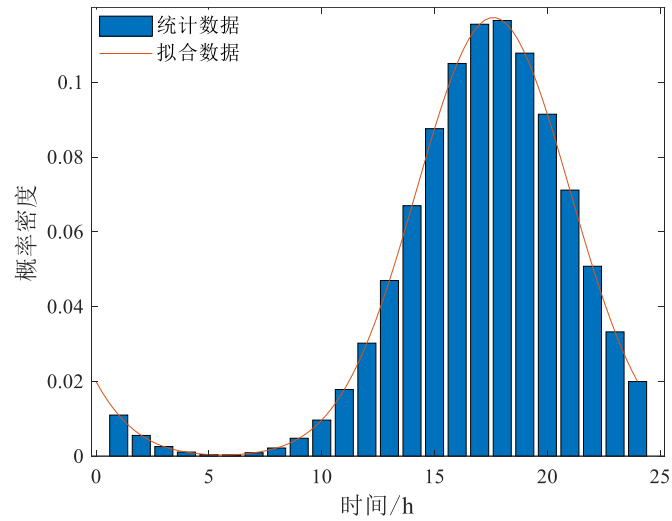


图 2-3 结束充电时刻的概率分布

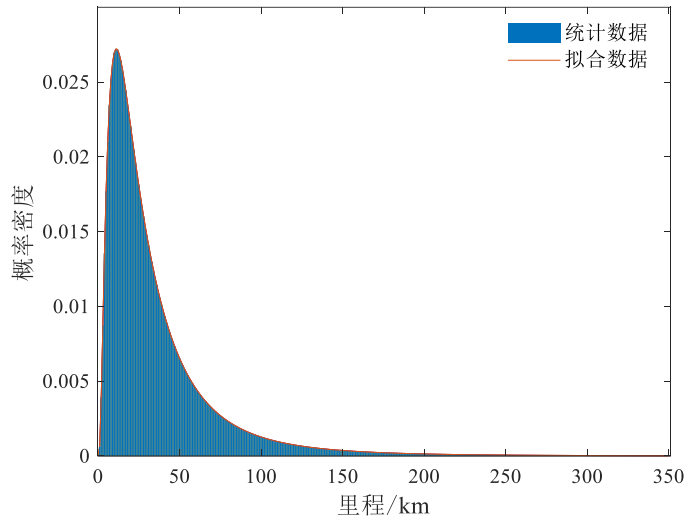


图 2-4 日行驶里程概率分布

(4) 自主充电电动汽车负荷计算

本研究认为电动汽车充电行为具有一定的概率特征，而且每辆车之间的充电行为互不影响。根据这一特点，通过采用随机统计技术可得到无序充电负荷。具体来说，利用蒙特卡洛随机抽样模拟技术，求出单辆电动汽车充电负荷和充电时间；接着，将计算出的结果进行累加，得到一定规模下电动汽车无序充电负荷曲线，图 2-5 展示了这一计算流程的具体步骤。

具体仿真步骤如下：

步骤 1：设置迭代次数 $k=1$ ，电动汽车序号 $n=1$ ；

步骤 2：根据给定的概率密度函数，随机生成第 n 辆车的充电起始时间及日行驶里程；

步骤 3：基于步骤 2 得到的采样结果，计算该车的充电需求，并将其叠加到系统总负荷；

步骤 4：检查当前电动汽车的数量是否达到车辆总数上限。若达到上限，进行步骤 5；否则，令 $n=n+1$ 后，回到步骤 2；

步骤 5：判断迭代次数是否已达到预设的最大值。若已达到，则计算 k 条负荷曲线的平均值，并将 n 辆电动汽车的无序充电总负荷输出；否则，令 $k=k+1$ 后回到步骤 2。

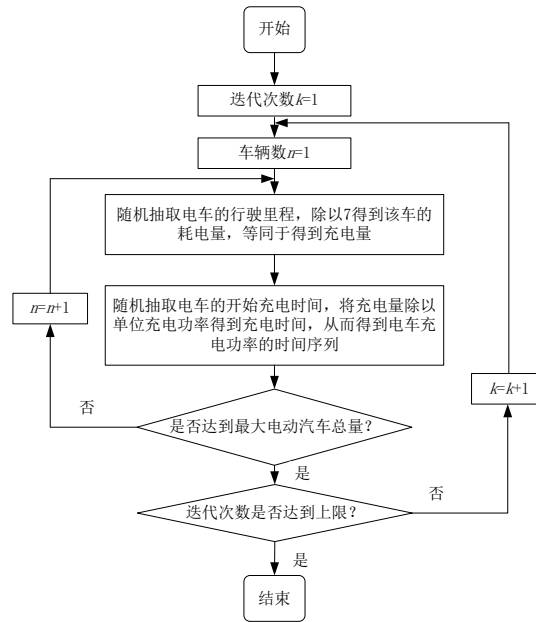


图 2-5 基于蒙特卡洛模拟抽样的电动汽车无序充电负荷计算流程图

2.3.4 柔性负荷

根据电力负荷调度响应的差异，本文将柔性负荷划分为 2 类：一类是可削减负荷，另一类是可转移负荷。

(1) 可削减负荷

可削减负荷指的是运行时段固定不变、其运行功率可根据实际需求进行调节的柔性负荷。比如，室内照明的灯具数量和亮度可以调节，温控负荷的运行功率也能进行调节等。本文主要针对温控负荷的需求响应展开探讨。由热平衡原理可知，建筑物在特定时间内获得的热量等于该时间段内从建筑物内部传递出去的热量与从内部散失的热量之差，建筑内外热量与温度的关系可表达为：

$$Q_t^d - Q_t^{ac} = CV\rho \frac{d[T_t^{out} - T_t^{in}]}{dt} \quad (2-10)$$

式中, Q_t^d 表示 t 时段建筑物内部获得的热功率, kW; Q_t^{ac} 表示 t 时段温控负荷制冷功率, kW; C 表示空气的定压比热容; V 表示建筑物内部的体积, m^3 ; ρ 表示空气密度; T_t^{out} 表示 t 时段室外温度, $^{\circ}C$; T_t^{in} 表示 t 时段室内温度, $^{\circ}C$ 。

建筑的冷负荷主要包含以下几个方面, 即

1) 外墙瞬变传热引起的逐时冷负荷为:

$$Q_t^{wal} = K_{wal} S_{wal} [T_t^{out} - T_t^{in}] \quad (2-11)$$

式中, K_{wal} 表示外墙传热系数; S_{wal} 表示外墙面积, m^2 。

2) 屋顶瞬变传热形成的逐时冷负荷为:

$$Q_t^{top} = K_{top} S_{top} [T_t^{out} - T_t^{in}] \quad (2-12)$$

式中, K_{top} 表示屋顶传热系数; S_{top} 表示屋顶面积, m^2 。

3) 外窗瞬变传热形成的逐时冷负荷为:

$$Q_t^{win} = K_{win} S_{win} [T_t^{out} - T_t^{in}] \quad (2-13)$$

式中, K_{win} 表示外窗传热系数; S_{win} 表示外窗面积, m^2 。

4) 太阳辐射热形成的逐时冷负荷为:

$$Q_t^{sun} = I_t^{sun} S_{win} \quad (2-14)$$

式中, I_t^{sun} 表示 t 时段太阳辐射照度, W/m^2 。

结合公式 (2-12), 可以构建出建筑物温控负荷模型为:

$$Q_t^d = Q_t^{wal} + Q_t^{top} + Q_t^{win} + Q_t^{sun} \quad (2-15)$$

$$P_t^{air} \varsigma = Q_t^d - \frac{CV\rho[T_t^{in} - T_{t-1}^{in}]}{3600\Delta t} \quad (2-16)$$

式中, ς 表示空调制冷效率; P_t^{air} 表示 t 时段空调功率, kW。

可调节温度区间约束为:

$$T_{in}^{min} \leq T_t^{in} \leq T_{in}^{max} \quad (2-17)$$

式中， $T_{in}^{\min}$ 为室内设定温度的下限， $^{\circ}\text{C}$ ； $T_{in}^{\max}$ 为室内设定温度的上限， $^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 可转移负荷

可转移负荷是指可以灵活调整运行时段且不受连续性约束的负荷，这类负荷的运行时长和区间均可以调节，具有很高的灵活性，但必须保证一个调度周期内总耗电量不变。因此，在本文中将其作为激励型需求响应负荷（Incentive-based Demand Response, IDR），通过实施奖励措施激励用户进行响应。针对用户参与响应的特性，把激励型需求响应划分为 3 类参与调度，具体如下：

A 类 IDR：用户提前 24 小时确认响应；

B 类 IDR：用户提前 15 分钟至 4 小时确认响应；

C 类 IDR：用户提前 5 分钟至 15 分钟确认响应。

$$0 \leq P_t^{\text{trans},q} \leq P_{t,\max}^{\text{trans},q} \quad (2-18)$$

$$0 \leq L_t^{\text{trans},q} \leq L_{t,\max}^{\text{trans},q} \quad (2-19)$$

式中， q 代表 A 类 IDR、B 类 IDR、C 类 IDR， $P_t^{\text{trans},q}$ 为 t 时段转移来的负荷功率； $L_t^{\text{trans},q}$ 为 t 时段转移走的负荷功率； $P_{t,\max}^{\text{trans},q}$ 、 $L_{t,\max}^{\text{trans},q}$ 分别为可转移负荷 t 时段最大响应量。

负荷转移前后需要满足电能总量守恒的约束条件，可表示为：

$$\sum_{t=1}^T (P_t^{\text{trans},q} - L_t^{\text{trans},q}) = 0 \quad (2-20)$$

2.4 算例分析

2.4.1 基础数据及模型参数

本章以办公楼宇为研究对象，楼宇屋顶光伏装机容量为 500kW，预测光伏出力及楼宇负荷数据如图 2-6 所示。

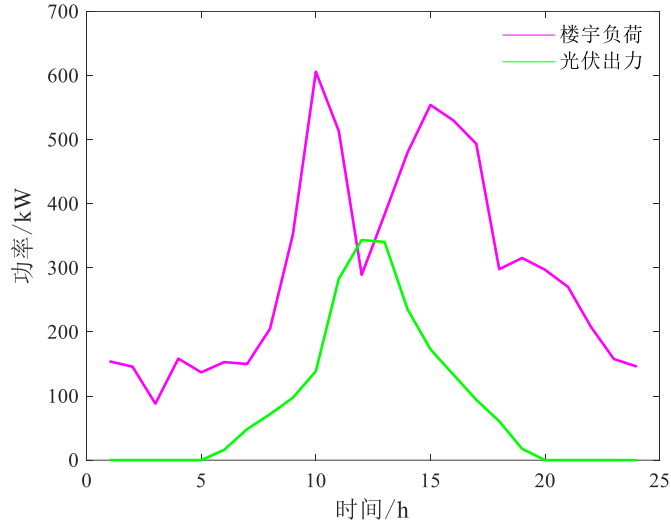


图 2-6 预测光伏出力及楼宇负荷数据

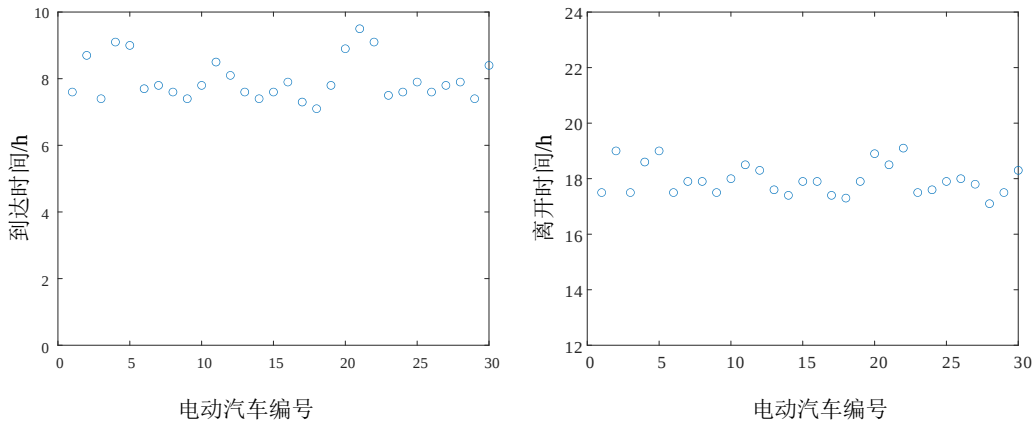


图 2-7 电动汽车到达和离开时间

本文所考虑的电动汽车规模为 30 辆，基于其出行特性，得到其入网和离网时间。图 2-7 所示为 30 辆车到达和离开车位的时间分布。

2.4.2 仿真结果与分析

电动汽车数量的增多以及自主充电负荷会对微电网运行带来影响，接下来从净负荷角度进行分析。根据蒙特卡洛模拟得到的充电负荷、已知的系统光伏发电功率和楼宇日负荷，得到此时的净负荷，即

$$P_t^{\text{LJ}} = P_t^{\text{EV}} + P_t^{\text{L}} - P_t^{\text{PV}} \quad (2-21)$$

式中， P_t^{LJ} 为 t 时段的净负荷； P_t^{EV} 、 P_t^{L} 分别为 t 时段的充电负荷、楼宇负荷。

然后进行随机抽样的分析计算，研究电动汽车用户在自主充电模式下的充电负荷特性。各类规模的电动汽车充电负荷如图 2-8 所示，系统净负荷曲线如图

2-9 所示。

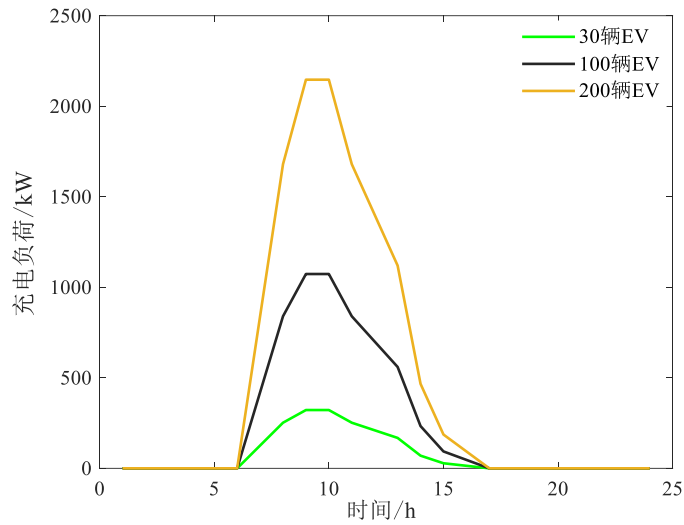


图 2-8 不同规模 EV 的日充电负荷曲线

从图 2-8 中可以看出，电动汽车无序充电负荷峰值集中在 9:00 至 10:00 左右，这是因为电动汽车在上午 8:00 左右接入微电网的数量偏多，随着充电负荷的累积于上述时段达到峰值。

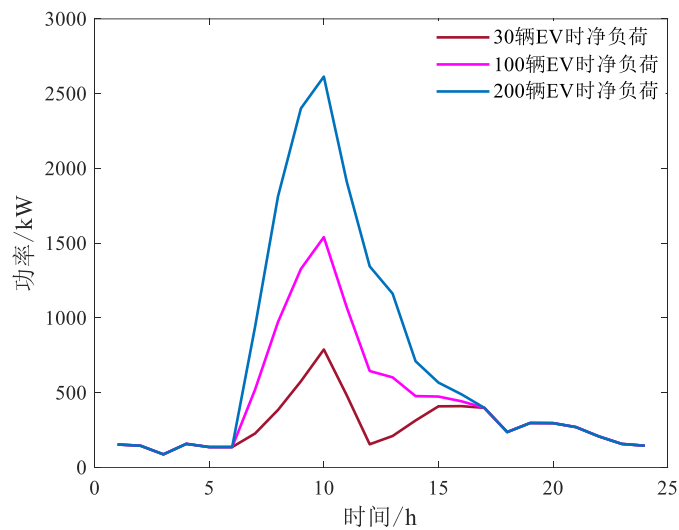


图 2-9 不同规模 EV 的系统净负荷曲线

由图 2-9 的净负荷曲线可以看出，即使电动汽车的入网规模不同，但都在 10:00 左右净负荷达到峰值。当系统中含有 200 辆电动汽车时，电动汽车的充电负荷峰值为 2146.47kW，消纳光伏出力后的净负荷峰值高达 2614.01kW。由此可知，9:00 至 11:00 时，自主充电负荷和建筑负荷易导致用电高峰叠加，并且峰谷差异显著，这极大考验着电网稳定运行的能力。

如果不对其充电行为进行调度，会导致系统中出现明显的功率波动，进而影响其它用电设备的正常运行。另外，此时段处于高电价时段，微电网高额从电网购电会增加运行成本，不利于经济运行，因此有必要将电动汽车纳入微电网优化调度的范围，通过合理调度其充电时段，降低其对电网造成的冲击以及降低光储充柔微电网的运行费用。

2.5 本章小结

本章节重点讨论分析了光储充柔微电网的基本结构并建立了主要元件的数学模型。光伏发电单元是分布式电源，由于其发电具有波动性及不确定性，属于不可控能源，分布式电源是研究微电网能量优化调度的基础，为微电网后续各单元调度优化策略研究提供了理论支持，接着建立储能单元模型，其在负荷较高时进行放电，负荷较低时进行充电，具有削峰填谷的功能。然后，对电动汽车以及可削减、可转移的柔性负荷进行了建模；重点对办公楼宇的电动汽车的出行特征进行分析，讨论了充电负荷和楼宇负荷需求较大时对微电网运行的影响，进而为后文光储充柔微电网优化调度模型的建立奠定基础。

第 3 章 计及 EV 差异化需求的光储充柔微电网优化调度

3.1 引言

大规模电动汽车接入光储充柔微电网后的负荷变化与常规负荷基本吻合，如果不受控制将容易造成极大峰谷差的局面，不利于系统运行的稳定性。为了解决该问题，本章提出了计及 EV 车主差异化需求和负荷需求响应的微电网优化调度策略。首先，根据车主的不同需求建立额定功率充电、灵活充电和灵活充放电三种 EV 模型；然后，考虑微电网中柔性负荷的可转移和可削减特性，建立需求响应机制的模型；最后，以最小化微电网日运行成本和 EV 车主支付费用为目标函数，建立微电网优化调度模型。仿真结果表明，将 EV 和柔性负荷作为灵活性资源参与优化调度，不仅能够满足不同车主的充电需求，还能使微电网运行成本降低的同时，有效缓解高峰用电压力。

3.2 EV 充电模型

考虑到 EV 车主的自主性，其充电方式取决于车主个人意愿和实际需求。本文根据 EV 车主充电需求差异，将电动汽车分为三类，即第一类为额定功率充电 EV。其特点是接入充电桩后保持额定功率充电，直至达到期望荷电状态，不参与微电网互动；第二类为灵活充电 EV。其特点是接入充电桩时段内动力电池充电功率可调节，但是无法向微电网放电；第三类为灵活充放电 EV。其特点是接入充电桩时段内动力电池可以向微电网放电，且充、放电功率可以调节。

不同充电方式对应车主不同的需求，即第一类方式体现车主希望缩短充电时长；第二类方式代表车主希望在减少充电成本的同时，避免电池额外损耗；第三类方式表示车主期望最小化充电成本。为激励 EV 参与微电网调度，针对第一种充电方式，采用峰电价进行收费；第二种充电方式，采用楼宇运行商制定的分时段电价；第三种充电方式，采用分时段电价充电，并进行放电补贴。

（1）额定功率充电 EV

$$\begin{cases} P_{t,u} = P_e & S_{t,u} \in [S_{u,or}, S_{u,ex}) \\ S_{t,u} = S_{t-1,u} + \eta_c P_{t,u} \Delta t / E_u \\ P_{t,1} = \sum_{u=1}^{N_{t,1}} P_{t,u} \end{cases} \quad (3-1)$$

式中， $P_{t,u}$ 、 $S_{t,u}$ 分别为车辆 u 在 t 时段充电功率、SOC； $P_{t,1}$ 、 $N_{t,1}$ 分别为 t 时段第一类 EV 总功率、EV 数量； P_e 、 η_c 、 $S_{u,or}$ 、 $S_{u,ex}$ 、 E_u 分别为车辆 u 的额定充电功率、充电效率、起始充电 SOC、离网期望 SOC、电池容量大小； Δt 为单位时长，为 1h。

(2) 灵活充电 EV

$$\begin{cases} P_{t,h} = P_e & S_{\min} \leq S_{t,h} \leq S_{h,cthr} \\ 0 \leq P_{t,h} \leq P_e & S_{h,cthr} \leq S_{t,h} \leq S_{\max} \\ S_{t,h} = S_{t-1,h} + \eta_c P_{t,h} \Delta t / E_h \\ P_{t,2} = \sum_{h=1}^{N_{t,2}} P_{t,h} \end{cases} \quad (3-2)$$

式中， $P_{t,h}$ 、 $S_{t,h}$ 分别为车辆 h 在 t 时段充电功率及 SOC； $S_{h,cthr}$ 为充电功率开始减小时的 SOC，式 (3-2) 中的第一个约束保证 SOC 未达到 $S_{h,cthr}$ 时，车辆 h 保持额定功率充电； $S_{\min}$ 、 $S_{\max}$ 分别为 SOC 的最小值和最大值，取值分别为 0.12、0.98； $P_{t,2}$ 、 $N_{t,2}$ 分别为 t 时刻第二类 EV 总功率、EV 数量。

(3) 灵活充放电 EV

$$\begin{cases} P_{t,j} = P_e & S_{\min} \leq S_{t,j} \leq S_{j,cthr} \\ 0 \leq P_{t,j} \leq P_e & S_{j,cthr} \leq S_{t,j} \leq S_{j,dthr} \\ -P_d \leq P_{t,j} \leq P_e & S_{j,dthr} \leq S_{t,j} \leq S_{\max} \\ S_{t,j} = S_{t-1,j} + \eta_c P_{t,j} \Delta t / E_j & P_{t,j} \geq 0 \\ S_{t,j} = S_{t-1,j} + P_{t,j} \Delta t / (\eta_d E_j) & P_{t,j} \leq 0 \\ P_{t,3} = \sum_{j=1}^{N_{t,3}} P_{t,j} & P_{t,j} \geq 0 \\ P_{t,3}^d = \sum_{j=1}^{N_{t,3}} P_{t,j} & P_{t,j} \leq 0 \end{cases} \quad (3-3)$$

式中， $P_{t,j}$ 、 $S_{t,j}$ 分别为车辆 j 在 t 时段充电功率及 SOC； P_d 、 η_d 为额定放电功

率、放电效率； $S_{j,dthr}$ 为开始放电 SOC，即 SOC 大于 $S_{j,dthr}$ 时，车辆 j 开始放电；

$P_{t,3}$ 、 $P_{t,3}^d$ 、 $N_{t,3}$ 分别为 t 时段第三类 EV 充电总功率、放电总功率和 EV 数量。

3.3 多目标优化调度模型

3.3.1 目标函数

当微电网中计及 EV 差异化充电需求时，不仅需要考虑微电网本身的日运行成本，还要考虑到 EV 车主的支付费用，因此本文构建以日运行成本和 EV 车主支付费用最小的多目标优化调度模型：

$$\min F = \mu_1 \left(\frac{C_e}{C_{emax}} \right) + \mu_2 \left(\frac{C_{ev}}{C_{EVmax}} \right) \quad (3-4)$$

$$\mu_1 + \mu_2 = 1 \quad (3-5)$$

式中， C_e 为微电网总运行成本； C_{ev} 为 EV 车主支付费用， C_{emax} 和 C_{evmax} 为电动汽车和柔性负荷均不参与优化调度时的系统日运行成本和电动汽车支付费用， μ_1 和 μ_2 为微电网总运行成本和 EV 车主支付费用的权重参数，两者的取值均为 0.5。

(1) 微电网总运行成本

本文中微电网运行成本主要考虑光伏电池运维成本^[66]、储能系统运维成本、购售电成本、电动汽车放电补贴和柔性负荷的补偿成本^[67]，故其目标函数表述如下：

$$\min C_e = \sum_{t=1}^{24} (C_{PV} + C_{EESS} + C_{Grid} + C_{EV} + C_{IDR}) \quad (3-6)$$

式中， C_e 为微电网总运行成本； C_{PV} 为光伏电池运维成本； C_{EESS} 为储能系统的运维成本； C_{Grid} 为与电网的购售电成本； C_{EV} 为电动汽车放电对车主的补贴； C_L 为对柔性负荷用户的补偿成本。

微电网的光伏电池成本主要考虑到运行方式对光伏电池的寿命影响很小，

因此本文不考虑其折旧成本，仅考虑其运行维护费用，即：

$$C_{PV} = \lambda_{PV} P_t^{PV} \quad (3-7)$$

式中， λ_{PV} 、 P_t^{PV} 分别为光伏电池运维系数和 t 时段的光伏有功出力。

微电网的储能充放电需考虑运行维护费用，即：

$$C_{EES} = \lambda_{EES} (P_t^{ESS, ch} + P_t^{ESS, dis}) \quad (3-8)$$

式中， λ_{EES} 、 $P_t^{ESS, ch}$ 、 $P_t^{ESS, dis}$ 分别为储能系统的维护系数和 t 时段的充放电功率。

微电网的交互成本主要由微电网与外部电网进行购售电生成的，即：

$$C_{Grid} = p_{t, buy}^{Grid} P_{t, buy}^{Grid} - p_{t, sell}^{Grid} P_{t, sell}^{Grid} \quad (3-9)$$

式中， $p_{t, buy}^{Grid}$ 、 $p_{t, sell}^{Grid}$ 分别为向电网购电的分时电价和向电网售电的分时电价，

$P_{t, buy}^{Grid}$ 、 $P_{t, sell}^{Grid}$ 分别为 t 时段系统从电网的购电功率和向电网售电功率。

微电网的电动汽车放电补贴主要与电动汽车的放电量有关，即：

$$C_{EV} = \lambda_{EV} P_{t, 3}^d \quad (3-10)$$

式中， λ_{EV} 、 $P_{t, 3}^d$ 分别为补贴电价和 t 时段的放电功率。

微电网的柔性负荷补偿成本认为温控负荷参与调度后温度仍在允许范围内，故不给予补偿，主要考虑为了激励可转移负荷电力用户参与需求响应所给予一定的补偿费用，即：

$$C_{IDR} = C_{price}^{trans, q} (P_t^{trans, q} + L_t^{trans, q}) \quad (3-11)$$

式中， $C_{price}^{trans, q}$ 为可转移负荷单位补偿成本。

(2) EV 车主支付费用最小

本文中 EV 车主支付费用主要优化第二类 and 第三类 EV 的充电费用和第三类 EV 的放电补贴，故其目标函数表述如下：

$$\min C_{ev} = \sum_{t=1}^{24} (C_c - C_{EV}) \quad (3-12)$$

因第一类 EV 充电单价为固定峰电价，第二类和第三类 EV 充电单价为微电

网设置的分时电价，即：

$$C_c = P_{t,1} p_{t,\max}^{\text{EV}} + (P_{t,2} + P_{t,3}) p_t^{\text{EV}} \quad (3-13)$$

式中， $p_{t,\max}^{\text{EV}}$ 为固定峰电价， p_t^{EV} 为向 EV 车主售电的分时电价。

3.3.2 约束条件

在对微网进行优化调度时，为防止调度方案失去合理性与可行性，需要考虑一些系统约束，即：

(1) 电功率平衡约束

当系统运行时，应保持每个发电单元的发电功率与负荷需求的平衡，表示为：

$$\begin{cases} P_{t,\text{buy}}^{\text{Grid}} + P_t^{\text{PV}} + P_t^{\text{ESS,dis}} = P_t^{\text{EV}} + P_t^{\text{new}} + P_t^{\text{ESS,ch}} + P_{t,\text{sell}}^{\text{Grid}} \\ P_t^{\text{EV}} = P_{t,1} + P_{t,2} + P_{t,3} - P_{t,3}^{\text{d}} \\ P_t^{\text{new}} = P_t^{\text{old}} + P_t^{\text{trans,q}} - L_t^{\text{trans,q}} + P_t^{\text{air}} \end{cases} \quad (3-14)$$

式中， P_t^{PV} 、 P_t^{EV} 、 P_t^{new} 、 $P_t^{\text{ESS,ch}}$ 和 $P_t^{\text{ESS,dis}}$ 分别为 t 时段光伏系统的有功出力、电动汽车总充放电功率、调度后楼宇负荷及储能系统充放电功率； P_t^{old} 为调度前 t 时段基础负荷与可转移负荷之和，为更好表示，记为可调度负荷。

(2) 大电网购售电约束

微电网与配电网之间的交换功率受到联络线路的约束，表示为：

$$\begin{cases} 0 \leq P_{t,\text{buy}}^{\text{Grid}} \leq I_t^{\text{buy}} P_{\text{buy,max}}^{\text{Grid}} \\ 0 \leq P_{t,\text{sell}}^{\text{Grid}} \leq I_t^{\text{sell}} P_{\text{sell,max}}^{\text{Grid}} \\ 0 \leq I_t^{\text{buy}} + I_t^{\text{sell}} \leq 1 \end{cases} \quad (3-15)$$

式中， $P_{\text{buy,max}}^{\text{Grid}}$ 、 $P_{\text{sell,max}}^{\text{Grid}}$ 分别为向电网购售电功率最大值； I_t^{buy} 是 t 时段微电网购电标志位 0-1 变量； I_t^{sell} 是 t 时段微电网售电标志位 0-1 变量。

3.3.3 模型求解流程

基于 CPLEX 的模型求解流程如图 3-1 所示，具体步骤如下：

步骤 1：获取未来 24h 的光伏出力、楼宇基础负荷和柔性负荷数据，利用蒙

特卡洛模拟得到 EV 车主的到达、离开时间及接入微电网时的电量；

步骤 2：建立储能系统充放电模型以及柔性负荷和 EV 的需求响应模型；

步骤 3：构建最小化微电网日运行成本和 EV 车主支付费用的多目标函数；

步骤 4：设定电功率供需平衡约束、储能系统充放电功率及电量约束、微电网与电网购售电功率约束和光伏出力功率约束；

步骤 5：利用 CPLEX 求解器进行混合整数线性优化问题的求解。

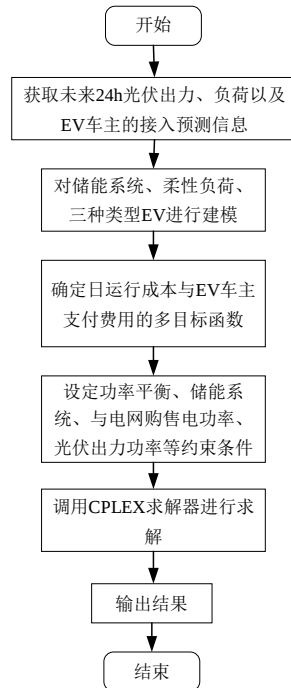


图 3-1 优化运行流程

3.4 算例分析

3.4.1 基础数据及模型参数

本算例仍以办公楼宇为研究对象，预测光伏出力、楼宇负荷及电动汽车到达、离开数据已在第 2 章给出。光伏发电系统和储能系统单位运维成本为 0.03 元/（kW·h）；购售电最大功率为 2000 kW。峰谷平时段划分为：峰时段（09:00-11:00，14:00-17:00）、谷时段（00:00-08:00，12:00-13:00）、平时段（18:00-24:00）。分时电价政策的具体电费、储能系统、EV 以及温控负荷的基本参数如表 3-1~表 3-4 所示。A 类、B 类、C 类 IDR 的调用容量上限分别为电负荷的 12%、8%、4%，单位补贴成本分别为 0.1 元/（kW·h）、0.2 元/

(kW·h)、0.3 元/(kW·h)。本文以 1h 为单位时间，优化调度周期为 24h，采用 CPLEX 求解器对模型进行求解。

表 3-1 分时购售电价

时段	向电网购售电价/[元/ (kW·h)]	向 EV 售电价/[元/ (kW·h)]
峰时段	1.5	2.1
谷时段	0.42	1.02
平时段	0.8	1.4

表 3-2 储能系统基本参数

参数	数值
额定充放电功率/kW	100
储能额定容量/kWh	1000
荷电状态最小值	0.1
荷电状态最大值	0.9
初始荷电状态	0.6
充/放电效率/%	90
最大充/放电功率/kW	100
单位运维成本/[元/(kW·h)]	0.03

表 3-3 EV 基本参数

参数	数值
额定充放电功率/kW	7
额定容量/kWh	64
荷电状态最小值	0.12
荷电状态最大值	0.98
功率开始减小的 SOC	0.4
开始放电的 SOC	0.6
充/放电效率/%	90
单位放电补偿价格/[元/ (kW·h)]	0.6

表 3-4 温控负荷基本参数

参数	数值
外墙传热系数	1.74
外墙面积/ m^2	9000
外窗传热系数	3.2
外窗面积/ m^2	500
建筑内部体积/ m^3	3000000
屋顶传热系数	2.8
屋顶面积/ m^2	3000
空调制冷效率	4.5
空气定压比热容	1.04

3.4.2 仿真结果与分析

本文以实际应用场景需求为基础，考虑到光储充柔微电网中存在部分 EV 车主对充电时间要求较高，因此在调度过程中必须考虑到额定功率充电负荷。为分析以不同类型 EV 按照不同数量接入微电网以及考虑柔性负荷作为灵活性资源参与调度对光储充柔微电网日运行成本、EV 车主支付费用的影响，设置了 4 种场景进行分析对比：

场景 1：不考虑电动汽车和柔性负荷参与优化调度的情况；

场景 2：考虑电动汽车和不考虑柔性负荷参与优化调度，且三类 EV 比例为 1：1：1 的情况；

场景 3：在场景 2 的基础上考虑柔性负荷参与调度；

场景 4：考虑电动汽车和柔性负荷参与优化调度，且三类 EV 比例为 1：0.5：1.5 的情况。

各场景下的优化调度结果如图 3-2 所示。表 3-5 给出了各场景下运行结果比较。根据图 3-2 和表 3-5，对调度结果分析如下：

在场景 1 中，楼宇负荷和 EV 无序充电负荷峰值相叠加，造成负荷峰上加峰，全天购电功率峰值出现在峰电价时段，从而增加微网的购电费用。楼宇负荷峰值为 928.08kW，日运行成本为 6588.28 元。在场景 2 中，由于考虑电动汽

车参与优化调度，部分EV充电负荷转移到了平电价时段，光伏和储能系统辅助供能，既满足了车主的充电需求，又减少了与电网的购售电成本。第三类EV在9:00-10:00放电容量较高，参与放电同时获得放电补贴。楼宇负荷峰值被控制在815.84W，日运行成本为5415.94元，相比场景1降低了1172.34元。电动汽车总放电补贴为125.74元。

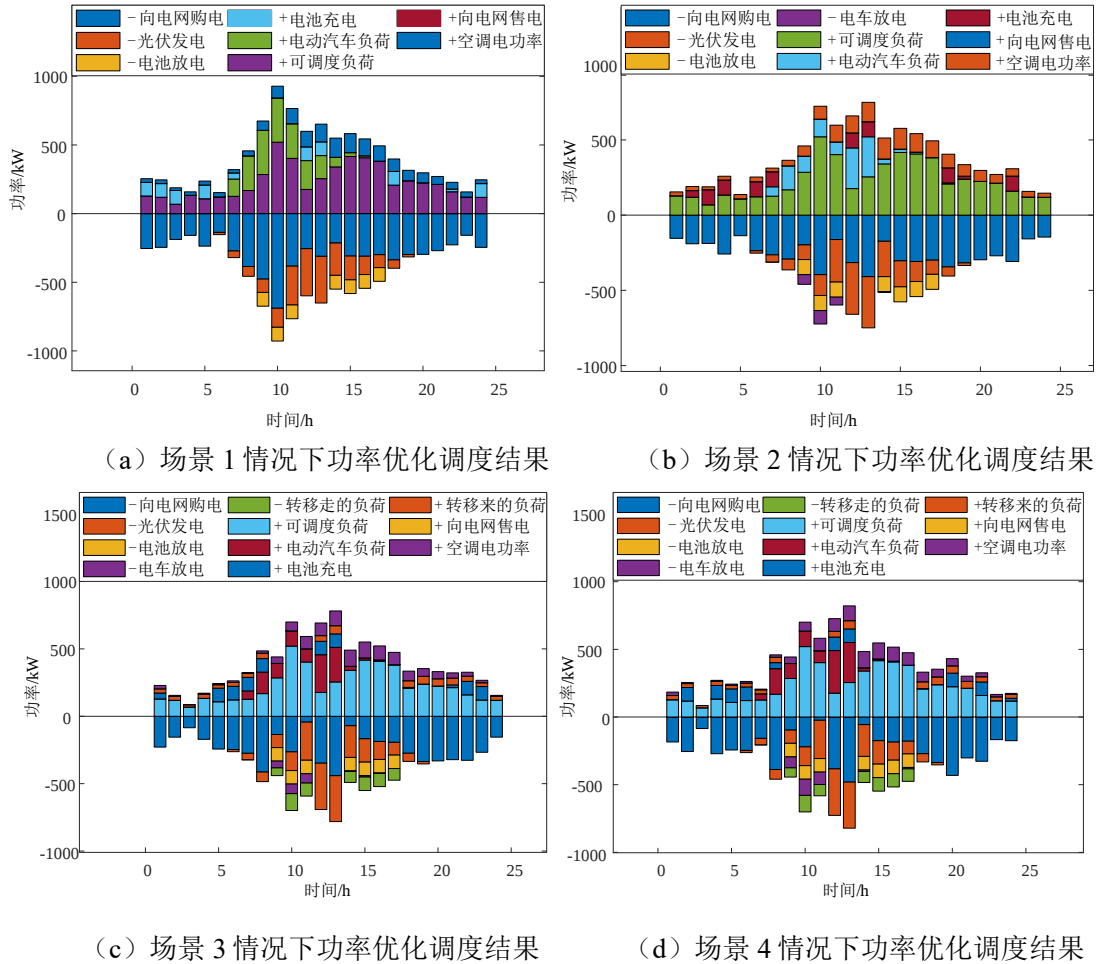


图 3-2 各场景下功率优化结果

在场景3中，由于考虑柔性负荷参与优化调度，可转移负荷从高电价时段转移到了低电价时段，对温控负荷实行需求响应后，由于人体对制冷温度具有一定的模糊性，所以在此场景适当提高室内温度可以使负荷曲线得到优化，相比于场景2，楼宇负荷峰值再次减少了35.28kW，日运行成本为4948.00元，相比场景2降低了467.94元。在场景4中，由于第二类EV数量减少，第三类EV数量增加，在9:00-11:00峰电价时段，总放电量增加。柔性优化后分布结果和场景3相同。楼宇负荷峰值被控制在740.96kW，日运行成本为4900.24元，相比场景3减少了47.76元。EV车主支付费用相比场景3减少了61.96元。

表 3-5 各场景下系统调度成本优化结果（单位：元）

场景	日运行成本	EV 车主支付费用	运维成本	柔性负荷补偿成本	电动汽车放电补贴	与电网交互成本
场景 1	6588.28	3704.42	69.94	0	0	6518.34
场景 2	5415.94	1634.70	69.94	0	125.74	5220.26
场景 3	4948.00	1634.70	69.63	224.56	125.24	4528.57
场景 4	4900.24	1572.74	69.94	224.56	188.58	4417.16

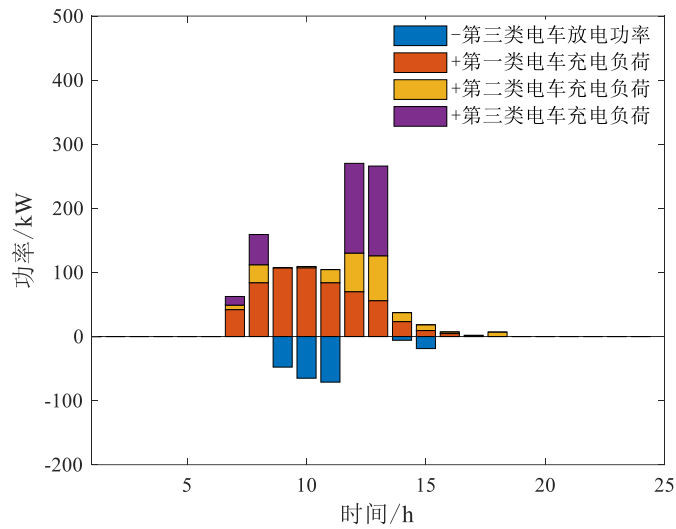


图 3-3 场景 3 下 EV 功率优化结果

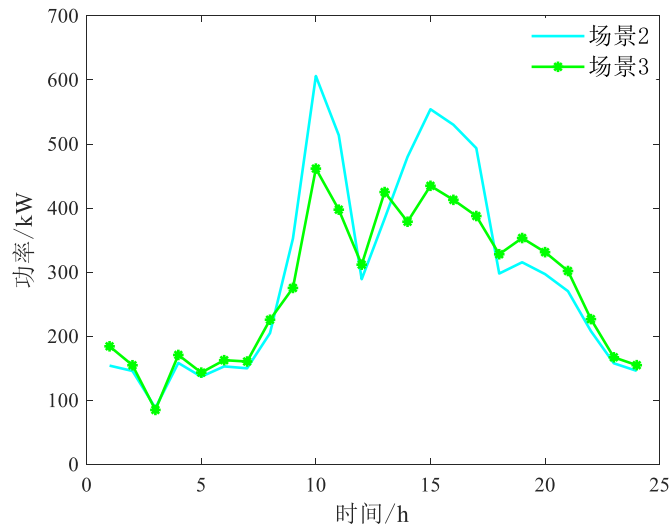


图 3-4 柔性负荷参与需求响应的优化曲线

图 3-3 所示为场景 3 中三种类型 EV 功率优化结果。从图 3-3 可以明显看出，第一类 EV 充电负荷在峰电价时段出现峰值，而第二类和第三类 EV 将充电负荷转移到平电价时段减少充电成本，并且在峰电价时段放电来获取收益。场景 2 和场景 3 的柔性负荷参与需求响应的优化曲线如图 3-4 所示。分析图 3-4 可知：

在电动汽车参与优化调度的基础上，与场景 2 相比，场景 3 在对柔性负荷实行需求响应后，室内的最佳温度从 25°C 调整为允许的范围内，并且峰谷差降低了 12.2%。

综合以上分析，EV 和柔性负荷作为灵活性资源共同参与微电网优化调度，能够有效降低日运行成本，考虑实际场景中 EV 车主的需求差异，可实现用户和楼宇的双赢。不同类型电动汽车按不同的数量比例接入微电网后，对运行成本和 EV 车主支付费用都会产生影响。

3.5 本章小结

本章在第 2 章构建的微电网运行结构的基础上，针对含光伏、储能、EV 和柔性负荷的微电网能量优化管理的问题，构建了以最小化微网日运行成本和 EV 车主充电费用为双目标，考虑 EV 车主需求差异的充放电模型和柔性负荷参与需求响应调度模型。通过设置多个场景进行对比分析可知，在分时电价的机制下通过综合考虑光伏、储能、V2B 技术以及楼宇内柔性负荷需求响应等调控手段对微电网能量进行管理，可有效降低微网的日运行成本、EV 车主充电费用和负荷峰值；考虑 EV 车主需求差异的充放电模型不但能够满足 EV 车主的不同充电需求，而且能够降低运行成本；通过比较不同类型 EV 按照不同数量比例接入微电网后，可得第一类 EV 数量不变，第二类 EV 数量减少，第三类 EV 数量增多时，日运行成本和 EV 车主充电费用都会降低；考虑可转移负荷和可削减负荷的加入，使得微电网在峰电价时段的购电量减少，不仅降低微网日运行成本，还能有效降低系统负荷峰值。

第 4 章 基于 IGDT 的光储充柔微电网日前优化调度

4.1 引言

第 3 章构建的模型主要针对电动汽车车主的充电需求以及微电网中柔性负荷的需求响应协同作用的运行方法进行研究。在上述模型中，调度周期内的光伏出力是确定的，而在实际运行时，光伏出力具有不确定性，这一特性会对调度运行产生显著影响。为应对这种不确定性带来的挑战，基于光伏出力的特性，本文应用信息间隙决策理论（Information Gap Decision Theory, IGDT），对光伏发电输出不确定性进行模型的建立，IGDT 能够在给出风险规避和风险追求两种策略下，有效量化系统可承受的最大扰动范围，进而评估不同调度方案的风险水平。

本章构建了一种基于 IGDT 解决光伏发电不确定性的日前优化调度模型。该模型以最小化系统总运行成本为优化目标，建立了鲁棒优化模型和机会寻求优化模型，实现对不同风险偏好下调度策略的量化分析并规划出完整的调度策略流程。通过调节偏差参数得到不同风险水平下最优调度方案。仿真表明，该模型能够有效描述光伏出力不确定性，帮助决策者基于风险偏好选择保守或激进的调度策略，实现了系统不确定性和经济性运行之间的平衡。

4.2 IGDT 优化模型

4.2.1 系统模型与不确定集模型

信息间隙决策理论，由Yalov Ben-Haim在2001年创立，是一种针对不确定信息的优化工具。该理论适用于数据极度匮乏或难以收集的情景，仅需关注变量的波动范围，无需依靠概率分布的假设，也不依赖于模糊信息的设定。由于其求解方便而且适用性广泛，IGDT已被广泛应用到电力系统领域。此外，IGDT可以量化参数变动而导致目标函数的双重效应，即可能使目标函数变差或者变优，进而分别对应风险规避和风险追求优化两种策略^[68-69]。

在风险规避的策略框架下，当决策者在看待不确定参数对预期目标的影响时，通常持有消极的态度。他们通过设置目标函数的最劣情境边界，推导出在保证目标不突破这一界限的情况下，不确定参数能够接受的最大变动范围，这种决策框架被称作IGDT鲁棒优化模型。在风险追求的决策策略下，决策者在面对不确定参数对目标影响时，表现出积极的心态，尽可能发掘优化目标的提升潜力，通过设置积极的目标值，从而进行不确定变量最小变动区间的寻求，这种即IGDT机会寻求优化模型。

系统调度模型的核心目标是在满足等式与不等式约束条件的前提下，得到最优调度方案。本章以最小化调度运行总成本作为目标函数，旨在确保系统的经济性运行。该模型的约束条件主要包括对设备出力、启停约束，功率平衡约束等。一般调度模型的表述如下：

$$\min f(x, \alpha) \quad (4-1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} H(x, \alpha) = 0 \\ G_{\min} \leq G(x, \alpha) \leq G_{\max} \end{cases} \quad (4-2)$$

式中， $f(x, \alpha)$ 、 $H(x, \alpha)$ 、 $G(x, \alpha)$ 分别为目标函数、等式和不等式约束条件； x 为一系列决策变量； α 为所需输入的参数集合。

在模型构建中，不确定集模型是指不确定参数的表示方法或者取值的范围。其中，包络限制模型、椭球限制不确定模型、加权方差模型是典型表现形式。

(1) 包络约束模型

$$U(\gamma, \hat{\alpha}) = \{\alpha \mid (1-\gamma)\hat{\alpha} \leq \alpha \leq (1+\gamma)\hat{\alpha}\} \quad (4-3)$$

式中， $U(\gamma, \hat{\alpha})$ 表示参数 α 的包络约束模型； γ 为参数实际值与预测值之间的偏差系数， $\gamma \geq 0$ ； $\hat{\alpha}$ 则表示为参数 α 的预测值。

(2) 椭圆约束不确定模型

$$U(\gamma, \bar{\alpha}) = \{\alpha \mid (\alpha - \bar{\alpha})^T C^{-1} (\alpha - \bar{\alpha}) \leq \gamma^2\} \quad (4-4)$$

式中， $U(\gamma, \bar{\alpha})$ 表示参数 α 的椭球约束不确定模型； $\bar{\alpha}$ 为参数 α 的均值； C 为协方差矩阵； $\bar{\alpha}$ 、 C 可由历史数据进行估算获得。

(3) 加权均方误差模型

$$U(\gamma, \alpha) = \{\alpha \mid \sigma^T W^{-1} \sigma \leq \gamma^2\} \quad (4-5)$$

式中, σ 为参数 α 实际值与预测值之间的偏差, $\sigma = \alpha - \hat{\alpha}$; W 为方差-协方差矩阵。

4.2.2 决策模型

由于决策者存在不同的风险偏好, IGD 决策模型被划分为鲁棒优化模型和机会寻求模型。然后, 采用 4.2.2 第一个模型对不确定参数进行处理, 能够推导出两种决策模型的通用表达形式。

(1) 鲁棒优化模型

这种建模方法能处理不确定参数向不利的目标结果变动的情景。鲁棒优化模型可表述为如下:

$$\hat{\lambda}(x, f_0) = \max \{\lambda \mid \max f(x, \alpha) \leq (1 + \beta) f_0\} \quad (4-6)$$

式中, $\hat{\lambda}(x, f_0)$ 表示鲁棒优化目标, 可衡量不确定参数的波动程度, 即不确定度; β 为目标偏差系数, 此值的设定具有主观性; f_0 为目标函数的预期值; $(1 + \beta) f_0$ 则可以对不确定参数对目标可能产生不利影响进行描述。

在鲁棒优化决策框架下, $\hat{\lambda}(x, f_0)$ 的求解结果越大, 意味着系统抵抗风险的能力越强, 但同时实际的成本支出也会相应增加。

(2) 机会寻求模型

这种模型适用于不确定参数朝着有利于目标实现方向变动的场景。其可通过如下表述:

$$\hat{\theta}(x, f_0) = \min \{\theta \mid \min f(x, \alpha) \leq (1 - \eta) f_0\} \quad (4-7)$$

式中, $\hat{\theta}(x, f_0)$ 为机会寻求目标, 即不确定水平; θ 为机会寻求策略对应的参数偏差系数, η 为目标偏差系数, 反映决策者期望获取风险收益程度, 其数值通常由决策者考虑实际情况确定; $(1 - \eta) f_0$ 为不确定参数对目标产生积极影

响的作用关系。

采用机会寻求策略时， $\hat{\theta}(x, f_0)$ 的计算结果越高，代表了利用不确定性获得的收益越大，但系统所承担的风险也会相应提升。

4.3 考虑光伏出力不确定性的日前优化调度模型

基于 2.2-2.3 小节阐述的光储充柔微电网运行结构、主要元件的数学模型、3.2 建立的电动汽车模型，在满足电力设备与电力系统运行约束的情况下，同时考虑光伏出力的不确定因素，对日前微电网经济性运行进行建模。

4.3.1 光伏出力预测不确定性模型

针对光伏出力的不确定性，采用包络约束进行刻画，进而建立区间不确定性模型 $U(\alpha_w, P_t^{PV})$ ：

$$U(\alpha_w, P_t^{PV}) = \{P_t^{PV, \text{true}} : (1 - \alpha_w)P_t^{PV} \leq P_t^{PV, \text{true}} \leq (1 + \alpha_w)P_t^{PV}\} \quad (4-8)$$

式中， $P_t^{PV, \text{true}}$ 为 t 时段实际光伏出力值； α_w 则表示光伏出力的波动程度，其具体数值由预测误差决定。

4.3.2 IGDT 调度优化策略

第 3 章为研究电动汽车参与优化调度，将微电网日运行成本和电动汽车充电费用共同作为目标函数构建日前优化调度确定模型。其中，采用的是预测光伏出力值。然而，第 4 章主要研究光伏出力不确定性带来的影响，故以最小化运行成本为目标函数，如式（4-9）所示。将电动汽车充电费用作为约束进行建模，即电动汽车充电费用不大于确定性模型下的充电费用。在实际优化调度模型中纳入不确定性因素时，应把光伏发电的预测数据替换为实际发电数据。接着，将不确定度置为零，即 $\alpha_w = 0$ ，此时日前调度模型是未考虑光伏出力波动性的情况下的确定性调度模型。通过将光伏发电预测值以及基本参数输入模型进行求解，最终求解得到的目标函数值即为系统的基础运行成本，记为 F_0 ， F_0

在 IGDT 调度模型中作为调度决策者制定调度策略的参考成本^[70]。

$$\min F = \sum_{t=1}^{24} (C_{PV} + C_{EES} + C_{Grid} + C_{EV} + C_L) \quad (4-9)$$

$$C_{PV} = \lambda_{PV} P_t^{PV} \quad (4-10)$$

$$C_{EES} = \lambda_{EES} (P_t^{ESS, ch} + P_t^{ESS, dis}) \quad (4-11)$$

$$C_{Grid} = p_{t, buy}^{Grid} P_{t, buy}^{Grid} - p_{t, sell}^{Grid} P_{t, sell}^{Grid} \quad (4-12)$$

$$C_{EV} = \lambda_{EV} P_{t, 3}^d \quad (4-13)$$

$$C_{IDR} = C_{price}^{trans, q} (P_t^{trans, q} + L_t^{trans, q}) \quad (4-14)$$

$$C_c = P_{t, 1} p_{t, max}^{EV} + (P_{t, 2} + P_{t, 3}) p_t^{EV} \quad (4-15)$$

$$C_c \leq C_0 \quad (4-16)$$

式中， C_0 为电动汽车充电费用不大于确定性模型下的充电费用，即 1634.70 元。

确定性模型的其余约束条件与第 3 章相同。

本节基于 IGDT，为决策者提供了一个框架，从而帮助管理者根据可调整的成本预期评估和优化决策能力。光伏发电的不确定性量化为不确定度 $\varphi (\varphi = \alpha_w)$ 。

不同优化策略的 IGDT 调度模型如下：

(1) 鲁棒优化策略。在这种策略下的决策者认为不确定性会对系统运行产生显著的影响，为了保证经济性运行，力求最大程度减少不确定性对运行结果的干扰，通过构建鲁棒函数实现这一目标，从而确保在不确定参数波动至极端情况时，微电网仍能维持最优运行状态，因此采用风险规避策略建立的鲁棒优化模型为：

$$\max \varphi \quad (4-17)$$

$$s.t. \begin{cases} \max F \leq (1 + \beta_{RM}) F_0 \\ P_t^{PV, true} \in (\alpha_w, P_t^{PV}) \\ (2-1)-(2-6), (2-10)-(2-20) \\ (3-1)-(3-15), (4-9) \end{cases} \quad (4-18)$$

式中， β_{RM} 为设置的成本预留参数。

(2) 机会寻求优化策略。该策略认为，充分利用不确定性可能会带来潜在的优化机会。为了实现成本降低，通过最小化不确定性波动的影响来优化决策。因此，在风险寻求策略，建立了机会寻求模型为：

$$\min \varphi \quad (4-19)$$

$$s.t. \begin{cases} \min F \leq (1 - \beta_{OM})F_0 \\ P_t^{PV, true} \in (\alpha_w, P_t^{PV}) \\ (2-1)-(2-6), (2-10)-(2-20) \\ (3-1)-(3-15), (4-9) \end{cases} \quad (4-20)$$

式中， β_{OM} 为风险寻求优化策略下的成本释放参数。

4.4 模型转化及求解流程

4.4.1 模型转化

鲁棒 IGDT 模型旨在保证光伏出力在不确定性区间变化时，系统成本能够控制在预期调度成本。当光伏出力取值为不确定集下限时，系统成本能达到最大值，因此可将模型转化为如式（4-22）：

$$\max \varphi \quad (4-21)$$

$$s.t. \begin{cases} F \leq (1 + \beta_{RM})F_0 \\ P_t^{PV, true} = (1 - \alpha_w)P_t^{PV} \\ (2-1)-(2-3), (2-6)-(2-17) \\ (3-1)-(3-15), (4-9) \end{cases} \quad (4-22)$$

机会 IGDT 模型中，当实际光伏出力取为不确定集的上界时，目标函数可取得最小值，因此可将模型转化为如式（4-24）：

$$\min \varphi \quad (4-23)$$

$$s.t. \begin{cases} F \leq (1 - \beta_{RM})F_0 \\ P_t^{PV, true} = (1 + \alpha_w)P_t^{PV} \\ (2-1)-(2-3), (2-6)-(2-17) \\ (3-1)-(3-15), (4-9) \end{cases} \quad (4-24)$$

4.4.2 模型求解流程

图 4-1 为基于 IGDT 处理光伏不确定性的光储充柔微电网调度流程图。

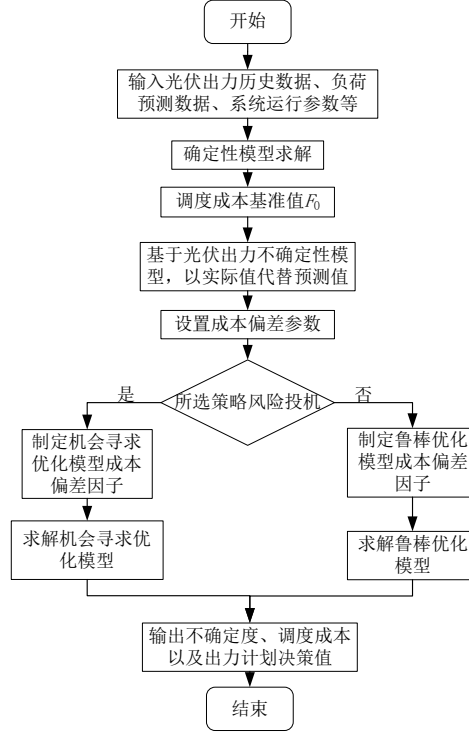


图 4-1 考虑光伏不确定性的微电网调度流程图

模型求解的步骤如下：

步骤 1：输入光伏出力历史数据、负荷预测值以及系统运行参数等必要信息；

步骤 2：将所有数据带入确定性调度模型，计算出期望成本最优值 F_0 ，并将其作为 IGDT 优化的基准参考值；

步骤 3：基于光伏预测的不确定性进行建模，用实际值 $P_t^{PV,true}$ 替换预测值，设置成本偏差系数 β_{OM} 与 β_{RM} ；

步骤 4：分别求解机会寻求策略和风险规避策略下的 IGDT 优化模型，得到预测的不确定程度 φ 以及对应的调度成本。

4.5 算例分析

4.5.1 基础数据及模型参数

系统结构和运行参数具体内容详见 3.5.1 小节。在本文中，将鲁棒优化方案与机会寻求方案下的成本参数均设定为统一标准（ $\beta_{OM} = 0.05$ ， $\beta_{RM} = 0.05$ ），并根据温控负荷的特点分为冬夏两季，假设每时段冬季光伏出力为夏季光伏出力 50%，室内温度调节区间夏季设置为 23~27℃，冬季设置为 21~26℃。

4.5.2 仿真结果与分析

为了分析确定性模型和不确定性模型在冬季、夏季的调度情况，设置 6 种优化场景进行对比分析，如表 4-1 所示。

表 4-1 模型优化场景设置

场景	光伏机组	电动汽车	柔性负荷	风险规避	机会寻求	夏季	冬季
场景 1	√	√	√	×	×	√	×
场景 2	√	√	√	√	×	√	×
场景 3	√	√	√	×	√	√	×
场景 4	√	√	√	×	×	×	√
场景 5	√	√	√	√	×	×	√
场景 6	√	√	√	×	√	×	√

各个场景优化调度的具体成本如表 4-2 所示，确定性模型下冬夏两季温控负荷的调度情况如图 4-2 所示。

（1）调度成本优化结果分析

通过观察表 4-2 和图 4-2 可知，光伏和灵活性资源无法满足微电网的供需平衡，因此需要向大电网购电。系统为了减小成本，在可转移负荷和温控负荷允许的范围内，使其完全参加需求响应。由于夏季光伏出力较冬季高，夏季系统从电网的购电费用低于冬季从电网的购电费用。此外，在温控负荷参与需求响应过程中，夏季温控负荷的功率小于冬季温控负荷的功率，因此，相比于冬季而言，夏季微电网的日运行成本远低于冬季。场景 2 和场景 4 运维成本相较

于各自确定性场景下的运维成本低，这是因为风险规避策略认为光伏实际出力小于预测值，这两个场景下对光伏发电的运行维护成本较低。场景 5 和场景 6 运维成本相较于各自确定性场景下的运维成本高，这是因为风险追求策略认为光伏实际出力大于预测值，这两个场景下对光伏发电的运行维护成本较高。

表 4-2 各场景下系统调度成本优化结果（单位：元）

场景	日运行成本	EV 车主支付 费用	运维成本	柔性负荷 补偿成本	电动汽车放 电补贴	与电网交互 成本
场景 1	4980.00	1634.70	69.63	224.56	125.24	4560.57
场景 2	5195.40	1634.50	62.63	224.56	125.34	4782.87
场景 3	4700.60	1634.50	77.30	224.56	125.24	4273.50
场景 4	8507.45	1634.70	39.14	224.56	125.72	8118.03
场景 5	8566.67	1601.74	38.95	224.56	125.14	8178.02
场景 6	7898.48	1601.74	56.39	224.56	49.43	7568.10

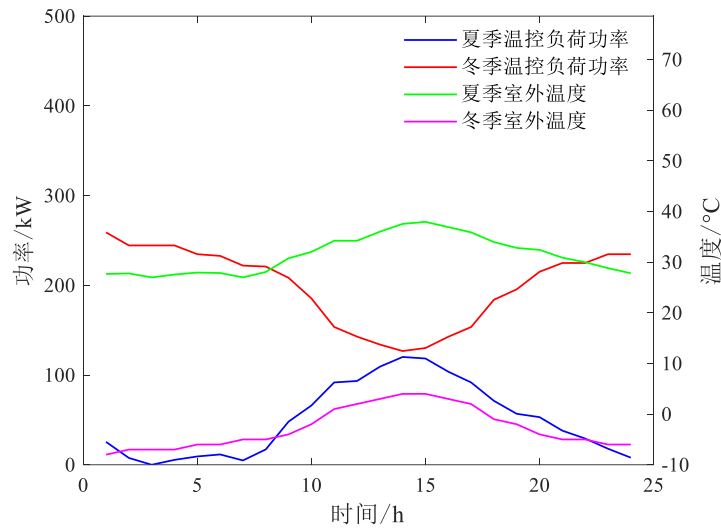


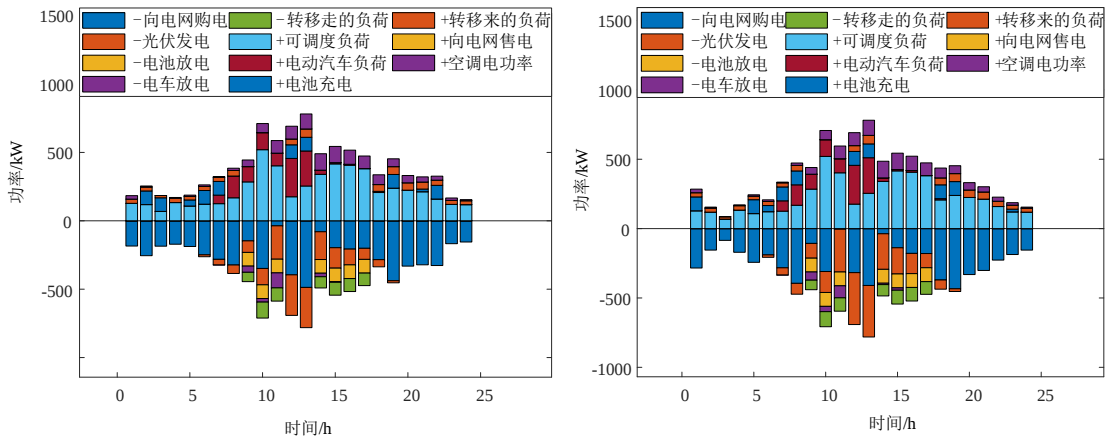
图 4-2 冬夏温控负荷功率情况

（2）基于 IGDT 的优化结果分析

考虑到光伏出力的不确定性，运用本文构建的 IGDT 模型，得到夏季风险规避（场景 2）和风险追求策略（场景 3）下的微电网优化调度结果，如图 4-3 所示。

由图 4-3 可知，当光伏出力预测存在偏差时，EMS 可以对各单元的出力进行优化从而确保微电网的运行能够满足不同风险倾向下的成本要求。风险规避策略下，系统为降低运行风险，与场景 1 相比，向电网的购电量会增加，保证

供电需求，导致与电网交互成本增加了 264.12 元；机会寻求策略下，系统为利用光伏出力预测风险，减少从电网的购电量，导致与电网交互成本降低了 245.34 元，最终日运行成本释放了 237.67 元。低谷时段，系统通过低电价从电网购电，将电能以蓄电池系统存储起来在高峰时段释放，进一步降低系统成本。高峰时段，储能系统释放电能，满足负荷对电能的需求。可转移负荷虽然在两种策略中的转移时段和转移量均不同，但都是在高电价时段转出，在低电价时段转入，降低了从电网的购电量以及峰谷差；电动汽车在高电价时段放电，满足车主期望充电成本降低的需求。



(a) 风险规避调度策略

(b) 机会寻求调度策略

图 4-3 IGDT 优化调度结果

(3) 风险偏好敏感性分析

本章考虑光伏出力的不确定性，并对两种模型求解结果进行深入分析。结果显示，在保证调度总成本符合管理者预期的前提下，风险规避策略所容忍光伏实际变化的最大不确定性为 14.8%，而机会寻求策略则允许光伏实际变化的最小不确定性为 14.5%。鉴于最终的不确定度受决策者风险差异因素的影响，在本小节对成本参数开展了敏感性分析旨在为决策者提供合适的决策依据。夏季调度成本和不确定度随成本参数变化的趋势如图 4-4、图 4-5 所示。表 4-3 展现了不同成本参数下 IGDT 模型求解结果，其中偏差系数分别表示为 β_{RM} 与 β_{OM} 。

由表 4-3、图 4-4 和图 4-5 可以看出，在风险规避型 IGDT 中，随着偏差系数 β_{RM} 的增大，不确定度 φ 也随之增大，同时运行成本也相应增加。这主要是因为风险规避型 IGDT 中，保守决策者往往从悲观的角度出发，认为不确定

性的扩大将会对降低成本产生负面影响。因此，该策略致力于在不确定参数波动达到极端，仍使得微电网系统运行最优，并在确保基本经济性的前提下，最大限度规避不确定性带来的风险。所以随着光伏出力不确定性的增加，在预测出力大于光伏实际出力的场景下，系统若要满足负荷必须向大电网购电，系统运行成本也增加，以增强微电网系统运行的稳定性。因此随着 β_{RM} 的增大，光伏出力不确定性引发的不利风险越大，调度运行成本越高，且光伏出力在成本偏差系数 β_{RM} 允许范围内变化时，能确保调度的运行成本始终低于保守决策者的最大接受成本 $(1 + \beta_{RM})F_0$ 。

在风险追求型 IGDT 中，随着偏差系数 β_{OM} 的增大，不确定度 φ 增大，但是系统运行成本减小，这是因为在风险追求型 IGDT 模型中，决策者倾向于从乐观角度出发，认为不确定性波动能够给系统运行带来积极影响。随着光伏出力不确定性的提高，在预测处理小于光伏实际出力的场景下，系统向电网的购电量减少，有利于成本降低。因此光伏出力波动程度越大，不确定性带来的好处越大，调度成本就越低，且光伏出力在偏差系数允许的范围内变化时，都有机会使调度成本低于激进决策者的预期值 $(1 - \beta_{OM})F_0$ 。

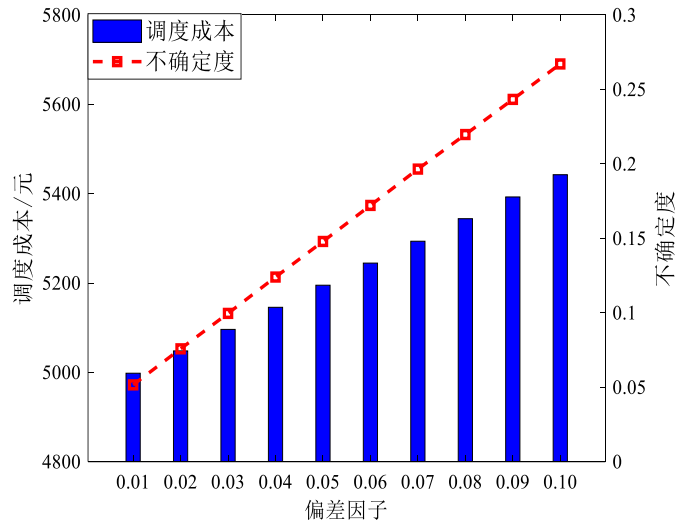


图 4-4 鲁棒模型不确定度及调度成本趋势

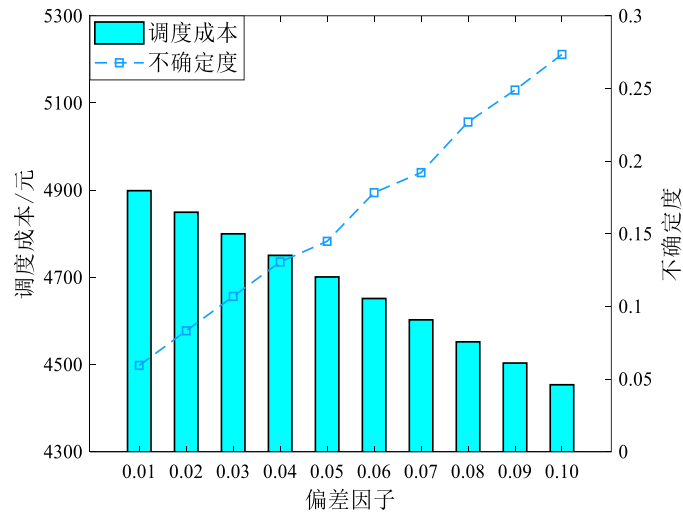


图 4-5 机会模型不确定性及调度成本趋势

表 4-3 风险偏好的敏感性分析结果

偏差系数	风险规避策略		风险追求策略	
	调度总成本/元	不确定性	调度总成本/元	不确定性
0.01	4998.05	0.0516	4898.85	0.0594
0.02	5047.98	0.0758	4849.37	0.0832
0.03	5096.14	0.0996	4799.86	0.1069
0.04	5145.58	0.1140	4730.42	0.1306
0.05	5195.40	0.1479	4700.60	0.1448
0.06	5244.54	0.1721	4631.46	0.1783
0.07	5293.49	0.1965	4602.51	0.1921
0.08	5343.94	0.2197	4552.06	0.2269
0.09	5392.63	0.2433	4503.37	0.2489
0.1	5442.42	0.2671	4453.58	0.2734

4.6 本章小结

本章在第 3 章构建的考虑 EV 车主需求差异和柔性负荷需求响应的微电网调度模型的基础上，考虑发电侧光伏出力的不确定性，构建了基于 IGDT 处理光

伏出力不确定性的光储充柔微电网优化调度模型。通过多个场景对比分析可知，由于冬季光伏出力小于夏季光伏出力，微电网冬季运行成本高于夏季；通过算例分析可知，若不确定参数在一定范围内变化时，鲁棒调度策略更加保守，倾向于更多地依赖向电网购电，从而使调度成本上升；而机会寻求调度策略将变得更加激进，由于向电网购电减少，从而降低调度成本；通过对成本偏差系数的敏感性分析，可以帮助管理者寻求符合预期风险偏好的调度优化方案。

第 5 章 计及柔性负荷响应特性的光储充柔微电网多时间尺度优化调度

5.1 引言

第 4 章所建立的日前优化调度模型，充分考虑了光伏发电输出的不确定性，而且依据 24h 长时间尺度的源荷数据，一次性规划出全天调度安排。然而，由于时间尺度不同，光伏出力和负荷预测精确程度呈现差异^[71-72]。如果完全按照日前计划进行各单元出力的安排，可能会出现很大程度的偏差，而且会使调度人员的工作难度增加。由于微电网光伏发电和负荷需求预测值精度随时间尺度的缩短而提升，因此，多时间尺度优化方法被应用于微电网调度管理，以有效应对并解决上述问题。

本章对新能源出力特性以及柔性负荷所具有的特性进行了深入分析，在第 4 章日前调度计划的基础上，对时间尺度进行细化，根据不同时段源荷预测数据的特点，建立日内、实时调度模型，从而形成多时间尺度优化调度策略。首先，部分可转移负荷用户响应速度慢，在日前确定其负荷响应量；其次，在日前调度的基础上，进一步完成日内优化调度；接着，进行实时调度。经过仿真表明，多时间尺度优化调度可以显著减轻光伏出力以及负荷预测偏差对调度安排的影响，在实现微电网的优化调度时，不仅能够确保系统的经济性，还能有效提升供电的稳定性。

5.2 优化调度策略

光伏预测精度随时间尺度的变化而有所不同，预测间隔越长，光伏预测出力与实际出力之间的误差会越大。类似地，柔性负荷在不同时间尺度上的预测精度也具有差异性，并且不同时间尺度上柔性负荷参与微电网的资源、响应时间、响应速度、持续时间也有所不同^[73]。例如，可迅速响应用户需求的蓄热型热水器，而部分电机类型负荷做出响应的前提是需要提前一段时间进行通知。

在不同时间尺度下，各种负荷在提前通知时长、调度补偿以及可调用的功率范围展现出差异性。通常，要使需求响应对系统发电计划的制定越有利，同时给用户带来的干扰越小，提前通知的时间应越长。然而，如果各类 IDR 资源全部在日前调度中确定响应量，就未能合理利用各类资源的调节潜力。因此，应将各类 IDR 的时间响应特性和不同时间尺度结合进行优化调度，从而制定更贴近于实际情况的计划。由 2.3.4 小节可知，各类 IDR 的响应特性与时间尺度之间的关系，表 5-1 对不同 IDR 响应特性进行总结。

表 5-1 不同 IDR 类型的响应特性

类型	响应机制	响应时间	响应特点
A 类 IDR	依据激励信号	日前响应	按照激励合同约定，获取响应补偿，调度成本高
B 类 IDR		日内响应	
C 类 IDR		实时滚动	

日前调度计划以 1 小时为间隔，提前 24 小时规划整个调度周期。在此阶段中，将日前光伏出力预测数据、电负荷预测数据作为微电网初始调度数据，通过调度优化流程，可以将 A 类 IDR 的响应量确定下来并得到日前出力计划。日内滚动调度计划采用 15 分钟为间隔，调度周期为 4h^[74-75]的方法，根据日内短期光伏、电负荷预测数据进行优化调度。B 类 IDR 响应量、储能设备的启停状态及电动汽车的充放电功率可以在此阶段中确定下来。实时调度计划时间尺度进一步缩短为 5 分钟，每 15 分钟为一个调度周期制定一次计划^[76]。在这个时间尺度下，采用预测误差更小的超短期光伏预测数据和实时电负荷预测数据进行优化，在 A 类、B 类 IDR 响应量已确定的基础上，确定 C 类 IDR 的调用量。通过这三个阶段的逐步遍历和优化调整，实现了对 24 小时电力调度的精细管理。

5.3 优化调度建模

5.3.1 日内调度计划建模

在日内调度过程中，实施的是日内滚动计划。该计划使用了比日前调度更准确的预测信息，通过不断滚动的方式，对剩余的时间进行优化，从而制定出一天之内的调度安排。日内调度作为日前调度和实时调度的衔接环节，发挥承

上启下的作用。日内调度模型与日前调度模型非常相似，该部分需要不断更新调度起始时刻，以适应不断变化的实际情况。将日前调度的 A 类 IDR 响应量作为已知量，纳入日内优化调度的范围。日内调度确定 B 类 IDR 调用量、储能设备的启停状态及电动汽车的充放电功率。具体如下式：

(1) 目标函数

日内优化调度以未来 4 小时微电网的运行成本最小为目标，本章中微电网运行成本主要考虑光伏电池运维成本、储能系统运维成本、与电网交互成本、电动汽车放电补贴以及柔性负荷参与优化调度的补偿成本，故其目标函数表述如下：

$$\min C_e = \sum_{t=t_0}^T (C_{PV} + C_{EES} + C_{Grid} + C_{EV} + C_{IDR}^B + C_{IDR}^C) \quad (5-1)$$

$$\begin{cases} C_{PV} = \lambda_{PV} P_t^{PV} \\ C_{EES} = \lambda_{EES} (P_t^{ESS, ch} + P_t^{ESS, dis}) \\ C_{Grid} = p_{t, buy}^{Grid} P_{t, buy}^{Grid, RiNei} - p_{t, sell}^{Grid} P_{t, sell}^{Grid, RiNei} \\ C_{EV} = \lambda_{EV} P_{t, 3}^d \\ C_{IDR}^B = C_{price}^{trans, B} (P_t^{trans, B} + L_t^{trans, B}) \\ C_{IDR}^C = C_{price}^{trans, C} (P_t^{trans, C} + L_t^{trans, C}) \end{cases} \quad (5-2)$$

(2) 约束条件

微电网与大电网交互功率在日内滚动计划与日前调度计划的偏差约束

$$|P_t^{Grid, RiNei} - P_t^{Grid, RiQian}| \leq \Delta P_{max} \quad (5-3)$$

式中， $P_t^{Grid, RiNei}$ 、 $P_t^{Grid, RiQian}$ 分别为日内、日前 t 时刻微电网和大电网交互功率，

ΔP_{max} 为日前计划与日内滚动计划偏差上限，本文设置为 50 kW。

日内滚动调度的其余约束条件，如光伏出力约束如式 (2-1)，储能系统约束如式 (2-2) 至 (2-6)，柔性负荷约束如式 (2-10) 至 (2-20)，EV 约束如式 (3-1) 至 (3-3)。电功率平衡约束如式 (3-14)，大电网购售电约束如式 (3-15)。

5.3.2 实时调度计划建模

在多时间尺度优化调度框架中，实时调度是时间尺度最小的一环，负责即

时调整。与日内优化调度的数据相比，实时优化调度所用的预测数据更为精确，能够针对各调度单元实际运行情况及时作出相应调整，充分体现调度的实时性和灵活性。实时调度计划是在日内滚动调度的基础上，采用更为精确的光伏出力和负荷预测信息，每 5min 滚动一次，得到后 15min 的运行调度计划，从而实现对日内调度方案与实际运行状态之间偏差的及时修正。在实时调度阶段，将在日前、日内确定的变量作为常量带入。该阶段确定 C 类 IDR 调用量和储能系统充放电功率。

(1) 目标函数

实时优化调度以微电网的运行成本最小为目标，如式：

$$\min C_e = \sum_{t=t_0}^T (C_{PV} + C_{EES} + C_{Grid} + C_{IDR}^C) \quad (5-4)$$

$$\begin{cases} C_{PV} = \lambda_{PV} P_t^{PV} \\ C_{EES} = \lambda_{EES} (P_t^{ESS, ch} + P_t^{ESS, dis}) \\ C_{Grid} = p_{t, buy}^{Grid} P_{t, buy}^{Grid, Shishi} - p_{t, sell}^{Grid} P_{t, sell}^{Grid, Shishi} \\ C_{IDR}^C = C_{price}^{trans, C} (P_t^{trans, C} + L_t^{trans, C}) \end{cases} \quad (5-5)$$

(2) 约束条件

$$|P_t^{Grid, ShiShi} - P_t^{Grid, RiNei}| \leq \Delta P'_{max} \quad (5-6)$$

式中， $P_t^{Grid, ShiShi}$ 为 t 时刻实时微电网与大电网交互功率， $\Delta P'_{max}$ 为日前计划与日内滚动计划偏差上限，设置为 10 kW。

实时调度的其余约束条件，如光伏出力约束如式 (2-1)，储能系统约束如式 (2-2) 至 (2-6)，柔性负荷约束如式 (2-10) 至 (2-20)。电功率平衡约束如式 (3-14)，大电网购售电约束如式 (3-15)。

5.3.3 模型求解流程

本章所构建的微电网多时间尺度优化调度方法可以划分为以下三个时段：日前优化阶段、日内滚动优化阶段和实时优化调度阶段。模型具体求解流程如图 5-1 所示，具体步骤如下：

步骤 1：根据日前预测信息进行日前调度，从而确定 A 类 IDR 响应量的大

小；

步骤 2：根据提前 4h 的光伏、负荷预测数据，进行日内调度并确定 B 类 IDR 响应量大小、EV 充放电功率及储能启停计划；

步骤 3：基于提前 15min 光伏、负荷预测数据进行实时调度，确定各单元出力计划及 C 类 IDR 大小。

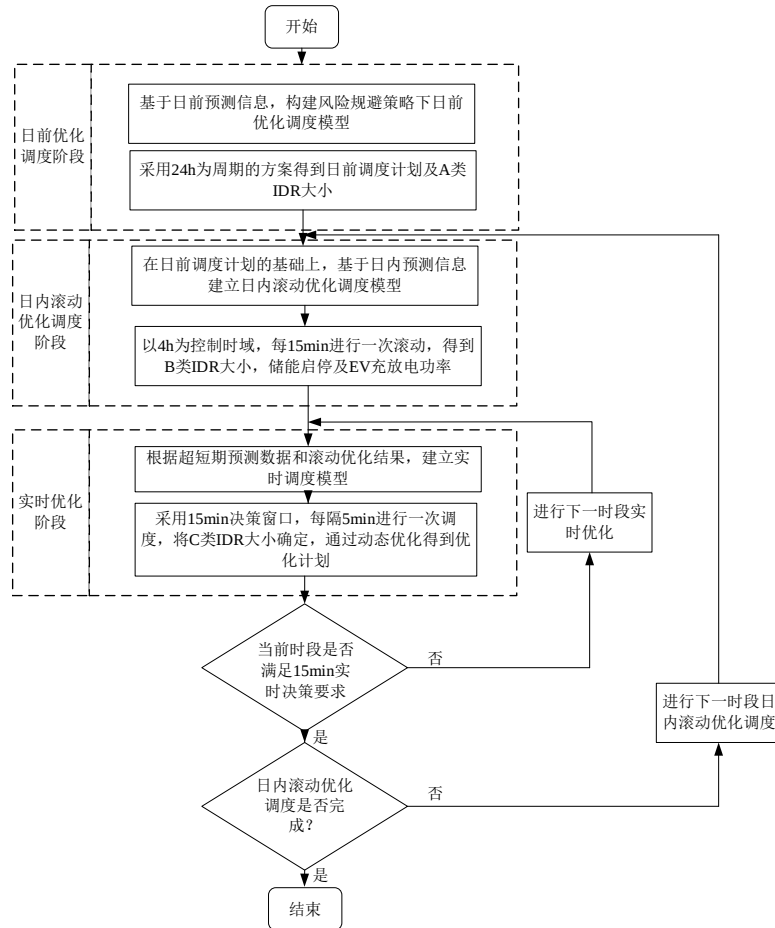


图 5-1 多时间尺度优化调度模型求解流程图

5.4 算例分析

5.4.1 基础数据及模型参数

本章在第 4 章日前调度数据的基础上进行算例仿真，以第 4 章偏差系数为 0.05 的夏季风险规避策略下的日前调度结果为参考，其他基础参数参考第 3 章，仍采用 MATLAB R2023b 仿真平台，并借助 CPLEX 求解器进行运算。在日内滚动优化调度阶段周期设为 4h，单位调度时长 $\Delta t = 15\text{min}$ ；实时调度阶段周期设

为 15min，单位调度时长 $\Delta t = 5\text{min}$ 。光伏和负荷预测曲线分别是在典型日实际光伏输出、实际负荷需求上，分别叠加不同比例的扰动生成。其中日前光伏预测输出和负荷需求的误差设为 10%，日内和实时尺度的误差则分别为 5%和 3%。日前、日内、实时各阶段的光伏出力预测和负荷预测如图 5-2 和图 5-3 所示。

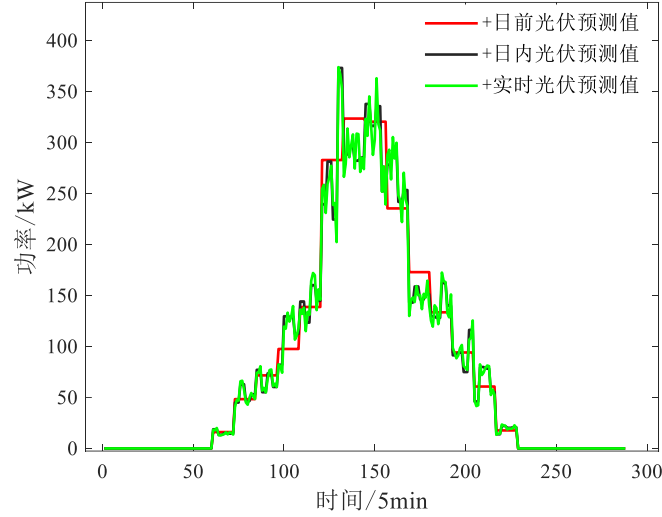


图 5-2 各时间尺度光伏预测出力

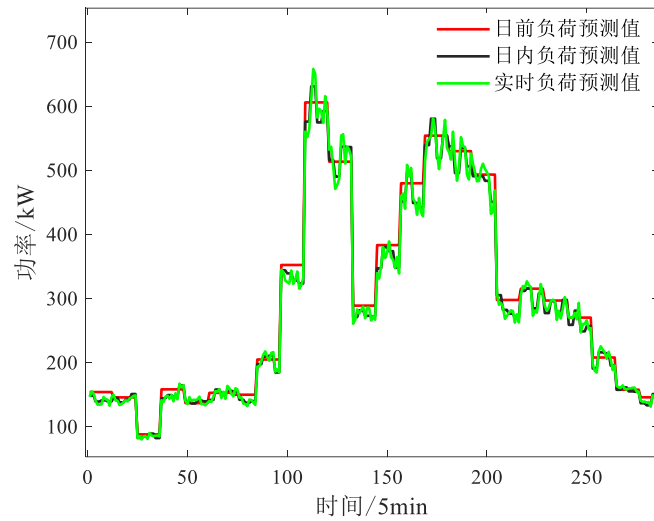


图 5-3 各时间尺度负荷预测

目前，光伏出力受到环境等各种不确定因素的影响，具有波动性。由图 5-2 可以看出，日内、实时光伏出力的预测情况与日前数据相比存在一定的偏差，更符合当天的实际出力。随着时间尺度的缩短，给出的预测数据点更加精确，经多时间尺度处理的数据更贴近实际情况，因此可以高效完成多时间尺度优化调度工作。

观察图 5-3 的负荷曲线，可见在不同时间尺度中，负荷变化呈现明显趋势。

深入分析三个时间尺度下的数据，可看到日内、实时预测数据围绕日前预测曲线上下波动。因此，制订优化调度方案时，加入日内、实时调度策略可有效减少因负荷波动带来诸多不利影响，从而有效提升微电网系统运行的稳定性。

5.4.2 仿真结果与分析

(1) 日内调度结果分析

1) 日内功率优化结果分析

对优化调度模型进行求解，得到系统的电功率平衡图，如图 5-4 所示，各类 ID 日前阶段和日内阶段响应量对比如图 5-5 所示，储能设备日前阶段和日内阶段功率变化对比如图 5-6 所示，EV 日内阶段充放电功率情况如图 5-7 所示。

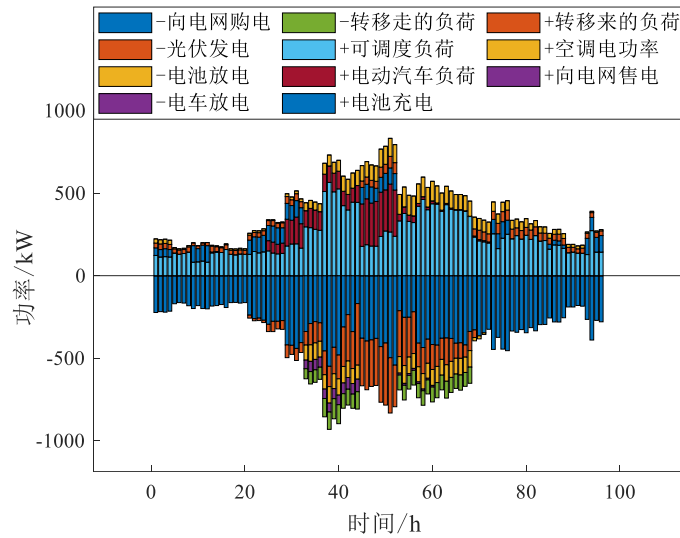


图 5-4 日内功率优化结果

根据图 5-4 可知，在日间光照充足时，高电价时段，系统中的负荷需求主要依靠光伏发电、储能系统放电、电动汽车放电、温控负荷削减功率以及可转移负荷的转出来满足，为了最小化微电网的运行成本，系统向电网购电量较少；在低电价时段，系统中的负荷需求主要依靠光伏发电和向电网购电，储能系统处于充电状态，可转移负荷转入到该时段；在夜晚期间，由于光伏发电单元无法供电，此时温控负荷适当削减功率，系统向电网购电以满足用电需求。

日前计划以小时为调度间隔，日内调度由于将调度周期变更为 15min，其对应的日内可调度单元在每个调度周期有所不同并且出力计划也更加详细，使得其能够更好地适应实际系统的变化和不确定性。而且，在日内调度中，光伏预测的输出和负荷能量需求根据滚动优化在不断地调整，因此各调度单元的出

力在多时间尺度调度中也存在一定的波动，日内滚动调度的优化结果相较于日前调度更为精确，且日内优化调度能够更精确地控制各调度单元，因此获得了最佳的调度模式，使系统具有更好的经济性。

2) 各类 IDR 响应量优化调度分析

由图 5-5 可以看出，各类 IDR 具备显著的调峰填谷效果，即在电价较低时段增加了负荷，在电价较高时段减少了负荷量。经过日前和日内的各类 IDR 响应量的对比分析可知，日前确定的 A 类负荷在日内的响应量是相同的，B 类和 C 类负荷在日前和日内的响应时段相同，响应量不同，并且 B 类负荷在日内调用量与日前调用量相比，存在较大的波动，这是因为经过日内滚动，光伏和负荷与日前存在一定的偏差，B 类负荷的调用范围比 C 类更大，补偿费用更低，因此会优先调用 B 类负荷来满足系统的供需平衡。

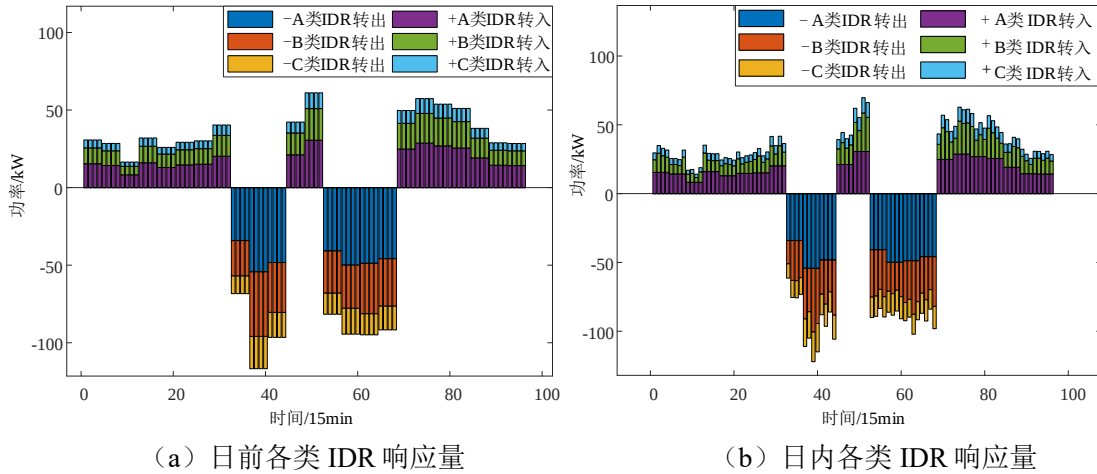


图 5-5 各类 IDR 日前阶段和日内阶段响应量对比

3) 日内储能设备优化调度结果分析

从图 5-6 中能够看出，储能设备在日内和日前两个时间尺度的启停状态和功率变化大体相似。这主要是因为预测精度导致的误差，大部分可以通过电动汽车和柔性负荷进行调整，剩下的部分则可以利用储能设备的调节能力实现平衡。储能设备在日内滚动优化阶段的充放电功率与日前有所差别，如在 0:00~2:00 期间，日内储能系统的充电功率大于日前储能系统充电功率，是因为该时段日内滚动预测负荷与日前负荷存在误差，为了保证日前微电网与大电网的交互功率和日内的交互功率在一定的偏差范围内，储能系统进行了调整，提高了系统运行的经济性。

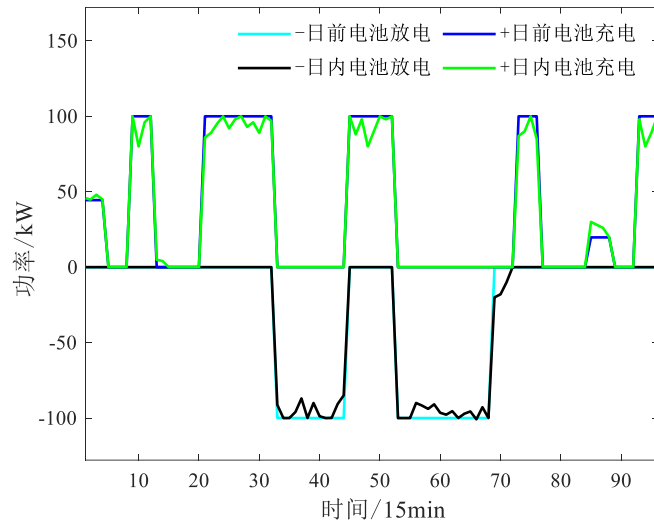


图 5-6 储能设备日前阶段和日内阶段功率变化

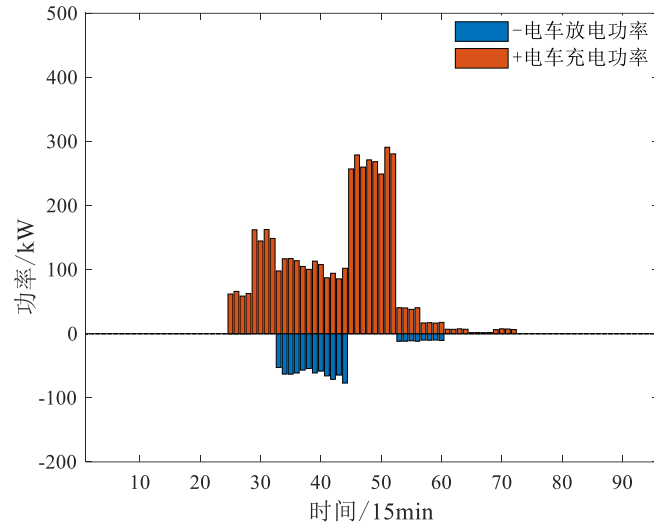


图 5-7 EV 日内阶段充放电功率

4) 日内 EV 优化调度结果分析

由图 5-7 知，在日内滚动优化调度中，EV 车主为了降低充电费用，在高电价时段放电，低电价时段充电，实现了削峰填谷的效果。与图 3-3 对比，可知，由于以日内 EV 充电费用不大于日前 EV 充电费用为约束，日前和日内 EV 充放电功率偏差较小，能够在因日内光伏出力和负荷波动无法满足系统功率平衡时候，适当调整各时段的充放电功率。

(2) 实时调度结果分析

由图 5-8 和图 5-9 可以看出，C 类 IDR 实时转入量和转出量和日内存在差别，这是因为实时调度时间段多，在保证经济性运行时，为了降低光伏出力和负荷波动对微电网运行的影响，不断调整响应量。由于日内和实时两个时间尺

度的光伏出力和负荷预测的误差较小，C 类负荷实时响应量和日内相差较小，从而使日内与实时电网交互电量的偏差保持在一定范围内，能够进一步保证联络线功率平稳。

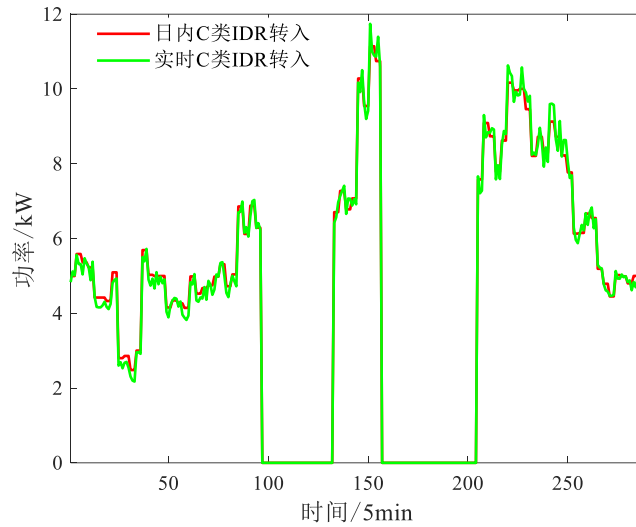


图 5-8 C 类 IDR 实时和日内转入量对比

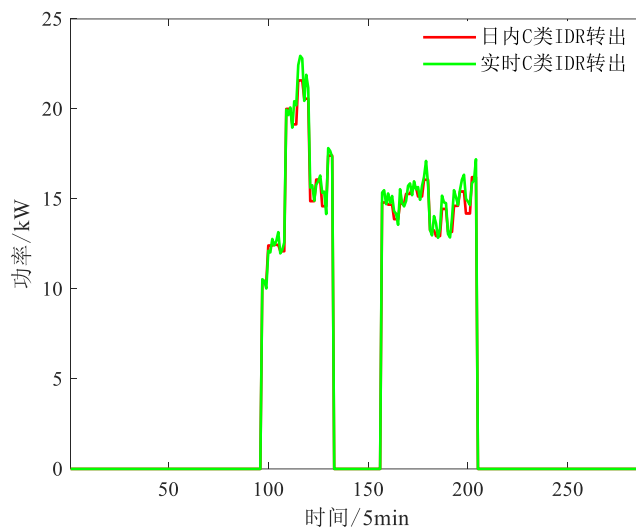


图 5-9 C 类 IDR 实时和日内转出量对比

(3) 各调度阶段的成本分析

由表 5-2 可知，运维成本在实时阶段比日内阶段高，是因为电动汽车在日内阶段的充放电量已确定，储能系统充放电功率较大从而减小日内预测误差对实时调度的影响。通过多时间尺度调度，系统与电网的交互成本降低了，证明储能系统、EV 以及柔性负荷的协调响应有利于实现经济性运行。

表 5-2 各调度阶段的成本结果（单位：元）

阶段	运行成本	运维成本	柔性负荷补偿成本	电动汽车放电补贴	与电网交互成本
日前	5195.40	62.63	224.56	125.34	4782.87
日内	5051.82	62.63	157.36	131.27	4700.56
实时	4943.26	63.51	67.69	131.27	4680.79

5.6 本章小结

针对光伏出力和负荷预测精度的时间特性以及各类 IDR 在响应能力上的差异，提出了一种计及柔性负荷响应特性的光储充柔微电网多时间尺度调度策略。该策略以最小化系统运行成本作为目标函数，进行日内、实时建模。算例表明，日内滚动调度和实时调度嵌套执行，购售电成本相比日前调度中降低了 102.08 元，实现微电网经济性运行；通过对各调度单元的出力进行精细调整，从而制定出更符合实际运行状况的运行方案；通过源荷两侧资源互动，使得适应不同时间尺度的柔性负荷参与到优化调度中，充分挖掘柔性负荷的调度潜力。

第 6 章 总结与展望

6.1 总结

光储充柔微电网优化调度通过合理地安排各单元的出力，在确保供需平衡的基础上，还可以实现经济性运行，是微电网保证经济稳定运行的核心环节。然而，由于电动汽车的大规模无序接入、柔性负荷响应特性存在差异、光伏发电的波动性和不确定性以及用户负荷随机性变化等因素，给微电网的优化调度带来了诸多挑战。针对这些问题，本文对电动汽车差异化充电策略、光伏出力不确定性以及各类IDR响应特性进行了深入分析和建模，并对调度时间尺度进行了不断细化，进而为实现光储充柔微电网优化调度的经济性和鲁棒性提供了参考。本文研究工作的结论如下所示：

（1）提出了一种计及EV差异化需求的光储充柔微电网优化调度策略。在考虑EV车主的不同需求的基础上，建立了无序充电、有序充电和有序充放电三种EV模型，接着根据微电网中柔性负荷的调节能力，建立可转移和可削减的柔性负荷响应模型，并以微电网的运行成本和车主支付费用最小为目标函数构建日前调度模型。算例结果表明，将EV和柔性负荷作为灵活性资源参与优化调度，能够在保证微电网调度经验性的同时，满足不同车主的充电需求并有效缓解高峰用电压力。

（2）针对光伏出力具有不确定性的特点，研究了一种基于IGDT处理光伏不确定性的微电网日前优化调度研究策略。采用IGDT理论对光伏的不确定性建模并对不确定性因素进行量化，同时建立了鲁棒规避优化模型和机会寻求优化模型。算例结果表明，鲁棒规避模型导致调度成本增加，而且能够保证光伏出力不确定度在一定范围内波动时不超过调度成本的预期值；机会寻求模型使调度成本下降，保证调度成本在光伏出力最小波动范围内有机会降低到设定期望值，从而为不同风险偏好的决策者提供调度方案。

（3）为了充分利用需求响应资源的多时间尺度特性，将柔性负荷根据不同时间尺度的响应特性的不同分别纳入到日前、日内和实时三个时间尺度，建立

了以最小化光储充柔微电网运行成本为目标函数的优化调度模型。算例分析表明，本文的调度策略，可以在保证经济运行的条件下，随着不同时间尺度的细分，不同响应能力的柔性负荷参与调度，通过对调度计划不断优化来减少光伏和负荷预测误差对光储充柔微电网运行的影响。

6.2 展望

本文针对考虑EV差异化需求、光伏出力不确定性以及柔性负荷需求响应特性的光储充柔微电网多时间尺度优化调度进行了有益的探索，但是还有很多方面没有考虑到，在将来的研究工作中，还需要从以下方面进行深入研究：

（1）本文在考虑EV差异化需求的光储充柔微电网中，将EV作为微电网内部确定性可调度资源进行调度，没有考虑EV在充电过程中变更充电方式、调整离网时间等情况，未来将进一步考虑EV的不确定性，深入研究EV主体与微电网之间的协同优化调度策略。

（2）本文对灵活性资源的研究是以光储充柔微电网为主体，后续可以将灵活性资源研究拓展到含光储充柔微电网的配网等领域，充分与电力系统转型的实际需求相结合，理论联系实际，发挥出科学研究的应用价值。

参考文献

- [1] 李洪言,郑一鸣,季银利等.2050 年世界能源展望分析[J].天然气与石油,2025,43(01):129-135.
- [2] 康重庆,杜尔顺,李姚旺等.新型电力系统的“碳视角”:科学问题与研究框架[J].电网技术,2022,46(03):821-833.
- [3] 巨云涛,李红权,于宗民等.考虑多元不确定性和备用需求的微电网双层鲁棒容量规划[J].电网技术,2023,47(08):3343-3361.
- [4] Caliano M, Delfino F, Di Somma M, et al. An Energy Management System for microgrids including costs, exergy, and stress indexes[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2022, 32: 100915.
- [5] 李嘉伟,张璐,路华振.能源区块链架构下考虑需求响应用户信用风险的微电网优化调度[J].电力自动化设备,2024,44(12):115-123.
- [6] 齐志远,李晓文,张如意等.基于动态回馈修正的独立微电网协调优化调度[J].高电压技术,2022,48(03):938-947.
- [7] 王继东,边翊楠,许秋铭等.考虑风险和碳交易机制的微电网分布鲁棒优化调度[J].高电压技术,2024,50(08):3477-3487.
- [8] 陈曦,付文龙,张海荣等.考虑新能源发电不确定性的含微电网群共享储能优化调度[J].电网技术,2024,48(01):219-236.
- [9] 王灿,张雪菲,凌凯等.基于区间概率不确定集的微电网两阶段自适应鲁棒优化调度[J].中国电机工程学报,2024,44(05): 1750-1764.
- [10] 李长云,徐敏灵,蔡淑媛.计及电动汽车违约不确定性的微电网两段式优化调度策略[J].电工技术学报,2023,38(07):1838-1851.
- [11] 胡俊杰,赖信辉,郭伟等.考虑电动汽车灵活性与风电消纳的区域电网多时间尺度调度[J].电力系统自动化,2022,46(16):52-60.
- [12] 温世凡.智能电网环境下的微电网能源管理策略研究[D].西南财经大学,2021.
- [13] Romankiewicz J. International microgrid assessment: governance, incentives, and experience (IMAGINE)[J]. 2013.

- [14] Kroposki B, Lasseter R, Ise T, et al. Making microgrids work[J]. IEEE power and energy magazine, 2008, 6(3): 40-53.
- [15] Ton D T, Smith M A. The US department of energy's microgrid initiative[J]. The Electricity Journal, 2012, 25(8): 84-94.
- [16] 华光辉,梁硕,汪春等.微电网监控与能量管理系统开发[J].电气应用,2017,36(12):87-92.
- [17] 赵贺,李子矜,闫浩然等.基于模型预测控制的微电网经济调度[J].电网与清洁能源,2017,33(09):119-123.
- [18] Arefifar S A, Ordonez M, Mohamed Y A R I. Energy management in multi-microgrid systems—Development and assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 32(2): 910-922.
- [19] 李献伟,李保恩,王鹏.微电网技术现状及未来发展分析[J].通信电源技术,2015,32(05):202-207.
- [20] Wang Y, Li S, Wu X, et al. Using sustainable performance prediction in data-scarce scenarios: A study of park-level integrated microgrid projects in Tianjin, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 304: 127042
- [21] 郝丽丽,王国栋,王辉等.考虑电动汽车入网辅助服务的配电网日前调度策略[J].电力系统自动化,2020,44(14):35-43.
- [22] 黄珍瑶,程诺,江岳文.考虑 EV 调峰需求响应可靠性的 V2G 聚合商多时间尺度调度策略[J].高电压技术,2025,51(01):401-411.
- [23] 贾士铎,康小宁,黑皓杰等.基于 V2G 负荷反馈修正的电热氢综合能源系统多层协调优化调度[J].电力系统自动化,2023,47(15):100-110.
- [24] Nefedov E, Sierla S, Vyatkin V. Internet of energy approach for sustainable use of electric vehicles as energy storage of prosumer buildings[J]. Energies, 2018, 11(8): 2165.
- [25] 凌孺,王子瑄,张辉等.可交易能源框架下智慧建筑 V2B 优化调度[J].供用电,2024,41(12):102-109+120.

- [26] Board A, Sun Y, Huang P, et al. Community-to-vehicle-to-community (C2V2C) for inter-community electricity delivery and sharing via electric vehicle: Performance evaluation and robustness analysis[J]. *Applied Energy*, 2024, 363: 123054.
- [27] 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.
- [28] AHMADI S E,MARZBAND M,IKPEHAI A,et al. Optimal stochastic scheduling of plug-in electric vehicles as mobile energy storage systems for resilience enhancement of multi-agent multi-energy networked microgrids[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55:105566.
- [29] 侯媛媛,曾君,罗燕等.社区微网主动能量管理协同与优化方法研究[J].*电网技术*,2023,47(04):1548-1557.
- [30] 郭晓利,赵莹,曲楠等.基于满意度的户用型微电网多属性需求响应策略[J].*太阳能学报*,2021,42(07):21-27.
- [31] Hamed H, Behrouz T. Optimal operation of DG-based micro grid by considering demand response program[J]. *Electric Power Systems Research*, 2019, 167:252-260.
- [32] 余苏敏,杜洋,史一炜等.考虑 V2B 智慧充电桩群的低碳楼宇优化调度[J].*电力自动化设备*,2021,41(09):95-101.
- [33] 李东东,陈天旭,沈运帷,等.基于联合虚拟储能系统的海岛微电网协同优化策略[J].*中国电机工程学报*,2023,43(20):7842-7856.
- [34] Hou J, Yu W, Xu Z, et al. Multi-time scale optimization scheduling of microgrid considering source and load uncertainty[J]. *Electric Power Systems Research*, 2023, 216: 109037.
- [35] Li S, Zhu J, Dong H, et al. Multi-time-scale energy management of renewable microgrids considering grid-friendly interaction[J]. *Applied Energy*, 2024, 367: 123428.

- [36] 张祥宇,舒一楠,付媛.基于虚拟储能的直流微电网源荷储多时间尺度能量优化与分区协调控制[J].电工技术学报,2022,37(23):6011-6024.
- [37] 王怡聪,柯方超,周航等.基于 ADMM-GBS 考虑故障影响的互联微电网多时间尺度优化调度[J].电力自动化设备 2024, 44(06):127-134+144.
- [38] 崔杨,周慧娟,仲悟之等.考虑广义储能与火电联合调峰的日前-日内两阶段滚动优化调度[J].电网技术,2021,45(01):10-20.
- [39] Cheng Z, Jia D, Li Z, et al. Multi-time scale dynamic robust optimal scheduling of CCHP microgrid based on rolling optimization[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 139: 107957.
- [40] Lin Q, Ding L, Kong Z, et al. Multi-Time Scale Model Predictive Control-Based Demand Side Management for a Microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024.
- [41] Karimi H, Gharehpetian G B, Ahmadihangar R, et al. Optimal energy management of grid-connected multi-microgrid systems considering demand-side flexibility: A two-stage multi-objective approach[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 214: 108902
- [42] Ding X, Sun W, Harrison G P, et al. Multi-objective optimization for an integrated renewable, power-to-gas and solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid system in microgrid[J]. Energy, 2020, 213: 118804.
- [43] Zheng W, Wu W, Zhang B, et al. Distributed optimal residential demand response considering operational constraints of unbalanced distribution networks[J]. IET generation, transmission & distribution, 2018, 12(9): 1970-1979.
- [44] 颜湘武,卢俊达,贾焦心等.含循环换电负荷及充电站的微电网多目标优化调度[J].华北电力大学学报(自然科学版),2024,51(02):1-12.
- [45] 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.
- [46] 王俊翔,李华强,邓靖微等.考虑需求侧灵活性资源的商业园区微网多目标优化调度[J].电力建设,2021,42(03):35-44.

- [47] Yang X, Leng Z, Xu S, et al. Multi-objective optimal scheduling for CCHP microgrids considering peak-load reduction by augmented ε -constraint method[J]. Renewable Energy, 2021, 172: 408-423.
- [48] Abunima H, Park W H, Glick M B, et al. Two-stage stochastic optimization for operating a renewable-based microgrid[J]. Applied Energy, 2022, 325: 119848.
- [49] Dong W, Sun H, Mei C, et al. Forecast-driven stochastic optimization scheduling of an energy management system for an isolated hydrogen microgrid[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 277: 116640.
- [50] 李咸善,李晨杰,张磊.氢耦合区域综合能源系统集群双层博弈随机优化调度策略[J].电力自动化设备,2023,43(12):238-247.
- [51] 吕海鹏,希望·阿不都瓦依提,孟令鹏.计及源-荷预测不确定性的微电网双级随机优化调度[J].电力自动化设备,2022,42(09):70-78.
- [52] Aguilar D, Quinones J J, Pineda L R, et al. Optimal scheduling of renewable energy microgrids: A robust multi-objective approach with machine learning-based probabilistic forecasting[J]. Applied Energy, 2024, 369: 123548.
- [53] 马跃,孟润泉,魏斌等.考虑阶梯式碳交易机制的微电网两阶段鲁棒优化调度[J].电力系统保护与控制,2023,51(10):22-33.
- [54] Li Y, Zhang F, Li Y, et al. An improved two-stage robust optimization model for CCHP-P2G microgrid system considering multi-energy operation under wind power outputs uncertainties[J]. Energy, 2021, 223: 120048.
- [55] 陈星宇,张亚超,黄张浩等.考虑节点边际电价的配电网与多微电网双层鲁棒经济调度[J].电力自动化设备,2023,43(11):51-58.
- [56] 颜宇飞,唐早,刘友波等.双重不确定性下考虑风险偏好的风储系统日前报量策略[J].电网技术,2023,47(03):1078-1088.
- [57] 赵先海,刘晓峰,季振亚等.考虑居民用户动态行为的负荷聚合商决策分析[J].中国电力,2024,57(10):179-189.
- [58] 陈博洋.计及灵活性资源互动的微电网优化运行及协同调度研究[D].上海电力大学,2023.

- [59] 王凌云,王易雯,张涛等.基于信息间隙决策理论和电动汽车有序充放电的微电网优化调度[J].科学技术与工程,2023,23(08):3306-3315.
- [60] 曹德成.基于短期负荷预测的综合能源微电网低碳经济运行策略研究[D].重庆大学,2023.
- [61] 裴润生.计及微网不确定性多时间尺度优化调度研究[D].辽宁工程技术大学,2022.
- [62] 李运鸿,徐潇源,严正.基于生成对抗网络的独立微电网光-储容量分布鲁棒优化配置[J].电力系统自动化,2023,47(07):51-62.
- [63] 王依妍,陈景文.基于 ISSA 的光储微网混合储能容量优化配置[J].智慧电力,2023,51(04):23-29+53.
- [64] 房超运,杨昆,柴瑞环.分时电价下含电动汽车的微电网群双层多目标优化调度[J].电力科学与技术学报,2024,39(01):124-133.
- [65] 王毅,麻秀,万毅等.基于分时充放电裕度的电动汽车有序充放电引导策略[J].电网技术,2019,43(12):4353-4361.
- [66] 向真,李振聪,谈赢杰等.计及能量共享的多微电网与配电系统两层协同优化调度方法[J].智慧电力,2024,52(08):42-49.
- [67] 田雪沁,冯亚杰,袁铁江等.考虑电氢负荷柔性的多堆电解槽优化运行[J].电网技术,2025,49(01):84-92.
- [68] 颜宇飞,唐早,刘友波等.双重不确定性下考虑风险偏好的风储系统日前报量策略[J].电网技术,2023,47(03):1078-1088.
- [69] 叶鹤林,刘松,胡剑等.基于 IGDT 的含光热电站电力系统多源联合调度策略[J].电力系统保护与控制,2021,49(23):35-43.
- [70] 朱西平,罗健,李姿霖等.考虑灵活爬坡产品的能源枢纽低碳经济调度[J].电力自动化设备,2023,43(01):9-15+24.
- [71] Hou J, Yu W, Xu Z, et al. Multi-time scale optimization scheduling of microgrid considering source and load uncertainty[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 216: 109037.

- [72] Wang L, Lin J, Dong H, et al. Demand response comprehensive incentive mechanism-based multi-time scale optimization scheduling for park integrated energy system[J]. Energy, 2023, 270: 126893.
- [73] 赵冬梅,宋原,王云龙等.考虑柔性负荷响应不确定性的多时间尺度协调调度模型[J].电力系统自动化,2019,43(22):21-30.
- [74] 彭伟鹏,邵振国,陈飞雄等.计及需求响应的风储集群电力系统多时间尺度优化调度[J].太阳能学报,2025,46(02):282-292.
- [75] 南斌,姜春娣,董树锋等.计及源荷不确定性的综合能源系统日前-日内协调优化调度[J].电网技术,2023,47(09):3669-3683.
- [76] 陈静,杨坤漓,张岩等.多时间尺度下计及综合需求响应和碳捕集-电转气联合运行的综合能源系统优化调度[J].电力自动化设备,2024,44(06):68-76.

攻读硕士期间取得的学术成果

发表的学术论文：

- [1] 以第一作者在四川轻化工大学学报发表论文一篇。
- [2] 以第三作者发表 EI 检索国际会议论文一篇。
- [3] 以第四作者在发电技术期刊发表论文一篇。
- [4] 以第四作者在安徽工程大学学报发表论文一篇。

致谢

时光荏苒，转瞬已至安工程求学生涯的尾声。驻足回望，从初入校门时的青涩迷茫，到今朝以硕士身份整装待发，千般思绪涌上心头，化作绵长感恩。

师恩如山，首先要向我的导师刘世林教授致以最深的敬意。犹记研一初定方向时，我常困于自我怀疑的迷雾，是刘老师以春风化雨般的点拨，让我窥见学术殿堂的璀璨星光。三载春秋，无论是实验瓶颈期的耐心指引，还是论文撰写时的逐字推敲，老师始终以“治学必严，立身须正”的准则躬身示范。那些深夜办公室的灯火，那些批阅文献时细密的朱批，早已化作滋养我学术生命的甘霖。

同窗情谊，恰似星辰照亮长夜。感谢 5018 实验室的每一位战友：苗婉的坚韧、崔露的聪慧、方乐的豁达、罗宗龙的幽默，还有师兄师姐们倾囊相授的温暖，师弟师妹们朝气蓬勃的活力。记得那些共克实验难关的深夜，记得失败时相互打气的温度，更记得成功时击掌相庆的欢愉。这方寸天地间的欢声笑语与汗水泪光，终将凝结成记忆里璀璨的琥珀。

亲恩似海，每念及此便心潮翻涌。双亲年逾半百仍为我奔波劳碌，青丝渐染霜雪，却始终用皱纹里藏着的笑意告诉我“莫怕前路”。姐姐跨越千里的叮咛，总在失意时化作最坚实的铠甲。这份沉甸甸的爱，是游子行囊中最珍贵的行囊，亦是我披荆斩棘时永不枯竭的动力。

最后，向拨冗审阅本文的评审专家致以诚挚谢意。您以专业眼光为后学把关，以严谨态度守护学术净土，这份付出必将助力更多求知者攀登高峰。

尚德敏学 唯实惟新

