

分类号： TM464

密 级： 公开

学校代码:10363

学 号： 2210330121



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题目 考虑需求侧响应的多能源
微电网优化

论 文 作 者 杨子昊

指 导 教 师 娄柯

学 科（专业） 电子信息

研 究 方 向 控制工程与自动化技术

论文提交日期： 2024 年 05 月 31 日

分类号：TM464

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2210330121

题 目 考虑需求侧响应的多能源微电网优化

题 目 Research on multi-objective scheduling of
multi-energy microgrid considering demand side
response

学生姓名： 杨子昊

指导教师： 娄柯 副教授

专 业： 电子信息

研究方向： 控制工程与自动化技术

论文答辩日期： 2024 年 5 月 24 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：杨子昊

日期：2024 年 5 月 31 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：

杨子昊

指导教师签名：

姜柯

日期：2024 年 5 月 31 日

日期：2024 年 5 月 31 日

考虑需求侧响应的多能源微电网优化

摘 要

近年来,新型能源技术如太阳能、风能、水能等得到了广泛应用和推广。同时,由于人口规模化增长、能源负荷的不断增大,能源供应安全和效率问题成为人们关注的焦点。

多能源微电网(Multi-energy Micro-grid, MEMG)是一种通过集成多种不同类型的可再生能源(如太阳能、风能、水能等)和传统能源(如燃气、燃油等)来实现电力供应的系统。它通常包括多个能源和负载设备,以及能量存储和转换设备。相对于传统的集中式电力系统,多能源微电网具有更高的灵活性和可靠性,能够适应更复杂的电力需求和环境条件。

现有的微电网优化研究偏向于优化微电网的经济成本,而忽略了环境成本。为了解决以上问题,本文提出了一种考虑阶梯型碳交易成本(Carbon trading scheme, CTS)、需求侧响应、多时间尺度的优化策略,用于解决不确定性下多能源微电网的优化问题,具体研究内容如下:

(1) 首先,绪论主要从课题研究背景及意义、MEMG的研究现状及发展、综合需求响应的研究现状、碳交易机制的研究现状、多时间尺度能源管理系统的研究现状、主要内容等几个方面进行阐述。然后,介绍了MEMG的典型结构和各种分布式设备的作用,确定了研究对象,建立了集电、热、气、冷多能源于一体的微电网数学模型,包括风力发电机、光伏发电机等可再生能源装置,燃气轮机、余热锅炉、吸收式冰箱等燃气轮机热电联产系统,燃料电池、燃气锅炉、电锅炉、电制冷机等能量转换装置,以及蓄电池、储热罐等储能装置。这些分布式设备的数学模型是优化微电网调度的理论基础。最后,对可再生能源出力及负荷的不确定性进行场景模拟,提出了相应的处理方法,为后文的研究奠定了基础。

(2) 以风能、太阳能发电和电、热、气、冷负载的多能微电网为研究对象,提出了一种考虑奖惩阶梯型碳交易和多能源耦合的需求响应(Demand response, DR)的微电网优化方法。首先,提出一种奖惩阶梯型CTS,以降低多能源微电网的碳排放量。此外,还针对电、热、冷、气负荷的柔性特性和可调度价值,建立完善的价格型综合需求响应模型。通过将这些模型引入到优化调度模型中,可以实现对多能源微电网的优化调度。最后,本研究以能量交换成本、运维成本、

阶梯型碳交易成本之和最小为优化目标,建立了多能源微电网的多目标优化模型并设置不同场景进行算例仿真和验证。结果表明,通过两种策略的协同优化,多能源微电网系统可以实现低碳、经济运行。

(3) 日前调度误差和预测精度的影响成为了微电网优化的瓶颈,使得微电网的经济性和稳定性受到限制。针对此问题,本研究提出了一种基于激励型综合需求响应策略(Incentive demand response, IDR)的日内双时间尺度滚动优化调度策略。本研究基于日前价格型综合需求响应模型,考虑到不同时间尺度下各能源负荷的响应能力不同,建立了双时间尺度日内滚动优化模型。在长时间尺度模型中,以 15 分钟为时间尺度,以购能成本、各设备调整惩罚、IDR 补偿成本之和为目标函数,对各能源设备出力进行调整。在短时间尺度模型中,以 5 分钟为时间尺度对电功率波动进行平抑。仿真结果表明,所提出的双时间尺度滚动优化调度策略和日内激励型综合需求响应策略的协同作用能够有效降低源-荷预测误差对系统运行的影响,提升其经济性和稳定性。

关键词: 不确定性; 多能源微电网; 阶梯型碳交易机制; 多目标优化; 双时间尺度

Research on multi-objective scheduling of multi-energy microgrid considering demand side response

Abstract

In recent years, new energy technologies such as solar energy, wind energy and water energy have been widely used and promoted. At the same time, due to the large-scale growth of population and the increasing energy load, the issue of energy supply security and efficiency has become the focus of attention.

A Multi-energy Micro-grid (MEMG) is a system that provides electricity by integrating many different types of renewable energy sources (such as solar, wind, water, etc.) and traditional energy sources (such as gas, oil, etc.). It typically includes multiple energy and load devices, as well as energy storage and conversion devices. Compared with traditional centralized power system, multi-energy microgrid has higher flexibility and reliability, and can adapt to more complex power demand and environmental conditions.

Existing research on microgrid optimization is biased towards the economic cost of optimizing microgrids, while ignoring the environmental cost. In order to solve the above problems, this paper proposes an optimization strategy that takes into account stepped carbon trading costs, demand-side response, and multiple time scales to solve the optimization problem of multi-energy microgrids under uncertainty. The specific research content is as follows:

(1) First of all, the introduction mainly expounds the research background and significance of the subject, the research status and development of multi-energy microgrid system, the research status of comprehensive demand response, the research status of carbon trading mechanism, the research status of multi-time scale energy management system, and the main content of this paper. Then, it also introduces the typical structure of MEMG and the role of various distributed devices, determines the research object, and establishes a microgrid mathematical model that

integrates multiple energy sources of electricity, heat, gas and cold, including renewable energy devices such as wind turbines and photovoltaic generators, and gas turbine cogeneration systems such as gas turbines, waste heat boilers and absorption refrigerators. Energy conversion devices such as fuel cells, gas boilers, electric boilers, electric chillers, and energy storage devices such as batteries and heat storage tanks. The mathematical models of these distributed devices are the theoretical basis for optimizing microgrid scheduling. Finally, the uncertainty of renewable energy output and load is simulated, and the corresponding treatment methods are proposed, which lays a foundation for the following research.

(2) Taking multi-energy microgrids of wind and solar power generation and electricity, heat, gas and cold loads as research objects, an optimization method of microgrid is proposed, which takes into account the reward and punishment ladder carbon trading and multi-energy coupling Demand response (DR). Firstly, this paper proposes a reward and punishment ladder carbon trading mechanism to reduce the carbon emissions of multi-energy microgrids. In addition, according to the flexible characteristics and schedulable value of electric, hot, cold and gas loads, a comprehensive price demand response model is established. By introducing these models into the optimal scheduling model, the optimal scheduling of multi-energy microgrids can be realized. Finally, taking the minimum sum of energy exchange cost, operation and maintenance cost and stepped carbon transaction cost as the optimization objective, this study established a multi-objective optimization model of multi-energy microgrid and set different scenarios for simulation and verification. The results show that through the cooperative optimization of the two strategies, the multi-energy microgrid system can achieve low carbon and economic operation.

(3) The influence of day-ahead scheduling error and prediction accuracy has become the bottleneck of microgrid optimization, which limits the economy and stability of microgrid. To solve this problem, this paper proposes a daily dual-time scale rolling optimal scheduling strategy based on incentive integrated demand response strategy. Based on the day-ahead price type comprehensive demand response model, a two-time scale intraday rolling optimization model is established considering

the different response capacities of energy loads at different time scales. In the long time scale model, the output of each energy equipment is adjusted by taking 15 minutes as the time scale and the sum of energy purchase cost, adjustment penalty of each equipment and IDR compensation cost as the objective function. In the short time scale model, the electric power fluctuation is flattened on the time scale of 5 minutes. The simulation results show that the synergistic effect of the proposed dual-time-scale rolling optimal scheduling strategy and the intra-day incentive integrated demand response strategy can effectively reduce the impact of source-load prediction error on system operation and improve its economy and stability.

Key words: uncertainty; Multi-energy microgrid; Stepped carbon trading mechanism; Multi-objective optimization; Double time scale

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 多能源微电网系统的研究现状及发展	2
1.2.2 综合需求响应的研究现状	5
1.2.3 碳交易机制的研究现状	6
1.2.4 多时间尺度能源管理系统的研究现状	7
1.3 本文的主要内容	8
第 2 章 多能源微电网结构及各设备的数学模型	10
2.1 多能源微电网结构	10
2.2 MEMG 各设备的数学模型及运行约束	11
2.2.1 制冷设备	11
2.2.2 电-热-气耦合的储能系统	12
2.2.3 CHP 的数学模型及约束	14
2.2.4 电转气设备	15
2.2.5 燃气锅炉	16
2.2.6 电锅炉 (EB)	16
2.2.7 不确定性建模	17
2.2.8 MEMG 与 DN 的能量交换	20
2.3 本章小结	20
第 3 章 基于 IDR 和阶梯型 CTS 的综合调度策略	21
3.1 IDR 模型	21
3.2 阶梯型 CTS	23
3.3 MEMG 的目标函数以及运行约束	25
3.3.1 目标函数	25
3.3.2 运行约束条件	26
3.4 仿真实验	28
3.4.1 基础数据	28
3.4.2 碳交易机制对系统优化调度影响分析	29
3.4.3 综合需求响应策略分析	31
3.4.4 综合优化策略下的 MEMG 最优调度结果	33
3.5 本章小结	36
第 4 章 基于双时间尺度的 MEMG 日前-日内调度研究	38
4.1 长时间尺度下的 MEMG 日前调度研究	39
4.2 双时间尺度下的 MEMG 日内调度研究	39
4.2.1 激励型 IDR 策略	40
4.2.2 MEMG 的日内长时间尺度调度	41
4.2.3 MEMG 的日内短时间尺度调度	42
4.3 仿真实验	44
4.3.1 基础数据	44

4.3.2 基于 MPC 和激励型 IDR 的日内双时间尺度调度策略分析	44
4.3.3 用户参与激励型需求响应计划的程度对 MEMG 优化的影响	49
4.4 本章小结	51
第 5 章 结论与展望	52
5.1 研究成果与结论	52
5.2 展望	53
参考文献	54
攻读硕士期间的学术成果	60
致谢	61

第 1 章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

多能源微电网是指由多个分布式电源、储能系统、负荷、智能控制设备等组成的小型电力系统^[1]。其特点是利用分散式电源和智能控制技术，将分布式电源、储能系统、负荷和智能控制设备等不同类型的资源合理配置，以实现微电网的自我调节和优化运行。随着能源的紧缺和环境问题的日益突出，多能源微电网系统因其能提高能源供应可靠性、降低能源消耗强度、减少二氧化碳排放等方面的优势而变得越来越重要和受到重视^[2]。

多能源微电网系统可以充分利用不同种类的能源资源进行供能，促进能源消费的多元化，从而缓解单一能源短缺的问题^[3]。其次，多能源微电网系统可以通过对不同能源的协调调配，实现能源利用效率的最大化和能源消耗强度的降低。此外，多能源微电网系统能够应对电网故障、安全隐患等问题，提高电网安全可靠，同时也应对新型能源技术发展带来的挑战，促进能源低碳化发展^[4]。

近年来，多能源微电网系统逐渐发展起来。在微电网系统中，光伏发电和风力发电作为主要电源参与系统运行，但是在电力市场改革后，我国电力市场呈现出新特点^[5]：（1）分布式电源功率输出具有波动性和间歇性；（2）微电网中负荷与光伏发电出力具有不确定性；（3）微电网中存在多种能源互补协调问题；（4）多能源微电网的经济调度问题是微电网优化运行的重要研究内容。

由于可再生能源具有间歇性和波动性等特点，现有电力市场环境下运行的微电网系统难以实现完全自平衡^[6]。因此需要考虑其他能源供给的灵活性和可靠性来确保系统安全稳定运行。

需求响应（DR, Demand Response）^[7]是指通过在电力系统的供需双方之间建立一种新的互动机制，通过用户对电力需求侧资源（如可替代能源、电动汽车）的响应来降低需求侧资源对系统供需平衡的影响。随着智能电网建设的不断推进，DR 作为一种新兴的互动负荷资源参与电力市场运行，具有重要的现实意义。目前国内外学者对 DR 在电力系统中的应用已有研究，但对 DR 在分布式电源并网中的作用及其影响因素方面研究较少，因此，本文针对分布式电源并网中 DR 应用于分布式电源并网系统时如何发挥其作用进行研究^[8]。

分布式电源并网时,需要考虑各发电单元的出力波动性,导致负荷波动较大,增加了调度运行风险。因此,在分布式电源并网中引入需求响应机制,可以提高系统运行可靠性^[9]。现有文献中对分布式电源并网时需求响应机制进行了研究,内容包括:(1)利用分布式电源提供的电能质量信息对用户用电质量进行预测;(2)构建负荷响应模型以预测用户用电需求;(3)基于可再生能源发电信息预测用户用电需求;(4)通过建立需求响应模型优化分布式电源并网后系统运行。

但现有文献中对分布式电源并网系统中需求响应机制的研究不够全面,缺乏对分布式电源并网系统中需求响应机制进行系统分析。

多目标优化调度^[10]是一种新型的调度模式,通过引入多目标优化算法来实现电力系统资源优化配置,其最大优点在于可以有效地降低系统中各种随机因素对系统运行经济性和可靠性的影响。

综上所述,多能源微电网作为一种高效、可靠、环保的能源供应方式,其研究和发展具有重要的现实意义和经济价值。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 多能源微电网系统的研究现状及发展

多能源微电网通过多种能源的耦合和互补,实现了更高的能源效率^[11]。MEMG 旨在实现清洁低碳发展,同时满足用户的无数能源需求。MEMG 代表了能源系统未来的发展方向。

我国早在上个世纪就已经开始了多能源微电网的研究和实践,同时也在加速能源体制改革以促进其发展。据国家能源局发布的 2019 年数据,我国光伏、风能装机容量分别达到 175GW 和 221GW,水电装机容量为 352GW^[12]。随着技术的不断进步,多能源综合利用也得到了广泛的应用与研究。下面是具体的相关研究现状:

(1) MEMG 技术研究: MEMG 技术^[13]是综合能源系统的重要方向之一,它能够有效地整合和管理不同类型的能源,实现能源的优化利用和分配。我国各大高校和科研机构正在积极开展 MEMG 技术研究,如介学生等已经完成了多个 MEMG 的实际实验,探索 MEMG 发展的各种参数和技术问题。

(2) 能源体制改革: 政策与法律法规是支撑能源发展的重要保障。随着能源体制改革的深入推进,能源市场逐渐透明化、竞争化,吸引了大量的社会资本

参与能源建设。通过在制度、政策和法规方面的改进，我国能源综合利用的市场环境也得到了不断优化。

(3) 智能化技术研究：智能化技术是支撑 MEMG 的重要标志和支撑，包括大数据、人工智能和物联网等技术^[14]。在这一领域，国内各大高校和科研机构均在积极开展智能化技术研究，某些高校甚至通过大数据分析，形成了 MEMG 中多能源优化调度的算法，实现了多能源系统的智能协调。

(4) 基础设施建设研究：综合能源系统需要完备的基础设施支撑，特别是在设备和设施方面。在这一领域，我国已经开始了相应的研究和实践。目前，国内已经建设了不少 MEMG 项目，各种新型设备和设施也在不断地应用和改进。

综上所述，我国的综合能源系统研究已经具有了一定实力和成果。随着技术的不断进步和政策的不断支持，我国的能源综合利用环境将会得到更进一步的优化和改进，为实现能源清洁、安全、高效利用提供更多的可能性。

在全球范围内，各国政府和机构纷纷开展多能源综合利用的研究和实践，以提高能源利用效率、降低能源消耗，从而减缓全球气候变化的影响^[15]。下面分别从多国情况描述综合能源系统的研究现状：

美国作为一个科技强劲的国家，在综合能源系统的研究方面已经证明其领先地位。美国通过政府和企业的资金支持和技术研发等方面的鼓励，不断推陈出新，提出了多种新的能源综合利用的方案^[16]。其中，智能电网系统是最有代表性的一种，利用互联网和信息技术，优化能源分配，提高利用效率。

欧盟作为全球严重受到气候变化威胁的地区之一，开始将可再生能源作为国家战略，积极开展综合能源系统的应用^[17]。欧盟的多能源综合利用主要集中于太阳能、风能、水力能等可再生能源领域，致力于实现能源的多元化和可持续发展。

加拿大政府实施了一些政策和措施，以推动多能源微电网系统的开发和示范^[18]。在加拿大各大高校和科研机构的持续努力下，多能源微电网系统得到了有效的开发和应用，以提高能源利用效率，降低碳排放，实现低碳经济模式的发展。

由于长期在能源进口方面严重依赖，日本政府推进可持续能源发展的愿望非常强烈。目前，日本的多能源微电网系统发展进展迅速，政府支持企业创新和针对综合能源系统的可持续发展的研究，以实现能源需求的平衡，并提高能源生产和利用的效率^[19]。

德国在推进可再生能源方面一直处于全球领先地位,该国政府实施了一系列政策和措施,以提高可再生能源的利用率和整合能力。德国 MEMG 的实践初步显现出其效益,特别是在企业和社区中的应用。

为了使 MEMG 在环境、经济等方面具有良好的效益,需要对 MEMG 在规划进行充分设计及运行阶段进行科学的调度。文献[20]介绍了一种基于分解的多目标进化算法,它提供了一个优秀的算法框架,并在进化多目标优化领域取得了巨大成功。为了提高算法的性能,文献[21]构造了一种基于混合分解的多目标进化算法,该算法利用模糊隶属度和 Chebyshev 函数并行分解 MEMG 多目标优化问题并更新解^[22]。文献[23]设计了 MEMG 储能系统的复合储能容量优化分配模型,研究了可再生能源的全生命周期成本和功率波动效应,生成了满足电网工作需求的优化方案。使用改进的差分进化算法来获得最优配置解,但该方法在实际应用中功率波动太大。文献[24]设计了 MEMG 能源管理策略和适当的储能容量设计,目的是在三种不同的运营策略下实现最低的运营成本。文献[25]提出了一种改进的 QPSO,并用于解决考虑热负荷和电负荷的 MEMG 能量优化问题。使用鲁棒优化解决了热电联产和可再生能源微电网场景中的发电调度问题。文献[26]作者考虑通过车联网技术进行充电和放电控制,以解决微电网调度问题和二氧化碳排放。文献[27]讨论了 DR 对综合能源系统的影响。在文献[28]中,提出了一个具有需求侧管理的并网微电网运营和规划协同优化模型,并将该模型公式化为一个同时优化经济和环境目标的优化问题。文献[29]使用元动力学方法和多目标花朵授粉算法来解决 RE 和负载不确定性条件下多目标 MG 的能量优化管理问题。文献[30]研究了在智能电网中实现 DR 技术的方法和算法,并确定了一些实现问题。

然而,综合需求响应可以为“调峰填谷”提供新的思路。随着“智慧城市”概念的引入,负荷已经从单一的电力扩展到制冷、供暖、电力和燃气的综合负荷。电力需求响应(DR)已扩展到冷、热、电力和天然气的 IDR。目前,文献[31]在 MEMG 的优化操作中采用了 IDR 机制,分析了 IDR 在能源梯级利用和降低系统运行成本中的作用。文献[32]从工业用户和园区微电网的角度考虑多种电加热负荷的 IDR,并提出了 MEMG 能源优化运行方案,该方案可以响应“调峰填谷”的使用时间价格,显著缓解了系统用电负荷短缺,增加了灵活性。已经为混合系

统提出了一种随机能源管理算法,包括热电联产机组、可再生资源和储能,其中应用了需求响应程序,以促进将需求转移到非高峰时段。文献[33]已经提出了一种随机双向能源管理算法,以满足风电、电价和需求响应计划中的不确定性。文献[34]通过最优随机规划,对需求响应程序和储冰与智能 MG 的集成进行了评估。动态定价算法^[35]是通过随机能源管理开发的,其中考虑了电动汽车、需求响应计划和光伏输出功率的不确定性。文献[36]为 MGs 开发了一个多目标随机计划,并讨论了需求响应计划在降低总成本方面的重要性。

多能源微电网的规划与运行是目前研究的热点领域,面临的挑战包括碳排放量减缓、需求侧需求响应和可再生能源的不确定性等因素。然而,现有研究大多从单一的角度出发去考虑调度和优化问题,而忽视了以上因素的影响,因此下面将从综合需求响应、碳交易机制和多时间尺度三个方面分析应用于综合能源系统的研究。

1.2.2 综合需求响应的研究现状

综合需求响应(Integrated Demand Response, IDR)^[37]是指在能源供应过程中,通过与用户协商、管理和控制电能、热能、气能和其他能源需求,实现对能源系统负荷的调度。IDR 降低了负荷峰谷差,提高了 RIES 的稳定性和安全性。IDR 遵循 DR 的市场激励机制和价格信号手段,连接多个能源市场,提高用户能源消费的可替代性,实现能源供需双方的最优管理,提高管理系统和多能源市场的稳定性和有效性。

综合需求响应是需求侧管理的一种重要方式,以确保需求侧的稳定运行。文献[38]中引入的综合需求响应提高了微电网系统的经济性和环境友好性。文献[39]考虑了基于价格的需求响应和基于激励的需求响应,以从不同角度确保 MEMG 的经济和安全运行。文献[40]由于 MEMG 中的多能量耦合,所有类型的能源都参与了 IDR,以形成综合需求响应(IDR)。文献[41]根据使用时间(TOU)能源价格调整 IDR,以优化 MEMG 效益并使用 Shapley 价值法对其进行公平分配。文献[42]将动态参数添加到两层随机模型中,以提高复杂不确定性 IDR 场景的适用性。文献[43]考虑了新能源输出和负荷预测的不确定性,并指定了 IDR 策略来优化 IES 日前和日内调度模型。在文献[44]中,作者提出了一种考虑多种不确定性和基于价格的 CIES 需求响应的最优操作方法。然而,基于激励的需求反应没

有被考虑在内。文献[45]分别使用 IDR 和 DR 规划和运营综合能源枢纽。结果表明, IDR 计划的实施修改了电力、供暖和制冷负荷的需求曲线,从而将运营成本降低了 15.1%。文献[46]讨论了 EHs 的日常运行条件,并对不同能源价格、线路损耗率和 IDR 参与率进行了敏感性分析,以证明模型的稳健性。文献[47]为 EH 的长期规划提出了一个多目标优化框架,其中考虑了设备退化和 IDR 计划。目标函数包括总成本、排放量和轮毂损失。

综合需求响应可以优化电力系统的平衡和负荷,减少突发故障和系统失灵,提高电力系统的可靠性和稳定性,优化电力系统的负荷分配,降低 MEMG 的经济成本和环境成本。因此,综合需求响应技术的研究对于提高电力系统的效率和可靠性、实现节能减排、优化电力市场和提高用户利益等具有重要的意义^[47]。

1.2.3 碳交易机制的研究现状

碳交易机制 (Carbon Trading Scheme, CTS)^[48]是指对碳排放量进行管理和控制的一种机制,在综合能源系统中有着重要的应用。通过建立碳排放权的交易市场来以经济的方式引导企业和个人减少碳排放量,达到社会、经济 and 环境的协调发展。目前,许多国家和地区都建立了自己的碳交易市场,因此在综合能源系统中,碳交易机制可以引导能源企业采取更为环保、经济和可持续的发展策略。

在文献[49]中,建立了适用于园区型 MEMG 模型的碳交易机制,用于能源控制,并研究了阶梯式碳价格中的各种因素对 MEMG 碳排放的影响。文献[50]比较了有碳排放收入和无碳排放收入情况下风电的成本和电价,并讨论了风电和火电之间成本竞争的可能性。文献[51]将各种能源发电的碳减排效益引入供电规划,并建立了考虑碳减排效益的供电规划模型,目标是最大限度地降低发电运营成本和二氧化碳处理成本。另一个方面是对电力行业碳减排潜力的研究。文献[52]将碳排放交易引入传统的电力调度模型,并构建了一个具有碳减排成本的新的低碳经济调度模型。文献[53]采用了复合自适应全局人工鱼算法,并与典型的微电网进行了分析。仿真结果表明,复合自适应全局人工鱼群算法适用于解决并网微电网的优化运行,碳排放交易可以显著提高微电网的经济性。文献[54]在传统的大容量电力系统发电扩展规划的基础上,讨论了考虑低碳经济的微电网发电扩展规划模型问题,并应用了一种改进的遗传算法——矩阵实数编码遗传算法,对编码方法和算子进行了修改,不仅更新了全局收敛性,还更新了优化速度。文献[55]

开发了一个低碳经济调度模型，以改善风力发电并减少二氧化碳排放。文献[56]提出了一种由光伏/燃料电池/电池组成的住宅能源系统，并对其进行了优化，使年运行成本或年二氧化碳排放量降至最低。文献[57]使用创新的随机成本排放方案，最大限度地提高了微电网的社会福利，并将环境排放降至最低，以优化前瞻性能源市场中基于可再生能源的微电网的同时能源和储备调度。

目前，碳排放机制作为一种政策和措施，被广泛用于限制二氧化碳等温室气体的排放行为。该机制有助于推动全球减排路径的转型，将高碳排放企业逐渐转变为低碳经营模式，改变传统化石能源的发展路径，倡导清洁能源的利用，推动企业逐步转型。此外，碳排放机制能够控制温室气体的排放，减缓全球气候变化的进程，保护全球气候环境，减少自然灾害和生态环境的破坏，为人类的生存和发展提供有利条件。

1.2.4 多时间尺度能源管理系统的研究现状

多时间尺度（Multi-Time-Scale, MTS）^[58]的能源管理系统的研究涵盖面广，涉及了系统建模、算法研究、能源供求侧管理、集成化能源系统和经济、环境、社会等多方面的因素，并试图通过集成多时间尺度信息和技术手段，提高能源系统的效率、可靠性和可持续性。目前，该领域的研究正在蓬勃发展，为实现低碳环保的能源转型和可持续发展提供了重要技术支持。

在文献[59]中，应用多时间尺度协调自适应鲁棒操作方法来保证工业多能源微电网在最坏情况下的鲁棒最优操作解决方案。文献[60]提出了一种用于冷热电联产微电网的多时间尺度动态鲁棒最优调度策略，以最小化日内运营成本，该策略由两个尺度组成：日前调度尺度和日内调整尺度。文献[61]提出了一种双层优化方法，用于在并网模式下优化运行光伏主导的微电网。该方法由上层调度层和下层调度层组成。调度层基于移动优化窗口，周期性地产生运行参考，由实时调度层中的微电网单元跟踪。移动窗口具有一种新颖的灵活时间结构，使调度层能够利用多个时间尺度的预测数据来生成功率参考，并且可以通过调整时间结构来控制操作成本的最优性和优化问题的规模。作为应对不确定性的对策，文献[62]使用随机过程对可再生能源发电的波动性和间歇性进行建模。随机动态优化可用于微电网的日前和日内运行。

在多层能源管理框架^[63]下，预测数据的准确性、时间分辨率和时间跨度会对

上层操作参考的有效性产生强烈影响。在现有的能源管理工作中，所使用的预测数据通常来自一个单一的时间尺度，例如具有固定分辨率的日前预测。如何在多个时间尺度上集成预测数据尚未解决。文献[64]研究了来自多个时间尺度的预测数据的集成问题，提出了一种生成覆盖多个时间帧（尺度）的无缝概率预测的模型。

综上所述，多时间尺度能源管理系统可以更加完善地集成不同的能源系统，利用各种能源之间的互补性和协同效应，从而更加高效地利用能源，减少能源消耗和浪费，提高能源使用效益，降低能源成本，在能源领域相关政策和决策中具有重要的指导和应用价值。

1.3 本文的主要内容

综合能源系统涉及多种能源形式和各用户侧，需要进行集中化控制和管理，以协调不同能源的供需，保证系统的稳定性和安全性，而传统能源的开发和利用会对环境造成严重影响，这对综合能源系统的可持续性和环保性来说是一个严峻的挑战。为了应对以上挑战，本文研究了基于 IDR、CTS 和 MTS 的多能源微电网调度策略。本文的具体章节及其主要内容安排如下：

第一章介绍了 MEMG 的研究背景及意义，并从 IES 的研究现状、MTS 的研究现状、CTS 的研究现状三个方面概述了国内外 MEMG 研究现状，最后阐述了本文研究的主要内容。

第二章介绍了 MEMG 的结构和各种分布式设备的作用，确定了研究对象，建立了集电、热、气、冷多能源于一体的微电网数学模型，并对可再生能源出力及负荷的不确定性进行场景模拟，提出了相应的处理方法，为后文的研究奠定了基础。

第三章提出了一种考虑 IDR 计划和奖惩阶梯型 CTS 的多能源微电网调度策略。首先，考虑了用户侧电-热-冷-气四种负荷的柔性特性和可调度能力，建立了完善的 IDR 模型。其次，以 MEMG 的能源交换成本、阶梯型碳交易成本、运维成本和储能设备老化成本之和最低为目标函数，建立了 MEMG 多目标优化模型并求解。最后，通过调整各项参数、变量、约束条件来设置不同实验，分析了设置不同 CTS 和 IDR 参数、变量、约束条件对 MEMG 多目标优化的影响，从而证明了本文提出的多能源微电网调度策略在求解 MEMG 多目标优化模型时的有

效性和可行性。

第四章针对 MEMG 的安全、可靠和经济运行的要求，提出了基于多时间尺度调度的激励型 IDR 响应的稳定运行策略。首先，针对不同种类的负荷削减、转移对需求侧产生的影响，建立了差异化的激励型 IDR 模型，激励用户参与需求响应。其次，在基于日前调度计划的双时间尺度优化模型中，以 15 分钟和 5 分钟为时间尺度，分别建立了日内长时间尺度和短时间尺度调度模型。仿真结果表明，采用多时间尺度调度策略可以有效地降低 MEMG 能源供给侧和需求侧的功率波动，实现不同种类负荷的调峰填谷目标，在保证 MEMG 安全稳定运行的同时，也降低了 MEMG 运行的经济成本和碳交易成本。最后，通过仿真实验研究了用户参与激励型 IDR 的程度对 MEMG 优化调度的影响，仿真结果表明：随着用户参与激励型 IDR 的比例增加，各类负荷的需求曲线愈加趋于平缓，并且峰谷差也有所减少。

第五章是对研究内容的总结和展望，总结了本文的研究成果和得出的结论，并根据本文研究中存在的缺陷对 MEMG 未来的研究内容进行展望。

第 2 章 多能源微电网结构及各设备的数学模型

本文研究的多能源微电网是一种集多种能源形式和储能技术于一体的多能源耦合系统，具有可靠性高、灵活性强、环境友好等特点。其主要结构组成包括多种能源设备（太阳能电池板、风力发电机等）、储能设备（电池存储系统、热能存储系统等），以便实现多种能源形式的互补和平衡，稳定 MEMG 供电质量。本章的主要任务是建立 MEMG 结构中各类设备的数学模型和对各设备的特性进行研究，并在场景生成的同时使用 K-means 聚类算法来减少场景数量，用于解决太阳能电池板、风力发电机的输出功率以及电、热和冷却需求的不确定性问题。

2.1 多能源微电网结构

多能源微电网系统是指将多种能源形式（如化石能源、可再生能源等）和能源转换技术（如热电联产、储能等）有机结合，其结构包括能源生产、传输、储存、转换和利用等环节，通过智能化控制和管理，实现能源的优化配置和利用。本文研究的多能源微电网主要包括以风力发电机（Wind Turbine, WT）、光伏发电机（Photovoltaic, PV）为核心的可再生能源发电机组；以电池储能系统（Battery Energy Storage System, BESS）、热能储存系统（Thermal Energy Storage System, TESS）和气体存储系统（Gas Storage System, GSS）为核心的多能源存储系统；以冷热电联产系统（Combined Cooling, Heating and Power System, CCHP）为核心的能量供应设备。其中 CCHP 包括燃气轮机（Gas Turbine, GT）、余热锅炉（Waste Heat Boiler, WHB）和吸收式制冷机（Absorption Refrigerator, AR）三种设备。此外还包括燃气锅炉（Gas Boiler, GB）和电转气设备（Power to Gas, P2G）、电制冷机（Air Conditioner, AC）和电锅炉（Electric Boiler, EB）^[65]。多能源微电网与外部配电网连接，以并网模式运行，即二者可进行能量交互。需求侧负荷需求主要包括电、热、气、冷四类，用户对象是以家庭、企业、学校、医院等为代表的各种类型的建筑和设施。

多能源微电网的结构图如图 2-1 所示。

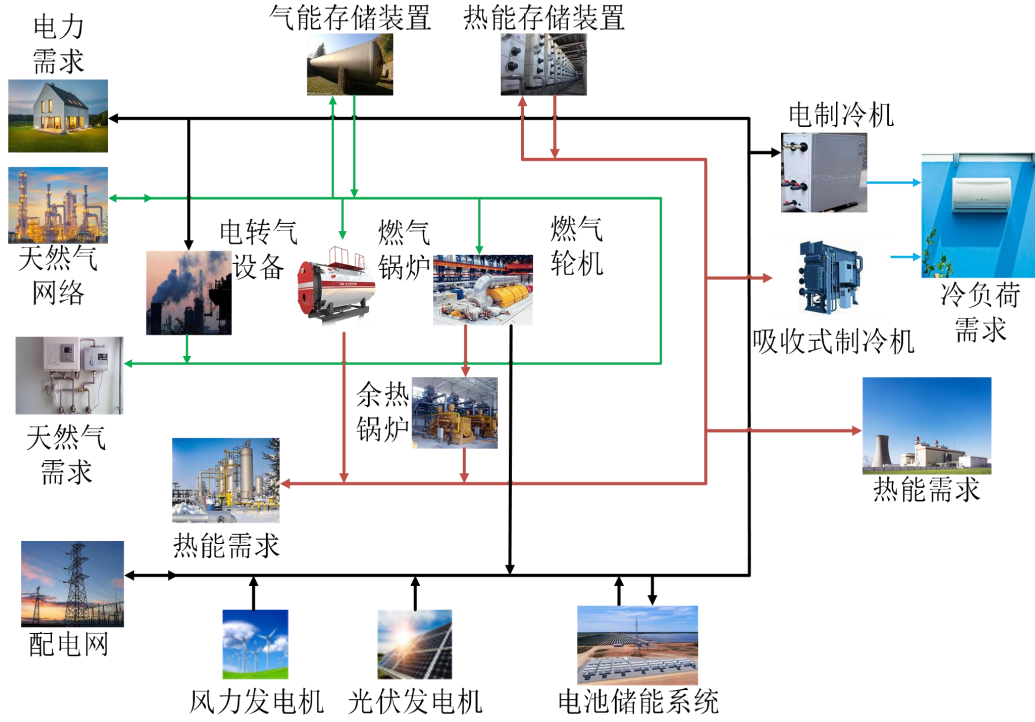


图 2-1 多能源微电网结构

2.2 MEMG 各设备的数学模型及运行约束

2.2.1 制冷设备

2.2.1.1 AC 的数学模型及约束

电制冷机（AC）是一种利用电能驱动的制冷设备，它通过电能驱动制冷剂在制冷循环中进行蒸发和冷凝，从而实现制冷效果。电制冷机的工作原理类似于传统的压缩式制冷机，但是它使用电能代替了机械能，因此它的制冷效率高，可以达到传统制冷机的两倍以上，并且可以根据实际需求进行调整，满足不同场合的制冷需求。电制冷机不仅不需要使用氟利昂等臭氧层破坏物质，对环境污染小，而且噪音低，不会对人们的生活和工作造成干扰。AC 输入的电功率与输出的制冷量的关系如下：

$$Q_{AC}(t) = P_{AC}(t) \cdot \eta_{AC} \quad (2-1)$$

其运行约束如下：

$$0 \leq P_{AC}(t) \leq P_{AC,max} \quad (2-2)$$

2.2.1.2 AR 的数学模型及约束

吸收式制冷机（AR）是一种利用热能驱动的制冷设备，它通过吸收剂在吸收循环中进行吸收和脱吸收，从而实现制冷效果。它的输出功率如下所示：

$$Q_{AR}(t) = H_{AR}(t) \cdot \eta_{AR} \quad (2-3)$$

其运行约束如下：

$$0 \leq H_{AR}(t) \leq H_{AR,\max} \quad (2-4)$$

式中： η_{AR} 为吸收式制冷机的效率； $H_{AR,\max}$ 为吸收式制冷机功率上限； $H_{AR}(t)$ 为吸收式制冷机在 t 时刻的功率。

2.2.2 电-热-气耦合的储能系统

电-热-气耦合的储能系统是一种能将 MEMG 中产生的多余能量储存起来的综合能源存储系统，包括 BESS、TESS、GSS。

2.2.2.1 电池储能系统（BESS）

BESS 在 t 时刻剩余电量的数学模型可以表示为：

$$E_{BESS}(t) = (1 - \delta) E_{BESS}(t-1) + [P_{bessch}(t)\eta_{bessch} - \frac{P_{bessdisch}(t)}{\eta_{bessdisch}}]\Delta t \quad (2-5)$$

BESS 在 t 时刻的输出功率可以表示为：

$$P_{BESS}(t) = P_{bessch}(t)\eta_{bessch} - \frac{P_{bessdisch}(t)}{\eta_{bessdisch}} \quad (2-6)$$

式中： $E_{BESS}(t)$ 是 t 时刻 BESS 储存的电量， δ 是自放电率， $P_{bessch}(t)$ 、 $P_{bessdisch}(t)$ 是 t 时刻 BESS 的充电、放电功率， η_{bessch} 、 $\eta_{bessdisch}$ 是 t 时刻 BESS 的充电、放电效率。 $P_{BESS}(t)$ 是 t 时刻 BESS 的输出功率。

2.2.2.2 热能储存（TESS）

TESS 在 t 时刻剩余热能的数学模型可以表示为：

$$E_{TESS}(t) = (1 - \sigma) E_{TESS}(t-1) + [P_{tessch}(t)\eta_{tessch} - \frac{P_{tessdisch}(t)}{\eta_{tessdisch}}]\Delta t \quad (2-7)$$

TESS 在 t 时刻的输出功率可以表示为：

$$P_{TESS}(t) = P_{tessch}(t)\eta_{tessch} - \frac{P_{tessdisch}(t)}{\eta_{tessdisch}} \quad (2-8)$$

式中： $E_{TESS}(t)$ 是 t 时刻 TESS 储存的热量， σ 是自放热率， $P_{tessch}(t)$ 、 $P_{tessdisch}(t)$ 是 t 时刻 TESS 的储热、放热功率， η_{tessch} 、 $\eta_{tessdisch}$ 是 t 时刻 TESS 的储热、放热效率。 $P_{TESS}(t)$ 是 t 时刻 TESS 的输出功率。

2.2.2.3 气体存储系统（GSS）

GSS 在 t 时刻剩余气体量的数学模型可以表示为:

$$E_{GSS}(t) = (1 - \omega) E_{GSS}(t-1) + [P_{gssch}(t)\eta_{gssch} - \frac{P_{gssdisch}(t)}{\eta_{gssdisch}}]\Delta t \quad (2-9)$$

GSS 在 t 时刻的输出功率可以表示为:

$$P_{GSS}(t) = P_{gssch}(t)\eta_{gssch} - \frac{P_{gssdisch}(t)}{\eta_{gssdisch}} \quad (2-10)$$

式中: $E_{GSS}(t)$ 是 t 时刻 GSS 储存的气体量, ω 是自放气率, $P_{gssch}(t)$ 、 $P_{gssdisch}(t)$ 是 t 时刻 GSS 的储气、放气功率, η_{gssch} 、 $\eta_{gssdisch}$ 是 t 时刻 GSS 的储气、放气效率。
 $P_{GSS}(t)$ 是 t 时刻 GSS 的输出功率。

2.2.2.4 电-热-气耦合的储能系统约束

由于 BESS 的物理限制, 其实际输出功率将严格限制在上、下限之间, TESS、GSS 同理。

$$\mu_{BESS}(t)P_{BESS}^{\min} \leq P_{BESS}(t) \leq \mu_{BESS}(t)P_{BESS}^{\max} \quad (2-11)$$

式中: $P_{BESS,ch}(t)$ 是 BESS 在 t 时刻的输出功率, $P_{BESS,ch}^{\max}$ 、 $P_{BESS,ch}^{\min}$ 为 BESS 输出功率的上、下限。 $\mu_{BESS}(t)=1$ 表示 BEES 在 t 时刻是充电状态, 而 $\mu_{BESS}(t)=-1$ 代表其在 t 时刻是放电状态, 并且 $\mu_{BESS}(t)$ 不能等于 0, 表示 BESS 不能同时充电和放电。

如公式(2-11)所示, BESS 的剩余电量应限制在合理范围内。BESS 的剩余电量在调度期开始和结束时应保持一致, 如公式(2-12)所示, TESS、GSS 同理。

$$E_{BESS,\min} \leq E_{BESS}(t) \leq E_{BESS,\max} \quad (2-11)$$

$$E_{BESS,0} = E_{BESS,24} \quad (2-12)$$

$$\mu_{TESS}(t)P_{TESS}^{\min} \leq P_{TESS}(t) \leq \mu_{TESS}(t)P_{TESS}^{\max} \quad (2-13)$$

式中: $P_{TESS,ch}(t)$ 是 TESS 在 t 时刻的输出功率, $P_{TESS,ch}^{\max}$ 、 $P_{TESS,ch}^{\min}$ 为 TESS 输出功率的上、下限。 $\mu_{TESS}(t)=1$ 表示 TESS 在 t 时刻是储热状态, 而 $\mu_{TESS}(t)=-1$ 代表其在 t 时刻是放热状态, 并且 $\mu_{TESS}(t)$ 不能等于 0, 表示 TESS 不能同时储热和放热。

$$E_{TESS,\min} \leq E_{TESS}(t) \leq E_{TESS,\max} \quad (2-14)$$

$$E_{TESS,0} = E_{TESS,24} \quad (2-15)$$

$$\mu_{GSS}(t)P_{GSS}^{\min} \leq P_{GSS}(t) \leq \mu_{GSS}(t)P_{GSS}^{\max} \quad (2-16)$$

式中： $P_{GSS, ch}(t)$ 是 GSS 在 t 时刻的输出功率， $P_{GSS, ch}^{\max}$ 、 $P_{GSS, ch}^{\min}$ 为 GSS 输出功率的上、下限。 $\mu_{GSS}(t)=1$ 表示 GSS 在 t 时刻是储气状态，而 $\mu_{GSS}(t)=-1$ 代表其在 t 时刻是放气状态，并且 $\mu_{GSS}(t)$ 不能等于 0，表示 GSS 不能同时充电和放电。

$$E_{GSS, \min} \leq E_{GSS}(t) \leq E_{GSS, \max} \quad (2-17)$$

$$E_{GSS, 0} = E_{GSS, 24} \quad (2-18)$$

2.2.3 CHP 的数学模型及约束

热电联产机组是一种能够同时产生电力和热能的设备，也称为“热电联合发电机组”或“CHP（Combined Heat and Power）”。它通过燃烧燃料（如天然气、煤炭、生物质等）来产生热能，然后利用热能驱动发电机发电，同时将余热回收利用，供暖或供给其他热能需求。这种机组的能源利用效率高，可以达到 80% 以上，比传统的分别发电和供热的方式更加节能环保。热电联产机组广泛应用于工业、商业、住宅等领域。热电联产机组不仅高效节能，还可以在停电时提供备用电力，降低能源成本，提高能源利用效率，用于满足不同场合的能源需求。

CHP 机组主要包括 GT 和 WHB，其消耗天然气量、回收余热功率与输出功率比之间的关系可表达如下：

$$\begin{cases} E_{GT}(t) = x(P_{GT}(t))^2 + yP_{GT}(t) + zU_{GT}(t) \\ E_{WHB}(t) = Q_{GT}(t)\lambda_{GT}\eta_{WHB} \\ \lambda_{GT} = \frac{\eta_{GT}^h}{\eta_{GT}^e} \end{cases} \quad (2-19)$$

式中： x ， y ， z 分别为燃气锅炉的能量消耗的系数； $G_{GT}(t)$ 、 $P_{GT}(t)$ 分别为 t 时刻燃气锅炉消耗能量总量和输出的电功率； λ_{GT} 为 GT 的输出电、热功率比， η_{GT}^h 、 η_{GT}^e 分别为 t 时刻 GT 的制热效率和额定发电效率； $Q_{WHB}(t)$ 为 t 时刻 WHB 输出热功率； η_{WHB} 为 t 时刻 WHB 的制热效率； $U_{GT}(t)$ 为 GT 的启停标志符号。

由于 CHP 的物理限制，CHP 中各机组的实际输出功率将严格限制在上、下限之间。

$$P_{GT, \min} \leq P_{GT}(t) \leq P_{GT, \max} \quad (2-20)$$

$$Q_{WHB, \min} \leq Q_{WHB}(t) \leq Q_{WHB, \max} \quad (2-21)$$

式中： $P_{GT}(t)$ 是 GT 在 t 时刻的输出功率， $P_{GT,\max}$ 、 $P_{GT,\min}$ 为 GT 输出功率的上、下限。 $Q_{WHB}(t)$ 是 GT 在 t 时刻的输出功率， $Q_{WHB,\min}$ 、 $Q_{WHB,\max}$ 为 GT 输出功率的上、下限。

$$|P_{GT}(t) - P_{GT}(t-1)| \leq P_{GT}^{\max} \quad (2-22)$$

$$|Q_{WHB}(t) - Q_{WHB}(t-1)| \leq Q_{WHB}^{\max} \quad (2-23)$$

式中： $P_{GT}(t)$ 、 $P_{GT}(t-1)$ 分别是 GT 在 t 时刻、 $t-1$ 时刻的输出功率， $P_{GT}^{\max}$ 表示 GT 功率爬升率的最大值。 $Q_{WHB}(t)$ 、 $Q_{WHB}(t-1)$ 分别是 WHB 在 t 时刻、 $t-1$ 时刻的输出功率， $Q_{WHB}^{\max}$ 表示 WHB 功率爬升率的最大值。

为了精确反映燃气轮机的实际运行工况，对公式(2-24)进行分段线性化处理，如图 2-2 所示。分段后的三段斜率^[66]为：

$$\begin{cases} k_1 = x(w_1 + w_2) + y \\ k_2 = x(w_2 + w_3) + y \\ k_3 = x(w_3 + w_4) + y \end{cases} \quad (2-24)$$

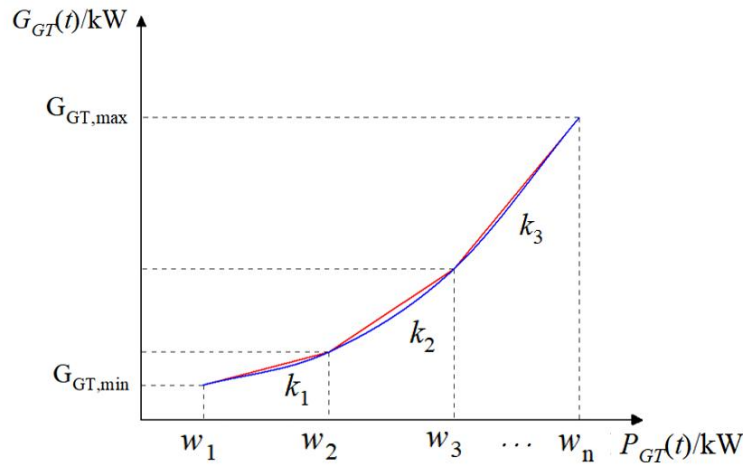


图 2-2 GT 燃料消耗的分段线性化曲线

式中： w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 表示分段后的 GT 电功率曲线参数； w_1 、 w_4 为 GT 输出电功率的上、下限，故式可以改写为：

$$G_{GT}(t) = G_{GT,\min} U_{GT}(t) + \sum_{i=1}^3 \left[k_i \frac{w_{i+1} - w_i + |P_{GT}(t) - w_i| - |P_{GT}(t) - w_{i+1}|}{2} \right] \quad (2-25)$$

2.2.4 电转气设备

电转气设备是一种将电能转化为氢气或其他气体的设备。它可以用于储存电能，以便在需要时将其转化为氢气或其他气体，供应燃料或能源。电转气设备包括电解水设备、电化学储氢设备等组成。电解水设备是用于将水分解成氢气和氧气的设备，电化学储氢设备是用于将氢气储存起来的设备。

P2G 输出功率的数学模型如下所示：

$$G_{P2G}(t) = P_{P2G}(t)\eta_{P2G}, \forall t = 1, 2, \dots, 24 \quad (2-26)$$

式中： $G_{P2G}(t)$ 为 P2G 在 t 时刻的天然气输出功率； η_{P2G} 为 P2G 在 t 时刻的转换效率。

其输出功率约束为：

$$G_{P2G,\min} \leq G_{P2G}(t) \leq G_{P2G,\max} \quad (2-27)$$

式中： $G_{P2G}(t)$ 是 P2G 在 t 时刻的输出功率， $G_{P2G,\max}$ 、 $G_{P2G,\min}$ 为 P2G 输出功率的上、下限。

2.2.5 燃气锅炉

燃气锅炉热功率如下：

$$H_{GB}(t) = P_{GB}(t)\eta_{GB}Q^G \quad (2-27)$$

式中： $P_{GB}(t)$ 为 GB 在 t 时刻的气体输入功率； η_{GB} 为 GB 在 t 时刻的发热效率； Q^G 为天然气低热值。

其输出功率约束为：

$$H_{GB,\min} \leq H_{GB}(t) \leq H_{GB,\max} \quad (2-28)$$

式中： $H_{GB}(t)$ 是 GT 在 t 时刻的输出功率， $H_{GB,\max}$ 、 $H_{GB,\min}$ 为 GB 输出功率的上、下限。

2.2.6 电锅炉（EB）

EB 的输出功率为：

$$Q_{EB}(t) = P_{EB}(t)\eta_{EB} \quad (2-28)$$

式中： $P_{EB}(t)$ 为 EB 在 t 时刻的气体消耗量； η_{EB} 为 EB 在 t 时刻的发热效率。

其输出功率约束为：

$$P_{EB,\min} \leq P_{EB}(t) \leq P_{EB,\max} \quad (2-29)$$

式中： $P_{EB}(t)$ 是 EB 在 t 时刻的输出功率， $P_{EB,\max}$ 、 $P_{EB,\min}$ 为 EB 输出功率的上、

下限。

2.2.7 不确定性建模

本节描述了用于输出 WT、PV 的功率以及电、热和冷却需求的不确定性模型。

2.2.7.1 太阳辐照度模型

双峰分布模型通常适合每小时太阳辐照度的概率分布。该分布线性地组合了两个单峰分布，每个分布都使用 Beta 概率分布函数（Probability distribution function, PDF）^[67]，由（2-30）、（2-31）、（2-32）得出：

$$f_b(si) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha_s + \beta_s)}{\Gamma(\alpha_s)\Gamma(\beta_s)} \times si^{(\alpha_s-1)} \times (1-si)^{(\beta_s-1)}, & 0 \leq si \leq 1, \alpha_s \geq 0, \beta_s \geq 0 \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (2-30)$$

$$\beta_s = (1 - \mu_s) \times \left(\frac{\mu_s \times (1 + \mu_s)}{\sigma_s^2} - 1 \right) \quad (2-31)$$

$$\alpha_s = \frac{\mu_s \times \beta_s}{(1 - \mu_s)} \quad (2-32)$$

太阳能辐照度、面积、光伏组件和太阳能收集器的效率等因素决定了光伏和太阳能收集器单元的输出功率。光伏和太阳能集热器单元的输出功率使用 Beta PDF 计算不同状态下的输出功率，计算公式如下：

$$P_{pv}(si) = \eta^{pv} \times S^{pv} \times si \quad (2-33)$$

$$P_{solar}(si) = \eta^{solar} \times S^{solar} \times si \quad (2-34)$$

2.2.7.2 风速和风力发电输出功率建模

威布尔 PDF 通常用于建模风速的随机行为。威布尔 PDF 中有两个参数需要确定以进行建模。这些参数是比例和形状因子。在本文中，这些参数被任意设置为 $a = v_{mean}/0.9$ 和 $b=2$ 。与太阳辐射类似，首先，每小时从相邻气象站接收风速的平均值和标准偏差。然后，通过在每个小时生成威布尔 PDF。

$$f_w(v) = \begin{cases} 0, & 0 \leq v \leq v_{ct} \\ P_{rated} \times \frac{v - v_{ct}}{v_r - v_{ct}}, & v_{ct} \leq v \leq v_r \\ P_{rated}, & v_r \leq v \leq v_{co} \\ 0, & v_{co} \leq v \end{cases} \quad (2-35)$$

$$f_d(l) = \frac{1}{\sigma_d \times \sqrt{2\pi}} \times e^{\frac{-(l-\mu_d)^2}{2\sigma_d^2}} \quad (2-36)$$

$$l = z \times \sigma_d + \mu_d \quad (2-37)$$

每个小时的正常 PDF 是使用上式预测的（电/热/冷却）需求的平均值和标准偏差生成的。

2.2.7.3 状态选择

为了在所提出的模型中公式化五个随机变量，即光伏发电量、风力发电量、电力需求、热需求和冷却需求，首先，每个连续 PDF 的 x 轴被分为几个状态。在本文中，假设太阳辐照度的状态数为 n，风速为 n，电力需求为 n，热需求为 n、冷却需求为 n。另一方面，所提出的模型有五个随机变量，每个随机变量都有四个状态。然后，通过（2-38）~（2-42）为任何给定小时的每个状态计算太阳辐照度、风速和需求等不确定变量的 PDF 下面积。这些区域是每个状态在任何指定时间出现不确定变量的概率。

$$P_s \{G_y\} = \int_{S_{y1}}^{S_{y2}} f_b(si) dsi \quad (2-38)$$

$$P_v \{G_w\} = \int_{V_{w1}}^{V_{w2}} f_w(v) dv \quad (2-39)$$

$$P_d \{G_l\} = \int_{d_{l1}}^{d_{l2}} f_d(l) dl \quad (2-40)$$

$$P_{d-th} \{G_{th}\} = \int_{d-th_{th1}}^{d-th_{th2}} f_{d-th}(th) dth \quad (2-41)$$

$$P_{d-coo} \{G_{coo}\} = \int_{d-co_{coo1}}^{d-co_{coo2}} f_{d-cool}(coo) dcoo \quad (2-42)$$

其中， $P_s \{G_y\}$ 、 $P_v \{G_w\}$ 、 $P_d \{G_l\}$ 、 $P_{d-th} \{G_{th}\}$ 和 $P_{d-coo} \{G_{coo}\}$ 表示五个不确定变量的概率，这些变量是太阳辐照度、风速、电力需求、热需求和冷却需求。可以注意到， S_{y1} 和 S_{y2} 显示了太阳辐照度变量第 y 个状态的极限； V_{w1} 和 V_{w2} 是风速变量的第 w 个状态的极限； d_{l1} 和 d_{l2} 是电负载变量的第 L 个状态的极限； $d-th_{th1}$ 和 $d-th_{th2}$ 是热负荷变量的第 th 个状态的极限； $d-co_{coo1}$ 和 $d-co_{coo2}$ 是冷负荷变量的第 coo 个状态的极限。 $f_b(si)$ 、 $f_w(v)$ 、 $f_d(l)$ 、 $f_{d-th}(th)$ 和 $f_{d-coo}(coo)$ 分别显示了光伏发电、风力发电、电力需求、热需求和冷却需求的每种状态的概率函数。

2.2.7.4 情景缩减

本文中的状态数假设为 n 个太阳辐照度, n 个风速, n 个电力需求, n 个热需求, n 种冷却需求。因此, 为未来一天的能源管理提供了 $24 \times n^5$ 个状态。情景缩减策略用于减少和管理计算负担, 如下所示。

2.2.7.5 基于遗传算法选择场景的自动聚类

为了最大限度地减少聚类内的传播, K-means 算法^[68]是使用迭代算法进行聚类的最佳替代方案之一。本研究使用遗传算法进行数据聚类, 解决了一个优化问题。此外, Davies-Bouldin (DB) 有效性指数用于自动聚类算法。该指数同时使用聚类内和聚类间的距离及其相应的样本均值。

计算集群内距离与集群间距离之和的比率, 以计算 DB 指数。首先, 第 i 个簇内的距离以及第 i 个和第 j 个簇之间的距离如下所示:

$$S_{i,q} = \left[\frac{1}{N_i} \sum_{\bar{X} \in C_i} |\bar{X} - \bar{m}_i|^q \right]^{\frac{1}{q}}, q \geq 1 \quad (2-43)$$

$$d_{ij,t} = \left[\sum_{p=1}^d |m_{i,p} - m_{j,p}|^t \right]^{\frac{1}{t}} = \bar{m}_i - \bar{m}_{j_t}, t \geq 1 \quad (2-44)$$

其中 $S_{i,q}$ 是第 i 个簇内的距离, $d_{ij,t}$ 表示第 i 个和第 j 个簇之间的距离, m_i 是第 i 个簇的中心; N_i 表示第 i 个簇中的元素数量; q (它是一个整数) 和 t 是可以任意选择的。 $R_{i,qt}$ 表示为:

$$R_{i,qt} = \max \left\{ \frac{S_{i,q} + S_{j,q}}{d_{ij,t}} \right\}, j \in k, j \neq i \quad (2-45)$$

DB 有效性指数如下所示:

$$DB(K) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K R_{i,qt} \quad (2-46)$$

运行了一个 GA, 结果得到了最小的 DB (K) 有效性。最初, 通过解决优化问题, 选择多个质心, 并将其分配到主场景集中最近的场景, 然后对其进行相应更新。然后, 重新分配概率, 并将未选择场景的概率添加到每个集群中刚刚更新的质心的概率中。最终, 选择了一个简化的场景集以及相关的概率。

ASO 是一个参数, 指示指定变量在选定场景中的平均可能加权输出, 其计算如下:

$$ASO = \frac{\sum_{s \in S} PO(s) \times PVAR(s)}{\sum_{s \in S} PVAR(s)} \quad (2-47)$$

其中 $PO(s)$ 表示特定变量在所选情景中的可能结果， $PVAR(s)$ 显示该变量在第 s 个情景中的发生概率。

2.2.8 MEMG 与 DN 的能量交换

式 (2-48) ~ (2-49) 的建立表明，MG 向 DN 销售、购买电能的功率不能超过上限，式 (2-50) 表示销售和购买电能的行为不能同时发生。

$$0 \leq P_t^{buy} \times u_t^{buy} \leq P_{\max}^{buy} \quad (2-48)$$

$$0 \leq P_t^{sell} \times u_t^{sell} \leq P_{\max}^{sell} \quad (2-49)$$

$$u_t^{buy} + u_t^{sell} \leq 1 \quad (2-50)$$

式中： P_t^{buy} 是 t 时刻 MEMG 从 DN 购买电力的功率， P_t^{sell} 是 t 时刻 MEMG 向 DN 出售电力的功率， $P_{\max}^{buy}$ 是 t 时刻 MEMG 从 DN 购买电力的功率， $P_{\max}^{sell}$ 是 t 时刻 MEMG 向 DN 出售电力的功率。

2.3 本章小结

本章主要介绍了 MEMG 的结构和各种分布式设备的作用，确定了本文的研究对象，并建立了集电、热、气、冷多能源于一体的多能源微电网结构，主要包括多种能源设备（太阳能电池板、风力发电机等）、储能设备（电池存储系统、热能存储系统等），以便实现多种能源形式的互补和平衡，稳定 MEMG 供电质量。此外还对 MEMG 结构中各类设备的数学模型和对各设备的特性进行研究，并在场景生成的同时使用 K-means 聚类算法来减少场景数量，用于解决太阳能电池板、风力发电机的输出功率以及电、热和冷却需求的不确定性问题。

第3章 基于 IDR 和阶梯型 CTS 的综合调度策略

目前，能源供应安全、供能效率问题、环境问题迫在眉睫。为了解决以上问题，本章提出了一种基于 IDR 和阶梯型 CTS 的综合调度策略。为了保证 MEMG 的安全性和稳定性，本章采用多能源耦合的 IDR 策略，充分了发挥多种能源互补特性，并根据响应性和负载特性，将负载分为三种类型，即固定负载、可中断负载和可转移负载。为了实现 MEMG 的经济环保运行、解决温室气体排放问题，本章使用了一种阶梯型碳交易机制。阶梯型碳交易机制可以通过碳排放权交易，使得企业可以在市场上购买或出售碳排放权，实现碳排放的分配和转移，从而降低碳排放成本。

3.1 IDR 模型

传统的 DR 模型只调整电负荷，通常通过调整价格信号来刺激用户改变用电习惯。MEMG 中有电、热、气、冷四种负荷。此外，MEMG 中的电能、热能、天然气和冷能可以通过能量耦合装置进行优化调节，MEMG 的能量耦合装置可以促进各种能源之间的互补性。本文提出的 IDR 模型基于四种负载的可调节性，并针对用户的可转移负载、可中断负载进行了优化。由于冷负荷只能由其他形式的能量转换产生，因此，本章只需研究电、热、气三种负荷即可。

在 IDR 中，而弹性系数表示需求对价格的敏感性^[69]，可表示为：

$$\varepsilon_E(t) = \frac{\Delta L_E(t)}{\delta_E L_{EI}(t)} \cdot \frac{Q_E(t)}{\Delta Q_E(t)} \quad (3-1)$$

$$\varepsilon_P(t) = \frac{\Delta L_P(t)}{\delta_P L_{PI}(t)} \cdot \frac{Q_P(t)}{\Delta Q_P(t)} \quad (3-2)$$

式中： $\varepsilon_E(t)$ 为 t 周期内的自弹性响应系数； δ_E 为 t 周期内弹性电负荷的容量比例； $\Delta L_E(t)$ 和 $L_{EI}(t)$ 是在 t 周期内实施 IDR 后的电力负荷的变化和实施 IDR 前的电力负荷值； $\Delta Q_E(t)$ 和 $Q_E(t)$ 是 t 时刻 IDR 实施后零售电价的变化量和 IDR 实施前的初始零售电价。 $\varepsilon_P(t)$ 是 t 周期内电力负荷价格的相互弹性系数； δ_P 为多周期内弹性电负荷的容量比例； $\Delta L_P(t)$ 和 $L_{PI}(t)$ 是在 t 时刻实施 IDR 后的电力负荷的变化和实施 IDR 前的电力负荷值； $\Delta Q_P(t)$ 和 $Q_P(t)$ 是 t 时刻实施 IDR 后零售电价的变化量和实施 IDR 前的初始零售电价。

从等式（3-1）到（3-2），可以得到需求响应实施后的电力负荷变化：

$$\Delta L_P(t) = \sum_{j=1}^N \varepsilon_P(t) \frac{\Delta Q_P(t)}{Q_P(t)} \delta_P L_{PI}(t) \quad (3-3)$$

类似地，IDR 实施后热负荷、气负荷的变化可以得到如下：

$$\Delta L_T(t) = \sum_{j=1}^N \varepsilon_T(t) \frac{\Delta Q_T(t)}{Q_T(t)} \delta_T L_{TI}(t) \quad (3-4)$$

$$\Delta L_G(t) = \sum_{j=1}^N \varepsilon_G(t) \frac{\Delta Q_G(t)}{Q_G(t)} \delta_G L_{GI}(t) \quad (3-5)$$

$\varepsilon_T(t)$ 是 t 周期内热负荷价格的相互弹性系数； δ_T 为 t 时刻弹性热负荷的容量比例； $\Delta L_T(t)$ 和 $L_{TI}(t)$ 是在 t 时刻实施 IDR 后的热负荷的变化量和实施 IDR 前的热负荷值； $\Delta Q_T(t)$ 和 $Q_T(t)$ 是 t 时刻实施 IDR 后热能价格的变化量和实施 IDR 前的初始热能价格。 $\varepsilon_G(t)$ 是 t 周期内燃气负荷价格的相互弹性系数； δ_G 为 t 时刻弹性燃气负荷的容量比例； $\Delta L_G(t)$ 和 $L_{GI}(t)$ 是在 t 时刻实施 IDR 后的燃气负荷的变化量和实施 IDR 前的燃气负荷值； $\Delta Q_G(t)$ 和 $Q_G(t)$ 是 t 时刻实施 IDR 后零售天然气价的变化量和实施 IDR 前的初始天然气价。

电力负荷、热负荷、燃气负荷可以从方程式（3-3）、（3-4）、（3-5）中获得。

$$L_P(t) = L_{PI}(t) + \Delta L_P(t) \quad (3-6)$$

$$L_T(t) = L_{TI}(t) + \Delta L_T(t) \quad (3-7)$$

$$L_G(t) = L_{GI}(t) + \Delta L_G(t) \quad (3-8)$$

式中： $L_P(t)$ 、 $L_T(t)$ 、 $L_G(t)$ 分别表示需求响应后的电力负荷、热负荷、燃气负荷。

除了常见的固定电负载、可调电负载、固定燃气负载、可调节燃气负载、固定热负载、可调整热负载外，还有电、热、气耦合负载，用户可以通过改变电负载热负载、改变燃气负荷来实现，也可以通过改变加热负荷或类似负荷来实现其他两种负荷的变化。当电力负荷的切换导致电力供应减少时，可以通过替代能源增加热量、天然气、冷能的消耗量来弥补电力短缺。考虑电负载耦合的需求响应关系可以用（3-9）来表示，其中 L 表示需求响应的后负载； ΔL 表示电、热、气、冷负载本身的变化；矩阵 C 表示 L 和 ΔL 之间具体变换关系的耦合矩阵； L_0 为初始荷载，气负荷、冷负荷同理。

$$L = C\Delta L + L_0 \quad (3-9)$$

在考虑了电、热、气、冷负载耦合后，根据方程式（3-6）~（3-9）可改写成以下方程：

$$L_P(t) = \Delta L_P(t) + \beta_{T,P}\varepsilon_{T,P}\Delta L_T(t) + \beta_{G,P}\varepsilon_{G,P}\Delta L_G(t) + L_{P,0}(t) \quad (3-10)$$

$$L_T(t) = \Delta L_T(t) + \beta_{P,T}\varepsilon_{P,T}\Delta L_P(t) + \beta_{G,T}\varepsilon_{G,T}\Delta L_G(t) + L_{T,0}(t) \quad (3-11)$$

$$L_G(t) = \Delta L_G(t) + \beta_{P,G}\varepsilon_{P,G}\Delta L_P(t) + \beta_{T,G}\varepsilon_{T,G}\Delta L_T(t) + L_{G,0}(t) \quad (3-12)$$

式中， $\beta_{i,j}$ 为 i 类荷载和 j 类荷载的耦合系数，例如： $\beta_{P,T} = \beta_{T,P}$ 、 $\beta_{G,P} = \beta_{P,G}$ ； $\varepsilon_{i,j}$ 是 i 类荷载和 j 类荷载之间的单位换算系数， $\varepsilon_{P,T}$ 和 $\varepsilon_{T,P}$ 、 $\varepsilon_{G,P}$ 和 $\varepsilon_{P,G}$ 是互为倒数的。 $\beta_{T,P}\varepsilon_{T,P}\Delta L_T(t)$ 是用户热负荷 $\Delta L_T(t)$ 变化时电负荷的变化量； $\beta_{G,P}\varepsilon_{G,P}\Delta L_G(t)$ 是用户燃气负荷 $\Delta L_G(t)$ 发生变化时用电负荷的变化量。

因此，电负荷的大小与电负荷的变化量、热负荷的变化量、气体负荷的变化量和原始电负荷有关，以此可以类比气体负荷、热负荷、冷负荷的大小。

电、热、气、冷耦合需求响应关系可写成以下形式：

$$\begin{bmatrix} L_P(t) \\ L_T(t) \\ L_G(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \beta_{T,P}\varepsilon_{T,P} & \beta_{G,P}\varepsilon_{G,P} \\ \beta_{P,T}\varepsilon_{P,T} & 1 & \beta_{G,T}\varepsilon_{G,T} \\ \beta_{P,G}\varepsilon_{P,G} & \beta_{T,G}\varepsilon_{T,G} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta L_P(t) \\ \Delta L_T(t) \\ \Delta L_G(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{P,0} \\ L_{T,0} \\ L_{G,0} \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

3.2 阶梯型 CTS

碳配额的分配是指政府或相关机构将碳排放总量分配给各个行业或企业的过程。碳配额的分配方式通常有以下几种：

无偿分配：政府或相关机构根据行业或企业的碳排放情况，将一定数量的碳配额免费分配给行业或企业。

拍卖分配：政府或相关机构通过拍卖的方式将碳配额出售给行业或企业，行业或企业可以根据自身的需求购买碳配额。

直接分配：政府或相关机构直接将碳配额分配给行业或企业，行业或企业可以根据自身的需求使用碳配额。

基准分配：政府或相关机构根据行业或企业的生产规模、能源消耗等指标，制定碳排放基准，将碳配额分配给符合基准要求的行业或企业。

通常情况下，政府部门会制定一个碳排放总量，并按照碳排放量配额比例将

碳排放配额分配给各个企业。碳排放配额是企业在碳交易市场上获得的碳排放权益。

在 MEMG 中, 排放 CO_2 的设备主要包括常规发电机组、CCHP 和 GB。根据文献[70]中的碳配额分配方法将各部分的碳配额按照等效的供热量进行分配。

则 t 时段 MEMG 的碳排放配额 $E_P(t)$ 为:

$$E_P(t) = \xi(P_t^{\text{buy}} + \varphi P_{GT}(t) + H_{WHB}(t) + P_{GB}(t)) \quad (3-14)$$

式中: ξ 为区域单位电量碳配额, 此处取 $590\text{t}/(\text{kW} \cdot \text{h})$; φ 为电量折算系数;

则 t 时段系统实际碳排放量 E_{ACE} 如下式所示:

$$E_{ACE} = E_{CCHP} + E_{GB} + E_{Grid, Buy} \quad (3-15)$$

$$E_{CCHP}(t) = \xi_{CCHP}(\varphi P_{GT}(t) + H_{WHB}(t)) \quad (3-16)$$

$$E_{Grid, Buy}(t) = \eta_{Grid, Buy} P_t^{\text{buy}} \quad (3-17)$$

$$E_{GB}(t) = \xi_{GB} H_{GB}(t) \quad (3-18)$$

式中: $E_{Grid, Buy}$ 为电网购电产生的实际碳排放量; $E_{CCHP}(t)$ 为 CCHP 系统的实际碳排放量; $E_{GB}(t)$ 为 GB 的实际碳排放量; $\eta_{Grid, Buy}$ 为电网的碳排放系数; ξ_{CCHP} 、 ξ_{GB} 分别为 CCHP 和 GB 在其生产运输阶段的碳排放系数, 此处取 $591\text{t}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。则实际碳交易量 E_{ACT} 为:

$$E_{ACT}(t) = E_{ACE}(t) - E_P(t) \quad (3-19)$$

本文采用了一种奖惩阶梯碳交易成本^[71]模型。在出售多余的碳排放额度时引入激励因素, 以确保所有未使用的碳排放额度都被出售。当碳交易量为正时, 企业购买碳排放额度需要支付更多的成本, 碳交易价格越高。当碳交易量为负时, 企业可以出售多余的碳配额以获得激励。因此, t 时刻的 CTS 成本为:

$$F_{CTS}(t) = \begin{cases} -c(2+3a)b + c(1+3a)(E_{ACT}(t) + 2b), & E_{ACT}(t) \leq -2b \\ -c(1+a)b + c(1+2a)(E_{ACT}(t) + b), & -2b \leq E_{ACT}(t) \leq -b \\ c(1+a)E_{ACT}(t), & -b \leq E_{ACT}(t) \leq 0 \\ cE_{ACT}(t), & 0 \leq E_{ACT}(t) \leq b \\ cb + c(1+\theta)(E_{ACT}(t) - b), & b \leq E_{ACT}(t) \leq 2b \\ c(2+\theta)b + c(1+2\theta)(E_{ACT}(t) - 2b), & 2b \leq E_{ACT}(t) \end{cases} \quad (3-20)$$

式中：\$c\$ 为当日碳交易价格；\$b\$ 为区间长度（\$b=2t\$）；\$\theta\$ 为价格波动值，且\$\theta=0.25\$；\$a\$ 为奖励系数，\$F_{CTS}(t) > 0\$ 时，说明此时碳排放量过多，需要从碳交易市场购买碳排放额度，\$F_{CTS}(t) < 0\$ 时，说明此时碳排放量额度仍有剩余，可以向碳交易市场出售，以获取相应利润。

3.3 MEMG 的目标函数以及运行约束

本节以第二章中建立的多能源微电网结构作为研究对象，提出了包括经济成本和 CTS 成本在内的多目标优化函数，并给出了其运行约束，以保证微电网多目标优化函数的有效性、可行性。

3.3.1 目标函数

多能源耦合微电网的经济成本包括运维成本、燃料成本、MEMG 与 DN 的能量交换成本。具体的表达式分别如下：

$$C_{om} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m K_i^{OM} \cdot P_i(t) \quad (3-21)$$

$$C_{Buy} = \sum_{t=1}^{24} (P_{Buy}(t)\chi_{Buy}(t) - P_{Sell}(t)\chi_{Sell}(t)) \quad (3-22)$$

$$C_{NG} = \sum_{t=1}^{24} C_{ng} C_{ng, buy} (P_{GB}(t) + P_{GT}(t) + P_{P2G}(t) + P_{GSS}(t)) \quad (3-23)$$

式中：\$C_{om}\$ 是微电网的总运维成本，其中 \$P_i(t)\$ 表示各个设备在 \$t\$ 时刻的输出功率，\$K_i^{OM}\$ 表示第 \$i\$ 台设备的运维成本系数，\$t\$ 表示设备运行的时长，\$i\$ 表示第 \$i\$ 台设备，\$m\$ 表示设备总量。\$C_{om}\$ 是购电成本，\$P_{Buy}(t)\$、\$P_{Sell}(t)\$ 是 MEMG 向 DN 的购电、售电功率；\$\chi_{Buy}(t)\$、\$\chi_{Sell}(t)\$ 分别为 MEMG 向 DN 购买、出售电力的价格。\$C_{NG}\$ 是

总燃料成本； $C_{ng, buy}$ 为天然气出售价格； C_{ng} 是天然气低热值；假定低热值和天然气价格分别为 9.72KJ/m^3 和 4.95 元/ m^3 ^[72]。

从 3.2.1 节中可以得到碳交易成本 $F_{CTS}(t)$ 的值，则 MEMG 的多目标优化函数 C_{tot} 为：

$$C_{tot} = C_{om} + C_{Buy} + C_{NG} + F_{CTS} \quad (3-24)$$

3.3.2 运行约束条件

MEMG 各设备自身的物理约束已在第二章中给出，本节将对第二章中未提及的 MEMG 运行约束进行补充。

(1) 功率平衡约束

电功率平衡：

$$P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{buy}(t) + P_{BESS}(t) + P_{GT}(t) = P_{EL}(t) + P_{sell}(t) + P_{AC}(t) \quad (3-25)$$

热功率平衡：

$$H_{WHB}(t) + H_{GB}(t) + P_{TESS}(t) = P_{TL}(t) + P_{AR}(t) \quad (3-26)$$

天然气功率平衡：

$$G_{g, buy}(t) = G_{GB}(t) + P_{GSS}(t) + G_{GL}(t) + G_{GT}(t) + G_{P2G} \quad (3-27)$$

冷功率平衡：

$$Q_{AC}(t) + Q_{AR}(t) = P_{CL}(t) \quad (3-28)$$

式中： $G_{g, buy}(t)$ 为 t 时刻天然气购买量。 $P_{WT}(t)$ 、 $P_{PV}(t)$ 分别表示 WT 和 PV 的输出电功率； $P_{EL}(t)$ 为响应后的实际电负荷； $P_{TL}(t)$ 为响应后的实际电负荷； $P_{GL}(t)$ 为响应后的实际电负荷； $P_{CL}(t)$ 为响应后的实际电负荷。

(2) 柔性负荷约束

本文考虑了包括可转移负荷和可中断负荷在内的柔性负荷，它的约束条件如下：

$$L_i(t) = L_{trans, i}(t) + L_{fix, i}(t) - L_{cut, i}(t) \quad (3-29)$$

式中： i 属于能源需求的类型，且 $i \in \{E, T, G, C\}$ ； $L_i(t)$ 为总能源需求量， $L_{trans, i}(t)$ 为第 i 类可转移能源需求量； $L_{fix, i}(t)$ 为第 i 类固定能源需求量； $L_{cut, i}(t)$ 为第 i 类可中断能源需求量。

(3) 综合需求响应约束

可转移负荷的约束是指当某一设备的能量需求无法满足时,可以通过调整其他设备的功率输出来满足该设备的需求,但是这种调整必须满足系统的稳定性和安全性。因此,可转移负荷需要满足以下约束条件:

$$\begin{cases} 0 \leq L_{trans,i}(t) \leq L_{trans,i}^{\max} \\ \sum_{i=1}^{24} L_{trans,i}(t) \Delta t = E_{trans,i} \end{cases} \quad (3-30)$$

式中: $L_{trans,i}^{\max}$ 为第 i 类可转移能源需求量的上限。

可中断负荷的约束是指当系统电力或热力供应不足时,可以通过中断某些设备的能源输出来保证系统的稳定性和安全性,但是需要考虑可中断负荷的约束。约束如下:

$$\frac{|L_{cut,j}(t)|}{L_{IN,j}(t)} \leq \beta_{cut,j}, \frac{\left| \sum_{j=1}^{24} L_{cut,j}(t) \right|}{\sum_{j=1}^{24} L_{IN,j}(t)} \leq \tau_{cut,j} \quad (3-31)$$

式中: $L_{IN,j}(t)$ 为第 i 类初始负荷; $\beta_{cut,j}^{\max}$ 为第 i 类可中断能源需求量的上限, $\tau_{cut,j}$ 为第 i 类负荷的总的可中断能源需求量的上限。

热负荷参与需求响应是通过调节热水温度来实现的。为了保证用户的舒适性,它的数学模型为:

$$\begin{cases} |T_t(t) - T_{t,0}| \leq \Delta T \\ \sum_{i=1}^T L_{T,0}(t) \Delta t = \sum_{i=1}^T L_T(t) \Delta t \end{cases} \quad (3-32)$$

式中: ΔT 为热水温度的最大允许偏差,取 5°C ; $T_t(t)$ 、 $T_{t,0}$ 为初始热水温度和 t 时刻热水温度; $L_{T,0}(t)$ 、 $L_T(t)$ 为需求响应前、后的供热量。

同样,冷负荷参与需求响应是通过调节制冷温度来实现的,它的数学模型为:

$$\begin{cases} |T_c(t) - T_{c,0}| \leq \Delta T \\ \sum_{i=1}^T L_{C,0}(t) \Delta t = \sum_{i=1}^T L_C(t) \Delta t \end{cases} \quad (3-33)$$

式中: ΔT 为制冷温度的最大允许偏差,取 5°C ; $T_c(t)$ 、 $T_{c,0}$ 为初始室内温度和 t 时刻室内温度; $L_{C,0}(t)$ 、 $L_C(t)$ 为需求响应前、后的制冷量。

3.4 仿真实验

CPLEX 在解决大规模混合整数规划问题、处理数百万个约束和变量以及提供可靠稳定的优化结果方面具有巨大优势。

本文研究中描述的 MEMG 优化调度问题就是典型的混合整数规划问题，适用于 CPLEX 解决方案。

为了证明本节提出的基于 IDR 和奖惩阶梯型 CTS 的综合调度策略的有效性，本节设计了 6 个实验进行比较。

3.4.1 基础数据

为了验证综合需求响应策略的有效性，对图 2-1 中 MEMG 综合调度策略进行模拟分析，相关参数来源于文献[73]。表 3-1 列出了 MEMG 设备的相关参数，MEMG 的分时电价、分时气价、与 DN 之间的交易电价如表 3-2 所示，购热价格为 40 元/GJ，图 3-1 显示了该地区日前预测的光伏、风机发电的输出功率数据，图 3-2 显示了该地区电、热、气、冷四类负荷的预测负荷曲线。

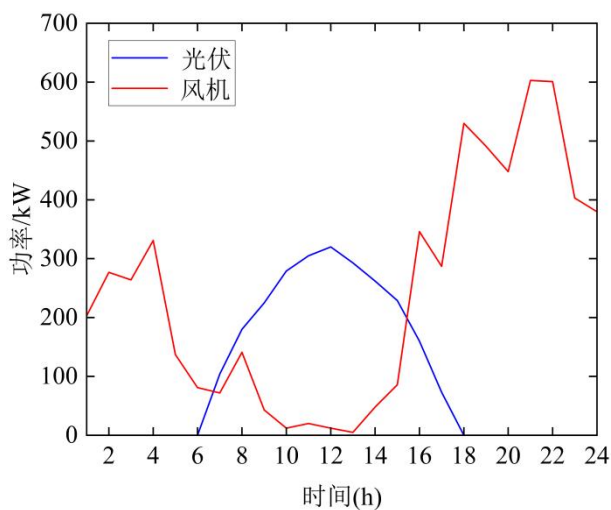


图 3-1 MEMG 设备的相关参数

表 3-1 MEMG 设备的相关参数^[74]

参数	取值	参数	取值
$x/y/z$	2.97/66.2/120	λ_{GT}/η_{WHB}	0.3/0.8
$P_{\min,GT}/P_{\max,GT}$	0/600kW	$P_{\downarrow,GT}/P_{\uparrow,GT}$	-50/50kW
η_{GB}	0.9	$H_{\max GB}$	750kW

$\eta_{bessch} / \eta_{bessdisch}$	0.95/0.95	$\eta_{tessch} / \eta_{tessdisch}$	0.9/0.9
$P_{BESS}^{\min} / P_{BESS}^{\max}$	0/200	$P_{TESS}^{\min} / P_{TESS}^{\max}$	0/200
$P_{AR,max}$	500kW	$P_{max}^{buy} / P_{max}^{sell}$	1200kW/1200kW
η_{EB}	0.93	$P_{EB,max}$	400kW
$P_{GSS}^{\min} / P_{GSS}^{\max}$	0/300		
$P_{max} AC$	350kW	$P_{P2G,max}$	400kW
$\eta_{gssch} / \eta_{gssdisch}$	0.95,0.95	η_{P2G}	0.9

表 3-2 MEMG 的分时电价、分时气价、与 DN 之间的交易电价、购热价格^[72]

价格	时段	元/kWh
分时电价	谷	1:00-7:00; 23:00-次日 7:00
	平	7:00-10:00; 13:00-18:00; 21:00-23:00
上网电价	峰	10:00-13:00; 18:00-21:00
	全天	0.17
分时气价	谷	1:00-6:00,23:00-1:00
	平	6:00-11:00, 14:00-18:00
	峰	11:00-14:00,18:00-20:00
上网气价	全天	4

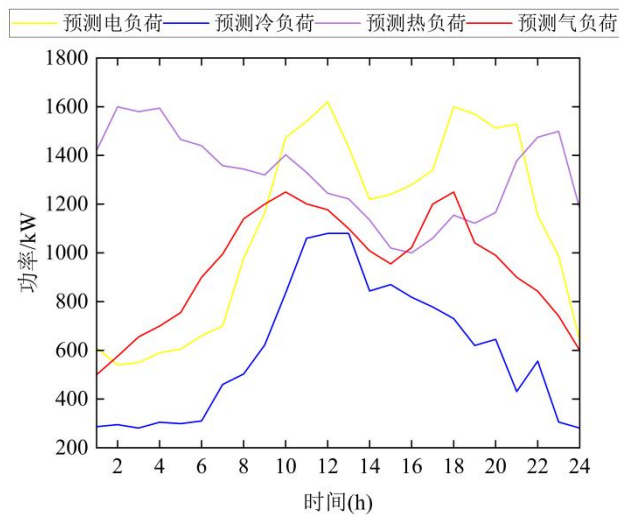


图 3-2 四种负荷预测曲线图

3.4.2 碳交易机制对系统优化调度影响分析

为了验证本章所提出的奖惩阶梯型 CTS 策略的优越性，本小节设置了三个对比实验。

实验 1：在 MEMG 多目标优化过程中未考虑碳交易成本。

实验 2：在 MEMG 的优化目标函数中加入了传统碳交易成本，并使用传统碳交易策略进行优化。

实验 3：在 MEMG 多目标优化过程中引入了奖惩阶梯型 CTS 下，并且考虑了碳交易成本。

结果如下表所示，从表 3-3 中可以看出实验 1-3 中 MEMG 的各项成本。

表 3-3 实验 1-3 中 MEMG 的各项成本

参数	实验 1	实验 2	实验 3
经济成本/元	33529	27320.4	27556.8
碳交易成本/元	0	3113.5	3536.8
总碳排放量/kg	43696	40627	38179
总成本/元	33529	30433.9	31093.6

根据表 3-3 中各项数据可以得出：采用实验 2 和实验 3 中的优化调度策略相比于实验 1 的碳排放总量下降了 8%和 12.7%，并且它们的综合成本 C_{tot} 相比于不考虑碳排放成本的实验 1 下降了 9.2%和 7.3%。

从数据分析的结果来看，实验 1 未考虑碳交易成本，MEMG 的目标函数中只包含经济成本，以 MEMG 的盈利和稳定运行为主。并且，在 23:00-7:00 时间段内，DN 的电价较低，且 MEMG 的电力负荷需求处于低谷期，为了降低自身的运行和维护成本，MEMG 将从 DN 大量购买电能，而在 MEMG 与 DN 能量交互的过程中会产生碳排放。由于实验 1 中的碳排放量较大，处理温室气体的成本增加，从侧面增加了 MEMG 运行的综合成本。

然而，实验 2 和实验 3 分别考虑了传统碳交易成本和阶梯型碳交易成本，因此 MEMG 在运行过程中会优先使用可再生能源、碳排放量较低的发电机组来满足用户的能力需求。因此，MEMG 将优先使用 PV、WT 可再生能源和 CHP 等燃气机组发电。虽然增加 CHP、GB 等发电设备的输出功率，将会导致 MEMG 的经济成本增加，但是由于它们的碳排放量较低，综合成本总体仍然呈下降趋势。

通过实验 2 和实验 3 的对比数据，可以得出：实验 3 中的碳排放量相对于实

验 2 降低了 6%，从而证明了本文提出的基于奖惩阶梯型 CTS 比传统的 CTS 更具有优越性和环保性。

综上所述，本文所提阶梯型 CTS 在 MEMG 在解决多目标优化问题中更具有经济性和环保性。

3.4.3 综合需求响应策略分析

为了验证本章所提出的价格型 IDR 的优越性，在实验 3 的基础上设置了三个对比实验，结果如表 3-4 所示。

实验 4：不考虑 DR，但考虑碳交易成本，其余条件与实验 3 相同。

实验 5：只考虑电负荷的 DR，其余条件与实验 4 相同。

实验 6：考虑电-热-气-冷负荷的 IDR 策略，其余条件与实验 4 相同。

表 3-4 不同 DR 策略下的 MEMG 优化结果

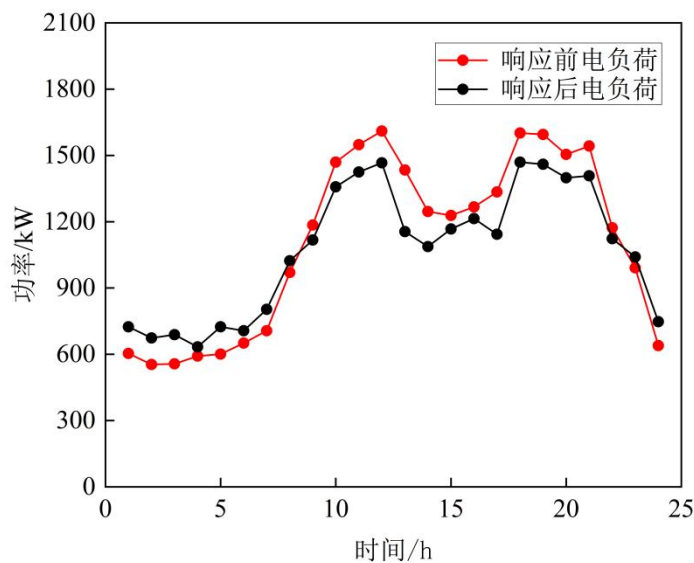
参数	实验 4	实验 5	实验 6
运行成本/元	27556.8	26223.6	24896.3
碳交易成本/元	3536.8	3044.5	2476.5
碳排放量/kg	38179	37070.1	35487.6
综合成本/元	31093.6	29268.1	27372.8

当用户未参与 DR 时，实验 4 中 MEMG 的综合成本最高，31093.6 元，碳排放总量也是最高，为 38179kg。相比之下，场景 5 和场景 6 的 MEMG 运行综合成本分别下降了 6%和 12%，且碳排放量分别下降了 3%和 7%。根据以上数据分析，当考虑 DR 策略时，可以在能源需求高峰时段通过转移或中断某些设备的功率输出来满足总体能源需求，并保证 MEMG 的稳定性和安全性。并且需求侧可以根据第二章中价格弹性矩阵中得出的价格信息调整用能策略，在满足自身用能需求和舒适度的前提下，降低 MEMG 运行的综合成本和碳排放量。

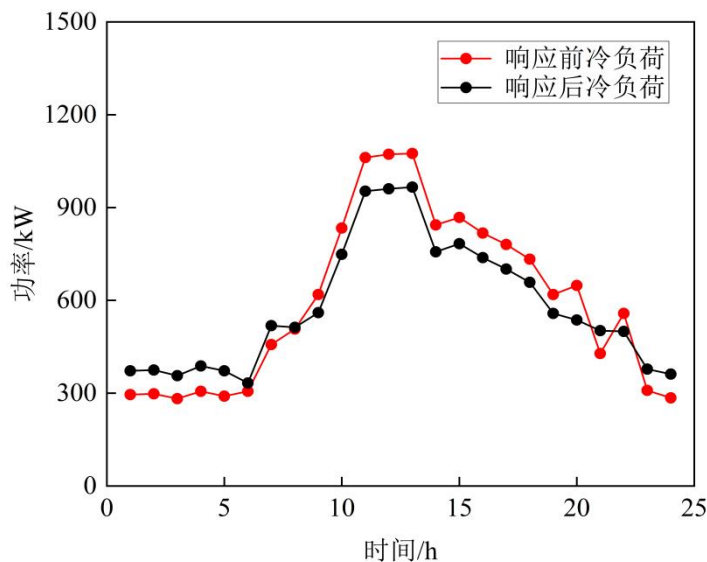
此外，考虑 IDR 的实验 6 相比于只考虑电负荷的实验 5 中的 MEMG 运行综合成本和碳排放量分别下降了 6.5%和 4.3%。并且，当一种能源需求短缺时，可以通过其他能源进行转化，这也是考虑 IDR 优化策略的 MEMG 相比只考虑传统电力 DR 策略最大的优越之处。

由此可见，在考虑奖惩阶梯型 CTS 的基础上实施 IDR 策略时，MEMG 的经济性、稳定性、环保性得到了进一步提升。

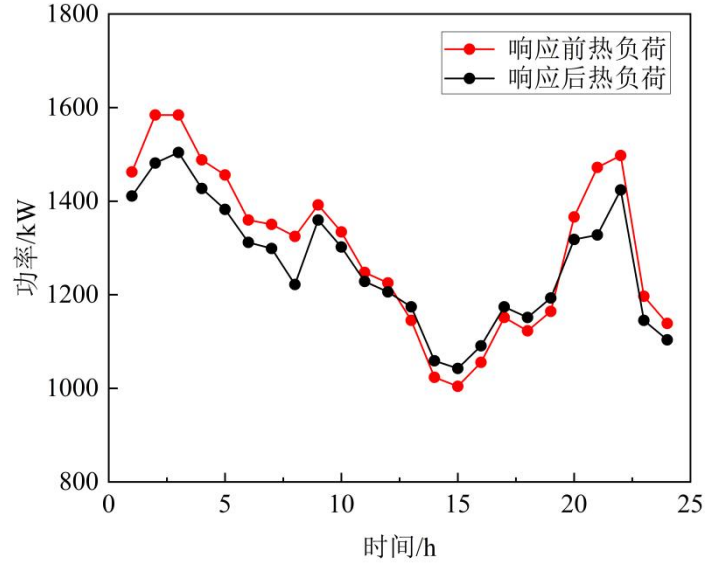
实验 6 中实施 IDR 策略前后电、热、气、冷负荷曲线的比较如图 3-4 所示。结果表明，电/热-气负荷在电价高峰期不同程度下降，在电价低谷期有一定程度上升。通过计算，用户电、热、冷、气负荷响应前后的峰谷差分别下降了 7.18%、4.09%、15.4%和 12.9%。从图中可以看出，随着 IDR 的引入，为了降低能源成本，各种负荷将部分负荷从电价峰值转移到电价低谷，并且各种负荷曲线比耦合需求响应之前更加平缓。



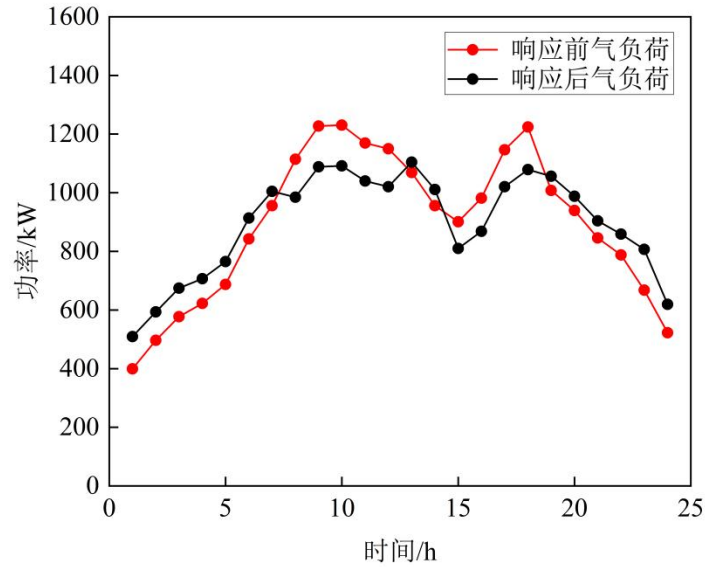
(a) 实施 IDR 前后的电负荷曲线



(b) 实施 IDR 前后的冷负荷曲线



(c) 实施 IDR 前后的热负荷曲线



(d) 实施 IDR 前后的气负荷曲线

图 3-4 实施 IDR 前后的电、热、冷、气负荷曲线

3.4.4 综合优化策略下的 MEMG 最优调度结果

基于奖惩阶梯型 CTS 和 IDR 的综合优化策略的电能最佳调度结果如图 3-5 所示。从图中可以看出，电力负荷需求在 1:00-7:00、23:00-次日 7:00 这两个时间段内处于低谷期，综合考虑了 MEMG 运行的经济成本和环境成本之后，MEMG 优先使用 WT、GT 发电，再加上与 DN 的电能交互来满足电力需求。由于这两个时段内的 MEMG 的电价较低，为了节约自身的运维成本、综合成本，MEMG 在满足 MEMG 和 DN 各种运行约束的前提下，将会从 DN 大量购买电力，

剩余的电能将会用于为P2G供气或者为EB供热,结余的电能将会被储存在BESS中,以便在电力需求高峰时段为MEMG提供电能。

由于10:00-13:00、18:00-21:00时段是电力负荷需求的峰值时段,同时也是购电价格最高的时段,为了减少MEMG与DN的电力交互成本、充分利用可再生能源、满足需求侧的电力需求、保证MEMG运行的经济性和环保性,MEMG将会优先使用PV、WT等可再生能源和GT供电,供应不足的部分将会通过BESS放电以及与DN进行电力交互得以满足。

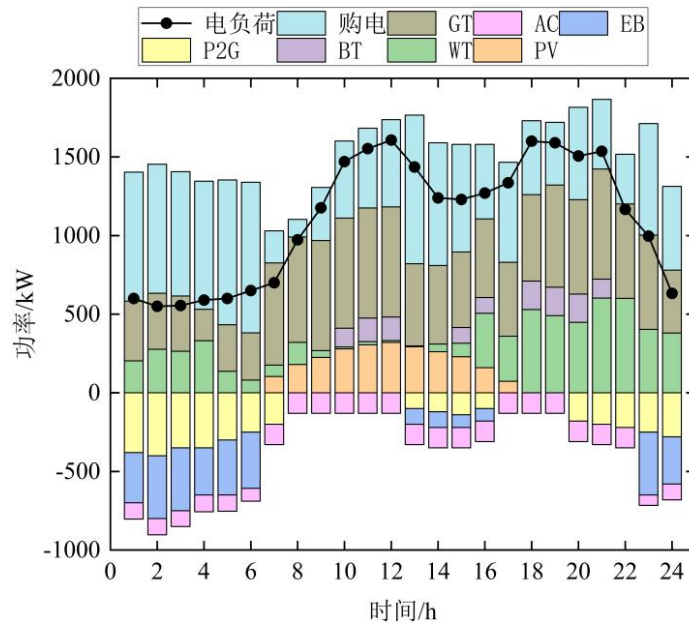


图 3-5 最优电力调度结果

图 3-6 为热能的调度结果图。从图中可以看出,热负荷需求在20:00-次日5:00内处于高峰期,综合考虑了MEMG运行的经济成本和环境成本之后,MEMG优先使用GB、WHB和EB提供热负荷,热负荷需求供应不足的部分由TESS放热提供。在10:00-18:00内热负荷需求量较低,GB、WHB和EB提供热负荷时的输出功率将会大幅降低,多余的热能将会通过AR热能转冷能供应给冷负荷或者通过TESS储存起来,以便在电力需求高峰时段为MEMG提供热能。

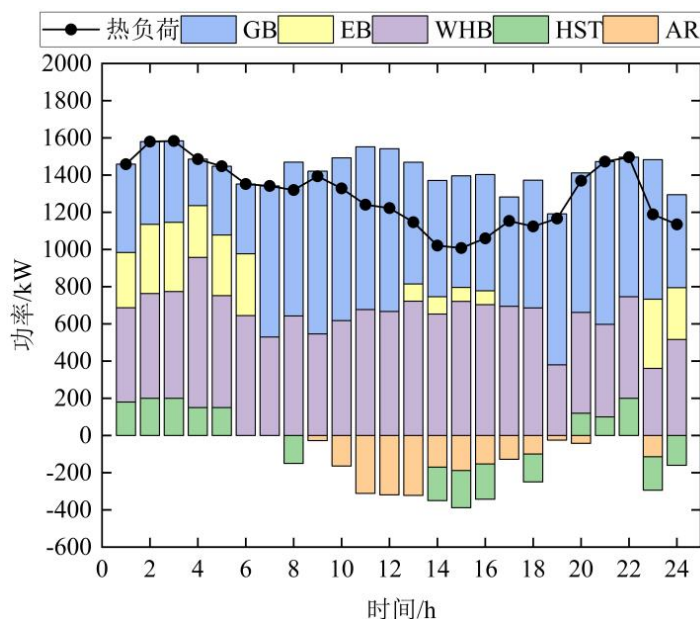


图 3-6 热能的调度结果图

图 3-7 为冷能的最佳调度结果。从图中可以看出，冷负荷需求与热负荷需求呈现出一种互补的关系。在 20:00-次日 5:00 内处于低谷期，冷负荷需求主要由 AC 来满足。在 10:00-18:00 内冷负荷需求量较高，主要通过 AC 的电力转换和 AR 的热能转换得以满足。

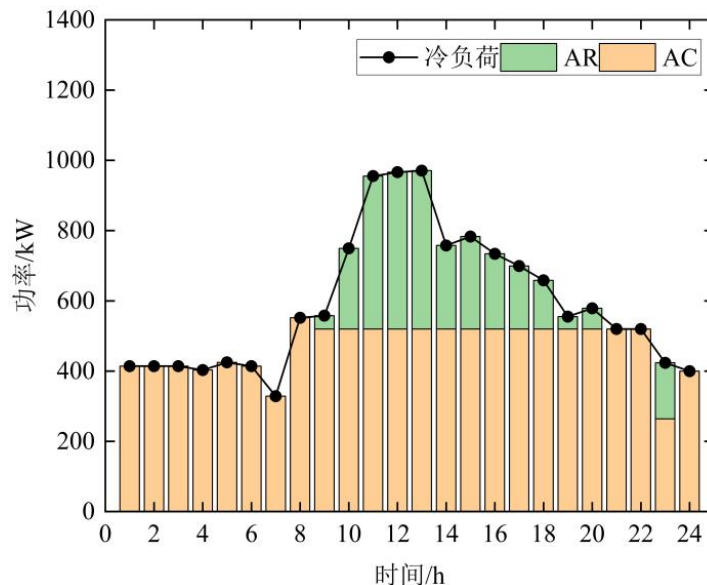


图 3-7 冷能最优调度结果

天然气最优调度结果如图 3-8 所示，气能主要通过 MEMG 与天然气网络的气能交互和 P2G 转气供应，多余的天然气将会储存在 GSS 中。在 1:00-7:00 和 20:00-24:00 时段，由于 P2G 成本较低，因此会通过 P2G 将电能转换会气能供应给气负荷，并将剩余的天然气储存在 GSS 中，从而减少 MEMG 的购气成

本。在 8:00-12:00 和 17:00-19:00 时段，气负荷需求处于峰值时段，MEMG 将通过 GSS 放气、从天气然网络购气以满足气能需求。

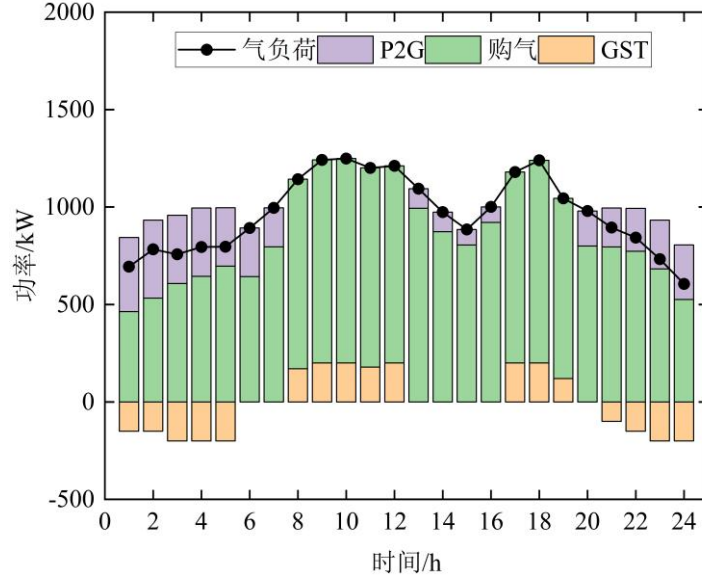


图 3-8 气负荷调度结果图

3.5 本章小结

为了实现 MEMG 的经济稳定运行、解决温室气体排放问题，本章以 MEMG 的综合成本为目标，提出了基于 IDR 和奖惩阶梯型 CTS 的综合优化策略。IDR 模型根据价格弹性矩阵预测了用户对电、热、气、冷四种负荷的需求量，并基于电-热-气-冷四种负载、可转移负载、可中断负载的可调节性对 MEMG 进行了优化，最后通过实验分析，证明了 IDR 策略的优越性。奖惩阶梯型 CTS 在出售多余的碳排放额度时引入激励因素，以确保所有未使用的碳排放额度都被出售，并通过设计实验进行分析，证明了奖惩阶梯型 CTS 的优越性。结论如下：

（1）本文将碳交易成本纳入 MEMG 的目标函数中，比不考虑碳交易成本的实验碳排放总量下降了 12.7%，综合成本 C_{tot} 下降了 7.3%，证明了考虑碳交易成本更具有优越性和环保性。

（2）采用多能源耦合的 IDR 策略，充分的发挥多种能源互补特性，再加上可中断负载和可转移负载的可调节性，保证了 MEMG 的安全性和稳定性。当一种负荷需求得不到满足时，可以通过调节可中断负载、可转移负载或者通过其他能源进行转换的形式得以满足。

（3）为了实现 MEMG 的经济环保运行、解决温室气体排放问题，本章使用了一种奖惩阶梯型 CTS，实现碳排放的分配和转移，从而降低碳排放成本，从

而证明了：本文提出的基于奖惩阶梯型 CTS 相比于基于传统 CTS 的实验更具有优越性和环保性。

第 4 章 基于双时间尺度的 MEMG 日前-日内调度研究

第三章以 MEMG 的综合成本为目标, 提出了基于价格型需求响应策略和奖惩阶梯型 CTS 的综合优化策略, 并基于电-热-气-冷四种负载、可转移负载、可中断负载的可调节性对 MEMG 进行了日前优化。然而, 可再生能源的随机功率波动和各类负载的变化要求 MEMG 中各能源设备的输出在日内得到优化, 以便系统能够及时响应光伏、风电以及用户的制冷、制热和电力需求等变量的波动。因此, 本文提出了基于模型预测控制 (Model predictive control, MPC)^[75]和 IDR 的动态最优调度策略, 主要包括三部分: 基于价格型 IDR 的日前调度计划、基于 MPC 和激励型 IDR 的日内短时间调度和日内长时间调度, 模型预测控制结构图如图 4-1 所示。日前调度计划以一小时为时间间隔, 以最低日综合成本为目标, 获得最优调度结果。预测控制的日内长时间尺度调度以风电、光伏和用户需求的滚动预测值为基准, 每 15 分钟启动一次, 根据日前优化调度策略的优化调度值修改未来 15 分钟能源设备的输出功率增量, 每次只执行第一时段的控制命令, 从而实现多个电源和负载之间的最佳能量匹配、抑制 MEMG 的网络波动。日内短时间尺度调度以 5 分钟为间隔, 优化过程与日内长时间尺度调度过程类似。

为了实现基于综合能源系统的间歇和分布式发电的有效耗散, 综合能源系统优化调度分为两个阶段, 即日前调度和日内滚动修正。如图 4-2 所示, 提出了一个多时间尺度的协调优化调度框架^[76]。

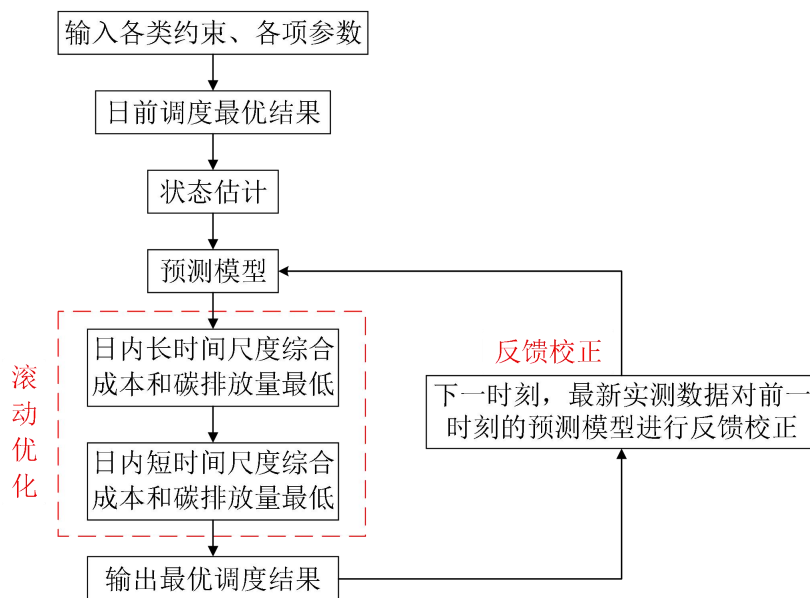


图 4-1 MPC 模型控制结构图

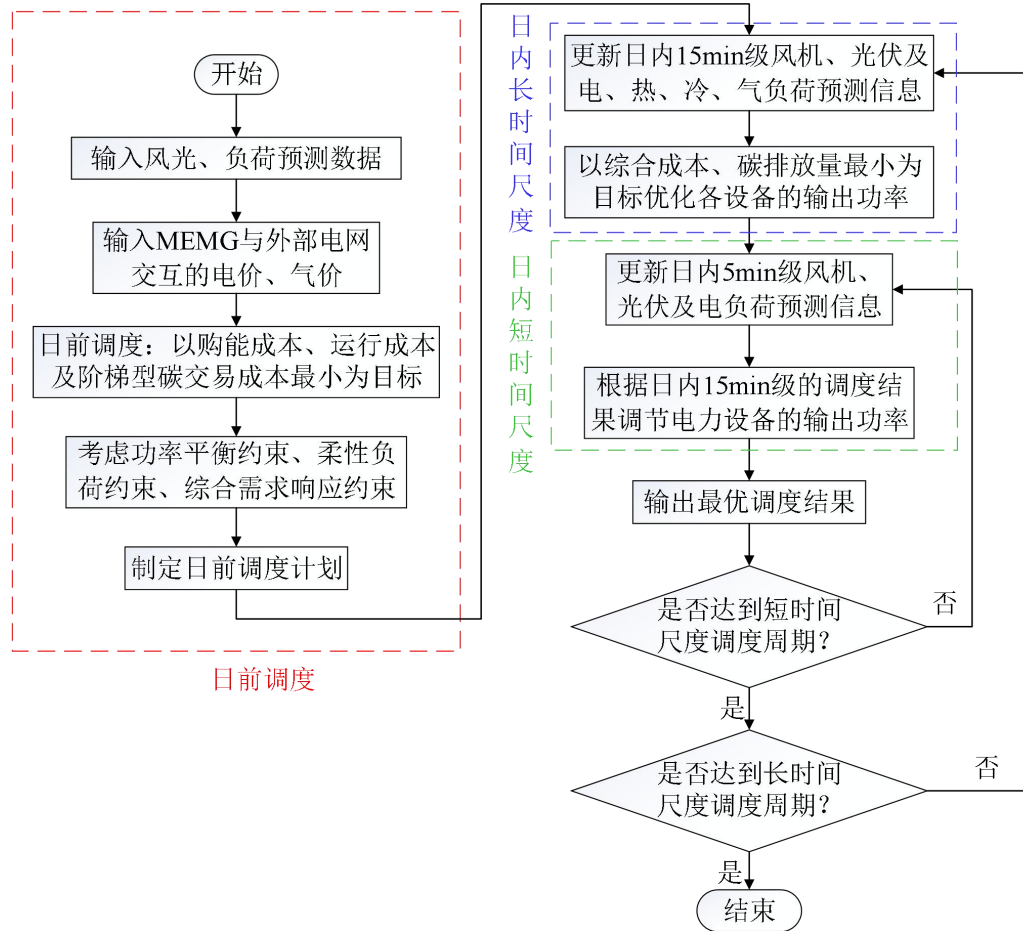


图 4-2 日内-日前双时间尺度调度框架图

4.1 长时间尺度下的 MEMG 日前调度研究

在日前调度期间，使用了基于价格型需求响应和奖惩阶梯型 CTS 的综合优化策略，调整了具有柔性特征的可转移负荷、可中断负荷和各类能源负荷，然后确定 MEMG 需要满足的电、热、气、冷负荷值。具体的优化过程在第三章已作出详尽描述，此处不再介绍。

4.2 双时间尺度下的 MEMG 日内调度研究

双时间尺度下的日内调度研究是指：在 MEMG 中，针对不同时间尺度的能源需求进行日内调度的研究。

双时间尺度下的日内调度研究可以分为日内长时间调度和日内短时间调度。日内双时间尺度调度需要考虑以下几个方面：

发电机组的出力调度：根据碳交易结果和各类负荷的变化情况，确定各个发电机组的出力调度方案，以最小化电力系统的综合成本和碳排放量。

DN 的调度：根据各类负荷的变化情况和输电网的负荷流量，确定输电网的

调度方案，以最小化电力系统的综合成本和碳排放量，满足各类能源需求。

需求侧的调度：根据可中断负荷的变化情况和负荷预测结果，确定负荷侧的调度方案，并建立了奖惩机制对参与 IDR 的用户进行补偿，以此激励用户参与 IDR 策略。

能源储备的调度：根据 MEMG 的可靠性要求和能源储备的情况，确定能源储备的调度方案，以保证 MEMG 的可靠性。

4.2.1 激励型 IDR 策略

激励型 IDR 是指通过激励机制来促使用户在 MEMG 中参与 IDR 策略，以实现系统的优化调度和节能减排等目标。MEMG 将会和用户签订合同，根据合同内容确定用户参与 IDR 后的补贴成本系数、各类最大可中断负荷量等参数。本章中的激励型 IDR 将会通过以下方式实现：

奖励机制：对于参与激励型 IDR 的用户，可以给予一定的奖励，即采用基于日前分时电价的补贴机制，以激励用户积极参与 IDR。

惩罚机制：对于未参与需求响应的用户，将会采取一定的惩罚措施，例如加收电费或限制用电量，以促使用户积极参与需求响应。

信息反馈机制：通过日前优化调度策略向用户提供实时的电热负荷信息和价格信息，以及预测未来的电热负荷和价格趋势，可以帮助用户更好地理解电热柔性负荷综合能源系统的运行情况，从而更加积极地参与需求响应。

通过以上激励机制，可以促使用户更加积极地参与需求响应，从而实现 MEMG 的优化目标。

为了提高用户满意度、激励用户参与 IDR 策略，建立了以下奖惩机制：

$$C_{E,cut}(t) = (A_E - B_E)Y_{E,Grid}(t)L_{E,cut}(t) \quad (4-1)$$

$$C_{T,cut}(t) = (A_T - B_T)Y_T L_{T,cut}(t) \quad (4-2)$$

$$C_{G,cut}(t) = (A_G - B_G)Y_{G,Grid}(t)L_{G,cut}(t) \quad (4-3)$$

式中： $C_{E,cut}(t)$ 为激励用户参与电负荷 DR 的激励成本； $C_{T,cut}(t)$ 为激励用户参与热负荷 DR 的激励成本； $C_{G,cut}(t)$ 为激励用户参与天然气负荷 DR 的激励成本。 A_E 为用户参与电负荷 DR 的补贴系数； B_E 为用户未参与电负荷 DR 的惩罚系数； $Y_{E,Grid}(t)$ 为分时电价； $L_{E,cut}(t)$ 为用户参与 IDR 时削减的电负荷量； A_T 为用户参

与热负荷 DR 的补贴系数； B_T 为用户未参与热负荷 DR 的惩罚系数； Y_T 为 MEMG 的热能价格； $L_{T,cut}(t)$ 为用户参与 IDR 时削减的热负荷量； A_G 为用户参与气负荷 DR 的补贴系数； B_G 为用户未参与天然气负荷 DR 的惩罚系数； $Y_{G,Grid}(t)$ 为分时气价； $L_{G,cut}(t)$ 为用户参与 IDR 时削减的天然气量。

4.2.2 MEMG 的日内长时间尺度调度

MEMG 的日内滚动优化过程是指在电力、热力、气力等多种能源互联互通的情况下，对系统进行日内调度的过程。具体来说，MEMG 的日内长时间滚动优化过程如下：

（1）能源预测：根据日前优化调度提供的信息，对电、热、气、能等负荷需求量和能源供应情况进行预测。

（2）能源调度：根据能源预测结果和能源市场的交易情况等数据，基于激励型 IDR 和 MPC 算法对能源进行调度。从 t_0 时段开始，根据以 15 分钟为周期更新的 MEMG 日内各机组输出功率数据和各类负荷数据，以最小化电力交互成本、燃料成本、调整各设备出力的调度成本和用户激励成本为目标，跟踪日前机组调度计划。根据可再生能源和负荷的实际波动，通过模型的保守性，可以抑制它们的不确定性所带来的波动，保证系统的稳定性、经济性。

（3）能源储备：根据系统的可靠性要求和能源储备的情况，确定能源储备的调度方案，以保证系统的可靠性。

（4）能源交互：根据能源市场的交易情况和能源供需的变化情况，对不同能源之间的交互进行调度，以提高系统的经济性和可靠性。

（5）能源响应：通过激励机制和信息反馈机制，促使用户参与能源需求响应，以实现系统的优化调度和节能减排。

根据公式（4-1）~（4-3）、（3-24）可以得出，MEMG 日内长时间尺度调度模型的目标函数为：

$$C_L^{IIDR} = C_{NG,L}^{IIDR} + C_{Grid,L}^{IIDR} + C_{sche,L}^{IIDR} + C_{IIDR,L} \quad (4-4)$$

式中： C_L^{IIDR} 为 MEMG 日内长时间尺度调度中的综合成本， $C_{NG,L}^{IIDR}$ 为日内长时间尺度调度中 MEMG 与 DN 的电力交互成本； $C_{Grid,L}^{IIDR}$ 为日内长时间尺度调度中 MEMG

燃料成本； $C_{sche,L}^{IIDR}$ 为日内长时间尺度调度中 MEMG 调整各设备出力的调度成本； $C_{IIDR,L}$ 为日内长时间尺度调度中用户激励成本。具体公式如 (4-5) ~ (4-8) 所示。

$$C_{NG,L}^{IIDR} = \sum_{t=1}^{24} (P_{Buy}^L(t) \chi_{Buy}(t) - P_{Sell}^L(t) \chi_{Sell}(t)) \quad (4-5)$$

$$C_{NG,L}^{IIDR} = \sum_{t=1}^{24} C_{ng} C_{ng,buy} (P_{GB,L}^{IIDR}(t) + P_{GT,L}^{IIDR}(t) + P_{P2G,L}^{IIDR}(t) + P_{GSS,L}^{IIDR}(t)) \quad (4-6)$$

式中： $P_{Buy}^L(t)$ 、 $P_{Sell}^L(t)$ 是日内长时间尺度调度中 MEMG 向 DN 的购电、售电功率； $\chi_{Buy}(t)$ 、 $\chi_{Sell}(t)$ 分别为 MEMG 向 DN 购买、出售电力的价格； $C_{ng,buy}$ 为天然气价格； C_{ng} 是天然气低热值； $P_{GB,L}^{IIDR}(t)$ 、 $P_{GT,L}^{IIDR}(t)$ 、 $P_{P2G,L}^{IIDR}(t)$ 、 $P_{GSS,L}^{IIDR}(t)$ 分别是日内长时间尺度调度中 GB、GT、P2G、GSS 的输出功率假定低热值和天然气价格分别为 9.78KJ/m³ 和 4.95 元/m³。

$$C_{sche}^{IIDR} = \sum_{t=t_0}^{T_1} \left[\sum_{i=1}^m R_{sche,S}^{IIDR}(t) (P_{i,S}^{IIDR}(t) + \Delta P_{i,S}^{IIDR}(t)) + \mu_{sche,S}^{IIDR}(t) (\Delta P_{i,S}^{IIDR}(t))^2 \right] \quad (4-7)$$

式中： T_1 表示日内长时间调度的周期， i 表示 MEMG 中各设备的种类数量， $R_{sche,S}^{IIDR}(t)$ 表示是 t 时刻的天然气单价； $\mu_{sche,S}^{IIDR}(t)$ 是日内长时间尺度调度中设备 i 的调度成本系数； $\Delta P_{i,S}^{IIDR}(t)$ 为日内长时间尺度调度中 t 时刻设备 i 的调整功率； $P_{i,S}^{IIDR}(t)$ 为日内长时间尺度调度中 t 时刻设备 i 的输出功率。

$$C_{IIDR} = \sum_{t=t_0}^{T_1} C_{e,cut}(t) + \sum_{t=t_0}^{T_1} C_{t,cut}(t) + \sum_{t=t_0}^{T_1} C_{g,cut}(t) \quad (4-8)$$

日内长时间尺度调度不仅要满足第三章中 MEMG 的各类约束，还需满足以下运行状态约束：

$$U_i^{DAD}(t) = U_i^{IRO}(t) \quad (4-9)$$

式中： $U_i^{DAD}(t)$ 为日前能源设备 i 的启停标志位； $U_i^{IRO}(t)$ 为日内长时间调度能源设备 i 的启停标志位；

4.2.3 MEMG 的日内短时间尺度调度

MEMG 的日内短时间尺度调度能源调度是根据能源预测结果和能源市场的交易情况等数据，基于激励型 IDR 和 MPC 算法对能源进行调度。从 t_0 时段开始，根据以 5 分钟为周期更新的 MEMG 日内各机组输出功率数据和各类负荷数据，

以最小化电力交互成本、燃料成本、调整各设备出力的调度成本和用户激励成本为目标，跟踪日前机组调度计划。MEMG 的日内短时间尺度调度过程与日内长时间尺度调度过程、目标函数、约束等条件类似，区别在于 MEMG 日内短时间尺度调度中日内各机组输出功率数据和各类负荷数据以 5 分钟为周期更新，此处不再过多描述。

根据公式（4-1）~（4-3）、（3-24）可以得出，MEMG 日内短时间尺度调度模型的目标函数为：

$$C_S^{IIDR} = C_{NG}^{IIDR} + C_{Grid}^{IIDR} + C_{sche}^{IIDR} + C_{IIDR} \quad (4-10)$$

式中：\$C_S^{IIDR}\$ 为 MEMG 日内短时间尺度调度中的综合成本，\$C_{NG,S}^{IIDR}\$ 为日内短时间尺度调度中 MEMG 与 DN 的电力交互成本；\$C_{Grid,S}^{IIDR}\$ 为日内短时间尺度调度中 MEMG 燃料成本；\$C_{sche,S}^{IIDR}\$ 为日内短时间尺度调度中 MEMG 调整各设备出力的调度成本；\$C_{IIDR,S}\$ 为日内短时间尺度调度中用户激励成本。具体公式如（4-11）~（4-14）所示。

$$C_{NG,S}^{IIDR} = \sum_{t=1}^{24} (P_{Buy}^S(t) \chi_{Buy}(t) - P_{Sell}^S(t) \chi_{Sell}(t)) \quad (4-11)$$

$$C_{NG,S}^{IIDR} = \sum_{t=1}^{24} C_{ng} C_{ng, buy} (P_{GB,S}^{IIDR}(t) + P_{GT,S}^{IIDR}(t) + P_{P2G,S}^{IIDR}(t) + P_{GSS,S}^{IIDR}(t)) \quad (4-12)$$

式中：\$P_{Buy}^S(t)\$、\$P_{Sell}^S(t)\$ 是日内短时间尺度调度中 MEMG 向 DN 的购电、售电功率；\$\chi_{Buy}(t)\$、\$\chi_{Sell}(t)\$ 分别为 MEMG 向 DN 购买、出售电力的价格；\$C_{ng, buy}\$ 为天然气价格；\$C_{ng}\$ 是天然气低热值；\$P_{GB,S}^{IIDR}(t)\$、\$P_{GT,S}^{IIDR}(t)\$、\$P_{P2G,S}^{IIDR}(t)\$、\$P_{GSS,S}^{IIDR}(t)\$ 分别是日内短时间尺度调度中 GB、GT、P2G、GSS 的输出功率。

$$C_{sche}^{IIDR} = \sum_{t=T_0}^{T_2} \left[\sum_{i=1}^m R_{sche,S}^{IIDR}(t) (P_{i,S}^{IIDR}(t) + \Delta P_{i,S}^{IIDR}(t)) + \mu_{sche,S}^{IIDR}(t) (\Delta P_{i,S}^{IIDR}(t))^2 \right] \quad (4-13)$$

式中：\$T_1\$ 表示日内短时间调度的周期，\$i\$ 表示 MEMG 中各设备的种类数量，\$R_{sche,S}^{IIDR}(t)\$ 表示是 \$t\$ 时刻的 MEMG 提供各种能源的价格系数；\$\mu_{sche,S}^{IIDR}(t)\$ 是日内短时间尺度调度中设备 \$i\$ 的调度成本系数；\$\Delta P_{i,S}^{IIDR}(t)\$ 为日内短时间尺度调度中 \$t\$ 时刻设备 \$i\$ 的调整功率；\$P_{i,S}^{IIDR}(t)\$ 为日内短时间尺度调度中 \$t\$ 时刻设备 \$i\$ 的输出功率。

$$C_{IIDR} = \sum_{t=t_0}^{T_2} C_{e,cut}(t) + \sum_{t=t_0}^{T_2} C_{t,cut}(t) + \sum_{t=t_0}^{T_2} C_{g,cut}(t) \quad (4-14)$$

4.3 仿真实验

为了证明日内双时间尺度调度策略的有效性,本节设计了三个实验进行对比实验。

4.3.1 基础数据

日内双时间尺度调度的数据根据日前预测数据及相应的概率分布生成,假设可再生能源出力与各类负荷需求的预测均满足正态分布,其误差范围如表 4-1 所示。

表 4-1 可再生能源和各类负荷预测的误差范围^[77]

误差范围	光伏	风电	电负荷	热负荷	冷负荷	气负荷
日内长时间尺度	20%	20%	10%	5%	5%	10%
日内短时间尺度	10%	10%	5%	3%	3%	5%

日内长时间尺度和短时间尺度调度模型中热、冷负荷的误差范围更低,原因是热、冷负荷的供应量与室内温度有关,将直接影响到用户的舒适体验感,因此要求较高。负荷奖励系数和惩罚系数 A_E 、 B_E 、 A_T 、 B_T 、 A_G 、 B_G 分别为 0.04、0.03、0.04、0.032、0.024、0.032; 日内双时间尺度调度中 t 时刻的 MEMG 提供各种能源的价格系数和设备 i 的调度成本系数可参见文献[77]。本章优化模型均采用 CPLEX 求解。

4.3.2 基于 MPC 和激励型 IDR 的日内双时间尺度调度策略分析

为了证明基于 MPC 和激励型 IDR 的日内双时间尺度调度策略的优越性,设计了以下 3 个实验进行对比说明:

实验 1: 只考虑采用基于 MPC 日内双时间尺度调度策略

实验 2: 采用基于 MPC 和激励型 DR 日内双时间尺度的滚动优化调度策略,只考虑电负荷参与激励型 DR 的情况。

实验 3: 基于 MPC 和激励型 IDR 策略的日内双时间尺度滚动优化调度策略,考虑电、热、气、冷参与激励型 IDR 的情况。

表 4-2 实验 1-3 的优化调度结果

参数	日前	实验 1	实验 2	实验 3
综合成本/元	33546.5	33245.3	32065.2	30546.5
用户激励成本/元	0	0	284.32	467.61
功率波动率/%	14.46	14.22	11.17	6.76

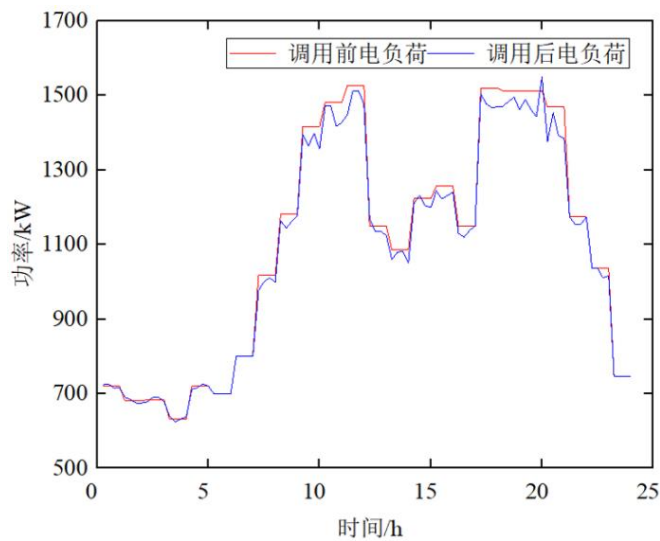
表 4-2 给出了种方案以及日前调度阶段的运行成本。由于实验 1 采用的是只考虑 MPC 算法的日内滚动优化调度，其日内双时间尺度优化调度模型中可再生能源和各类负荷的信息是由日前优化调度提供的。实验 2 的 MEMG 综合成本和联络线交互功率波动率相比实验 1 分别下降了 1180.1 元和 3.05%，证明了在日内双时间尺度优化调度中引入激励型 DR 策略不仅可以降低 MEMG 的综合成本，提高 MEMG 和外部 DN 联络线的稳定性，还可以激励用户参与 DR 计划，实现 MEMG 运营商和需求侧用户合作共赢。

实验 2 采用基于 MPC 和激励型 DR 日内双时间尺度的滚动优化调度策略，但只考虑电负荷参与激励型 DR 的情况，而实验 3（本文所考虑的实验模型）中综合考虑了电、热、冷、气四种能源耦合的 IDR 策略。然而，实验 3 中的 MEMG 综合成本和联络线交互功率波动率相比实验 2 分别下降了 1518.7 元和 4.41%，证明了考虑综合能源耦合的基于 MPC 和激励型 IDR 策略的日内双时间尺度优化调度策略比只考虑单一能源的基于 MPC 和激励型 DR 策略日内双时间尺度优化调度策略更具有优越性。

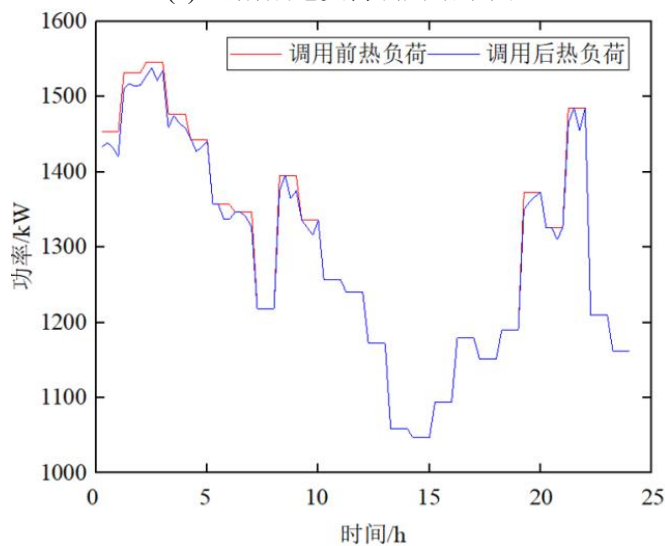
由于日内调度中 MEMG 调整各设备输出功率的调度成本较高，因此考虑各类可中断负荷和用户激励成本，激励用户参与激励型 IDR 计划。实施 IDR 计划不仅解决了 MEMG 供需预测误差带来的网络波动，还降低了 MEMG 的综合成本，提高了用户的满意度。

图 4-3 是实施激励型 IDR 前后各类可中断负荷的调度结果。从图中可以看出，可中断负荷的削减大部分出现在各类能源需求的高峰时段，实现了各类能源负荷的调峰填谷，保证了 MEMG 运行的经济性、稳定性。虽然各类能源需求的高峰时段用户可以获得参与需求响应的响应利润，但是用户舒适度将会受到影响。为了最大程度的保证用户的舒适度和满意度，MEMG 在各类能源需求平谷时段出现负荷中断的情况较少，而在低谷时段几乎不出现中断用户负荷的情况。

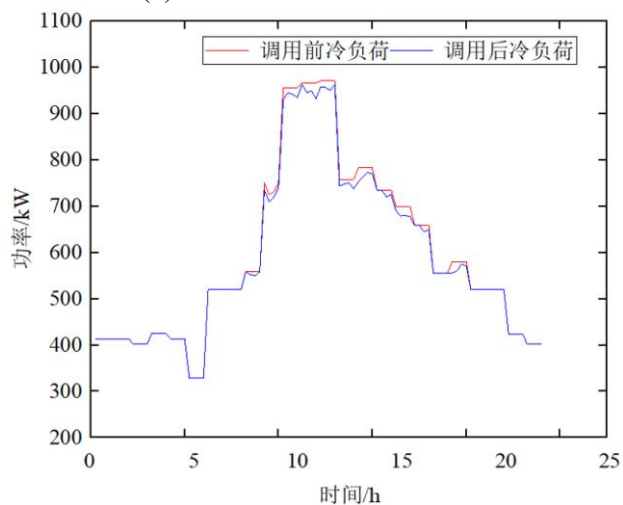
综上所述,实施 IDR 策略可以有效降低 MEMG 和外部配电网的功率波动率、实现各类负荷的调峰填谷,保证了 MEMG 运行的经济性、稳定性。



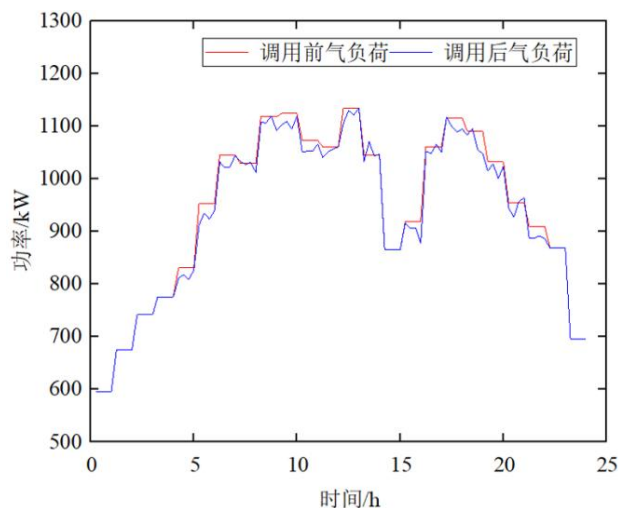
(a) 可削减电负荷调用结果图



(b) 可削减热负荷调用结果图



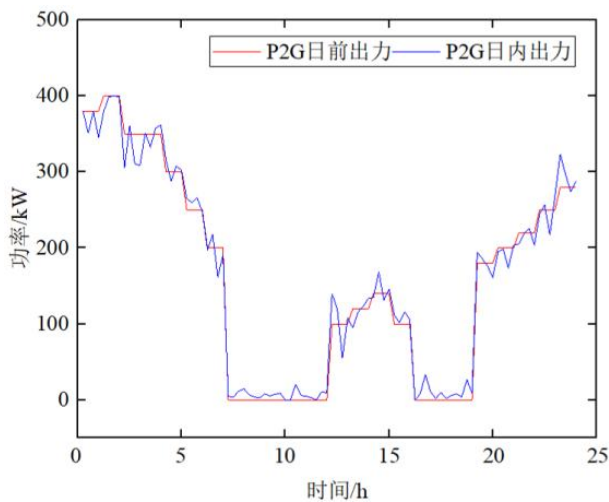
(c) 可削减冷负荷调用结果图



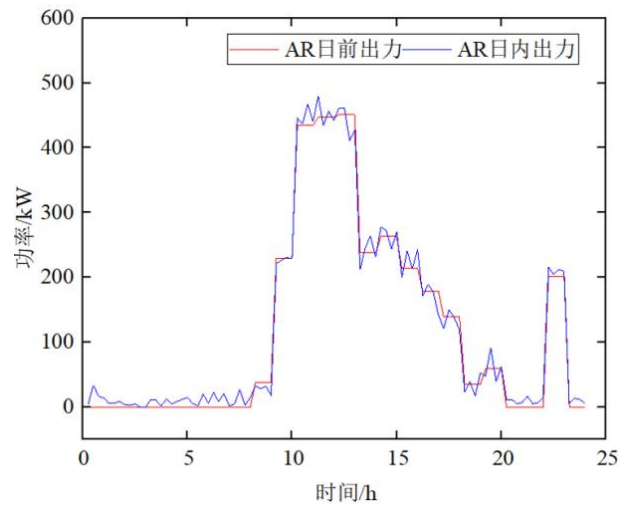
(d) 可削减气负荷调用结果图

图 4-3 实施激励型 IDR 前后各类可中断负荷的调度结果

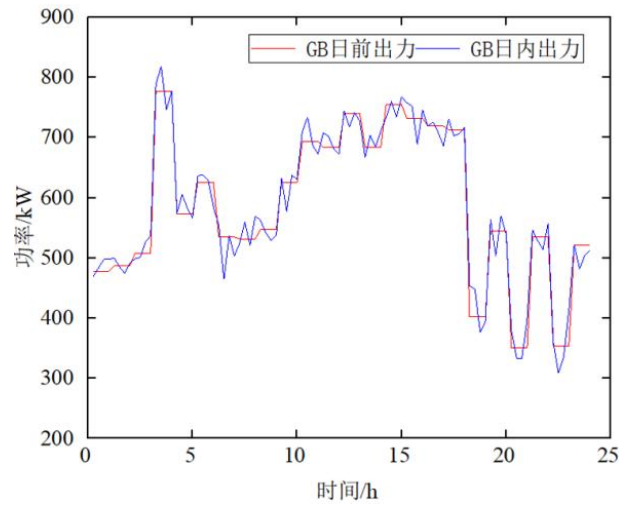
基于 MPC 和激励型 IDR 的日内双时间尺度调度策略分别以 15 分钟和 5 分钟为调度周期，根据日前调度数据对日内各类负荷需求量、各设备的输出功率进行跟踪。图 4-4 表示 MEMG 部分设备日前-日内调度的输出功率，从图中可以看出，由于日内调度的调度周期相比于日前调度大幅度缩减，它的输出结果较为精准，能够准确地显示出日内各类负荷需求量、各设备的输出功率，并对其进行修正，可以更好地缩减日前预测所产生的误差、输出 MEMG 最优调度结果。



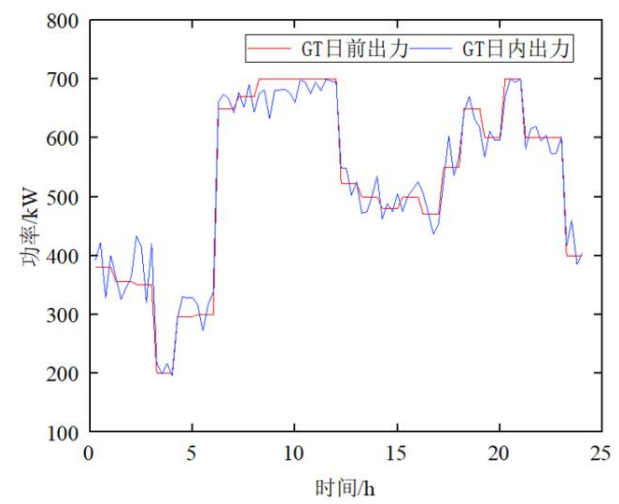
(a)P2G 日前-日内调度的输出功率



(b)AR 日前-日内调度的输出功率



(c)GB 日前-日内调度的输出功率



(d)GT 日前-日内调度的输出功率

图 4-4 MEMG 部分设备日前-日内调度的输出功率

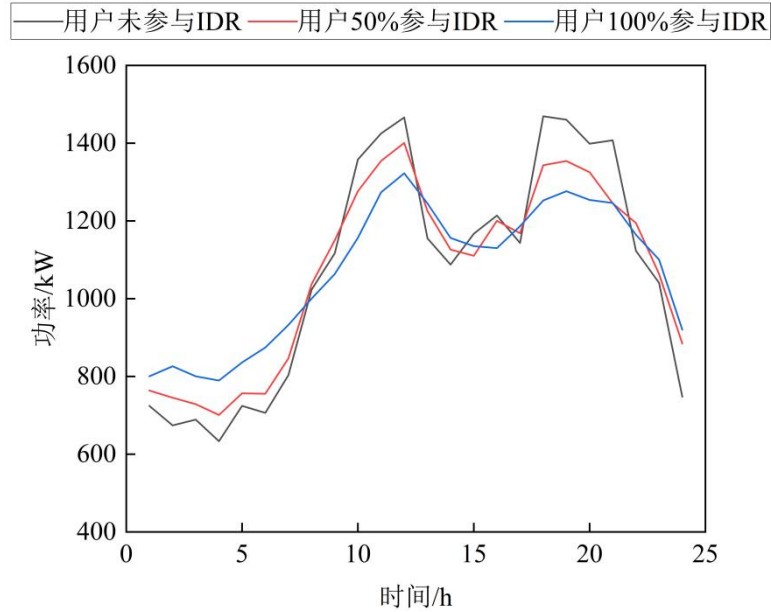
4.3.3 用户参与激励型需求响应计划的程度对 MEMG 优化的影响

为了分析用户参与激励型 IDR 的程度对 MEMG 优化结果的影响^[72], 本节设计了以下 3 个实验。

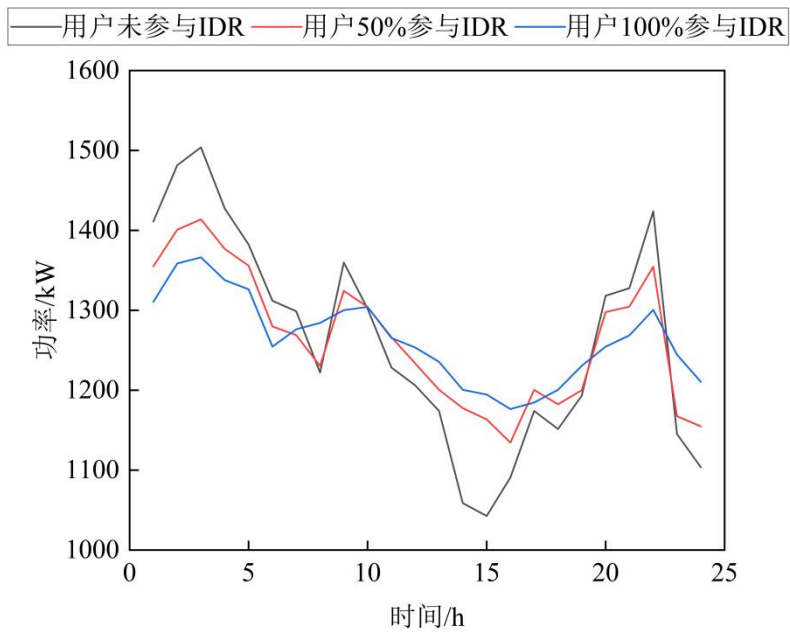
实验 4: 所有用户均未参与激励型 IDR 计划。

实验 5: 设置了 50% 用户参与激励型 IDR 计划, 其余参数和条件均与实验 4 相同。

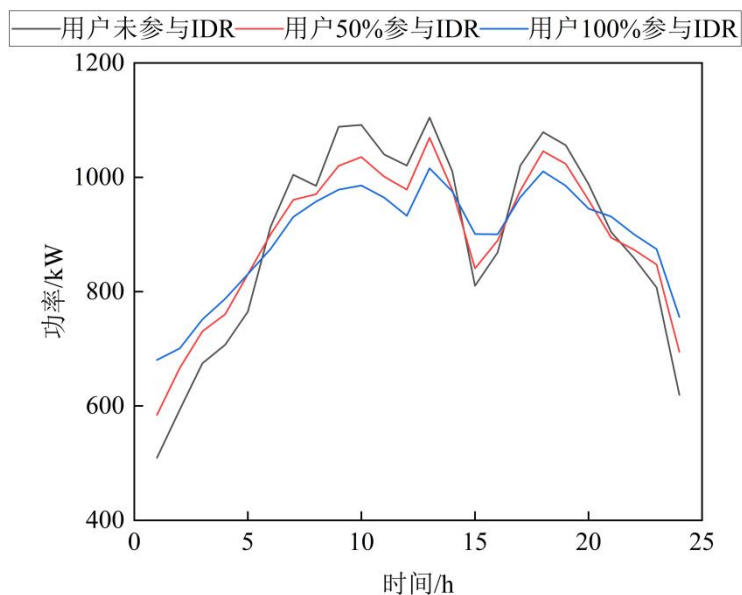
实验 6: 设置了全部用户参与激励型 IDR 计划, 其余参数和条件均与实验 4 相同。



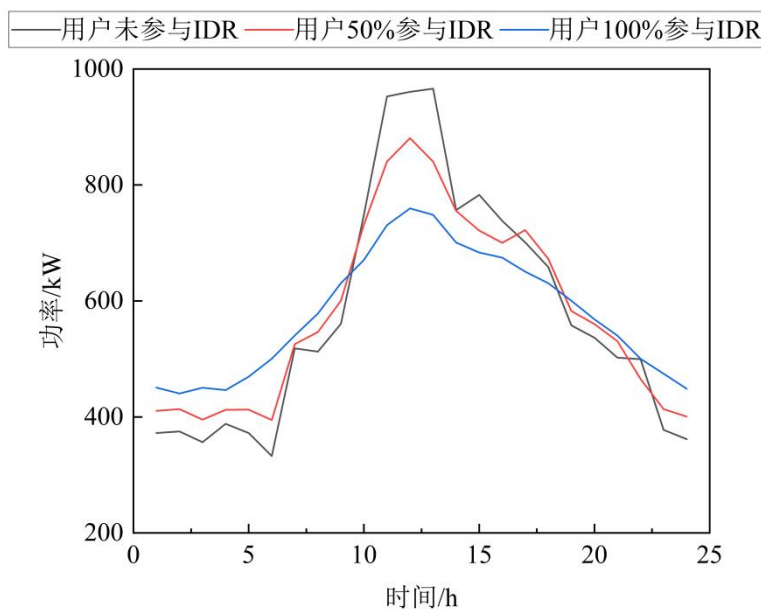
(a) 三种情况下, MEMG 的电负荷功率曲线



(b) 三种情况下, MEMG 的热负荷功率曲线



(c) 三种情况下, MEMG 的气负荷功率曲线



(d) 三种情况下, MEMG 的冷负荷功率曲线

图 4-5 三种情况下 MEMG 的电、热、气、冷四种负荷的功率曲线

图 4-5 说明了分别在三种情况下, MEMG 的电、热、气、冷四种负荷的功率曲线。23 时-次日 7 时处于电力需求的低谷时段, 且电价较低, 因此可激励用户将高峰时段 (7-14 时和 18-22 时) 的非必需用电转移到电力需求低谷期, 实现电力需求的削峰填谷。由于 7-14 时和 14-18 时处于热能需求的低谷时段, 因此可激励用户将高峰时段 (0-7 时) 的热能需求转移到热能需求低谷期, 实现热能需求的削峰填谷。23 时-次日 7 时处于天然气需求的低谷时段, 且气价较低, 因

此可激励用户将高峰时段（7-14 时和 18-22 时）的非必需用气转移到用气需求低谷期，实现天然气需求的削峰填谷。23 时-次日 7 时处于冷能需求的低谷时段，因此可激励用户将高峰时段（7-14 时和 18-22 时）的非必需冷能需求转移到冷能需求低谷期，实现冷能需求的削峰填谷。

综上所述，实施激励型 IDR 策略不仅可以减少 MEMG 各类能源需求的峰谷差，而且随着用户参与程度增加，实现各类负荷的需求曲线的削峰填谷，MEMG 的总成本也有所减少。

4.4 本章小结

第三章基于 IDR 和阶梯型 CTS 的综合调度策略对 MEMG 做出了日前预测。然而，日前优化调度中的调度周期较长、不确定性因素较多，因此它提供的可再生能源、各类负荷、设备出力的预测信息误差较大。为了缩小日前预测中的各类信息误差，本章根据可再生能源和各类负荷的日前预测信息，提出了基于 MPC 和激励型 IDR 的日内双时间尺度调度计划，目标是在日内调度中最大限度地降低 MEMG 的总成本、各设备的总调节量、MEMG 网络的功率波动率。

通过本文提出的双时间尺度调度下的日内调度实验分析，使得 MEMG 中可再生能源的随机功率波动和负载变化要求能源设备的输出在日内得到优化，并且可以及时响应光伏、风电以及用户的制冷、制热、电力需求、天然气需求的变化。实验 2 的 MEMG 综合成本和联络线交互功率波动率相比实验 1 分别下降了 1180.1 元和 3.05%，实验 3 中的 MEMG 综合成本和联络线交互功率波动率相比实验 2 分别下降了 1518.7 元和 4.41%，证明了考虑综合能源耦合的基于 MPC 和激励型 IDR 策略的日内双时间尺度优化调度策略的经济性、稳定性。实验 4-6 证明了实施激励型 IDR 策略可以减少 MEMG 各类能源需求的峰谷差，保证 MEMG 运行的经济性、稳定性，并且随着用户参与程度增加，可以实现各类负荷的需求曲线的削峰填谷，MEMG 的总成本也有所减少。

第 5 章 结论与展望

5.1 研究成果与结论

随着能源需求的不断增长,传统能源供应方式已经难以满足需求,然而,传统能源供应方式存在着能源供应不稳定、能源的排放和污染等问题。传统能源供应方式已经难以满足能源需求和环境保护的要求,MEMG 的研究和应用成为了解决能源问题的重要途径。本文以电-热-气-冷四种能源耦合的 MEMG 作为研究对象,建立了 MEMG 各设备的数学模型、目标函数和各类约束。此外,提出了一种基于价格型 IDR 策略和奖惩阶梯型 CTS 综合需求响应策略,用于 MEMG 的日前调度计划,在降低 MEMG 综合运行成本的同时,保证了 MEMG 运行的环保性、可靠性,并通过三个比较实验对综合需求响应策略的有效性、优越性进行分析。并且,根据日前调度计划预测出的各类信息,提出了一种基于 MPC 和激励型 IDR 的日内双时间尺度调度策略,目标是在日内调度中最大限度地降低 MEMG 的总成本、各设备的总调节量、MEMG 网络的功率波动率,并通过三个比较实验对日内双时间尺度调度策略进行分析。最后,还增设了实验 4、实验 5、实验 6,用于分析用户参与激励型 IDR 的比例对 MEMG 优化调度的影响。最终得出的结论如下:

(1) 本文将碳交易成本纳入 MEMG 的目标函数中,比不考虑碳交易成本的实验碳排放总量下降了 12.7%,综合成本 C_{tot} 下降了 7.3%,证明了考虑碳交易成本更具有优越性和环保性。第三章实验 3 中的碳交易成本相对于实验 2 降低了 6%,从而证明了本文提出的基于奖惩阶梯型 CTS 比传统的 CTS 更具有环保性。

(2) 采用多能源耦合的 IDR 策略,充分的发挥多种能源互补特性,再加上可中断负载和可转移负载的可调节性,保证了 MEMG 的安全性和稳定性。当一种负荷需求得不到满足时,可以通过调节可中断负载、可转移负载或者通过其他能源进行转换的形式得以满足。

(3) 第四章中实验 2 的 MEMG 综合成本和与 DN 交互功率波动率相比实验 1 分别下降了 1180.1 元和 3.05%,实验 3 中的 MEMG 综合成本和与 DN 交互功率波动率相比实验 2 分别下降了 1518.7 元和 4.41%,证明了考虑综合能源耦合的基于 MPC 和激励型 IDR 策略的日内双时间尺度优化调度策略的经济性、稳定性。

(4) 实施激励型 IDR 策略可以减少 MEMG 各类能源需求的峰谷差,并且

随着用户参与激励型 IDR 的比例增加, 各类负荷的需求曲线愈加趋于平缓。

5.2 展望

本文以降低 MEMG 的经济成本、减少 MEMG 碳排放量、提高网络稳定性为优化目标, 考虑了基于价格型 IDR 策略和奖惩阶梯型 CTS 综合需求响应策略、基于 MPC 和激励型 IDR 的日内双时间尺度调度策略, 并通过实验分析, 证明了它们的有效性、可行性, 实现了优化目标。

然而, 本文仍有一些可以深入研究的地方以及不足之处:

(1) 本文研究的 MEMG 设备和结构较为单一, 在以后的研究中可以增加更多不同种类的设备, 建立更复杂的能源网络, 以便对 MEMG 优化调度做进一步研究。

(2) 本文研究的目标函数主要是针对 MEMG 的经济性、环保性、稳定性, 而忽略了对 MEMG 中各设备的生命周期、投资成本、回收折现成本、用户满意度和舒适度等方面的研究, 在今后的研究中可以进一步考虑这些因素。

(3) MEMG 的研究需要考虑能源的智能化, 包括人工智能、大数据等技术的应用, 以提高能源的管理和控制效率

(4) 综合能源系统的研究需要考虑能源的社会学问题, 包括能源的社会影响、能源消费者的行为和态度等, 以促进能源的社会可持续发展。

参考文献

- [1] EBELL N, HEINRICH F, SCHLUND J, et al. Reinforcement learning control algorithm for a pv-battery-system providing frequency containment reserve power[C]//2018 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm). October 29-31, 2018, Aalborg, Denmark. IEEE,2018:1-6.
- [2] 张琳,谢洪途,赵路路,等.混合能源直流微电网能源优化管控策略研究[J].电力系统保护与控制,2024,52(03):141-151.DOI:10.19783/j.cnki.pspc.230531.
- [3] OROOHI S I, TAGHI A M, SETAYESH N M. Generation maintenance scheduling for generation expansion planning using a multi-objective binary gravitational search algorithm [J]. International Transaction of Electrical and Computer Engineers System,2014,2(2):44-45.
- [4] 祝锦发,林建丰,黄思奇,等.基于麻雀搜索算法的区域微电网多目标协同优化调度[J].电工技术,2024,(02):112-114+117.DOI:10.19768/j.cnki.dgjs.2024.02.031.
- [5] KHOSRAVI A,NAHAVANDI S,CREIGHTON D. Construction of optimal prediction intervals for load forecasting problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2010,25(3):1496-1503.
- [6] HUANG Q,WEI S Y. Improved quantile convolutional neural network with two-stage training for daily-ahead probabilistic forecasting of photovoltaic power[J]. Energy Conversion and Management,2020,220:113085.
- [7] JI L,NIU D X,HUANG G H. An inexact two-stage stochastic robust programming for residential micro-grid management-based on random demand[J]. Energy,2014,67:186-199.
- [8] YANG L,TAI N L,FAN C J,et al. Energy regulating and fluctuation stabilizing by air source heat pump and battery energy storage system in microgrid[J]. Renewable Energy,2016,95:202-212.
- [9] HOSSEINNIA H,TOUSI B. Optimal operation of DG-based micro grid (MG) by considering demand response program (DRP)[J]. Electric Power Systems Research,2019,167:252-260.
- [10] 赵毅,吴志,钱仲豪,等.计及源—荷时空相关性的主动配电网分布式优化调度[J].电力系统自动化, 2019, 43(19):68-76.

- [11] 王源,南海鹏,关欣.风水储微电网优化调度策略研究[J].高压电器,2020,56(5):216-222.
- [12] 王治国,刘继荣,郝艳军,等.多智能体系统微电网能源实时管理系统设计[J].信息技术,2021,45(5):61-67.
- [14] 赵新宽.粒子群优化算法的微电网功率自动控制策略[J].信息技术,2020,44(11):73-77.
- [15] 李明威,姚伟伟,瞿路明,等.微电网系统多目标优化技术研究[J].微型电脑应用,2022,38(12):101-106.
- [16] 王春博.基于改进粒子群算法冷热电联供型的微网优化运行研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.
- [17] 李美成,梅文明,张凌康,等.基于可再生能源不确定性的多能源微网调度优化模型研究[J].电网技术,2019,43(4):1260-1270.
- [18] 彭伟款,郭紫娟,张先勇,等.基于 NSGA-II和模糊决策的交直流混合微电网多目标优化调度[J].广东电力,2023,36(2):42-51.
- [19] 杨茂,王金鑫.考虑可再生能源出力不确定的孤岛型微电网优化调度[J].中国电机工程学报,2021,41(3):973-985.
- [20]包曼,张红旗,吴昊等.含大规模风电接入的电力系统经济调度研究[J].节能,2020,12(32):105-107.
- [21]邱威,张建华,刘念.含大型风电场的环境经济调度模型与解法[J].中国电机工程学报,2011,31(19):8-16.
- [22]Zhang Hong xue; Zhang Lian peng; Chang Jian xia. et.al .Study on the Optimal Operation of a Hydropower Plant Group Based on the Stochastic Dynamic Programming with Consideration for Runoff Uncertainty. [J]Water. 2022, 14(2): 220-220
- [23]黄治翰,汪晗,李启迪等.基于改进遗传算法的主动配电网经济优化调度[J].山东电力技术,2021,48(10):12-16+65
- [24]周鹤宁.基于改进粒子群算法的微电网优化调度[D].沈阳:沈阳工程学院电气工程,2021.
- [25]李世煜.人工藻类算法在电力系统经济调度中的应用研究[D].秦皇岛:燕山大学电力系统及其自动化,2021.

- [26] 李奇, 赵淑丹, 蒲雨辰, 等. 考虑电氢耦合的混合储能微电网容量配置优化[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 486-495.
- [27] 司杨, 陈来军, 陈晓弢, 等. 基于分布鲁棒的风-氢混合系统氢储能容量优化配置[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 3-10.
- [28] 熊宇峰, 陈来军, 郑天文, 等. 考虑电热气耦合特性的低碳园区综合能源系统氢储能优化配置[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 31-38.
- [29] 李彦哲, 郭小嘉, 董海鹰, 等. 风/光/储微电网混合储能系统容量优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(6): 123-128.
- [30] 王盼宝, 徐殿国, 谭岭玲, 等. 基于改进 MOPSO 算法的多能互补型微电网多元优化运行策略[J]. 南方电网技术, 2022, 16(10): 130-140.
- [31] 张军, 任豪, 刘廷章. 基于改进 NSGA-II 算法的微电网多目标优化研究[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(12): 3760-3763.
- [32] 杨国华, 朱向芬, 周鑫, 等. 基于遗传算法的风电混合储能容量优化配置[J]. 电气传动, 2015, 45(02): 50-53.
- [33] 杨国华, 朱向芬, 马玉娟, 等. 基于改进粒子群算法的混合储能系统容量优化[J]. 电测与仪表, 2015, 52(23): 1-5.
- [34] Zhi-sheng Z. Quantum-behaved particle swarm optimization algorithm for economic load dispatch of power system[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(02):1800-1803.
- [35] Cao B, Dong W, Lv Z, et al. Hybrid microgrid many-objective sizing optimization with fuzzy decision[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2020, 28(11):2702-2710.
- [36] 钱科军, 徐在德, 陈振宇, 等. 考虑用户舒适度的多样化负荷控制策略[J]. 智慧电力, 2018, 46(9): 1-5.
- [37] Cha H J., Choi J Y., Won D J. Smart load management in demand response using microgrid EMS[C]//Energy Conference. Beijing: IEEE Press, 2014: 21-23.
- [38] Liasi S G., Bathae S. Optimizing microgrid using demand response and electric vehicles connection to microgrid[C]//2017 Smart Grid Conference. Singapore: IEEE Press, 2017: 57-61.
- [39] Shao C., Zhang S. Optimal Dispatch of Grid-connected Microgrid Considering Incentive-based Demand Response[C]//2019 IEEE 8th International Conference on

- Advanced Power System Automation and Protection. Xi'an: IEEE Press, 2019: 11-14.
- [40] 都成, 魏震波. 基于模糊激励型需求响应的微电网两阶段优化调度模型[J]. 电力建设, 2020, 41(5): 37-44.
- [41] 杨秀茹, 郭兴众, 王昊. 风光发电与电动汽车充放电协同优化调度[J]. 四川轻化工大学学报(自然科学版), 2021, 34(5): 55-61.
- [42] 高少希, 张达敏, 陈伟川, 等. 计及供需两侧的电动汽车有序充放电优化算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(11): 140-147.
- [43] 李振坤, 李逸沐, 罗潇, 等. 计及碳交易和绿电占比的园区微电网优化运行[J/OL]. 电测与仪表: 1-11[2023-11-22].
- [44] ZHENG Shunlin, SUN Yi, LI Bin, et al. Incentive-Based Integrated Demand Response for Multiple Energy Carriers Considering Behavioral Coupling Effect of Consumers[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 3231-3245.
- [45] KHAJEHVAND M, FAKHARIAN A, SEDIGHIZADEH M. A Risk-Averse Decision Based on IGDT/Stochastic Approach for Smart Distribution Network Operation under Extreme Uncertainties[J]. Applied Soft Computing, 2021, 107: 107395.
- [46] 乔学博, 杨志祥, 李勇, 等. 计及两级碳交易和需求响应的多微网合作运行优化策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(7): 2573-2583.
- [47] 李星辰, 袁旭峰, 李沛然, 等. 基于改进 QPSO 算法的微电网多目标优化运行策略[J]. 电力科学与工程, 2020, 36(12): 22-29.
- [48] 吴晓雯, 顾雪平, 范辉, 等. 基于相对目标接近度的并网型微电网多目标优化调度[J/OL]. 现代电力: 1-11[2023-07-16]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0187>.
- [49] 王福忠, 陶新坤, 田广强. 基于改进果蝇算法优化的微电网逆变器恒功率控制算法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 71-79.
- [50] SHAN D, CAO G H, DONG H J. LGMS-FOA: an improved fruit fly optimization algorithm for solving optimization problems[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013: 1-9.
- [51] 钟少云. 考虑需求侧响应的风光燃储微网经济运行规划和研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
- [52] 徐忠林, 刘彦琴, 向泽, 等. 基于 Mesh 网络鲁棒性优化的电缆监控系统研

- 究[J]. 高压电器, 2021, 57(1): 123-128.
- [53] 宋晓文, 回茜, 张雯舒. 基于多阶段鲁棒优化的多站合一能源站市场优化策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(2): 53-60.
- [54] 吴玮坪, 胡泽春, 宋永华. 结合随机规划和序贯蒙特卡洛模拟的风电场储能优化配置方法[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1055-1062.
- [55] 虎智峰, 陈静, 张婧菲, 等. 考虑新能源不确定性边界的主动配电网优化调度[J]. 智慧电力, 2022, 50(11): 48-55.
- [56] 葛玉友, 尚策. 寿命约束的储能规划[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6150-6161.
- [57] 朱晓荣, 鹿国微, 谢婉莹. 考虑源网荷灵活性资源的配电网储能鲁棒规划[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 8-16.
- [58] 魏梅芳, 吴燕, 黎跃龙, 等. 基于分布鲁棒优化的微电网日前经济运行模型与求解方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(12): 81-90.
- [59] 汤翔鹰, 胡炎, 耿琪, 等. 考虑多能灵活性的综合能源系统多时间尺度优化调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 81-90.
- [60] Zhou Y, Pan S, Qin L, et al. Short-term solar power forecasting based on convolutional neural network and analytical knowledge[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2021, 31(11): e13111.
- [61] Malakouti S M, Ghiasi A R, Ghavifekr A A, et al. Predicting wind power generation using machine learning and CNN-LSTM approaches[J]. Wind Engineering, 2022, 46(6): 1853-1869.
- [62] 刘亚辉, 赵倩. 基于聚类经验模态分解的 CNN-LSTM 超短期电力负荷预测[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4444-4451.
- [63] 张雲钦, 程起泽, 蒋文杰, 等. 基于 EMD-PCA-LSTM 的光伏功率预测模型[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9): 62.
- [64] 王磊, 周建平, 朱刘柱, 等. 基于分布式模型预测控制的综合能源系统多时间尺度优化调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(13): 57-65.
- [65] 王颖杰, 詹红霞, 杨孝华, 等. 考虑综合需求响应的电热系统调度[J]. 电力工程技术, 2021, 40(01): 17-24.
- [66] 余江胜, 娄柯, 张艳, 等. 考虑需求响应与碳交易成本的综合能源系统优化调度[J]. 兰州工业学院学报, 2022, 29(03): 78-83.

- [67] 张新宇.基于马尔可夫链和概率潮流的含光伏电力系统频率分布计算研究[D].兰州交通大学,2023.DOI:10.27205/d.cnki.gltec.2023.001279.
- [68] 郭桂志.社区微电网储能容量配置与协同优化运行研究[D].广西大学,2022.DOI:10.27034/d.cnki.ggxju.2022.001999.
- [69] H. Aalami, M. P. Moghaddam, and G. Yousefi, "Demand response modeling considering interruptible/curtailable loads and capacity market programs," *Applied Energy*, vol. 87, no. 1, pp. 243-250, 2010.
- [70] 杨翱.不同碳配额分配方式的中国经济波动效应研究[J].数量经济技术经济研究,2022,39(06):81-99.DOI:10.13653/j.cnki.jqte.2022.06.003.
- [71] 赵依茗,彭道刚,徐春梅,等.计及奖惩阶梯型碳交易和源荷不确定性的综合能源调度研究[J/OL].电测与仪表,1-9[2024-04-06].
- [72] 杨子昊,娄柯,蒋卓伟.考虑需求响应的微电网优化调度[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2023,48(04):74-86.DOI:10.16112/j.cnki.53-1223/n.2023.04.452.
- [73] 国家发展改革委.国家发展改革委等部门关于印发《促进绿色消费实施方案》的通知[EB/OL] [2023-12-18].
- [74] 葛少云,刘静仪,刘洪,等.需求响应机制下含建筑虚拟储能的能源站经济调度[J].电力系统自动化,2020,44(4): 35-43.
- [73] 殷红旭,刘春秀,赵金勇,等.基于自适应模型预测控制的区域能源互联网两阶段协同调度[J].现代电力,2018,35(4): 35-44.
- [74] 王磊,周建平,朱刘柱,等.基于分布式模型预测控制的综合能源系统多时间尺度优化调度[J].电力系统自动化,2021,45(13): 57-65.
- [75] 王成山,吕超贤,李鹏,等.园区型综合能源系统多时间尺度模型预测优化调度[J].中国电机工程学报,2019,39(23): 6791-6803.
- [76] 葛少云,刘静仪,刘洪,等.需求响应机制下含建筑虚拟储能的能源站经济调度[J].电力系统自动化,2020,44(4): 35-43.
- [77] Kong X, Xiao J, Wang C, et al. Bi-level multi-time scale scheduling method based on bidding for multi-operator virtual power plant[J]. *Applied Energy*, 2019, 249: 178-189.

攻读硕士期间的学术成果

[1] 杨子昊, 娄柯, 蒋卓伟. 考虑需求响应的微电网优化调度[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2023, 48(04): 74-86. DOI: 10.16112/j.cnki.53-1223/n.2023.04.452.

致谢

天色将晚，余晖仍在，就在这样的时刻，我画上了本文的最后一个句点。我推开窗，微风拂面，树影婆娑，恰如此刻我的心境一平静而喜悦。今天和往常并没有什么不同，只是内心增添了一分淡定，不论对自己还是对未来都越发充满信心。这种信心来自于一直以来对美好生活的向往与追寻，来自于三年硕士求学生涯的探索与磨练，更来自于在这段生命历程中所感受到的温暖与关爱。

首先，我应该感谢我的恩师娄柯老师，您是我前行中的引路人，是我精神上的坚强后盾，他在学习和生活上给予了无私的帮助，让我真切感受到家人般的温暖。在此，向恩师致以崇高的敬意和深深的感谢！

我的家人在我的成长过程中倾注了大心血。我的父亲和母亲以每月有限的收入一直供养我读到研究生，其中的爱与艰辛可想而知。他们是小城市里最平凡的老百姓，但是在我心里，他们是最伟大的人。

我还要感谢我的室友张陈、华峰、王煜、512 第五人王博，是他们陪我一起走过三年的研究生生涯，让我的学习和生活充满了乐趣。我的同门蒋卓伟、师弟岳君豪、胡浩然和好哥们孙超、张健等也给予了我莫大的帮助和鼓励，有他们这群好朋友、好室友，我感到非常荣幸，感谢命运安排我们相遇。

最后还要感谢学院的各位领导、老师、同学们多年来的关心和支持，这些点滴感动我都会铭记于心。

青葱岁月渐渐远去，新的生活即将开启。在这样一个时空交汇的十字路口上，我已不再感到迷惘和彷徨，我依然会背上思想的行囊继续旅行，带上所有的感激和祝福。

尚德敏学 唯实惟新

