

虚拟电厂的优化调度技术与市场机制的综述与展望

——一种微电网系统的优化方案

邹程润¹, 杨天奇¹, 孙晨煊¹, 王天野¹, 吕佳霖², 孙奕翔³, 于洁^{1*}

¹青岛大学电气工程学院, 山东 青岛

²大连交通大学机械工程学院, 辽宁 大连

³山东科技大学电气与自动化工程学院, 山东 青岛

收稿日期: 2025年1月20日; 录用日期: 2025年2月6日; 发布日期: 2025年2月27日

摘要

本文深入分析现有微电网的技术现状、实践应用及存在的问题, 探讨新型电力系统的新需求, 提出并分析了具有创新储能系统和调度算法的微电网系统, 包括电池周期性安全评估、盘式液风散热结构、储能变流器管理装置、智能电力调度算法等产品设计。阐述了该系统在能源聚合、协同调控、安全运行等方面的技术进展。最后探讨了源网荷储一体化的发展, 包括“双碳”背景下的源网荷储一体化、技术突破以及其对虚拟电厂实现的助力作用。本文提出的新型微电网体系有助于减少分布式发电模块出力不确定性, 保障虚拟电厂稳定运行, 推动能源转型和智能电力网络构建。

关键词

微电网, 虚拟电厂, 储能系统, 调度算法, 源网荷储一体化, 智能电力调度

A Review and Prospect of Virtual Power Plant Optimization Dispatch Technology and Market Mechanism

—An Optimization Scheme for Microgrid System

Chengrun Zou¹, Tianqi Yang¹, Chenxuan Sun¹, Tianye Wang¹, Jialin Lyu², Yixiang Sun³, Jie Yu^{1*}

¹College of Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao Shandong

²College of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian Liaoning

*通讯作者。

文章引用: 邹程润, 杨天奇, 孙晨煊, 王天野, 吕佳霖, 孙奕翔, 于洁. 虚拟电厂的优化调度技术与市场机制的综述与展望[J]. 电力与能源进展, 2025, 13(1): 48-57. DOI: [10.12677/aepe.2025.131006](https://doi.org/10.12677/aepe.2025.131006)

³College of Electrical and Automation Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

Received: Jan. 20th, 2025; accepted: Feb. 6th, 2025; published: Feb. 27th, 2025

Abstract

This paper conducts an in-depth analysis of the current technical status, practical applications, and existing problems of microgrids, explores the new demands of the new power system, and proposes and analyzes a microgrid system with innovative energy storage systems and dispatching algorithms, including battery periodic safety assessment, disc-type liquid air cooling structure, energy storage converter management device, intelligent power dispatching algorithm, and other product designs. It elaborates on the technological progress of this system in energy aggregation, coordinated regulation, and safe operation. Finally, it discusses the development of source-grid-load-storage integration, including source-grid-load-storage integration under the “dual carbon” background, technological breakthroughs, and its facilitating role in the realization of virtual power plants. The new microgrid system proposed in this paper helps to reduce the output uncertainty of distributed generation modules, ensure the stable operation of virtual power plants, and promote energy transformation and the construction of intelligent power networks.

Keywords

Microgrid, Virtual Power Plant, Energy Storage System, Scheduling Algorithm, Source-Grid-Load-Storage Integration, Intelligent Power Scheduling

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

微电网是一种可以独立于主电网，作为单个可控个体运行。它也可以将分布式模块集成到电力网络中，与大电网进行交互，提供安全可靠的电能服务，提高电力系统的经济效益和环境效益[1]。但是，随着可再生能源在能源结构中的占比不断攀升，加之电力系统负荷峰谷差不断加大，给电网的稳定运行带来许多挑战。因此，迫切需要提升电力系统调峰调频的作用，实现能源的优化配置。虚拟电厂的快速发展，不仅能够有效促进新能源的高效利用，缓解电力系统的供需矛盾，还为新型电力系统的灵活调度与高效运行提供了坚实支撑，成为推动能源转型与电力系统升级的重要路径。但是，国内虚拟电厂的发展仍存在瓶颈，例如：虚拟电厂要作为独立主体与系统中的其他虚拟电厂或其他主体进行联合优化调度，参与电网运行调控[2]，这需要有很高的用户参与度；同时，由于储能系统的发展的限制，例如：锂离子电池热稳定性较差，一旦过热，可能会导致安全问题[3]。这使得现有的微电网和储能系统不能满足虚拟电厂的需要。为支撑构建新型电力系统，加快推动新型储能高质量规模化发展[4]，构建适应虚拟电厂需求的新型微电网体系迫在眉睫。本文旨在深入分析现有微电网的基本技术、实践应用及存在的问题，探讨新型电力系统中的新需求。随后，文章提出了一种具有创新储能系统和调度算法的微电网系统[5]，系统性地阐述了该系统在能源聚合[6]、协同调控、安全运行等方面的技术进展，并最终针对该系统在支持虚拟电厂的电力调度[7]、配合构建电力现货市场的挑战与机遇提出展望与建议。

2. 虚拟电厂的发展现状

2.1. 基于多代理的虚拟电厂协调优化调度策略

多代理系统(multi-agent system, MAS)是由多个物理分散而行为自治的 Agent 形成的进化系统。MAS 将大而复杂的系统划分成小的且彼此联系相互通信、易于协调控制的系统，现已广泛应用于微电网中。首先在智能电网环境下基于 MAS 对商业用户的可控负荷进行协调管理，提高整体舒适度，然后基于 MAS 对含有 VPP 的配电网的电压稳定性进行协调控制，通过信息之间的交互，设置多智能体的反馈控制器，如图 1 所示。最终通过信息和通信技术建立了分层聚合的 MAS，使可控负荷更好的参与到调度中[8]。

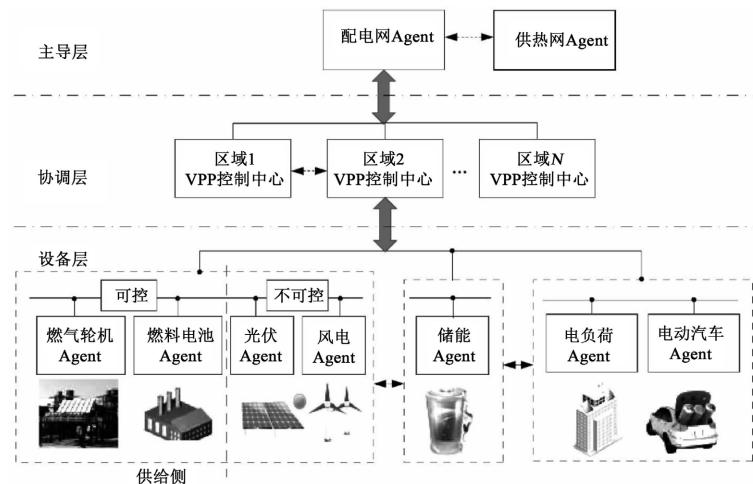


Figure 1. MAS-based hierarchical control structure [9]
图 1. 基于 MAS 的分层控制结构图[9]

2.2. 基于能源区块链网络的虚拟电厂运行与调度

将能源区块链网络模型如图 2 引入虚拟电厂的运行调度过程中，使得 DER (分布式能源资源 Distributed Energy Resources)可以有效地参与到电力市场交易中，在提高虚拟电厂整体运行效率的同时，也借由区块链自身的密码学特点使虚拟电厂获得了更大程度的信息安全保障。区块链的数据结构使得链上每个区块的信息都可以由前驱节点追溯，并影响后继节点的信息构成，由密码学方法保证了恶意攻击无法篡改信息，确保数据的安全性和完整性。

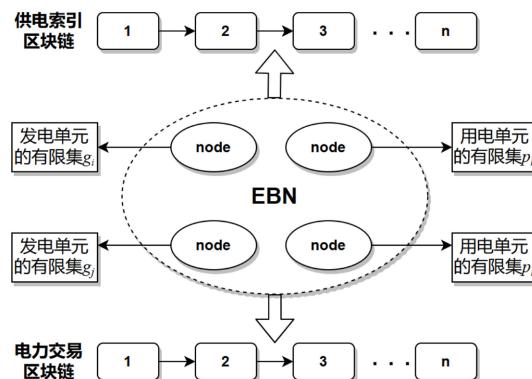


Figure 2. Energy blockchain network [10]
图 2. 能源区块链网络[10]

2.3. 基于主从博弈的虚拟电厂双层竞标策略

由于虚拟电厂内部主体存在产权独立性,且电价竞标与电量竞标存在先后行动次序,应用 Stackelberg 动态博弈理论,建立虚拟电厂竞标问题的动态博弈模型。考虑风、光及负荷的出力波动和预测误差,分别建立虚拟电厂的电价竞标模型和电量竞标模型。基于两个子模型的主从递阶关系,利用最优性一阶条件和粒子群智能优化算法,求出模型的均衡解,确定虚拟电厂内多个分布式电源的交易电价与调度计划。最后对模型进行仿真,讨论不同场景下虚拟电厂的收益、电价竞标和电量竞标结果,验证模型的有效性 [11]。

2.4. 考虑需求响应和多能互补的虚拟电厂协调优化策略

随着能源互联网技术的发展,源-网-荷互动和热、电等多能源互动成为解决分布式能源(distributed energy resource, DER)系统高可靠性和效率利用的有效方案。采用虚拟电厂(virtual power plant, VPP)协调各机组运行,引入源-网-荷互动模型,用来描述不同类型电源和负荷之间的互相支持和电量交易,引入热电联产(combined heat and power, CHP)系统,建立考虑多能互补的需求响应(demand response, DR)互动优化模型,实现虚拟电厂内部的协调互动。考虑虚拟电厂收益最大化与电力公司热电负荷补偿成本最小化这2个目标,建立多目标互动优化模型,采用遗传算法对模型进行求解。双项目最优解图3如所示。

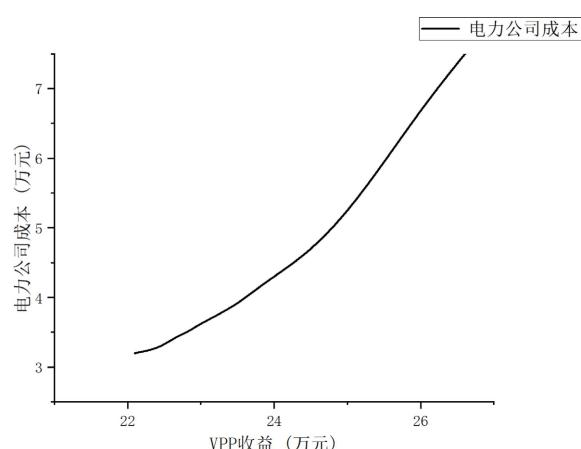


Figure 3. The optimal solution set for two objectives [12]

图3. 双目标最优解集[12]

3. 微电网技术现状及产品设计

3.1. 传统微电网的结构和运作模式

微电网是由多种分布式电源、储能系统、能量转换装置、负荷以及监控保护装置汇集而成的小型发配电系统,是一个能够实现自我控制、保护和管理的独立自治系统,可以有并网运行和孤岛运行两种模式[13]。当微电网处于并网状态时,微电网可以向大电网输送多余电力,同时大电网也可以向微电网售电,功率能够实现双向流动;当其处于孤岛状态时,微电网与大电网切断联系,微电网在一段时间内可以实现独立运行,这降低了因意外导致区域紧急断电带来的损失。然而,微电网目前存在许多需要进一步研究和攻克的技术难题,主要包含新能源发电技术、电力电子技术、储能技术和通信技术等[14]。其中,储能技术作为微电网的关键技术之一,为微电网提供能源的同时,在削峰填谷方面发挥着重要的缓冲作用;同时,新能源发电技术和安全监测技术也是目前微电网亟待解决的问题[15]。

3.2. 虚拟电厂背景下微电网面临的问题及解决方案

随着虚拟电厂技术的发展，微电网在电源端和负荷端均出现了较大的波动，过去的微电网调控模式主要为“源随荷动”。当负荷增高而电源发电不足时，供需不平衡会严重影响电网的安全运行。为了解决以上问题，首先可以提高储能系统的容量，加强对储能设备的安全检测，进而在电源发电不足时能够及时提供电力，缓解负荷侧用电高峰时的供电问题；同时，优化微电网电力调度系统，提高需求侧响应的灵敏性和机动性，从而配合虚拟电厂的能源调度，实现源网荷储一体化建设[16]。我们优化设计了需求侧电力调度算法，设计安装新型储能变流器，以提高储能系统的智能化水平和充放电稳定性；同时，周期性安全检测和盘式液风散热结构能够确保储能系统在高频次充放电的响应下安全运行。

3.3. 产品设计

3.3.1. 电池周期性安全评估

随着可重构储能系统大规模安全应用，需采取更有效的安全保护方法提高系统安全性能，因此对电池的检测评估变得愈发重要。但是，现有的电池评估方法，不便于实现周期性检测评估，且在反复检测时，不能够精准的把握好时间，无法实现故障电池的精准切除，在保障储能系统本质安全层面仍有所欠缺。这降低了可重构电池系统的适用性及安全性。

针对上述问题，在该新型微电网系统中提出了一种可重构电池的周期性安全评估装置，如图4所示。可重构电池的周期性安全评估装置是一种用于周期性检测和评估可重构电池安全性的专业设备，能够对电池模组在每个重构周期中的电压、温度等安全性能指标进行全面、准确的监测和分析；在每个重构周期开始前，装置会对电池状态进行评估，为选择最优的电池组接入电路进行重构。可以对电池模组及时进行拓扑重构、能量调度和温度管理，有效提升系统的安全性，提高了适用性，促进可重构电池在储能系统中的规模化应用。

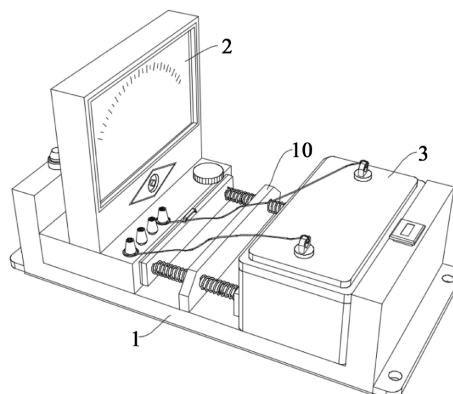


Figure 4. Schematic diagram of the main structure of a periodic safety assessment device for a reconfigurable battery

图4. 一种可重构电池的周期性安全评估装置主视结构示意图

3.3.2. 盘式液风散热结构

电池的盘式液风散热结构是一种高效轻量的电池散热模型，适用于多种应用场景，如电动汽车、储能系统、消费电子设备等，该装置能够明显降低在电池工作时产生的热堆积，有效提高电池的稳定性、可靠性和工作效率。

不可避免的，电池在工作过程中由于发生一系列化学反应而产生热损耗，如果不及时散热会形成热

堆积，导致电池工作时温度过高，充放电效率和安全性会严重下降，电池寿命也会因此缩短。因此，对电池散热结构的研究具有重要的现实意义。在电池散热领域，液冷散热系统具有较好的散热效果，但是传统的液冷系统无法满足部分电池组的散热需求，散热性能仍有待提高。

盘式液风散热结构如图 5 结合了液冷散热与风冷散热的双重优势，实现了对锂电池块的高效散热。液冷散热组件通过盘式液冷管路紧密贴合锂电池块，有效吸收并带走电池产生的热量；风冷散热组件则通过风冷散热扇产生的风流，进一步增强了散热效果，确保了电池组在适应的温度范围内工作。

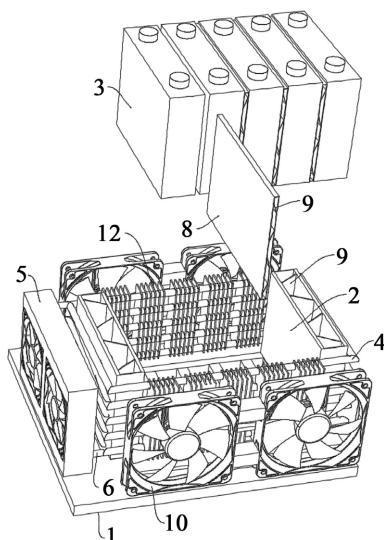


Figure 5. Schematic diagram of disk-type liquid-air cooling structure

图 5. 盘式液风散热结构示意图

3.3.3. 储能变流器管理装置

随着可再生能源比例的不断增加，如何高效协调不同类型能源并保证储能系统的稳定性成为了亟待解决的技术挑战。现有系统在处理多种能源波动时，存在功率分配不均、储能电池过充或过放等问题；同时，储能变流器在不同工作模式切换时，常面临电压、频率波动等稳定性问题。本产品引入智能协调控制与稳定性切换技术，设计了一种基于多源互补的模块化储能变流器系统如图 6 所示。旨在解决光伏、风能、电网等多种能源接入和储能系统协调控制中的波动性、调度复杂性以及切换稳定性等问题[17]，同时确保虚拟电厂在源荷两侧实现更加精准、灵活的调度。

本产品的核心技术包括基于 LSTM 深度学习算法的智能调度系统和多模式工作切换稳定性控制方法。LSTM 网络通过分析历史数据与天气预测，对各类能源输出进行精准预测，结合实时负荷需求，采用优化算法动态调整各能源功率，从而实现系统的智能调度，提升光伏、风能、电网与储能电池等多能源的协调接入能力[18]。该智能协调控制技术能够避免传统系统中出现的能量调度不均和储能电池过充或过放等问题，显著提高系统的效率和储能电池的使用寿命。通过虚拟同步发电机(VSG)技术和动态滤波控制，确保储能变流器在并网与离网模式之间平稳切换，减少了频率波动、电压不稳定以及谐波干扰问题，从而进一步提高系统的稳定性和电能质量。

3.3.4. 智能电力调度算法

随着大规模新能源分布式发电的接入和需求侧可调负载的多样性，电力系统在能源端与负荷端面临着双重不确定性的严峻挑战[19]。这对传统调度算法在协同性、实时性和稳定性方面提出了更高的要求。

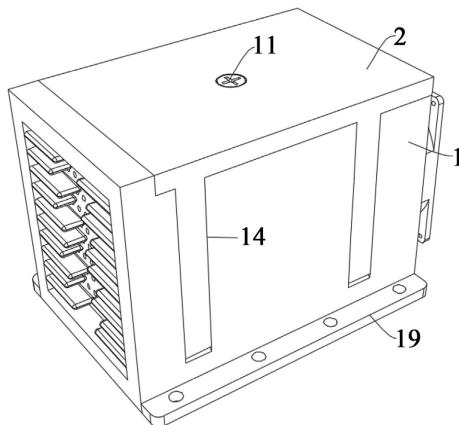


Figure 6. A multi-module management device for energy storage converters

图 6. 一种储能变流器的多模块管理装置

为应对此问题, 本产品基于虚拟电厂理论, 提出了一种创新型智能电力调度算法。该算法结合深度强化学习(DRL)与动态多目标优化模型[20], 实现了分布式能源的高效协同与系统运行稳定性的增强。算法通过深度强化学习框架, 智能体与环境交互学习最优策略, 有效应对电力负荷波动和可再生能源发电的不确定性。基于历史数据与实时反馈, 建立系统动态特性模型, 进行短期预测并优化多目标决策过程, 显著提升对可再生能源的消纳能力, 同时增强电力系统的整体运行效率和可靠性。

基于深度 Q 网络(DQN) [21]设计一个多目标强化学习模型。以系统总收益最大化、提高市场波动响应能力、提高可再生能源的利用率、最大化用户满意度、最小化供电中断的风险或损失、最少碳排放为目标的总体多目标优化模型的目标函数可表示为:

$$\begin{cases}
 \max F = w_1 F_1 + w_2 F_2 + w_3 F_3 + w_4 F_4 - w_5 F_5 - w_6 F_6 \\
 F_1 = \sum_{t=1}^T (R_t - C_t) \\
 F_2 = \sum_{t=1}^T \left(\frac{1}{|P_t^{load} - P_t^{forecast}| + \delta} \right) \\
 F_3 = \sum_{t=1}^T \left(\frac{\sum_{i \in RES} P_{i,t}^{gen}}{\sum_{i \in RES} P_{i,t}^{avail}} \right) \\
 F_4 = \sum_{t=1}^T \left(1 - \frac{P_t^{unserved}}{P_t^{load}} \right) \\
 F_5 = \sum_{t=1}^T (L_t^{loss} + P_t^{unserved} \cdot C_{penalty}) \\
 F_6 = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^N (P_{i,t}^{gen} \cdot E_i) \right)
 \end{cases} \quad (1)$$

其中, w 是对应目标的权重, R_t 是第 t 时段的总收益, C_t 是第 t 时段的总成本, T 是调度周期总时长。 P_t^{load} 是第 t 时段的实际负荷, $P_t^{forecast}$ 是第 t 时段的预测负荷, δ 是正的无穷小。RES 是可再生能源发电单元集合, $P_{i,t}^{gen}$ 是第 i 个发电单元在 t 时段的发电功率, $P_{i,t}^{avail}$ 是第 i 个单元在 t 时段的可用发电功率。 $P_t^{unserved}$ 是第 t 时段未满足的负荷功率, P_t^{load} 是第 t 时段的总负荷功率。 L_t^{loss} 是第 t 时段的线路损耗功率, $C_{penalty}$ 是未供电的惩罚成本系数。 N 是发电单元总数, E_i 是第 i 个发电单元的单位功率排放量。

约束条件包括功率平衡约束与发电单元出力约束:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N P_{i,t}^{gen} + P_t^{import} = P_t^{load} + P_t^{loss} \\ P_{i,t}^{\min} \leq P_{i,t}^{gen} \leq P_{i,t}^{\max} \end{cases} \quad (2)$$

结合 DRL, 系统可以通过以下训练过程进行优化:

$$Q^*(s, a) = E \left[R_t + \gamma \cdot \max_{a'} Q(s', a') \right] \quad (3)$$

其中, $Q^*(s, a)$ 为在状态 s 下采取动作 a 的最优 Q 值, R_t 为即时奖励, γ 为折扣因子, s' 为下一个状态, a' 为下一个动作。

通过深度强化学习智能体的持续迭代与探索, 算法能够基于当前系统状态(如电力负荷、可再生能源输出、实时电价)进行决策, 并通过实时反馈动态调整电力生产与分配策略, 适应系统变化。

3.4. 虚拟电厂背景下新型微电网技术相较于现有微电网技术的优势

新型微电网技术主要由电池周期性安全评估、盘式液风散热结构、储能变流器管理装置, 智能电力调度算法四大核心技术构成, 使其兼顾安全性、高效性、灵活性, 全能性。

虚拟电厂往往与新能源发电、废旧电池再利用相关联, 而废旧电池在使用过程中具有不稳定性, 安全系数低的劣势, 在实际生产中难以大规模利用。新型微电网技术创造性地给出了电池周期性安全评估的方法, 使废旧电池大规模再利用成为可能, 极大提高能源利用率。

虚拟电厂并网后, 对电池的精细化控制使其使用更加频繁复杂, 如果不及时散热会形成热堆积, 导致电池工作时温度过高, 充放电效率和安全性会严重下降, 电池寿命也会因此缩短。市面上的散热装置往往针对单一应用场景, 而盘式液风散热结构适用于多种应用场景, 如电动汽车、储能系统、消费电子设备等, 该装置能够明显降低在电池工作时产生的热堆积, 有效提高电池的稳定性、可靠性和工作效率。

虚拟电厂背景下, 要求发电终端对发电设备进行更加精细化的调控, 传统的储能变流器主要完成何时通电何时断电的要求, 无法精确地控制发电设备的实时功率, 难以达到虚拟电厂并网要求, 储能变流器管理装置较好地完成了这一要求, 解决了解决光伏、风能、电网等多种能源接入和储能系统协调控制中的波动性、调度复杂性以及切换稳定性等问题。

市面上现有的电力调度往往针对于某一种特殊的发电场景, 在更换场景后难以再次应用, 泛用性不足, 而智能电力调度算法通过深度强化学习框架, 智能体与环境交互学习最优策略, 基于历史数据与实时反馈, 建立系统动态特性模型, 进行短期预测并优化多目标决策过程, 显著提升了智能性, 相较于市场产品优势区间更大。

4. 产品未来发展方向——源网荷储一体化

4.1. “双碳”背景下的源网荷储一体化

随着我国“双碳”目标的提出, 源网荷储一体化成为推动绿色低碳电力系统建设的核心技术。源网荷储一体化是指在特定区域内, 通过优化整合电源侧、电网侧、负荷侧及储能设施等资源, 构建高效协同运作的小型或局部能源系统[22]。其核心目标是实现电源、电网、负荷与储能的深度协同, 提升电力系统的稳定性、可靠性与可持续性, 尤其在可再生能源大规模接入的背景下, 确保系统高效运行。这一模式通过全过程管理, 合理规划、协调控制并高效利用能源资源, 旨在满足绿色低碳电力系统需求。其中包括将风电、光伏等可再生能源与智能电网连接, 结合多类型负荷需求, 并合理配置储能设施(如电池储

能、抽水蓄能等), 实现电力的生产、传输、使用与存储一体化管理[23]。

源网荷储一体化功能包括促进可再生能源消纳, 减少对传统电网调峰的依赖, 提高电力供应的安全性与灵活性。通过智能化调度, 该模式增强了系统对市场波动、负荷变化及可再生能源不确定性的响应能力, 从而优化电力系统效率与服务质量, 推动能源转型与电力市场改革。

4.2. 源网荷储一体化的技术突破点

在源网荷储一体化发展的过程中, 在新能源发电接入和新型储能方面面临多个技术难点[24]。首先, 新能源的高比例接入带来了不确定性和难以预测性, 尤其是在风能、太阳能等可再生能源发电的协同接入方面, 传统算法难以处理这些波动和间歇性问题, 亟需开发适应新能源特性的优化算法。此外, 用户侧需求响应机制尚未充分考虑, 特别是新能源汽车的大规模充电需求对电力负荷的影响, 如何实现高效的需求响应机制, 以应对不同时间段的负荷波动, 仍是一个亟待解决的挑战。

在储能技术方面, 尽管储能能在平衡电力供需、调节负荷波动方面起到了关键作用, 但其面临的技术瓶颈依然突出。储能安全性仍是一个重大挑战, 尤其是电化学储能的起火爆炸事故时有发生, 亟需突破安全技术。储能系统的寿命和可控的快速调节能力也未能完全满足高频率调节和长周期使用的需求, 同时, 不同类型新能源的接入与协调仍需进一步的技术研究与解决[25]。针对上述技术难点的攻克, 将会为未来的源网荷储一体化的实现提供坚实的技术支撑, 推动绿色低碳电力系统的高效运行。

4.3. 虚拟电厂助力源网荷储一体化的实现

源网荷储一体化作为未来电力系统的核心发展方向, 具有广阔的前景与深远的意义。结合虚拟电厂的运行调度与电力现货市场的实时电价算法, 能够进一步提升电力系统的灵活性和智能化水平[26]。虚拟电厂通过整合分布式能源、负荷响应和储能系统等多个要素, 能够灵活调度资源, 最大限度地平衡电力供需, 实现资源的最优配置。随着各地电力现货市场的引入, 通过实时电价算法和峰谷电价差的动态调整, 为电力市场参与者提供了精准的市场信号, 进一步提高了市场资源的配置效率。通过大数据和云计算等技术手段, 系统实时处理海量数据, 并对电力市场的波动、需求变化以及可再生能源的波动进行精准预测和调度[27]。能够进一步促进可再生能源的大规模消纳, 助力能源转型, 推动可持续发展和智能电力网络的构建。

5. 总结

本文所提出的新型微电网体系, 将会减少分布式发电模块出力的不确定性, 助力清洁能源的消纳。通过对虚拟电厂需求侧模型算法的优化, 也可以保证虚拟电厂的稳定运行。随着大数据和人工智能的应用, 新型微电网系统对可再生能源的预测将会更加便捷; 同时, 电池管理系统将会更加智能, 有助于提高电池的寿命和储能系统运行的安全性、稳定性; 多个新型微电网系统的聚合, 还可以为虚拟电厂参与区域统一电力市场提供保障, 使得虚拟电厂具有更广泛的适应性。

参考文献

- [1] 颜浩. 微电网能量管理研究综述[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(13): 184-187, 190.
- [2] 郭昆健, 高赐威, 严兴煜. 新型电力系统下虚拟电厂研究综述与展望[J]. 电力需求侧管理, 2024, 26(5): 49-57.
- [3] 李赟, 孟艳花. 电池储能系统和功率调节技术研究进展[J]. 电池, 2024, 54(6): 883-888.
- [4] 国家发展改革委国家能源局: 《“十四五”现代能源体系规划》印发[J]. 华北电业, 2022(3): 4.
- [5] 程韧俐, 周保荣, 史军, 等. 面向区域统一电力市场的超大城市虚拟电厂关键技术研究综述[J]. 南方电网技术, 2023, 17(4): 90-100, 131.

- [6] 方燕琼, 艾芊, 范松丽. 虚拟电厂研究综述[J]. 供用电, 2016, 33(4): 8-13.
- [7] 张思博, 郭权利, 孔令伟, 等. 虚拟电厂内部资源优化调度综述[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2022, 18(3): 43-50.
- [8] 李铁松, 刘甲利, 庄明振. 基于多代理的虚拟电厂协调优化调度策略研究[J]. 广东电力, 2016, 29(8): 32-37.
- [9] 刘思源, 艾芊. 基于多代理系统的虚拟电厂协调优化[J]. 电器与能效管理技术, 2017(3): 19-25, 33.
- [10] 余维, 胡跃, 杨晓宇, 等. 基于能源区块链网络的虚拟电厂运行与调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3729-3736.
- [11] 李星雨, 邱晓燕, 史光耀, 等. 考虑虚拟电厂和分时电价的风光火储系统两阶段优化调度策略[J]. 南方电网技术, 2017, 11(6): 70-77.
- [12] 王哲, 杨鹏, 刘思源, 等. 考虑需求响应和多能互补的虚拟电厂协调优化策略[J]. 电力建设, 2017, 38(9): 60-66.
- [13] 王成山, 周越. 微电网示范工程综述[J]. 供用电, 2015(1): 16-21.
- [14] 刘立杰, 吴福保. 微电网技术在中国的研究现状和应用前景[J]. 农村电气化, 2010(6): 38-40.
- [15] 李莉华, 李宾皑. 微电网技术的研究与应用前景[J]. 电力与能源, 2011, 32(2): 124-126, 130.
- [16] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [17] 刘浩宇. 储能变流器电网适应性控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北方工业大学, 2023.
- [18] 陆继翔, 张琪培, 杨志宏, 等. 基于 CNN-LSTM 混合神经网络模型的短期负荷预测方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 131-137.
- [19] 曾雪婷. 基于虚拟发电厂理论的双侧调峰多目标协调优化调度[J]. 现代电力, 2020, 37(6): 654-663.
- [20] 袁桂丽, 贾新潮, 陈少梁, 等. 虚拟电厂源-荷协调多目标优化调度[J]. 太阳能学报, 2021, 42(5): 105-112.
- [21] 黎海涛, 申保晨, 杨艳红, 等. 基于改进竞争深度 Q 网络算法的微电网能量管理与优化策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(7): 42-49.
- [22] 魏旭, 刘东, 高飞, 等. 双碳目标下考虑源网荷储协同优化运行的新型电力系统发电规划[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3648-3658.
- [23] 帅挽澜, 朱自伟, 李雪萌, 等. 考虑风电消纳的综合能源系统“源-网-荷-储”协同优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 18-26.
- [24] 李建林, 郭兆东, 马速良, 等. 新型电力系统下“源网荷储”架构与评估体系综述[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4330-4342.
- [25] 苏舟, 钟鸣睿, 王喆, 等. 基于全生命周期的广义源网荷储一体化的电力系统协调优化配置研究[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(8): 74-84.
- [26] 张惠忠, 周嘉新, 张雅雯. 含源-荷-储的虚拟电厂经济性优化运行研究[J]. 电气传动, 2021, 51(9): 55-60.
- [27] 王继业. 人工智能赋能源网荷储协同互动的应用及展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7667-7681.