

[分布式能源]

基于多智能体的电力系统分布式能量调度技术

文/秦佳浩 刘欣波 孙继磊
山东天弘化学有限公司

多智能体系统（MAS）因其高度的灵活性和扩展性，被广泛认为是优化分布式电力系统能量调度的有效技术。分析基于多智能体的电力系统分布式能量调度技术的设计和实现，讨论系统架构设计、智能体模型构建、通信与协调机制以及能量调度策略的设计，并通过技术应用测试验证了所提方法的有效性和实用性。

随着分布式能源资源如太阳能、风能及小型水电的快速增长，电力系统面临着越来越多的挑战，尤其是如何有效地调度和管理这些分散的能源资源以保证电力供应的稳定性和效率。传统的中央集中式电力管理模式难以适应这种新的变化，因此，发展一种能够实现灵活、高效管理的新型电力系统调度技术变得尤为迫切。多智能体系统（Multi-Agent System, MAS）提供了一种解决方案，它通过在电力系统中部署具有自主决策能力的智能体，使得系统能够在更细粒度上进行能量管理和优化，从而响应各种操作条件和市场需求。

多智能体系统的原理与应用

MAS的原理基于多个自主决策的智能体相互协作，以达成共同的目标或解决复杂的问题，特别适用于电力系统分布式能量调度，其中各智能体可以代表不同的电力系统组件，如发电站、变压器、消费者和可再生能源单元，每个智能体都具备自我控制的能力，能根据预定规则和实时信息独立作出决策，并通过通信网络与其他智能体交换信息，共同优化整个电力网络的能量分配和利用效率。在电力系统中，这种方法特别重要，因为它允许系统在面对需求波动和供应不确定性时，实时动态地调

整能源分配，增强系统的可靠性和灵活性。实际应用中，多智能体技术可以用于实现高效的需求响应策略，优化能源交易和市场操作，提高能源利用效率，同时减少环境影响，这些都是当前电力系统现代化转型中急需解决的关键问题。通过精确的算法和策略，多智能体系统在电力系统中的应用不仅提升操作的自动化水平，还提高整个系统的经济性和环境友好性^[1]。

基于多智能体的电力系统分布式能量调度技术设计

1. 系统架构设计

在基于多智能体的电力系统分布式能量调度技术设计中，系统架构设计确保系统的高效运行和能源优化分配的目标能够达成，此架构主要由三个核心部分组成：智能体、通信网络和控制中心，每个智能体代表电力系统中的一个实体，如发电厂、配电站或消费设备，它们具备独立的决策能力和自我控制功能，能根据实时数据和内置策略独立操作，并通过通信网络与其他智能体交换信息。通信网络是智能体之间交互的纽带，支持高效、安全的数据交换，使得智能体之间能够共享状态信息、能量需求和供应数据，以及其他关键的运行参数。控制

中心则扮演着监督和协调的角色，实时监控整个系统的状态，分析来自各智能体的数据，优化调度策略，并在必要时介入调整智能体的行为以确保系统整体的稳定性和效率。此外，系统架构设计还包括了高级的算法和模型，用于预测能源需求、优化资源分配和处理紧急情况，这些算法和模型嵌入在控制中心，以支持复杂决策的制定。

2. 智能体模型构建

在基于多智能体的电力系统分布式能量调度技术中，智能体模型的构建是核心环节，其设计必须精确地反映出每个智能体的行为特征与决策逻辑，使其能够有效响应系统内外的各种动态变化并进行自主优化。在这种模型中，每个智能体被赋予了特定的角色，如发电单位、配电网操作者或消费端设备，每类智能体根据其角色的不同，拥有不同的目标函数和决策参数，这些参数的设置基于实时监测和预测数据，以支持智能体的优化决策。

考虑到电力系统的复杂性，智能体的决策模型通常采用以下形式的优化算法进行描述

$$\min_x f(x) \text{ subject to } g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

$$h_j(x) = 0, j = 1, 2, \dots, p \quad (2)$$

式中， $f(x)$ 是目标函数，代表成本最小化、能效最大化或其他相关性能指标； $g_i(x)$ 和 $h_j(x)$ 分别是智能体在决策过程中需要遵守的不等式和等式约束，这些约束涉及法规限制、技术参数或环境标准。

为确保智能体在多变环境下的适应性和灵活性，通常还会引入一个基于反馈的动态调整机制，即

$$x_{t+1} = x_t + \alpha \nabla f(x_t) \quad (3)$$

式中， x_t 是在时间 t 的决策变量； α 是学习率； $\nabla f(x_t)$ 是目标函数关于决策变量的梯度，用于指导智能体根据当前系统状态和外部信息进行实时调整^[2]。

3. 通信与协调机制

在基于多智能体的电力系统分布式能量调度技术中，通信与协调机制允许各智能体之间以及智能体与控制中心之间进行实时信息交换和决策协调。有效的通信机制必须支持快速、可靠的数据传输，以处理来自分布式资源的大量动态数据。这通常涉及使用高带宽、低延迟的通信协议和网络技术，如基于IEEE 802.15.4标准的无线网络或更先进的5G通信技术。为了确保智能体可以协同工作，实现全

局优化目标，协调机制则需要利用复杂的算法来解决潜在的冲突，优化资源分配，包括博弈论、优化理论以及最近发展的机器学习方法，帮助智能体评估不同决策选项的潜在效益，进行策略调整。为详细展示通信和协调策略的实施情况及效果，表1列出智能体之间以及智能体与控制中心之间在特定测试场景下的通信频率、延迟和数据传输量。

表1 通信与协调机制应用数据

智能体对	通信类型	通信频率 (次/min)	平均延迟 /ms	数据传输量 /MB
A与B	双向实时数据	30	15	2.35
B与C	控制指令交换	10	20	1.58
A与控制中心	状态更新与控制响应	45	10	3.22
C与控制中心	警报与紧急响应	5	25	0.95
B与D	能量调度协商	20	18	2.10

表1中的数据反映了通信与协调机制在多智能体电力系统中的应用效果，显示各类通信的频率、延迟和传输数据量，这些指标对于评估系统整体的响应速度和数据处理能力至关重要^[3]。

4. 能量调度策略设计

在基于多智能体的电力系统中，能量调度策略设计的目标是通过智能算法优化能源分配，以满足系统的实时需求同时降低运行成本。这种策略通常依赖于先进的优化算法，如线性规划或非线性规划，用于计算最优的发电和能量交换决策。特别地，考虑一个基于实时市场价格和消费需求变化的动态调度模型，该模型采用了滚动时域优化策略，以适应环境和市场的快速变化。

定义总成本函数 C ，是发电成本和电力交易成本的函数

$$C = \sum_{i=1}^N (c_i \cdot p_i + \sum_{j=1}^M t_{ij} \cdot q_{ij}) \quad (4)$$

式中， p_i 是第 i 个发电单元的发电量； c_i 是相应的单位发电成本； q_{ij} 是从第 i 个单元到第 j 个用户的电力传输量； t_{ij} 是相应的电力传输成本。

调度策略需确保成本最小化的同时满足下列约束

$$\sum_{i=1}^N p_i = \sum_{j=1}^M d_j \quad (5)$$

$$p_i^{\min} \leq p_i \leq p_i^{\max}, \quad \forall i \quad (6)$$

$$q_{ij}^{\min} \leq q_{ij} \leq q_{ij}^{\max}, \quad \forall i, j \quad (7)$$

第一个约束确保供应与需求平衡，第二和第三个约束保证发电和电力传输在安全可靠的操作范围

内。采用这种方法，智能体可以在每个调度周期内动态调整其决策，优化能源使用效率^[4]。

技术应用测试

本实验所使用的数据集，是为测试基于多智能体的电力系统分布式能量调度技术而特别设计的模拟数据，主要模拟实际电力系统的运行情况，包括电力消耗、发电量和市场价格等多种变量，旨在通过模拟真实操作环境的复杂性和动态性来验证调度策略的效果。所有的数据都用于测试过程中，确保了测试结果能够直接反映出算法和系统设计的性能。关于数据的具体量和内容，实验使用了总量约 100 GB 的模拟数据。这些数据被划分为不同的测试场景，每个场景都设计不同的系统负载和市场条件，全面评估系统在各种状况下的反应和效能。整个测试共进行五轮，确保数据的可靠性和测试结果的一致性。测试指标主要包括总成本、系统响应时间和资源使用率。总成本指的是在进行电力调度过程中所有成本的总和，包括发电成本、输电成本以及可能的调度损失成本；系统响应时间是指从接收到调度指令到完成所有调度操作的时间，这个指标反映系统处理请求的速度；资源使用率则衡量的是系统在调度过程中对计算和网络资源的利用效率，高资源使用率通常意味着系统管理能力强，能够有效利用可用资源。测试数据见表2。

表2 测试数据

测试轮次	总成本/元	系统响应时间/s	资源使用率 (%)
1	20 567.35	0.56	75.25
2	19 345.24	0.49	78.40
3	18 934.58	0.47	80.10
4	18 500.65	0.45	81.55
5	18 075.42	0.43	83.89

从测试结果可以看出，随着测试轮次的增加，总成本逐渐降低，系统响应时间缩短，资源使用率也有所提高。随着系统逐渐“磨合”，其性能趋于优化，调度策略更为高效。总成本的降低说明调度

策略在优化资源分配的同时，也降低运营成本；系统响应时间的缩短则说明系统处理速度得到了提升；资源使用率的提高反映系统对资源的利用更加高效。这些结果验证基于多智能体的调度策略在提升电力系统的经济性、响应速度和资源利用效率方面的有效性，支持该技术在实际电力系统中的应用潜力^[5]。

结束语

通过整合多智能体技术，电力系统能够实现更高效的分布式能量调度，不仅可以优化能源的分配和消耗，还可以增强系统对于可再生能源波动和不确定性的适应能力。因此，基于多智能体的电力系统分布式能量调度技术不仅为电力系统的现代化升级提供技术支持，也为电力市场的进一步发展打开新的可能，使得电力系统能够在保证经济效益的同时，更好地满足环保和可持续发展的要求。EA

(收稿日期：2024-12-16)

参考文献

- [1] 李帅虎，欧阳中，孙杰懿，等．面向沙戈荒区域新能源消纳的电力系统日前低碳调度策略[J]．太阳能学报，2024，45 (7)：82-91.
- [2] 鄢旻雯．锂离子电池在电力系统中的应用[J]．电子技术，2024，53 (5)：318-319.
- [3] 金贤球，雷涛，闵志豪，等．分布式电推进飞机能量优化动态管理技术研究[J]．电气工程学报，2023，18 (3)：315-331.
- [4] 金韬，黄云龙，谈历，等．基于TTU分布式决策的配电系统弹性调度策略研究[J]．供用电，2022，39 (3)：61-68.
- [5] 赵启新，苏雅亨，李雨佳，等．基于多智能体仿真的区域低碳电力系统发展形态及实现路径研究[J]．内蒙古电力技术，2024，42 (5)：13-22.