

基于改进 ADMM-GS 的配电网与微电网双层协同优化调度研究

史黎阳¹, 高玖生^{2*}, 张石刚³, 武家辉¹

1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830049

2. 国网新疆电力有限公司克州供电公司, 新疆 克孜勒苏柯尔克孜自治州 845350

3. 新疆龙源新能源有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830054

DOI:10.61369/ME.2025050018

摘要 : 随着分布式能源大规模接入, 配电网在电压安全、新能源消纳及多主体利益协调方面面临严峻挑战。本文构建配电网运营商 (DSO) 与微电网运营商 (MGO) 双层协同优化调度模型: 上层 DSO 通过电价调控实现系统效益与电压安全双重目标; 下层 MGO 以功率购售为决策变量, 优化微电网经济性与可再生能源利用率。针对传统 ADMM 求解效率不足的问题, 提出融合 Gauss-Seidel 顺序更新机制的改进交替方向乘子法 (ADMM-GS), 通过自适应惩罚参数策略显著提升分布式求解性能。基于改进 IEEE-33 节点三微网算例验证, 所提方法在电压安全、负荷平抑和算法性能方面均优于对比方案, 调度效果接近集中式最优, 为主动配电网多主体协同调度提供了可行路径。

关键词 : 配电网; 微电网; 主从博弈; 双层优化; ADMM-GS 算法; 优化调度

Research on Double-Layer Collaborative Optimal Scheduling of Distribution Network and Microgrid Based on Improved ADMM-GS

Shi Liyang¹, Gao Jiusheng^{2*}, Zhang Shigang³, Wu Jiahui¹

1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830049

2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd. Kizilsu Power Supply Company, Kizilsu Kirghiz Autonomous Prefecture, Xinjiang 845350

3. Xinjiang Longyuan New Energy Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 830054

Abstract : With the large-scale integration of distributed energy resources, distribution networks face critical challenges in voltage security, renewable energy accommodation, and multi-stakeholder benefit coordination. This paper establishes a bi-level collaborative optimization model between the distribution system operator (DSO) and microgrid operators (MGOs): the upper-level DSO regulates electricity prices to achieve both system efficiency and voltage security, while the lower-level MGOs optimize economic performance and renewable utilization through power trading decisions. To address the limited efficiency of conventional ADMM, an improved Alternating Direction Method of Multipliers with Gauss-Seidel sequential updates (ADMM-GS) is proposed, incorporating an adaptive penalty parameter strategy to significantly enhance distributed computation performance. Case studies on a modified IEEE-33 bus system with three microgrids demonstrate that the proposed approach outperforms benchmark methods in voltage security, load smoothing, and algorithm efficiency, achieving near-centralized optimal scheduling and providing a practical pathway for collaborative scheduling in active distribution networks.

Keywords : distribution network; microgrid; leader-follower game; bi-level optimization; ADMM-GS algorithm; optimal scheduling

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划 项目编号: 2023B01025-2

作者简介:

史黎阳(1996—), 男, 河南安阳人, 博士研究生, 研究方向: 为电力市场、电力系统规划与可靠性;

张石刚(1976—), 男, 新疆乌鲁木齐人, 大学本科, 工学学士, 高级工程师, 研究方向: 风力发电与储能技术应用;

武家辉(1988—), 女, 新疆乌鲁木齐人, 博士, 教授, 研究方向: 可再生能源发电与并网技术。

通讯作者简介: 高玖生(1980—), 男, 甘肃平凉人, 大学本科, 工学学士, 副高级工程师, 研究方向: 电力系统运行。

引言

随着“双碳”目标的深入推进，我国新能源装机渗透率持续增高。风电与光伏等分布式能源在配电网中的大规模接入推动了能源结构的低碳化转型，但也带来了电压波动、潮流反转和功率平衡困难等技术挑战。博弈论已成为解决多主体协同调度问题的重要工具。文献[1]针对共享储能经济效益差和可再生能源利用率低的问题，提出基于主从博弈的优化调度方法，通过主体调价和从体调容求解租赁容量与调度策略，提高了储能利润和利用效率。文献[2]结合并网型微电网的多层次、多主体特征，提出基于主从博弈的“配电网-微电网-用户”三层能量管理优化策略，通过KKT条件将三层模型重构为双层求解，有效提升了各主体经济效益。文献[3]针对多微网系统中各市场主体利益平衡问题，提出基于斯塔克尔伯格博弈的点对点交易策略，通过最优成交价格激励合作交易。

随着大规模分布式能源接入，模型计算复杂度和通信负担显著增加，分布式优化算法在配电网与微电网协同调度中得到广泛应用。ADMM作为经典的分布式优化算法，通过将优化问题分解为多个子问题并在本地求解，能够有效处理大规模分布式优化问题。文献[4]针对主动配电网中分布式能源消纳和运行经济性问题，提出基于ATC的区域多主体自治协同优化方法，通过解耦系统实现整体与局部目标协同优化。文献[5]提出基于ADMM的分层优化经济调度方法，构建上下两层优化模型，实现配电网整体运行成本最小化。文献[6]基于同步型ADMM和模型预测控制提出分布式优化调度策略，该策略降低了系统运行成本，分布式优化算法收敛性良好且与集中式算法结果一致。

综上所述，本文构建DSO-MGO双层协同优化调度模型，创新性地将电压安全与新能源消纳纳入优化目标，并提出ADMM-GS分布式求解方法，以同步提升系统电气安全性、经济性与计算效率。

一、基于主从博弈的协同调度模型

(一) 博弈框架

主从博弈作为一种分层的非合作博弈模型，其核心在于构建具有层级关联的决策主体结构。在博弈过程中，领导者依据对跟随者反应前瞻性的预判来制定策略，以实现自身利益的最大化；而跟随者则需在领导者既定策略的约束下，通过求解约束优化问题实现自身的局部最优。

基于上述博弈机制，本研究提出了一种基于Stackelberg博弈框架的双层规划模型。模型上层以DSO作为决策主体，通过全局优化生成调度基准策略；下层则由MGO作为响应主体，基于上层策略进行分布式资源协同优化配置。这样在保障各主体自主决策权的前提下，实现了双方协同优化，从而提升能源系统的整体运行效能与经济性。

(二) DSO优化模型

DSO需面向多维目标体系开展协同优化，目标函数涵盖经济性指标和系统稳定性参数等多个优化维度。本文将DSO的时段电价信号作为上层博弈的决策变量。目标一：DSO运行效益最大；目标二：DSO网络损耗最小。DSO优化模型的约束条件主要包括配电网潮流约束、线路功率容量约束和节点电压约束等常规约束和电价保护约束。与DSO有所不同，MGO优化目标主要集中在降低运行成本和净负荷波动上，也就是说MGO需要在满足微电网内部需求的同时与DSO进行有效的功率交互，以实现效益最大化。MGO的决策变量为微电网购售电功率。MGO优化模型的约束条件包括充放电功率约束、功率平衡约束和储能状态约束等。

二、基于ADMM-GS的分布式求解

在多变量问题中，变量之间的复杂耦合关系可能导致ADMM

陷入局部最优解，难以保证全局最优性。故本文将采用的基于串行更新的分布式求解算法，简称为ADMM-GS算法。

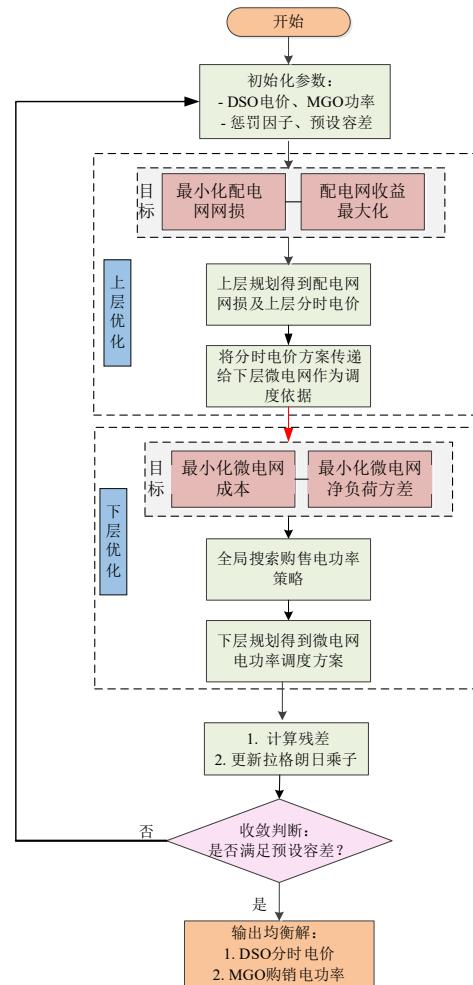


图1 DSO-MGO博弈求解流程图

Fig1. Solution flowchart of the DSO-MGO game

图1呈现了配电网运营商（DSO）与微电网运营商（MGO）的双层协同优化机制。该机制的运行流程如下：首先对初始参数进行设置，包括DSO的电价基础数据、MGO的功率初始值、负荷需求以及各类设备的约束条件；随后，上层的DSO以最小化电网网损和最大化电网收益为核目标，制定分时电价方案并将其传递至下层；下层的MGO则以最小化购电成本和平抑净负荷波动为优化方向，依据接收的电价方案开展功率分配与调度工作。在此基础上，上下层通过交替迭代进行优化：每次迭代后计算残差并更新拉格朗日乘子，若未达到收敛条件则继续迭代，直至满足收敛要求。最终输出的均衡解为：DSO确定的分时电价方案与MGO的购售电功率调度方案。

三、算例分析

（一）算例设置

本研究在Matlab软件仿真环境中对IEEE33节点主动配电网系统进算例验证。系统中含有DG、柔性负荷、储能装置、重要负荷等主体。对原配电网系统中含有负荷、储能、DG的节点划分为三个集群。设置以下三个场景进行研究：场景1：配电网与各微电网之间独立运行，无双层优化策略；场景2：配电网同微电网间采用双层优化模型运行并采用标准ADMM算法进行求解；场景3：在场景2的基础上改为采用ADMM-GS算法求解。

（二）优化调度结果分析

微电网1在负荷低谷及电价低时段通过购电与风电出力储能，在负荷高峰及电价较高时段优先利用储能和燃机满足需求，并在晚高峰将富余电能外售；微电网2、3主要依赖光伏出力，在日间光伏高峰期时段实现自给并余电外售，低谷及晚高峰则通过储能、燃机及外购电协同供能。整体上，三微网在不同电价和出力条件下实现了风光优先消纳与储能调节，显著降低了对高价外购电的依赖。

（三）协同优化策略有效性分析

场景3的主动配电网电压偏移量和电压偏移率均显著低于场景1和场景2。具体而言，与场景1相比，场景3的电压偏移量降低了32.64%，电压偏移率降低了20.51%。这表明采用配微主从博弈模型进行优化可以有效降低主动配电网的电压偏移量，提高系统电压稳定性。与场景2相比，场景3的结果也稍有提升，其采用的

ADMM-GS算法收敛速度与精度更高，在提升了信息处理效率的同时也提高了求解精度。

从各微电网的多目标优化结果来看，场景1相对于场景3，微电网1、微电网2和微电网3的净负荷均方差分别降低了30.50%、25.29%和29.65%，证明了本文的配微主从博弈策略可以有效平抑净负荷波动，有力促进了可再生能源就地消纳。

（四）求解算法性能分析

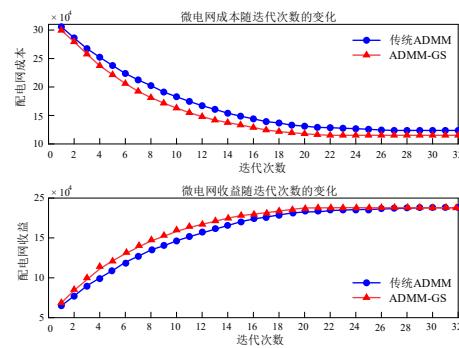


图2 各主体迭代策略

Fig. 2. Iterative Strategies of Each Stakeholder

由图2可得出，ADMM-GS相较于传统ADMM，能够以较少的迭代次数收敛于精度较高的解。本文算法迭代至19代时基本趋于稳定。配电网的成本随着迭代次数的增加而逐渐降低，这体现了其在主从博弈架构中的领导地位。配电网在求解最优定价策略时迭代方向始终朝着有利于自身利益最大化的方向调整；同时多目标的设置保证了微网的成本与配电网收益最大这两个目标的博弈过程并非零和博弈，双方均可在博弈过程中不断提高自身收益。

四、结论

本文构建了基于领导者-跟随者关系的双层优化框架，提出改进型ADMM-GS算法并将其应用于IEEE33节点系统。通过该框架与算法的协同作用，有效实现了多主体利益协调与新能源高效消纳，在运行经济性提升、电压稳定性增强及算法收敛效率优化三方面均取得显著效果。”

参考文献

- [1] 吕荣胜, 黄正伟, 魏业文, 等. 基于主从博弈的多微网共享储能优化调度研究 [J]. 现代电子技术, 2024, 47(20): 46–50.
- [2] 谢元皓, 林声宏, 朱建全. 基于双重博弈的含多微网配电网分层协调能量管理 [J/OL]. 电测与仪表, 1-12[2025-03-06].
- [3] 周步祥, 彭昊宇, 贲天磊, 等. 基于Stackelberg博弈的多微网系统点对点交易策略 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(02): 103–111.
- [4] 王家武, 赵佃云, 刘长锋, 等. 基于目标级联法的多主体主动配电网自治协同优化 [J]. 中国电力, 2024, 57(7): 214–226.
- [5] 李军徽, 马得轩, 朱星旭, 等. 基于ADMM算法的主动配电网分层优化经济调度 [J]. 电力建设, 2022, 43(08): 76–86.
- [6] 吴成辉, 林声宏, 夏成军, 等. 基于模型预测控制的微电网群分布式优化调度 [J]. 电网技术, 2020, 44(02): 530–538.