# Journal of System Simulation

Volume 34 | Issue 11

Article 2

11-25-2022

# Bilevel Distributed Optimal Dispatch of Active Distribution Network with Multi-microgrids

Yongjun Lin

State Key laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;, lin3172@163.com

Xin Chen

State Key laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;, 1257857311@qq.com

Kai Yang

State Key laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

Shanshan Zhou

State Key laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal

Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

# Bilevel Distributed Optimal Dispatch of Active Distribution Network with Multimicrogrids

# Abstract

Abstract: With continuous increase of the penetration proportion of renewable energy in the distribution network, the traditional centralized dispatching is facing problems such as high pressure of power flow calculation and difficulty in recycling renewable energy, which makes it difficult to guarantee the operation quality of the system. A *distributed optimal two-layer scheduling method for active distribution networks with multiple micro-grids is proposed. The upper-level aims to minimize the loss of regional distribution network, the second-order conical relaxation method and synchronous ADMM (alternating direction method of multipliers) algorithm are used to solve the scheduling instructions of the micro-grid connection lines. At lower-level, the coordinated scheduling of energy coupling devices such as carbon capture and storage (CCS), power-to-gas (P2G) and flexible loads are considered, and the optimization model at lower-level is established to improve economy, reduce wind and light abandonment, and ensure environmental protection, etc. A simulation platform is established based on real-time databaseto verify the effectiveness of the proposed method by taking the IEEE33 node system as an example.* 

## Keywords

microgrid group, synchronous alternating direction method of multipliers (ADMM), second-order cone relaxation, carbon capture and storage (CCS), power-to-gas (P2G)

## Authors

Yongjun Lin, Xin Chen, Kai Yang, Shanshan Zhou, and Qingfei Bai

# **Recommended Citation**

Yongjun Lin, Xin Chen, Kai Yang, Shanshan Zhou, Qingfei Bai. Bilevel Distributed Optimal Dispatch of Active Distribution Network with Multi-microgrids[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(11): 2323-2336.

第 34 卷第 11 期	系统仿真学报©	Vol. 34 No. 11
2022年11月	Journal of System Simulation	Nov. 2022

# 含多微网的主动配电网双层分布式优化调度

林永君, 陈鑫\*, 杨凯, 周珊珊, 白青飞 (华北电力大学 新能源系统国家重点实验室, 河北 保定 071003)

**摘要:**随着配网中可再生能源渗透比例的不断提高,传统集中式调度面临潮流计算压力大、可再生 能源消纳困难等问题,难以保证系统的运行品质。提出一种含多微网的主动配网分布式双层优化调 度方法。上层建立以区域配网网损最小为目标的优化模型,运用二阶维松弛方法以及同步型 ADMM(alternating direction method of multipliers)算法求解各微网联络线调度指令;下层考虑碳捕获 (carbon capture and storage, CCS)、电转气(power-to-gas, P2G)等能源耦合设备与柔性负荷协调调度, 建立以提高经济性、降低弃风弃光、保证环保性等为目标的下层优化模型。基于实时数据库建立仿 真验证平台,以IEEE33节点系统为例,验证了所提方法的有效性。

关键词: 微电网群; 同步型 ADMM; 二阶锥松弛; CCS; P2G

中图分类号: TP319.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X (2022) 11-2323-14 DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0573

#### Bilevel Distributed Optimal Dispatch of Active Distribution Network with Multi-microgrids

Lin Yongjun, Chen Xin<sup>\*</sup>, Yang Kai, Zhou Shanshan, Bai Qingfei

(State Key laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: With continuous increase of the penetration proportion of renewable energy in the distribution network, the traditional centralized dispatching is facing problems such as high pressure of power flow calculation and difficulty in recycling renewable energy, which makes it difficult to guarantee the operation quality of the system. A *distributed optimal two-layer scheduling method for active distribution networks with multiple micro-grids is proposed. The upper-level aims to minimize the loss of regional distribution network, the second-order conical relaxation method and synchronous ADMM (alternating direction method of multipliers) algorithm are used to solve the scheduling instructions of the micro-grid connection lines. At lower-level, the coordinated scheduling of energy coupling devices such as carbon capture and storage (CCS), power-to-gas (P2G) and flexible loads are considered, and the optimization model at lower-level is established to improve economy, reduce wind and light abandonment, and ensure environmental protection, etc. A simulation platform is established based on real-time databaseto verify the effectiveness of the proposed method by taking the IEEE33 node system as an example.* 

**Keywords:** microgrid group; synchronous alternating direction method of multipliers (ADMM); second-order cone relaxation; carbon capture and storage (CCS); power-to-gas (P2G)

# 引言

随着风机、光伏等可再生电源在中低压配网中

渗透比率的不断提高,其间歇性和随机性的特点可 能会导致配网电压水平升高,短路电流增大,供电 可靠性降低、电能质量恶化,这使得传统配电网运

收稿日期: 2021-06-21 修回日期: 2021-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(52077078)

第一作者:林永君(1965-),男,博士,教授,研究方向为先进控制理论在自动化装置中的实现与应用。E-mail: lin3172@163.com 通讯作者:陈鑫(1997-),男,硕士生,研究方向为微电网运行优化调度。E-mail: 1257857311@qq.com

第 34 卷第 11 期	系统仿真学报	Vol. 34 No. 11
2022 年 11 月	Journal of System Simulation	Nov. 2022

行面临诸多挑战<sup>[1]</sup>。为应对以上问题,传统配电网 逐步向主动配电(active distribution network, ADN) 转变, ADN 可通过使用灵活的网络拓扑结构来管 理潮流,以便对局部的分布式电源(distributed generation, DG)进行主动控制和管理<sup>[2]</sup>。现如今多 微网系统可能共存于一个区域配电网,包含多微网 能量互济与协调控制的微电网技术引起广泛的关 注<sup>[3]</sup>。通过网络通信、智能测量、数据处理、智能 决策等先进技术手段,将多个微电网通过区域自治 消纳和广域对等互联,可最大程度适应分布式能源 接入的动态特性,分散协同的管理调度可实现系统 供需平衡,以提高能源利用效率<sup>[4]</sup>。

主动配电网的控制方法可分为集中式控制和 分布式控制两大类, 文献[5]采用集中式控制方法, 利用随机分布函数模拟能源的不确定性,得到微电 网之间的能量流动最优经济运行结果,并且考虑了 误差存在情况下对调度结果的影响。文献[6]建立了 微电网群日前能量调度策略,将管理系统分为内外 两层,内层微电网剩余或不足电量作为外层微电网 的电源或符合,与传统能源管理策略相比,分层管 理模式下的微电网群运行成本更低。在考虑与主动 配电网交互的双层模型研究上,文献[7]采用两层嵌 套的优化调度方法进行求解,内层以电压波动最小 为目标,外层以微电网最小成本为目标以提高系统 可靠性,降低弃风弃光率。文献[8]计及可转移负荷 以及可再生能源的不确定性,一个场景下总运行成 本削减为最大目标,构建优化调度模型。上述研究 均针对集中控制系统,通过制定全局优化目标,统 一调配可控资源可以达到良好的控制效果,但中央 控制器一旦故障,控制系统便会崩溃。为此通常将 系统分布式进行控制。文献[9]分析了微电网群区域 自治能力,并利用鲁棒机会约束将其引入到调度计 划中,提出一种考虑区域自治能力的主动配电网优 化调度模型。文献[10]提出一种微电网群双层优化 方法,在上层考虑微电网群的经济性并基于交替乘 子法协调各微网间的电能交互,下层协调微电网内 各可控源出力。文献[11]针对多个自治微电网互联 合作运行时,由于分布式电池储能的充放电损耗与 线路损耗所造成的系统高运行成本问题,提出一种 以经济性为目标的分布式储能控制策略。文献[12] 针对孤岛型微电网的实时功率分配问题,运用多智 能体一致性理论提出实时协同功率表分配的框架; 以各微电网的调节成本作为一致性状态变量设计 一致性功率分配算法,使得各微电网共同承担微电 网群系统的功率不平衡量,从而达到降低调节成本 的目的。文献[13]基于分区凸优化思想,提出一种 主动配电网分布式无功优化方法。

上述文献中有关多微网的分布式优化的研究 缺少对潮流问题的考虑,有些潮流问题简化过于简 单也多为集中式优化,这种方式给中央控制器带来 巨大计算压力,使得潮流求解困难。在多微网分层 优化的研究中,缺少对单一微网内的多能源耦合设 备的考虑,为此本文提出一种主动配电网的双层分 布式优化调度方法;利用二阶锥规划建立潮流约 束,并基于分区思想将配网进行分区处理,采用同 步型交替反向乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM)求解各子区域的最优潮流, 从而有效缓解了上层的计算压力。基于上层求解结 果以确定微网节点联络线功率,在下层微网内充分 考虑能源耦合设备以及柔性负荷,同时为响应"碳 达峰"减少碳排放指标,在微网内设置碳捕获与电 转气机组。通过对微网内各资源的合理调度在满足 上层最优潮流的基础上,可有效提高微网系统运行 的经济性,减少弃风弃光量,从而提高微网系统的 运行品质;在算例验证阶段,基于实时数据库搭建 相关实验平台,实现了对仿真结果的直观展示。

# 含多微网的主动配电网分布式双 层优化框架

双层优化广泛应用于复杂模型的求解,双层优 化问题包含两级优化任务,其中一个优化任务嵌套 在另一个优化任务中,外部优化问题通常被称作领 导者(上层)优化问题,内部优化问题被称为追随者 (下层)优化问题,两个层次有各自的目标和约束以

第 34 卷第 11 期		Vol. 34 No. 11
2022年11月	林永君, 等: 含多微网的主动配电网双层分布式优化调度	Nov. 2022

及决策变量<sup>[14]</sup>。本文借鉴双层优化理论,针对主动 配电网(active distribution network, ADN)中并入多 微网系统分上下层进行研究,以区域 ADN 系统最 优潮流为目标,考虑相邻分区间的耦合,基于文献 [7,9]利用二阶锥松弛技术将非线性非凸模型转换 为凸可行域的二阶锥规划模型;将并入的微网视为 电源,并基于分区协调的思想利用同步型 ADMM 算法对 ADN 系统进行分区潮流求解,以求得上层 ADN 的最优潮流;在下层各微网内基于上层优化 求得的联络线功率,对下层多类聚合柔性负荷以及 可控能源耦合设备出力进行调控以实现微网系统 运行最经济、弃风弃光量最小、碳排放量最低等目 标,其优化框架如图1所示,分布式双层模型结构 如图2所示。



图 1 含多微网的主动配电网分布式双层优化框架





Fig. 2 Bilevel optimization model structure

http://www.china-simulation.com

• 2325 •

第 34 卷第 11 期	系统仿真学报	Vol. 34 No. 11
2022年11月	Journal of System Simulation	Nov. 2022

# 2 上层优化调度模型

### 2.1 目标函数

$$f = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{N} I_{ij}^{2}(t) r_{ij}$$
(1)

式中: *r<sub>ij</sub>*为节点*i* 到节点*j* 的线路电阻; *t* 为调度时段, 调度间隔取 1 h, 一天共 24 h; *N* 为主动配网支路数目。

### 2.2 约束条件

#### 2.2.1 支路潮流约束

本文基于文献[9]中二阶锥松弛的方法,其具体 约束条件为

$$\sum_{k\in\delta(j)} P_{jk}(t) - \sum_{k\in\delta(j)} \left( P_{ij}(t) - I_{ij}^{2}(t)r_{ij} \right) = P_{j}^{MG}(t) + P_{j}^{G}(t) - P_{j}^{L}(t) \qquad (2)$$

$$\sum_{k\in\delta(j)} O_{k}(t) - \sum_{k\in\delta(j)} \left( O_{k}(t) - I_{j}^{2}(t)r_{j} \right) = 0$$

$$\sum_{k\in\delta(j)} Q_{jk}(t) - \sum_{k\in\pi(j)} (Q_{ij}(t) - I_{ij}^{2}(t)x_{ij}) = Q_{i}^{G}(t) - Q_{i}^{L}(t)$$
(3)

$$V_{j}^{2}(t) = V_{i}^{2}(t) - 2(P_{ij}(t)r_{ij} + Q_{ij}(t)x_{ij}) + I_{ij}^{2}(t)(r_{ij}^{2} + x_{ij}^{2})$$
(4)

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{ij}(t) \\ 2Q_{ij}(t) \\ I_{ij}^{2}(t) - V_{i}^{2}(t) \end{array} \right\|_{2} \leqslant I_{ij}^{2}(t) + V_{i}^{2}(t)$$
(5)

式中:  $P_{ij}(t)$ 为节点 t 时刻线路 ij 的有功功率;  $r_{ij}$ 为 线路电阻;  $P_{jk}(t)$ 为 t 时刻节点 j 连接的其他线路 的有功输出功率;  $P_{j}^{MG}(t)$ 为 t 时刻节点 j 处微网注 入功率;  $P_{j}^{L}(t)$ 为节点 j 处在 t 时刻的有功负荷;  $\delta(j)$ 为与节点 j 相连接的节点集合;  $P_{j}^{G}(t)$ 为上级 节点注入的有功功率;  $Q_{ij}(t)$ 和  $x_{ij}$ 分别为 t 时刻线 路 ij 无功功率和线路电抗;  $Q_{jk}(t)$ 为t 时刻节点 j连接的其他线路的有功输出功率;  $Q_{j}^{G}(t)$ 为上级节 点注入的无功功率;  $V_{i}(t)$ 和 $V_{j}(t)$ 分别为 t 时刻节 点 i, j的电压幅值。

### 2.2.2 上级电网联络线约束

$$P_{\min}^{\rm G} \leqslant P_{\rm up}\left(t\right) \leqslant P_{\max}^{\rm G} \tag{6}$$

$$Q_{\min}^{\rm G} \leq Q_{\rm up}(t) \leq Q_{\max}^{\rm G} \tag{7}$$

式中: Pup(t)、Qup(t)为 t 时刻与上级电网交互节点

用功和无功功率;  $P_{\text{max}}^{\text{G}}$ 、  $P_{\text{min}}^{\text{G}}$ 为有功上下限值;  $O_{\text{max}}^{\text{G}}$ 、  $O_{\text{min}}^{\text{G}}$ 为无功上下限值。

### 2.2.3 网络安全约束

0

$$V_{i,\min}^2 \leq V_i^2(t) \leq V_{i,\max}^2 \tag{8}$$

$$\leq I_{ij}^t(t) \leq I_{ij,\max}^2 \tag{9}$$

式中: *V<sub>i,max</sub>*、*V<sub>i,min</sub>*为节点*i*电压的上下限; *I<sub>ij,max</sub>*为 支路*ij*电流上限。

#### 2.2.4 微网节点联络线约束

在上层优化中将微网节点作为可控源进行处 理优化,根据各微网内的设备容量建立如下微网节 点联络线约束:

$$P_{\mathrm{MG,min}} \leq P_{\mathrm{MG},i}(t) \leq P_{\mathrm{MG,max}} \tag{10}$$

式中:  $P_{MG,i}(t)$  为节点 *i* 微网出力;  $P_{MG,max}$ 、  $P_{MG,min}$ 为微网节点出力上下限。这里假设微网只进行有功 调度,不考虑微网节点内的无功,故将微网节点内 的无功功率视为 0。

因上述模型含有二次项为非线性规划模型,为 此令 $\tilde{I}_{ij}(t) = I_{ij}^2(t) \mathcal{D}\tilde{V}_i(t) = V_i^2(t)$ 将模型转化为线性 凸规划模型,便于算法打包进行求解。

# 3 分布式优化求解

#### 3.1 上层优化问题分解

针对传统集中式控制运行成本高、通信要求 高、可靠性差的问题,基于文献[13]所提出的分区 协调控制的思想,对上层主动配网系统进行分区控 制,将主动配电网分为N个区域,针对区域a,其 相邻区域耦合支路 $e_{ij}$ 的状态变量包括,支路传输 功率 $P_{ij}, Q_{ij}$ 支路两端节点电压 $V_i, V_j$ 。区域耦合 支路的状态为 $X_{a,ij} = \{P_{a,ij}, Q_{a,ij}, V_{a,i}, V_{a,j}\}$ ,为此可优 化问题分解成针对各区域的子问题,分解后的问题 与原问题等价分布式控制模型为

$$\min \sum_{a=1}^{N} \sum_{t \in \theta_{i}} f_{a}(x_{a})$$
s.t.
$$\begin{cases} h_{a}(x_{a}) = 0 \\ g_{a}(x_{a}) \ge 0 \\ X_{a,ij} = X_{b,ij} \end{cases} a \in N$$
(11)

第 34 卷第 11 期 2022 年 11 月

式中:  $f_a(x_a)$ 为子区域目标函数;  $h_a(x_a)$ 为子区域 等式约束;  $g_a(x_a)$ 为子区域不等式约束。

# 3.2 同步型 ADMM 分布式求解

ADMM 算法形式简单、收敛性好、鲁棒性强, 且不要求子优化目标函数严格为凸函数,是近年 来得以广泛应用的分布式数学优化方法<sup>[15]</sup>。由于 上层潮流模型是目标函数可分、边界耦合约束线 性的凸优化模型,同时为了避免次序混乱,决定 采用同步型 ADMM 算法,选取迭代的相邻边界的 平均值作为下一次迭代的参考值<sup>[10,13,16]</sup>。同样基 于文献[13]的分布式求解方法对主区动配网建立 分区优化控制模型,以含算例中相邻耦合区域的 典型配网为例介绍分区方法;分别建立区域 a 和 区域 b 以及区域 c 的优化问题,其目标函数对应 的 拉 格 朗 日 函 数 分 别 为  $L_a(x_a, X_{ka}', \lambda_a')$  和  $L_b(x_b, X_{kb}', \lambda_b')、 L_c(x_c, X_{kc}', \lambda_c')$ 并通过适当的变 化,转化为

$$L_{a}\left(\boldsymbol{x}_{a},\boldsymbol{X}_{Ka}^{t},\boldsymbol{\lambda}_{a}^{t}\right) = f_{a}\left(\boldsymbol{x}_{a}\right) + \frac{\rho}{2} \left\|\boldsymbol{X}_{a} - \boldsymbol{X}_{Ka}^{t} + \boldsymbol{\lambda}_{a}^{t}\right\|_{2}^{2}$$

$$(12)$$

$$L_{b}\left(\boldsymbol{x}_{b},\boldsymbol{X}_{Kb}^{t},\boldsymbol{\lambda}_{b}^{t}\right) = f_{b}\left(\boldsymbol{x}_{b}\right) + \frac{\rho}{2} \left\|\boldsymbol{X}_{b} - \boldsymbol{X}_{Kb}^{t} + \boldsymbol{\lambda}_{b}^{t}\right\|_{2}^{2}$$

$$(13)$$

$$L_{c}\left(\boldsymbol{x}_{c},\boldsymbol{X}_{Kc}^{t},\boldsymbol{\lambda}_{c}^{t}\right) = f_{c}\left(\boldsymbol{x}_{c}\right) + \frac{\rho}{2} \left\|\boldsymbol{X}_{c} - \boldsymbol{X}_{Kc}^{t} + \boldsymbol{\lambda}_{c}^{t}\right\|_{2}^{2}$$

$$(14)$$

式中: t 为迭代次数;  $\lambda_a^t \ \lambda_b^i \ \lambda_c^i$  分别为区域 a、 区域 b 以及区域 c 对偶变量组成的向量;  $\rho$  为 ADMM 算法的罚参数;  $X_{Ka}^i \ X_{Kb}^i \ X_{Kc}^i$  分别为 区域 a、区域 b、区域 c 第 t+1 次迭代的固定参考 值,都取为区域 a 和区域 b,区域 a 和区域 c 第 t次迭代得到的相邻耦合支路状态的平均值,其中区 域 a 与区域 b、c两两耦合:

$$\boldsymbol{X}_{Ka,b}^{t} = \boldsymbol{X}_{Kb}^{t} = \frac{\left(\boldsymbol{X}_{a,b,ij}^{t} + \boldsymbol{X}_{b,ij}^{t}\right)}{2}$$
(15)

$$\boldsymbol{X}_{Ka,c}^{t} = \boldsymbol{X}_{Kc}^{t} = \frac{\left(\boldsymbol{X}_{a,c,mn}^{t} + \boldsymbol{X}_{c,mn}^{t}\right)}{2}$$
(16)

各区域主动配电网的约束条件见式(1)~(10), 主动配电网中各区域的优化问题确定后,各区域控 制器按如下流程进行分布式求解;

在第 t+1次迭代时,主动配电网区域 a 和区域 b 内的控制器并行求解各自的优化问题,并行计算 拉格朗日函数  $L_a(x_a, X_{ka}^t, \lambda_a^t)$ 、 $L_b(x_b, X_{kb}^t, \lambda_b^t)$ 以及  $L_c(x_c, X_{kc}^t, \lambda_c^t)$ 最小的本区域决策变量,同时获得 各区域耦合支路状态  $X_a^{t+1}$ 、 $X_b^{t+1}$ 、 $X_c^{t+1}$ 。

$$x_a^{t+1} = \arg\min L_a\left(x_a, \boldsymbol{X}_{Ka}^t, \boldsymbol{\lambda}_a^t\right)$$
(17)

$$x_b^{t+1} = \arg\min L_b\left(x_b, X_{Kb}^t, \lambda_b^t\right)$$
(18)

$$x_c^{t+1} = \arg\min L_c\left(x_c, \boldsymbol{X}_{Kc}^t, \boldsymbol{\lambda}_c^t\right)$$
(19)

基于区域*a*和区域*b*耦合支路状态,通过式(15) 计算耦合支路 *ij* 状态的平均值;基于区域*a*和区域 *c*耦合支路状态,通过式(16)计算耦合支路 *mn* 状态 的平均值,得 *x<sup>i</sup>*<sub>a</sub>、*x<sup>i</sup>*<sub>b</sub>、*x<sup>i</sup>*<sub>c</sub>并作为下一次迭代的参 考值,并对各区域的对偶变量进行更新:

$$\boldsymbol{\lambda}_{a}^{t+1} = \boldsymbol{\lambda}_{a}^{t} + \left(\boldsymbol{X}_{a}^{t+1} - \boldsymbol{X}_{Ka}^{t+1}\right)$$
(20)

$$\boldsymbol{\lambda}_{b}^{t+1} = \boldsymbol{\lambda}_{b}^{t} + \left(\boldsymbol{X}_{b}^{t+1} - \boldsymbol{X}_{Kb}^{t+1}\right)$$
(21)

$$\boldsymbol{\lambda}_{c}^{t+1} = \boldsymbol{\lambda}_{c}^{t} + \left(\boldsymbol{X}_{c}^{t+1} - \boldsymbol{X}_{Kc}^{t+1}\right)$$
(22)

当边界残差区域零或迭代次数达到设定值,算法结束。边界残差为相邻区域求得耦合支路状态之差的二范数的平方,如式(23)~(24)所示,当迭代满足条件时,跳出迭代:

$$\left\| \boldsymbol{X}_{a,b,ij}^{t+1} - \boldsymbol{X}_{b,ij}^{t+1} \right\|_{2}^{2} \leq \delta$$
(23)

$$\left\|\boldsymbol{X}_{a,c,mn}^{t+1} - \boldsymbol{X}_{c,mn}^{t+1}\right\|_{2}^{2} \leq \delta$$
(24)

至此,算法结束。算法流程如图3所示。





第 34 卷第 11 期	系统仿真学报	Vol. 34 No. 11
2022年11月	Journal of System Simulation	Nov. 2022

# 4 下层优化模型

下层优化采用集中式优化策略,基于上层优化 得到的各微网节点联络线功率,合理安排各微网资 源出力,以实现微网内优化目标,在微网内,为响 应"碳达峰,碳中和"的要求,网内设置碳捕集装置 (CCS)以及电转气装置(P2G),以实现由 CO2的动态 利用,使碳元素一直处于 CO2-CH4-CO2 的循环利 用转态。同时协调微网内的各柔性负荷,如电动汽 车、空调等资源,通过对网内资源的合理调度以提 高系统的可靠性,节约系统运行成本。下层所涉及 决策变量包含 CCS、P2G 微燃机以及电锅炉等耦 合设备参数,可再生能源消纳功率,以及电动汽车、 空调等柔性负荷设备功率,储能系统电量及功率。

### 4.1 目标函数

$$f_{1} = \sum_{t \in \theta_{T}} \left( c_{\text{PV}} P_{\text{PV}}\left(t\right) + c_{\text{WT}} P_{\text{WT}}\left(t\right) + c_{\text{MT}} P_{\text{MT}}\left(t\right) + c_{\text{si}} \left| P_{\text{si}}\left(t\right) \right| + G_{\text{gird}}\left(t\right) Q_{\text{gird}}\left(t\right) + G_{\text{gird}}^{\text{CO}_{2}}\left(t\right) Q_{\text{gird}}^{\text{CO}_{2}}\left(t\right) \right) \Delta T$$

$$(25)$$

$$f_{2} = \sum_{t \in \theta_{T}} \begin{pmatrix} \left( P_{\text{PV}}(t) - P_{\text{PV,cur}}(t) \right) - \\ \left( P_{\text{WT}}(t) - P_{\text{WT,cur}}(t) \right) \end{pmatrix}$$
(26)

$$f_{3} = \gamma \left( \sum_{t \in \theta_{T}} \left( Q_{\text{MT}}^{\text{CO}_{2}}\left(t\right) - Q_{\text{CCS}}^{\text{CO}_{2}}\left(t\right) \right) - C_{\text{f}} \right)$$
(27)

式中:  $f_1$ 为经济性目标函数;  $c_{PV}$ 、 $c_{WT}$ 、 $c_{MT}$ 、 $c_{si}$ 分别为光伏、风机、微型燃气轮机、储能系统发电 与折损成本系数;  $G_{gird}(t)$ 为向上层气网购买天然气 价格;  $G_{gird}^{CO_2}(t)$ 为向上层气网购 CO<sub>2</sub> 价格;  $f_2$ 为弃 风弃光量最小目标函数;  $P_{PV}(t)$ 、 $P_{WT}(t)$ 为光伏、 风机的预测出力值;  $P_{PV,cur}(t)$ 、 $P_{WT,cur}(t)$ 为光伏、 风机实际消纳值;  $f_3$ 为碳排放量最小目标函数  $Q_{MT}^{CO_2}(t)$ 为微型燃气轮机产生二氧化碳量;  $Q_{CCS}^{CO_2}(t)$ 为由 CCS 机组捕获的二氧化碳;  $C_f$ 为最高排放标 准;  $\gamma$ 为超额排放惩罚系数。

## 4.2 CCS 与 P2G 耦合模型

本文利用 CCS 机组捕获微型燃气轮机发电过程中所产生的 CO<sub>2</sub>,并将捕集到的 CO<sub>2</sub> 供应给 P2G

机组, P2G 通过电解水生成氢气, 氢气与 CO<sub>2</sub> 反 应可生成甲烷, 并最终合成天然气, 所产生的天然 气同时可提供给微型燃气轮机发电, 通过这种方式 可以减少 CO<sub>2</sub> 的排放, 基于文献[17-20]可将 CCS 和 P2G 的耦合过程描述为

$$Q_{\rm CO_2}^{\rm CCS}(t) = \eta_{\rm CCS} Q_{\rm CO_2}^{\rm MT}(t)$$
(28)

$$Q_{\rm CO_2}^{\rm CCS}(t) = Q_{\rm CO_2}^{\rm P2G}(t) + Q_{\rm CO_2}^{\rm f}(t)$$
(29)

$$P_{\rm CO_2}^{\rm CCS}(t) = \lambda_{\rm CCS} Q_{\rm CO_2}^{\rm CCS}(t)$$
(30)

$$P_{\rm CCS}(t) = P_{\rm CO_2}^{\rm CCS}(t) + P_{\rm f}^{\rm CCS}(t)$$
(31)

$$F_{\text{gas}}^{\text{P2G}} = \omega \left( Q_{\text{CO}_2}^{\text{P2G}}(t) + Q_{\text{CO}_2}^{\text{gird}}(t) \right)$$
(32)

$$P_{\rm P2G}\left(t\right) = \beta Q_{\rm CO_2}^{\rm P2G}\left(t\right) \tag{33}$$

$$P_{\text{e, min}}^{\text{P2G}} \leq P_{\text{P2G}}\left(t\right) \leq P_{\text{e, max}}^{\text{P2G}} \tag{34}$$

$$\Delta P_{\mathrm{e,min}}^{\mathrm{P2G}} \leq P_{\mathrm{P2G}}\left(t+1\right) - P_{\mathrm{P2G}}\left(t\right) \leq \Delta P_{\mathrm{e,max}}^{\mathrm{P2G}} \tag{35}$$

其中,式(28)描述 CO<sub>2</sub> 捕获量, $Q_{CO_2}^{MT}(t)$ 分别 为微型燃气轮机工作时 CO<sub>2</sub> 排放量, $\eta_{CCS}$  为捕获效 率, $Q_{CO_2}^{CCS}(t)$ 为 CO<sub>2</sub> 的捕获量。式(29)为捕获到的 CO<sub>2</sub> 一部分用于封存  $Q_{CO_2}^{f}(t)$ ,另一部分用于供给 P2G 制甲烷 $Q_{CO_2}^{P2G}(t)$ 。式(30)~(31)为碳捕获过程, 式(32)~(33)为 P2G 工作过程,碳捕集装置消耗的电 功率  $P_{CO_2}^{CCS}(t)$ ,由捕集效率 $\lambda_{CCS}$ 和  $Q_{CO_2}^{CCS}(t)$ 共同决 定。P2G 合成的甲烷量与所消耗的 CO<sub>2</sub>与反应的 平衡系数  $\overline{o}$  成正比关系,其中制甲烷所消耗的 CO<sub>2</sub> 量为 CCS 机组捕获的 CO<sub>2</sub>和从电网购买的  $Q_{CO_2}^{eid}(t)$ 。式(33)表示 P2G 机组消耗功率, $\beta$ 为 CO<sub>2</sub> 处理效率。式(34)~(35)为 P2G 机组出力以及爬坡约 束, $P_{e,max}^{P2G}$ 为 P2G 机组出力上下限, $\Delta P_{e,max}^{P2G}$ 、  $\Delta P_{e,min}^{P2G}$ 为 P2G 机组爬坡上下限。

### 4.3 柔性负荷模型

在子微网内考虑聚合柔性负荷的协调调度,所 考虑柔性负荷包括聚合空调以及电动汽车负荷,在 电动汽车聚合时考虑出行规律的随机性,基于文献 [17]利用蒙特卡罗抽样依次对出行时间、返回时间、 行驶里程等3个函数进行抽样以模拟电动汽车随机 出行规律,下面针对第*i*辆电动汽车建立模型。其 中,式(36)~(39)为第*i*辆电动汽车约束条件,式(40) 为聚合后电动汽车功率。

$$P_{\rm EV}^{\rm min} \leqslant P_{\rm EV,i}(t) \leqslant P_{\rm EV}^{\rm max}$$
(36)

$$0.95 \times C_i \leq SOC_{\text{EV},i}^{\text{last}} \leq C_i \tag{37}$$

$$SOC_{EVmin} \leq SOC_{EV}(t) \leq SOC_{EVmax}$$
 (38)  
 $SOC_{EV,i}(t) = SOC_{EV,i}(t-1) +$ 

$$\left(\frac{\eta_{\text{EV}} + \frac{1}{\eta_{\text{Dis,EV}}}}{2} P_{EV,i}(t) + \frac{\eta_{\text{EV}} - \frac{1}{\eta_{\text{Dis,EV}}}}{2} |P_{\text{EV},i}(t)|\right) (39)$$

$$P_{\text{EV,sum}}\left(t\right) = \sum_{i=1}^{N} P_{\text{EV},i}\left(t\right)$$
(40)

式中:  $SOC_{EV,i}(t)$ 为 t 时段第 i 辆车的电池电量约 束;  $SOC_{EV,i}$ 为第 i 辆车出行时刻的最终电量约束;  $C_i$ 为第 i 辆车的电池容量;  $\eta_{EV} \setminus \eta_{Dis,EV}$ 为电动汽车 充放电效率。

由于单一空调的可调度容量较小,为此这里采 用一阶 ETP 空调聚合模型来描述聚合空调特性, 聚合模型为

$$T_{\text{VESS}}(t+1) = T_{\text{VESS}}(t) + \frac{\Delta T}{\rho C V} \left( C_{\text{VESS}}(t) + H_{\text{MT}}(t) + A_{\text{W}i} \alpha I' - (A_{\text{W}i} k_{\text{W}i} + A_{\text{W}a} k_{\text{W}a}) (T_{\text{VESS}}(t) - T_{\text{OUT}}(t)) \right)$$

$$(41)$$

$$0 \leq P_{\text{VESS}}(t) \leq P_{\text{VESS, max}} \tag{42}$$

$$C_{\text{VESS}}(t) = COP_{\text{VESS}}P_{\text{VESS}}(t)$$
(43)

$$T_{\min} \leqslant T_{\text{VESS}}(t) \leqslant T_{\max} \tag{44}$$

式中:基于热功率平衡方程,引入住宅建筑结构参数,可得式(41) ETP 热平衡条件, $\rho$ 、C、V别为室内空气的密度、空气的热容、室内空气总体积;  $A_{wa}$ 、 $A_{wi}$ 分别为住宅建筑外墙及外窗总面积, $k_{wi}$ 、 $k_{wa}$ 分别为住宅建筑外墙和外窗传热系数;I'为t时段水平面太阳辐射强度; $\alpha$ 为住宅建筑遮阳系数;  $C_{vess}(t)$ 为空调供冷/热负荷; $COP_{vess}$ 为空调的能效比; $H_{MI}(t)$ 为微型燃气轮机工作产热量。

### 4.4 储能系统模型

$$P_{\rm si}^{\rm min} \leqslant P_{\rm si}\left(t\right) \leqslant P_{\rm si}^{\rm max} \tag{45}$$

$$SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max}$$
 (46)

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \left(\frac{\eta_{c} + \frac{1}{\eta_{disc}}}{2} P_{si}(t) + \frac{\eta_{c} - \frac{1}{\eta_{disc}}}{2} |P_{si}(t)|\right)$$
(47)

式中: *P*<sub>si</sub><sup>max</sup> 、*P*<sub>si</sub><sup>min</sup> 为储能系统充放电功率上下限; *η*<sub>c</sub>、*η*<sub>disc</sub> 为储能系统充放电效率; *SOC*<sub>max</sub> 、*SOC*<sub>min</sub> 为储能系统电量上下限。调度前后电量相等约束为 *SOC*(0) = *SOC*(24) (48)

## 4.5 微燃机模型

为提高微网系统内供电的可靠性,在子微网内 配置微型燃气轮机,其模型为

$$P_{\rm MT}(t) = F_{\rm gas}(t) \times L_{\rm HVNG} \times \eta_{\rm MT}$$
(49)

$$H_{\rm MT}(t) = P_{\rm MT}(t) \times \frac{1 - \eta_{\rm MT} - \eta_{\rm L}}{\eta_{\rm MT}}$$
(50)

式中:  $P_{MT}(t)$ 为微型燃气轮机出力;  $F_{gas}(t)$ 为所消 耗的天然气量;  $L_{HVNG}$ 为天然气热值;  $\eta_{MT}$ 为微型 燃气轮机发电效率;  $H_{MT}(t)$ 为微型燃气轮机发电 所伴有的产热量;  $\eta_L$ 为其散热损失率。

### 4.6 约束条件

电功率平衡条件为  

$$P_{MGi}(t) + P_{PV, cur}(t) + P_{WT, cur}(t) +$$
  
 $P_{MT}(t) = P_{si}(t) + P_{load}(t) + P_{P2G}(t) +$   
 $P_{CCS}(t) + P_{VESS}(t) + P_{EV,sum}(t)$  (51)

式中: P<sub>MGi</sub>(t)为上层优化联络线功率。

气体平衡条件为  

$$Q_{\text{gird}}(t) + F_{\text{gas}}^{\text{P2G}}(t) + Q_{ij, \text{ex}}(t) =$$
  
 $Q_{\text{load}}(t) + F_{\text{gas}}(t)$  (52)

$$Q_{\text{gird}}^{\min} \leq Q_{\text{gird}}(t) \leq Q_{\text{gird}}^{\max}$$
 (53)

式中: $Q_{gird}(t)$ 为t时刻从气网购气量, $Q_{gird}^{max}$ 、 $Q_{gird}^{min}$ 为购气量上下限

光伏和风机等式为

$$P_{\rm PV,e}(t) + P_{\rm PV,cur}(t) = P_{\rm PV}(t)$$
 (54)

$$P_{\rm WT,e}(t) + P_{\rm WT,cur}(t) = P_{\rm WT}(t)$$
(55)

式中:  $P_{PV,cur}(t)$ 、 $P_{WT,cur}(t)$ 为光伏和风机各时段实际消纳;  $P_{PV}(t)$ 、 $P_{WT}(t)$ 为光伏和风机各时段的预

第 34 卷第 11 期	系统仿真学报	Vol. 34 No. 11
2022年11月	Journal of System Simulation	Nov. 2022

测出力情况。

本文所构建的微网内优化模型包含经济性、新 能源消纳量,二氧化碳排放量等3个目标函数,是 典型的多目标求解问题。本文参考文献[18]利用改 进熵权法进行多目标问题的转化,将多目标问题转 化为单目标问题进行求解。

# 5 仿真平台搭建

为更好地展示上述双层分布式优化调度结果, 本文基于实时数据库搭建实验仿真分析平台,通过 可视化界面对结果进行直观展示,平台架构见图4。



Fig. 4 Overall architecture of the platform

图 4 中,所建立平台以实时数据库为桥梁,为 电网实时仿真模型、能量管理系统和人机交互界面 之间铺设双向数据通路,平台从结构上分为底层实时电网仿真模型、实时数据库和上层能量管理3个部分。底层实时仿真模型基于 PXI 电网实时仿真器进行实时仿真,并基于配套 Starsim HIL 软件将配网系统 Simulink 模型下载到 CPU上进行实时仿真,实时仿真模型与实时数据库基于 Modbus 进行数据交互;上层将所验证能量管理算法生成动态链接库,基于 C#语言编写计算引擎算法可实现能量管理算法与实时数据库的通信,并基于实时数据库配套的可视化界面对数据结果进行直观展示。

# 6 算例分析

本文上层基于 IEEE33 标准节点配电网系统进 行算例验证,将 IEEE33 节点系统分为 3 个区域, 分别为区域1 {1~6, 18~24, 33}, 区域2 {7~17}, 区域3 {25~32}; 其中各区域内均设有一个微网, 微网 MG1 设置在区域 1 节点 3 处, 微网 MG2 设 置在区域 2 节点 14 处, 微网 MG3 设置在节点 28 处,设首节点 33 为与上层电网交互节点,如图 5 所示,基于标准配网线路损耗设置线路阻抗,并基 于动态负荷模拟各配网节点负荷,所建立底层配网 Simulink 模型见附录所示。在计算最优潮流中电压 基准值取 12.66 kV, 基准功率取 100 MVA, 假设 该主动配网的各有功、无功负荷均满足相应规律, 以典型日负荷曲线,乘以相应倍数得到各节点 24 时刻的负荷值,如图 6,7 所示,该用电负荷曲线 存在两处用电峰值,集中在 11:00 左右和 20:00 左 右, 夜间负荷则处于低谷时段。





http://www.china-simulation.com

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol34/iss11/2 DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0573



图 7 除微网节点外各节点无功负荷 Fig. 7 Power load of every node except microgrid node

在上层配网层优化求解中,基于式(2)~(10)建 立潮流模型,上层以配网网损最小为目标,应用同 步型 ADMM 算法对其进行分布式求解,其中区域 1 与区域 2 耦合支路为 6~7,区域 1 与区域 3 的耦 合支路为 5~25,其中,区域 1 的耦合状态变量为  $X_a = \{P_{a,67}, Q_{a,67}, V_{a,6}, V_{a,7}, P_{a,5,25}, Q_{a,5,25}, V_{a,5}, V_{a,25}\}, 区$  $域 2 的耦合状态变量为 <math>X_b = \{P_{b,67}, Q_{b,67}, V_{b,6}, V_{b,7}\},$ 区域 3 的耦合状态变量  $X_c = \{P_{c,5,25}, Q_{c,5,25}, V_{c,55}, V_{c,25}\}$ 基于式(15)~(24)应用同步型 ADMM 进行分布式求 解,残差收敛结果如图 8 所示。





http://www.china-simulation.com

第 34 卷第 11 期	系统仿真学报	Vol. 34 No. 11
2022 年 11 月	Journal of System Simulation	Nov. 2022

图 8 为分区优化各区域配网残差收敛过程,由 上图可知在经过一百次迭代后各区域的残差不断 接近于零,这使得区域耦合变量无限接近,由此说 明分解后的各区域所得最优解,与集中优化基本无 差,即整个配网系统最优解,从而验证了所采用分 布式求解算法的有效性与系统分区的有效性,实现 将原集中式优化转为分布式优化,大大降低了集中 控制器的计算压力,下面对各分区结果进行分析, 仿真结果见图 9。



图 9 为区域 1 与区域 2 耦合变量图,耦合区域 变量中线路有功、无功与各时段的负荷成正比关 系,即在负荷峰值时刻对应着线路损耗的峰值时 刻;耦合节点电压,则呈现相反趋势,在负荷峰值 时刻对应着耦合节点的低谷时刻,区域 1 与区域 3 同样呈现上述关系限于篇幅不再赘述。在考虑配网 中微网可主动参与上层配网优化的前提下,各微网 节点与整体配网节点负荷变化趋势相反见图 10 所 示,如配网系统在 12:00 和 20:00 时刻对应两处负 荷峰值,与之对应节点微网在这两时刻达到最大出 力峰值,以减小系统网损,各微网出力与负荷变化 大小刚好成反比。本文对比了各节点微网参与上层 调度与未参与调度系统各时段损耗情况,负荷峰值 时刻对应调度前与调度后线损差最大时刻,在 12:00 和 20:00 可减少线损达 87.1 kW 与 75.06 kW, 通过上层对个微网的有效调度可以明显减少线路 损耗,使上层系统满足最优潮流。基于所建立平台, 将各微网出力,以及各节点负荷数据下控至底层模 型,可对上层能量管理算法进行实时监测与展示, 上层迭代求解可视化界面可见图 11。



图 10 微网节点联络线出力情况 Fig. 10 Output of micro-network tie line



图 11 上层能量管理界面 Fig. 11 Upper energy management interface

• 2332 •

第 34 卷第 11 期 2022 年 11 月

基于第 5 节介绍的平台架构搭建相关仿真验 证平台可将结果进行直观展示;所采用分区计算各 微网节点最优潮流与传统集中式计算所得功率基 本无异,从而验证了本文所采用的分区优化算法在 保证计算结果准确性的基础上,可以有效缓解上层 集中控制器的计算压力。

基于上层优所求得各区域节点微网出力功率, 结合式(51)~(52)功率平衡条件,在下层微网内通过 合理调控能源耦合设备与柔性负荷在保证上层微 网节点出力的情况下,以节点微网运行经济性、弃 风弃光最小、碳排放量最小建立多目标函数,利用 改进熵权法求解各目标的权重系数,将多目标问题 转化为单目标问题以得综合最优解。在各微网内利 用场景分析法生成各区域内的典型场景集,其中, 假设3个区域各时段的天然气价格一致,3个微网 中的电动汽车出行规律均按商业区函数进行抽样, 限于篇幅,以区域1中MG1为例进行分析,其中 MG1中的各设备参数见表1,仿真结果见图12。

Table 1	MG1 equipment parameters	
设备	装机容量	设备功率/kW
风力	2 160 kW	
光伏	1 500 kW	
微燃机	600 kW	600
P2G 机组	500 kW	500
电储能	750 kW∙h	80
单台电动汽车	50 kW·h	20

表1 MG1 设备参数





基于图 12 中 MG1 日前预测风机功率、光伏功 率、负荷功率以及电价曲线,对所建立目标进行相 应求解,可得图 13 能源耦合设备与柔性负荷协调 调度结果与图 14 为聚合柔性负荷协调调度结果。







由图 13 可以看出,风机和光伏实际消纳量基 本维持在图 12 预测出力上限,当可再生能源发电 有剩余时,储能系统在 02:00—08:00 时段为消纳剩 余可在生能源,一直处于充电状态。图 14 中聚合 空调负荷在此时段维持在最大出力状态,空调将作 为虚拟储能进行充电,使室内温度维持在设定值上 限 25 ℃左右;聚合电动汽车由于抽样商业区函数, 此时电动汽车陆续到达接受调度,其在到达时刻陆 续接入充电,见 04:00—08:00 时段阶梯充电曲线, 在 09:00 时刻风光出力不足以满足负荷需求,此时 由于天然气价格较贵,图 14 中聚合电动汽车参与 放电,空调作为虚拟储能设备进行放电,以满足系

第 34 卷第 11 期	系统仿真学报	Vol. 34 No. 11
2022年11月	Journal of System Simulation	Nov. 2022

统运行的经济性; 17:00—20:00 此时风光出力与负 荷差距较大,为负荷峰值时段,此时图 13 中微型 燃气轮机作为备用电源出力,储能系统参与放电, 图 14 中聚合电动汽车在此时段同样响应放电,空 调作为虚拟储能设备将温度维持在最低限值,以维 持系统运行的经济性,由于环保性目标函数的设置, 此时 P2G 机组与 CCS 机组出力以满足环保性的要求,见图 13 中 17:00—21:00 时段。通过求解 MG1 优化问题可得,MG1 在此综合目标下运行成本为 3 587.5 元,光伏风机全天弃风弃光为 1 639.5 kW。在下层将算例仿真结果基于可视化界面进行展示,图 15 为下层能量管理界面。



图 15 下层能量管理界面 Fig. 15 Lower energy management interface

# 7 结论

本文为解决含高比例可再生能源配电网集中 式调度方法的缺陷,缓解集中优化控制器的计算压 力提出了一种含多微网的主动配电网双层分布式 优化调度方法。在上层,将上层配网进行分区处理, 以配网中线路网损最小为目标,优化各微网节点出 力,有效缓解了上层潮流的计算压力;在下层,依 据上层的优化结果对微网内的能源耦合设备和柔 性负荷进行合理调度,在提升系统运行的经济性的 同时可减少弃风弃光现象,从而保证了系统的运行 品质。研究结论如下:

(1)在上层,通过对微网节点联络线出力的合 理优化,可以有效降低主动配网系统网损,提高配 网运行的稳定性,减少可在生能源出力不确定性对 配网带来的影响。

(2)在下层,通过对多类可调度资源的协调调度,可降低弃风弃光量,提高微网系统运行的经济性与环保性。其中,在微网中设置相应的碳捕集装

置,可以在减少二氧化碳排放的同时提供天然气, 有助于"碳达峰,碳中和"目标的实现。

(3) 在求解方法上,针对上层优化模型,采用 同步型 ADMM 算法进行分区协同优化的调度方案 求解,可以大大降低上层集中控制器的计算压力; 针对下层微网优化模型,采用改进熵权法将多目标 优化问题转化为单目标问题,可有效获取各微网运 行综合最优解。

(4) 在算例验证上,提出一种基于实时数据库 仿真验证平台搭建方法,并基于搭建平台对所建立 的底层模型进行实时监测,同时对上层能量管理算 法结果进行更为直观的展示与验证。

### 参考文献:

 赵波,王财胜,周金辉,等.主动配电网现状与未来 发展[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 125-135.
 Zhao Bo, Wang Caisheng, Zhou Jinhui, et al. Present and Future Development Trend of Active Distribution Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 125-135. 第 34 卷第 11 期 2022 年 11 月

- [2] 范明天,张祖平,苏傲雪,等.主动配电系统可行技术的研究[J].中国电机工程学报,2013,33(22):12-18.
  Fan Mingtian, Zhang Zuping, Su Aoxue, et al. Enabling Technologies for Active Distribution Systems[J].
  Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 12-18.
- [3] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国 电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
  Yang Xinfa, Su Jian, Lü Zhipeng, et al. Overview on Micro-grid Technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [4] 吴鸣, 熊雄, 季宇, 等. 微网群技术综述[J]. 储能科学 与技术, 2019, 8(4): 621-628.
  Wu Ming, Xiong Xiong, Ji Yu, et al. Overview on Multi-microgrid Technologies[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(4): 621-628.
- [5] Lee J, Guo J, Choi J K, et al. Distributed Energy Trading in Microgrids: A Game-theoretic Model and its Equilibrium Analysis[J]. Transactions on Industrial Electronics (S1557-9948), 2015, 62(6): 3524-3533.
- [6] Hussaini A, Van-Hai Bui, Hak-Man Kim, et al. A Resilient and Privacy-Preserving Energy Management Strategy for Networked Microgrids[J]. Transactions on Smart Grid (S1949-3061), 2018, 9(3): 2127-2139.
- [7] 叶亮,吕智林,王蒙,等.基于最优潮流的含多微网的主动配电网双层优化调度[J].电力系统保护与控制, 2020,48(18):27-37.

Ye Liang, Lü Zhilin, Wang Meng, et al. Bi-level Programming Optimal Scheduling of ADN with a Multi-microgrid Based on Optimal Power Flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 27-37.

- [8] 姚强, 王昕. 计及可转移负荷的微电网群分布式优化 调度[J]. 电气自动化, 2020, 42(3): 41-44, 98.
  Yao Qiang, Wang Xin. Distributed Optimal Scheduling of Micro-grid Groups Considering Transferable Load[J].
  Power System & Automation, 2020, 42(3): 41-44, 98.
- [9] 孟繁星,孙英云,蒲天骄,等.考虑区域自治能力的 主动配电网分层优化调度[J].电力系统自动化,2018, 42(15):70-76.
  Meng Fanxing, Sun Yingyun, Pu Tianjiao, et al. Hierarchical Optimal Scheduling Model for Active Distribution Netwoork Considering Regional Autonomy Ability[J]. Automoation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 70-76.
- [10] 王皓,艾芊,吴俊宏,等.基于交替方向乘子法的微
   电网群双层分布式调度方法[J].电网技术,2018,42(6):1718-1725.

Wang Hao, Ai Qian, Wu Junhong, et al. Bi-level Distributed Optimization for Microgrid Clusters Based on Alternating Direction Method of Multipliers[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1718-1725.

- [11] 张步云,王晋宁,梁定康,等.采用一致性算法的自 治微电网群分布式储能优化控制策略[J]. 电网技术, 2020,44(5):1705-1713.
  Zhang Buyun, Wang Jinning, Liang Dingkang, et al. Optimization Control Strategy of Distributed Energy Storage in Autonomous Microgrid Cluster on Consensus Algorithm[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1705-1713.
- [12] 杨家豪. 基于一致性算法的孤岛型微电网群实时协同 功率分配[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 8-15, 38.
  Yang Jiahao. Consensus Algorithm Based Real-time Collaborative Power Dispath for Island Multi\_microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 8-15, 38.
- [13] 梁俊文,林舜江,刘明波. 主动配电网分布式无功优 化控制方法[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 230-237.
  Liang Junwen, Lin Shunjiang, Liu Mingbo. A Method for Distributed Optimal Reactive Power Control of Active Distribution Network[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 230-237.
- [14] Ankur Sinha, Pekka Malo Kalyanmoy Deb, et al. A Review on Bilevel Optimization: From Classical to Evolutionary Approaches and Applications[J]. Transactions on Evolutionary Computation (S1941-0026), 2018, 22(2): 276-295.
- [15] 张世旭, 苗世洪, 杨炜晨, 等. 基于自适应步长 ADMM 的配电网分布式鲁棒优化调度策略[J]. 高电 压技术, 2021, 47(1): 81-93.
  Zhang Shixu, Miao Shihong, Yang Weichen, et al. Distributed Robust Optimal Dispatch for Active Distribution Networks Based on Alternative Direction Method of Multipliers with Dynamic Step Size[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 81-93.
- [16] 瞿小斌, 文云峰, 叶希, 等. 基于串行和并行 ADMM 算法的电—气能量流分布式协同优化[J]. 电力系统自 动化, 2017, 41(4): 12-19.
  Qu Xiaobin, Wen Yunfeng, Ye Xi, et al. Distributed Optimization of Electric-Gas Integrated Energy Flow Using Serial and Parallel Iterative Modes for Alternating Direction Method of Multipliers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 12-19.
- [17] 吴凯, 程启明, 李明, 等. 具有 V2G 功能的电动汽车 快速充放电方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2):

第 34 卷第 11 期	系统仿真学报	Vol. 34 No. 11
2022 年 11 月	Journal of System Simulation	Nov. 2022

30-34.

Wu Kai, Cheng Qiming, Li Ming, et al. Fast Charging and Discharging Method for Electric Vehicle with V2G Function[J]. Electric Power Automation Equip, 2014, 34(2): 30-34.

[18] 张兴平, 张又中. 计及 P2G 和 CCS 的园区级电-热-气综合能源系统多目标优化[J]. 电力建设, 2020, 41(12): 90-99.

Zhang Xingping, Zhang Youzhong. Multi-objective Optimization Model for Park-Level Electricity-Heat-Gas Integrated Energy System Considering P2G and CCS[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(12): 90-99.

- [19] Zhang Xingping, Zhang Youzhong. Environmentfriendly and Economical Scheduling Optimization for Integrated Energy System Considering Power-to-gas Technology and Carbon Capture Power Plant[J]. Journal of Cleaner Production (S0959-6526), 2020, 276(10): 123348.
- [20] 林永君,曹翠,李静,等. 计及碳捕获的含 P2G 微电网能量调度模型[J]. 热力发电, 2021, 50(8): 95-103.
  Lin Yongjun, Cao Cui, Li Jing, et al. Study on Energy Scheduling Strategy of Microgrid with P2G Carbon Capture[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(8): 95-103.

http://www.china-simulation.com

• 2336 •