

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240003

# 基于通用化生产流程模型的工业园区微电网能量管理与 生产流程协同优化

张儒峰, 毛天宇, 曲锐, 姜涛, 李雪

(现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 工业园区微电网中动态工业生产流程与其能源供应是紧密联系的, 通过灵活调控其工业生产流程的用能计划, 参与到配电市场中, 可进一步减少其用电成本。提出一种基于通用化生产流程模型的工业园区微电网参与配电市场的能量管理与生产流程协同优化模型与方法, 并引入地源热泵进一步提高能效。首先, 提出了含地源热泵的工业园区微电网的用能架构, 建立了工业生产流程与用能关系的通用模型。其次, 构建了基于通用化生产流程模型的工业园区微电网参与配电市场的双层优化模型, 分别以工业园区微电网能量管理与生产流程调度协同优化模型为上层模型, 以配电市场出清模型为下层模型, 双层模型之间交换功率和电价信息。然后, 基于KKT条件、对偶原理以及大M法将双层模型转化为混合整数二阶锥规划(mixed-integer second-order-cone programming, MISOCP)模型。最后, 以短流程炼钢厂、水泥厂等典型工业园区为例进行算例分析。结果表明所提出方法可对工业生产流程进行有效建模, 并降低工业用户的用能成本, 缓解电网调峰压力。

**关键词:** 工业园区微电网; 能量管理; 通用模型; 配电市场; 协同优化

## Collaborative optimization of energy management and production process of an industrial park microgrid based on a generic production process model

ZHANG Rufeng, MAO Tianyu, QU Rui, JIANG Tao, LI Xue

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology,  
Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China)

**Abstract:** The energy supply of an industrial park microgrid and its dynamic production process are tightly coupled. By flexibly regulating the energy consumption plan and participating in the power distribution market, the cost of purchasing electricity can be further reduced. This paper presents an optimal model and method of energy management and collaborative scheduling of production processes in industrial park microgrids that participate in the power distribution market. The model is based on a generic production process model and incorporates ground source heat pumps to enhance energy efficiency. First, this paper proposes an energy consumption framework for an industrial park microgrid that uses ground source heat pumps. A general model is established to illustrate the relationship between industrial production processes and energy consumption. Then, a bi-level energy management model based on the generic production process model is constructed to participate in the power distribution market. The industrial park microgrid energy management and production process scheduling collaborative optimization model is the upper model, and the distribution market clearing model is the lower model. Power and price information are exchanged between the bi-level models. Next, based on the KKT conditions, duality principle and large M method, the bi-level model is transformed into a mixed-integer second-order cone programming (MISOCP) model. Finally, taking a short-process steel plant, a cement plant and other typical industrial parks as examples for case studies, the results show that the proposed method can effectively model the industrial production process, reduce the energy cost of industrial users, and relieve the pressure of power grid peak regulation.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFB2407300).

**Key words:** industrial park microgrid; energy management; generalized model; distribution market; collaborative optimization

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2023YFB2407300)

## 0 引言

随着新型电力系统的不断发展,分布式电源广泛接入,微电网作为集成分布式电源的重要载体,将成为参与配电侧市场交易的新兴市场主体<sup>[1-2]</sup>。工业园区微电网作为一种典型的微电网形式,具有能源需求大、供能规律明显等特点,用电负荷较为集中,便于统一管理和调度<sup>[3-4]</sup>。工业园区运营商(industrial park operator, IPO)可以在市场环境下,通过调度工业生产流程,实现多种类型负荷需求的优化调控,挖掘和利用工业用户的可调控潜力<sup>[5]</sup>,在降低工业用户用电成本的同时<sup>[6]</sup>,对辅助电网调峰具有积极意义。

为了提升工业园区微电网的能量利用效率,进一步降低其自身的用能成本,已有部分文献提出了有效的能量管理策略。文献[7]提出了基于柔性边界控制的微电网协调调度方法,主要解决储能装置因功率分配导致频繁调节的问题;文献[8]提出了基于交替方向乘子法的园区电-氢-热能源双层能量低碳优化调度方法,用以求解园区内交互能量值,降低园区运行成本;文献[9]提出了一种基于改进模型预测控制的双层多时间尺度微电网优化策略,用于解决园区微电网内分布式电源出力和负荷不确定性的问题;文献[10]提出了一种独立型微电网能量管理策略,以短期功率预测和超短期功率预测为基础,综合考虑了网内分布式电源(distributed generation, DG)和参与需求侧管理负荷的技术经济特性。然而,以上研究主要考虑的是工业园区微电网内部的能量管理,忽略了工业生产流程的可调度性,而对工业园区微电网而言,其内部工业生产流程的调度与其用能负荷相耦合,可进行协调优化调度。

为了灵活调度工业园区微电网内工业生产流程,需要对其工业生产流程进行建模。文献[11]提出了采用状态任务网络的方法,构建轮胎工业生产流程与能源耦合的优化模型;文献[12]提出了基于状态任务网络的方法,将工业负荷的需求响应问题转化为以最小化工业设备能耗成本为目标的优化问题,实现工业园区微电网的生产负荷削减,降低工厂对工业园区微电网的能源需求;文献[13]依据工业生产流程的依赖性,对面粉加工厂的生产流程进行建模;文献[14]针对可调节潜力与生产流程密切相关的短流程钢铁企业,提出一种计及该类用户生产过程的供需互动调度模型,以调动其参与电网调度的积极性,促进可再生能源消纳;文献[15]提出了一种基于后悔度的工业园区微电网随机生产任务和能量管理模型,对电池生产厂的生产流程进行了

建模;文献[16]对大型工业用户生产任务的精确开始和取消时间、任务的部署和执行进行了建模。然而,以上研究所建立的数学模型均面向具体行业,适用场景具有一定的局限性,需要建立工业园区微电网工业生产流程与用能关系的通用模型。同时,工业园区微电网与配电网具有交互影响,工业园区微电网可参与到配电市场中进行最优能量管理。

工业园区微电网通过灵活的能量响应可以参与到配电市场,配电市场在近年来也受到广泛关注,已有专家学者对微电网与配电网的协调优化调度和市场出清进行了研究<sup>[17-26]</sup>。文献[17]提出了考虑电池储能寿命的微电网并网能量管理优化方法;文献[18]提出了一种含多微网的主动配电网(active distribution network, AND)自治优化调度模型和求解方法;文献[19]提出了一种含有共享储能的微电网群分布鲁棒博弈优化调度方法;文献[20]在考虑微电网的碳排放特性和需求响应潜力的基础上,构建多微网端对端能源交易模型实现配电侧供需协同以及确定其最优交易策略;文献[21]提出了基于两层协调控制方法的微电网并网和孤岛运行的能量管理方法;文献[22]构建了园区微电网和主动配电网的协调调度模型;文献[23]建立配电网与多微电网的双层非合作博弈模型,微电网根据配电网制定的边际电价调整其报价策略,通过博弈模型获得纳什均衡解;文献[24]提出一种考虑交互功率控制和双边竞价交易策略的多微电网双层优化调度模型;文献[25]提出了一种新的市场出清模型,通过协调输电网和配电网中的灵活性供应商,促进能源的灵活交易;文献[26]提出了一种新的电力市场出清机制,实现了配电系统和微电网的协调运行。然而,上述文献虽然构建了配电市场出清机制,并对多个主体之间的交互行为进行模拟,但未考虑对工业园区微电网内生产过程进行统一的建模和优化调度,因此,对工业园区微电网的用能优化有进一步挖掘的潜力。

此外,工业园区微电网内部有大量冷能、热能需求,普通空调和锅炉<sup>[27]</sup>等传统设备能源利用率相对较低,而地源热泵系统以大地为冷热源,可利用较少的电力转移提供冷、热能,从而满足负荷需求,通过地热能进行热交换的机制使地源热泵具有更高的转化效率、更少的碳排放量、更低的运行维护成本以及更长的使用寿命<sup>[28]</sup>。然而,以往研究中地源热泵多作为生活住宅区冷热能来源,并未与工业园区微电网内部工业生产流程相联系。因此,本文引入地源热泵系统作为工业园区微电网的冷、热能来源,提高能源利用效率,进一步降低用能成本。

针对上述问题, 本文提出一种基于通用化生产流程模型的工业园区微电网参与配电市场的能量管理与生产流程协同优化模型与方法, 并在工业园区微电网内部使用地源热泵来进一步降低用能成本。首先, 提出了含地源热泵的工业园区微电网的用能架构, 根据工业生产流程的依赖关系, 划分工业生产流程, 建立工业园区微电网工业生产流程与用能关系的通用模型; 其次, 构建了一个基于通用化生产流程模型的工业园区微电网参与配电市场的双层优化模型, 上层模型是工业园区微电网能量管理与生产流程协调优化模型, 下层模型是配电市场出清模型, 双层模型之间交换功率和电价信息; 然后, 基于 KKT 条件、对偶原理以及大 M 法将双层模型转化为混合整数二阶锥规划模型; 最后, 以短流程炼钢厂、水泥厂等典型工业园区为例进行算例分析。算例结果表明, 所构建的模型能够解决多种工业生产流程的复杂建模问题, 实现工业园区微电网的整体优化运行。所提出的方法不仅降低了工业用户的用能成本, 也能有效缓解电网调峰压力。

## 1 工业园区微电网用能特性模型

### 1.1 工业园区微电网参与配电市场的架构

考虑 IPO 和配电系统运营商(distribution system operator, DSO)之间的交互关系, 构建了工业园区微电网参与配电市场的架构, 如图 1 所示。

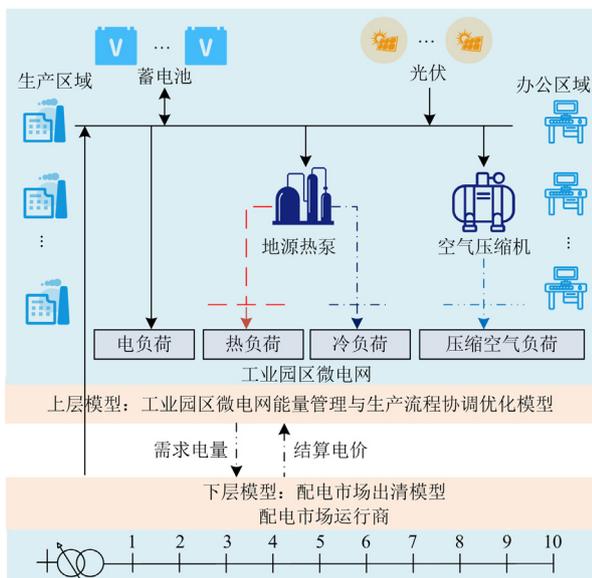


图 1 工业园区微电网与配电系统的双层架构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the bi-level architecture of the industrial park microgrid and power distribution system

在工业园区微电网层面, IPO 作为独立运营商, 参与配电市场的购售电交易, 基于耦合节点处配电

网的节点边际电价(distribution locational marginal price, DLMP), 制定园区内部能量管理和生产流程的调度策略, 以确定从 DSO 的购电量, 从而达到降低用能成本的目的。在配电网层面, DSO 根据 DG 的投标信息、工业园区微电网的用电信息、输电市场结算电价和配电网中各节点的电负荷预测值等信息进行市场出清, 并计算各节点的 DLMP。此外, IPO 在参与配电市场时, 需要向 DSO 提交其电量报价和购电量等投标信息, 这将影响配电市场的出清结果; 相反地, 配电市场出清得到的 DLMP 也会影响工业园区微电网的能量管理策略。

### 1.2 含地源热泵工业园区微电网用能架构

在工业园区微电网中, 工业园区运营商将园区内多种能源整合为一个整体进行能量管理, 保证了电、冷、热和压缩空气负荷的供应。在电能方面, 电能来自于园区内部的光伏发电以及从外部配电网购电, 满足园区整体的用电需求; 在冷热能方面, 本文引入地源热泵系统, 满足园区整体的冷热能需求; 在气能方面, 由空气压缩机提供气负荷。

地源热泵系统以地表能量为热源, 通过少量高品位能量驱动, 实现热能向高密度区域转移, 机组性能系数(coefficient of performance, COP)较高, 能够转移所消耗电能 3 倍以上的热能。系统运行中受环境和地域因素影响小, 且使用寿命长、运行效率高、维护方便、稳定性高, 具有广阔的发展前景, 可为微电网中用户提供高效的冷热能供应<sup>[29]</sup>。因此, 本文引入地源热泵系统, 保证工业园区微电网中冷、热能的高效供应, 降低园区用电成本。

地源热泵运行原理如图 2 所示。以加热循环为例来说明地源热泵系统的工作原理: 热量通过蒸发器传递到制冷剂, 制冷剂蒸汽由可逆阀引导到压缩机, 对制冷剂蒸汽施加压力, 从而提高其温度。热量通过冷凝器传递到房屋, 最后由膨胀阀降低蒸汽

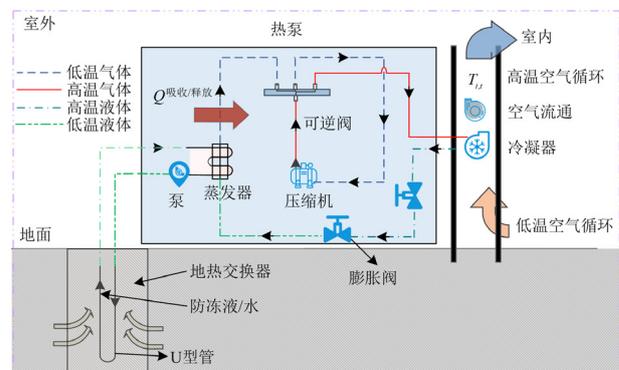


图 2 地源热泵运行原理图

Fig. 2 Operation principle of ground source heat pump

压力, 制冷剂再次变成低温液体。其中, 压缩机由电能来驱动, 通过压缩冷凝液让其在液态和气态之间转化, 冷凝液在液态和气态之间转化会释放、吸收大量热量, 同时蒸发器利用较少的电能与地热换热器交换热量, 从而达到制冷或者采暖的目的。

### 1.3 工业园区微电网生产流程通用化建模

工业园区微电网的能量管理与工业生产流程动态耦合, 因此, 可以对工业园区微电网的生产任务和能量管理进行协同优化管理。本节对工业园区微电网的生产流程进行通用化建模, 其中, 可调控生产流程包括连续流程、离散流程、顺序流程、互锁流程以及并行流程, 对应的时变能源需求包括电力、热能、冷能和压缩空气能等, 能源需求随生产任务调整而改变, 可基于市场电价对生产流程和能量管理进行协调优化调节, 从而降低 IPO 运营成本。

工业生产流程是多输入、多输出、多区间系统, 可由式(1)表示。对于每个工业生产流程  $y$ , 可以定义一个矩阵  $R_y$ , 即每个工业生产流程的生产效率。

$$\begin{bmatrix} o_{1,y,t}^{\text{out}} \\ o_{2,y,t}^{\text{out}} \\ \vdots \\ o_{p,y,t}^{\text{out}} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} R_{1,1,y} & R_{1,2,y} & \cdots & R_{1,p,y} \\ R_{2,1,y} & R_{2,2,y} & \cdots & R_{2,p,y} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ R_{q,1,y} & R_{q,2,y} & \cdots & R_{q,p,y} \end{bmatrix}}_{[R_y]} \begin{bmatrix} i_{1,y,t}^{\text{in}} \\ i_{2,y,t}^{\text{in}} \\ \vdots \\ i_{p,y,t}^{\text{in}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $y$  表示工业生产流程编号;  $R_{q,p,t}$  表示第  $q$  条工业生产线的第  $p$  个生产流程在  $t$  时刻的生产效率; 输入变量  $i_{p,y,t}^{\text{in}}$  和输出变量  $o_{p,y,t}^{\text{out}}$  分别表示物质流入和流出的量。

#### 1.3.1 工业生产流程划分

考虑到工业生产流程自身有一定的生产要求, 可以将工业生产流程分为离散流程和连续流程; 并且根据相邻流程之间的依赖性, 又可以分为顺序流程、互锁流程和并行流程。

##### 1) 离散流程与连续流程

(a) 离散流程: 离散流程是指可以随时启停的某一工业生产流程。式(2)和式(3)表示离散流程的运行条件。式(2)表示设备不能同时启动或停止, 式(3)表示运行变量、状态变量和停止变量之间的关系, 即式(2)和式(3)构成了启停的连续性状态方程。

$$d_{h,t}^u + d_{h,t}^v \leq 1 \quad \forall h, \forall y, h \in y \quad (2)$$

$$d_{h,t}^u - d_{h,t}^v = s_{h,t} - s_{h,t-1} \quad \forall h, \forall y, h \in y \quad (3)$$

式中:  $h$  表示离散流程编号;  $d_{h,t}^v$  表示停止变量;  $d_{h,t}^u$  表示运行变量;  $s_{h,t}$ 、 $s_{h,t-1}$  表示状态变量。

(b) 连续流程: 连续流程是指不能随意启停、受工业生产流程连续性约束的工业生产流程。式(4)一

式(7)表示连续流程运行条件。其中式(6)和式(7)分别表示工业生产流程的最小运行时间和最小停机时间。

$$d_{z,t}^u + d_{z,t}^v \leq 1 \quad \forall z, \forall y, z \in y \quad (4)$$

$$d_{z,t}^u - d_{z,t}^v = s_{z,t} - s_{z,t-1} \quad \forall z, \forall y, z \in y \quad (5)$$

$$d_{z,t}^u + \sum_{\tau=t+1}^{t+U_z^p-1} d_{z,\tau}^v \leq 1 \quad \forall z, \forall y, z \in y, \quad (6)$$

$$T_{m,z} \leq t \leq T_{m+1,z} - U_z^p + 1$$

$$d_{z,t}^v + \sum_{\tau=t+1}^{t+D_z^p-1} d_{z,\tau}^u \leq 1 \quad \forall z, \forall y, z \in y, \quad (7)$$

$$T_{m,z} \leq t \leq T_{m+1,z} - D_z^p + 1$$

式中:  $z$  表示连续流程的编号;  $T_{m,z}$  表示第  $m$  个生产时间段;  $U_z^p$  表示最小运行时间;  $D_z^p$  表示最小停机时间。

##### 2) 顺序流程、互锁流程以及并行流程

(a) 顺序流程: 顺序流程是指相邻的两个工业生产流程按照固定顺序进行生产。式(8)一(10)表示顺序流程的运行条件。

$$w_{y,t} = \sum_{\tau=1}^t d_{y,\tau}^u \quad \forall y, \forall t \quad (8)$$

$$w_{k,t} \leq w_{y,t} \quad \forall y, \forall k, \forall t \quad (9)$$

$$s_{y,t} + s_{k,t} \leq 1 \quad \forall y, \forall k, \forall t \quad (10)$$

式中:  $k$  是  $y$  的前一生产流程;  $w_{y,t}$  为辅助变量, 表示第  $y$  生产流程截止到  $t$  时刻的运行变量之和。

(b) 互锁流程: 互锁流程是指相邻的两个工业生产流程开启时间之间存在一个固定的时间间隔  $G_{y,k}$ 。式(11)和式(12)表示互锁流程的运行条件。

$$d_{k,t}^u = d_{y,t-G_{y,k}}^u \quad \forall y, \forall k, \forall t \quad (11)$$

$$r_y = r_k \quad \forall y, \forall k \quad (12)$$

式中,  $r_y$  为辅助变量, 表示第  $y$  生产流程截止到  $t$  时刻的运行变量之和。

(c) 并行流程: 并行流程是指流程  $y$  和  $k$  的开启之间没有时间间隔, 同时运行。式(13)为并行流程的运行条件, 表示第  $y$  和第  $k$  生产流程同时运行。

$$s_{y,t} = s_{k,t} \quad \forall y, \forall k, \forall t \quad (13)$$

#### 1.3.2 仓库储存环节建模

储存量应保持在仓库容量范围内。式(14)一(16)表示仓库储存环节的运行条件。其中, 式(14)表示第一个时间间隔的仓库  $c$  的存储水平, 式(15)表示计算后续时间间隔的仓库  $c$  存储水平, 式(16)表示仓库储存容量的上下限。

$$L_{0,c} + \sum_m i_{m,c,t}^{\text{in}} - \sum_n o_{n,c,t}^{\text{out}} = l_{c,t} \quad \forall c, t = 1 \quad (14)$$

$$l_{c,t-1} + \sum_m i_{m,c,t}^{\text{in}} - \sum_n o_{n,c,t}^{\text{out}} = l_{c,t} \quad \forall c, t \geq 2 \quad (15)$$

$$L_{\min,c} \leq l_{c,t} \leq L_{\text{cap},c} \quad \forall c, \forall t \quad (16)$$

式中:  $L_{0,c}$  表示初始时刻仓库  $c$  储存量;  $i_{m,c,t}^{\text{in}}$  和  $o_{n,c,t}^{\text{in}}$  分别表示第  $m$  个进入仓库存储量和第  $n$  个运出仓库的出库量;  $l_{c,t}$  表示  $t$  时刻仓库  $c$  储存量;  $L_{\min,c}$  和  $L_{\text{cap},c}$  分别表示仓库  $c$  的储存容量下限和额定储存容量。

### 1.3.3 空气压缩系统建模

空气压缩系统是依靠压力将压缩空气输送给工厂以用于动力生产的气动系统。对其建模如式(17)~式(21)所示<sup>[30]</sup>。其中, 式(17)表示相邻时刻剩余气量关系, 式(18)表示储气量在优化周期首末差值的限制约束, 式(19)表示储气罐的容量上下限, 式(20)表示储气罐内达到最高压力时, 停止工作, 式(21)表示当储气罐内跌到最低压力时, 开始工作。

$$L_{ca,t}^{\text{AS}} = L_{ca,t-1}^{\text{AS}} - L_{ca,t}^{\text{AV}} \Delta t + \varepsilon_{ca} P_{ca,t} \Delta t \quad (17)$$

$$0.8L_{ca,\text{ini}}^{\text{AS}} \leq L_{ca,\text{end}}^{\text{AS}} \leq 1.2L_{ca,\text{ini}}^{\text{AS}} \quad (18)$$

$$V_{ca} p_{ca,\text{min}} \leq L_{ca,t}^{\text{AS}} \leq V_{ca} p_{ca,\text{max}} \quad (19)$$

$$L_{ca,t}^{\text{AS}} + v_{ca,t} V_{ca} p_{ca,\text{max}} \leq 1.1V_{ca} p_{ca,\text{max}} \quad (20)$$

$$1.1V_{ca} p_{ca,\text{min}} \leq L_{ca,t}^{\text{AS}} + v_{ca,t} V_{ca} p_{ca,\text{min}} \quad (21)$$

式中:  $L_{ca,t}^{\text{AS}}$ 、 $L_{ca,t-1}^{\text{AS}}$  表示  $t$  时刻、 $t-1$  时刻储气罐的储气量;  $L_{ca,t}^{\text{AV}}$  表示  $t$  时刻用气量;  $\Delta t$  表示每个时间间隔;  $\varepsilon_{ca}$  表示压缩空气系统的效率;  $v_{ca,t}$  和  $P_{ca,t}$  分别表示  $t$  时刻储气罐运行变量和运行功率;  $V_{ca}$  表示储气罐容积;  $p_{ca,\text{max}}$  和  $p_{ca,\text{min}}$  分别表示储气罐的压力上下限;  $L_{ca,\text{ini}}^{\text{AS}}$  和  $L_{ca,\text{end}}^{\text{AS}}$  分别表示优化周期初始时刻和结束时刻储气罐储气量。

### 1.3.4 蓄电池储能建模

为简化建模, 假设储能蓄电池在充放电过程中两端电压维持不变, 蓄电池模型建立如式(22)~式(25)所示<sup>[17]</sup>。其中, 式(22)表示相邻时刻剩余电量关系, 式(23)和式(24)表示蓄电池需满足荷电状态与充放电功率上下限, 式(25)表示其能量状态在调度周期始末相等。

$$S_{b,t}^{\text{soc}} = S_{b,t-1}^{\text{soc}} + P_{b,t} \varepsilon_b \Delta t / C_b \quad (22)$$

$$S_{b,\text{min}}^{\text{soc}} \leq S_{b,t}^{\text{soc}} \leq S_{b,\text{max}}^{\text{soc}} \quad (23)$$

$$-P_{\text{bd}} \leq P_{b,t} \leq P_{\text{bc}} \quad (24)$$

$$S_{b,0}^{\text{soc}} = S_{b,Nt}^{\text{soc}} \quad (25)$$

式中:  $S_{b,t}^{\text{soc}}$  表示蓄电池荷电状态;  $P_{b,t}$  表示蓄电池交互功率,  $P_{b,t} > 0$  时表示充电,  $P_{b,t} < 0$  时表示放电,  $P_{b,t} = 0$  时表示浮充;  $C_b$  表示蓄电池容量;  $S_{b,\text{max}}^{\text{soc}}$ 、

$S_{b,\text{min}}^{\text{soc}}$  表示蓄电池的荷电状态上、下限;  $S_{b,0}^{\text{soc}}$ 、 $S_{b,Nt}^{\text{soc}}$  分别表示蓄电池荷电周期的初始状态和结束状态;  $P_{\text{bc}}$ 、 $P_{\text{bd}}$  分别表示蓄电池额定充、放电功率;  $\varepsilon_b$  表示充放电的效率。

$$\varepsilon_b = \begin{cases} \varepsilon_b^c, & P_{b,t} \geq 0 \\ 1/\varepsilon_b^d, & P_{b,t} < 0 \end{cases} \quad (26)$$

式中,  $\varepsilon_b^c$ 、 $\varepsilon_b^d$  分别表示蓄电池充、放电效率。

## 2 基于通用化生产流程模型的工业园区微电网参与配电市场的能量管理与生产流程双层优化模型

### 2.1 上层模型: 工业园区微电网能量管理与生产流程调度协同优化模型

上层模型为工业园区微电网能量管理与生产流程调度协同优化模型, 在满足生产线任务约束、仓库状态约束和园区冷、热、气、电能平衡约束的前提下, 最小化工业园区的总运行成本。

目标函数: 式(27)表示上层模型的目标函数为最小化工业园区微电网的运行成本。

$$\min(P_{\text{pcc},t} \cdot \lambda_{\text{grid},t}) \quad (27)$$

式中:  $\lambda_{\text{grid},t}$  表示  $t$  时刻工业园区微电网向配电网节点购买电量的结算电价;  $P_{\text{pcc},t}$  表示  $t$  时刻工业园区微电网从配电网购电功率。

约束条件: 式(28)表示工业园区微电网的有功功率平衡约束; 式(29)表示工业园区微电网内部生产用电约束; 式(30)、式(31)分别表示工业园区冷能平衡约束和热能平衡约束; 式(32)、式(33)分别表示地源热泵系统制冷、制热出力上下限约束; 式(34)表示工业园区生产任务量约束; 式(35)表示压缩空气系统的供气量和生产线用气量的平衡关系。

$$P_{\text{pv},t} + P_{b,t} + P_{\text{pcc},t} = P_{c,t} + P_{h,t} + P_{g,t} + P_{ca,t} \quad (28)$$

$$P_{g,t} = o_{1,t} \cdot P_{g1,t} + o_{2,t} \cdot P_{g2,t} + \dots + o_{n,t} \cdot P_{gn,t} \quad (29)$$

$$\eta_{\text{EER}} \cdot P_{c,t} = \sum_{y=1}^n (d_{y,t}^u \cdot C_{y,t}) + C_{\text{gb},t} \quad (30)$$

$$\eta_{\text{COP}} \cdot P_{h,t} = \sum_{y=1}^n (d_{y,t}^u \cdot H_{y,t}) + H_{\text{gb},t} \quad (31)$$

$$0 \leq P_{c,t} \leq P_{c,\text{max}} \quad (32)$$

$$0 \leq P_{h,t} \leq P_{h,\text{max}} \quad (33)$$

$$\sum_{t=1}^{N_t} \sum_{y=1}^{N_y} s_{y,t} F_y = F_{\text{sum},y} \quad (34)$$

$$L_{y,t}^{AV} = L_y^{AV} \cdot \sum_{y=1}^{N_y} s_{y,t} \quad (35)$$

式中： $P_{pv,t}$ 、 $P_{c,t}$ 和 $P_{h,t}$ 分别表示工业园区微电网内部光伏输出功率、地源热泵系统制冷功率和制热功率； $P_{g,t}$ 表示园区微电网工业生产用电功率； $P_{gn,t}$ 表示第 $n$ 个生产流程单位用电功率； $o_{n,t}$ 表示第 $n$ 生产流程在 $t$ 时刻的运行状态； $\eta_{EER}$ 和 $\eta_{COP}$ 分别表示工业园区微电网地源热泵系统的制冷及制热效率； $C_{y,t}$ 表示生产流程单位用冷量； $H_{y,t}$ 表示生产流程单位用热量； $C_{gb,t}$ 和 $H_{gb,t}$ 分别表示园区内固定冷、热负荷； $P_{c,max}$ 和 $P_{h,max}$ 分别表示地源热泵系统制冷、制热功率的最大值； $N_t$ 和 $N_y$ 分别表示总时间和总生产流程数量； $F_y$ 表示工业园区微电网第 $y$ 生产流程生产效率； $F_{sum,y}$ 表示工业园区微电网第 $y$ 生产流程任务量； $L_y^{AV}$ 表示第 $y$ 生产流程单位用气量； $L_{y,t}^{AV}$ 表示第 $y$ 生产流程在 $t$ 时刻的用气量。

此外该工业园区微电网能量管理与生产流程调度协同优化模型应满足约束：式(2)一式(26)。

## 2.2 下层模型：配电市场出清模型

下层模型为配电市场出清模型，在满足配电系统潮流约束、安全运行约束和机组安全运行约束的前提下，最小化配电市场的总运行成本。

目标函数：式(36)表示下层模型的目标函数为最小化配电市场总运行成本，包括从输电网购电成本、从DG购电成本和向工业园区微电网购/售电成本。

$$\min \sum_{t=1}^{N_t} (B_{G,t} P_{G,t} + B_{DG,t} P_{DG,t} - B_{pcc,t} P_{pcc,t}) \quad (36)$$

式中： $B_{G,t}$ 和 $B_{DG,t}$ 分别表示发电机组和分布式电源的电量报价； $B_{pcc,t}$ 表示工业园区微电网向配电网提供的电量报价，即上层模型中的结算电价 $\lambda_{grid,t}$ ； $P_{G,t}$ 和 $P_{DG,t}$ 分别表示发电机组和分布式电源的输出功率。

约束条件：采用适用于放射状电网的支路潮流模型对配电市场出清模型进行建模<sup>[31]</sup>。式(37)表示配电网节点电压约束；式(38)表示电压降约束；式(39)和式(40)表示配电网中的节点有功和无功功率平衡方程约束；式(41)表示从配电网向微电网的传输功率约束；式(42)一式(45)表示上级电网输入功率上下限约束及分布式电源的功率上下限约束；式(46)表示电流幅值约束。

$$(V_{j,\min})^2 \leq u_{j,t} \leq (V_{j,\max})^2 : (\lambda_t^{\min}, \lambda_t^{\max}) \quad (37)$$

$$u_{i,t} - u_{j,t} = 2(r_{ij,t} P_{ij,t} + x_{ij,t} Q_{ij,t}) - ((r_{ij,t})^2 + (x_{ij,t})^2) I_{ij,t} : (\eta_t) \quad (38)$$

$$\sum_{i \in m_1, j \in m_2} P_{ij,t} - I_{ij,t} r_{ij,t} - \sum_{j \in m_1, k \in m_2} P_{jk,t} + P_{G,j,t} + P_{DG,j,t} - P_{j,t}^d + P_{pcc,t} = 0 : (\alpha_t^p) \quad (39)$$

$$\sum_{i \in m_1, j \in m_2} Q_{ij,t} - I_{ij,t} x_{ij,t} - \sum_{j \in m_1, k \in m_2} Q_{jk,t} + Q_{G,j,t} + Q_{DG,j,t} - Q_{j,t}^d = 0 : (\alpha_t^q) \quad (40)$$

$$P_{pcc,\min} \leq P_{pcc,t} \leq P_{pcc,\max} \quad (41)$$

$$P_{G,j,\min} \leq P_{G,j,t} \leq P_{G,j,\max} : (\mu_t^{\min}, \mu_t^{\max}) \quad (42)$$

$$Q_{G,j,\min} \leq Q_{G,j,t} \leq Q_{G,j,\max} : (\varphi_t^{\min}, \varphi_t^{\max}) \quad (43)$$

$$P_{DG,j,\min} \leq P_{DG,j,t} \leq P_{DG,j,\max} : (\rho_t^{\min}, \rho_t^{\max}) \quad (44)$$

$$Q_{DG,j,\min} \leq Q_{DG,j,t} \leq Q_{DG,j,\max} : (\zeta_t^{\min}, \zeta_t^{\max}) \quad (45)$$

$$\|2P_{ij,t} \ 2Q_{ij,t} \ I_{ij,t} - u_{i,t}\|_2 \leq I_{ij,t} + u_{i,t} : (\theta_t^1, \theta_t^2) \quad (46)$$

式中： $i$ 和 $j$ 分别表示配电线路 $ij$ 的起始和终止节点； $u_{i,t}$ 表示节点 $i$ 的电压的平方； $u_{j,t}$ 表示与节点 $i$ 直接相连的节点 $j$ 的电压的平方； $V_{j,\max}$ 和 $V_{j,\min}$ 分别表示节点 $j$ 电压的上下限； $P_{ij,t}$ 和 $Q_{ij,t}$ 分别表示配电系统线路从 $i$ 到 $j$ 的有功功率和无功功率； $r_{ij,t}$ 和 $x_{ij,t}$ 分别表示节点 $i$ 和 $j$ 之间的电阻和电抗； $P_{jk,t}$ 和 $Q_{jk,t}$ 分别表示配电系统线路从 $j$ 到 $k$ 的有功功率和无功功率； $I_{ij,t}$ 表示节点 $i$ 和 $j$ 之间的电流的平方； $P_{G,j,t}$ 和 $Q_{G,j,t}$ 分别表示上级电网输入的有功功率和无功功率； $P_{j,t}^d$ 和 $Q_{j,t}^d$ 分别表示节点的有功负荷和无功负荷； $m_1$ 表示配电线路起始节点 $i$ 的集合； $m_2$ 表示配电线路终止节点 $j$ 的集合； $P_{pcc,\max}$ 和 $P_{pcc,\min}$ 分别表示 $t$ 时刻工业园区微电网从配电网购电功率上下限； $P_{G,j,\max}$ 和 $P_{G,j,\min}$ 分别表示发电机输出有功功率的上下限； $Q_{G,j,\max}$ 和 $Q_{G,j,\min}$ 分别表示发电机输出无功功率的上下限； $P_{DG,j,t}$ 和 $Q_{DG,j,t}$ 分别表示分布式电源输出的有功功率和无功功率； $P_{DG,j,\max}$ 、 $P_{DG,j,\min}$ 分别表示分布式电源输出有功功率的上下限； $Q_{DG,j,\max}$ 、 $Q_{DG,j,\min}$ 分别表示分布式电源输出无功功率的上下限。

在每个约束中，冒号后面的变量为与每个约束相关联的对偶变量。模型的原始变量集 $\Xi_M^p = \{P_{G,j,t}, Q_{G,j,t}, P_{DG,j,t}, Q_{DG,j,t}, P_{ij,t}, Q_{ij,t}, I_{ij,t}, u_{i,t}\}$ ，而它的对偶变量集 $\Xi_M^D = \{\alpha_t^p, \alpha_t^q, \eta_t, \theta_t^1, \theta_t^2, \lambda_t^{\min}, \lambda_t^{\max}, \mu_t^{\min}, \mu_t^{\max}, \varphi_t^{\min}, \varphi_t^{\max}, \rho_t^{\min}, \rho_t^{\max}, \zeta_t^{\min}, \zeta_t^{\max}\}$ 。

在配电市场出清阶段, 通过对下层模型的拉格朗日函数进行求偏导, 计算得到配电网的有功功率节点边际电价 DLMP, 如式(47)所示, 并作为配电侧日前市场结算结果对 IPO 的竞价行为进行反馈。此外, 由于 IPO 基于配电网 DLMP 进行策略性竞价, 因此, IPO 的投标或报价价格应该与配电网出清的 DLMP 强相关。

$$B_{pcc,t} = \frac{\partial F}{\partial P_{j,t}^d} = \frac{\partial F}{\partial P_{pcc,t}} = \lambda_{grid,t} = \alpha_t^p \quad (47)$$

### 3 双层模型的转化与求解

#### 3.1 MPEC 模型

本文提出基于通用化生产流程模型的工业园区微电网参与配电市场的能量管理与生产流程协同优化双层模型是一个非凸问题, 并且具有多层次结构, 难以直接求解, 因此需要对上述问题进行模型转化。两个主体之间传输信息有限, 能更好地保证信息隐私。

针对所提出的双层优化模型, 将下层模型等价转化为 KKT 条件, 代入上层, 转化为均衡约束数学规划问题 (mathematical programming with equilibrium constraint, MPEC), 再使用大 M 法将 KKT 中的互补松弛条件线性化。因双层规划中包含连续变量和整数变量, 所以最终转化的模型为单层混合整数二阶锥规划模型。下层模型的 KKT 条件如式(48)一式(66)所示。式(48)一式(56)为下层模型中拉格朗日函数的一阶偏导数。式(57)一式(66)为 KKT 条件中的互补松弛条件, 其中每个互补条件的形式  $0 \leq \psi \perp g(x) \geq 0$  表示满足以下约束:  $\psi \geq 0$ ,  $g(x) \geq 0$  和  $\psi g(x) = 0$ 。

$$\alpha_{t,j}^p - \alpha_{t,i}^p - 2r_{ij}\eta_t - 2\theta_{t,1}^1 = 0 \quad (48)$$

$$\alpha_{t,j}^q - \alpha_{t,i}^q - 2x_{ij}\eta_t - 2\theta_{t,2}^2 = 0 \quad (49)$$

$$B_{G,t} + \alpha_t^p - \mu_t^{\min} + \mu_t^{\max} = 0 \quad (50)$$

$$\alpha_t^q - \varphi_t^{\min} + \varphi_t^{\max} = 0 \quad (51)$$

$$B_{DG,t} + \alpha_t^p - \rho_t^{\min} + \rho_t^{\max} = 0 \quad (52)$$

$$\alpha_t^q - \zeta_t^{\min} + \zeta_t^{\max} = 0 \quad (53)$$

$$B_{pcc,t} - \alpha_t^q = 0 \quad (54)$$

$$-\alpha_{t,i}^p r_{ij} - \alpha_{t,j}^q x_{ij} + \eta_t((r_{ij})^2 + (x_{ij})^2) + \theta_t^1 + \theta_{t,3}^2 = 0 \quad (55)$$

$$\eta_{t,i} - \eta_{t,j} - \lambda_t^{\min} + \lambda_t^{\max} + \theta_t^1 - \theta_{t,3}^2 = 0 \quad (56)$$

$$0 \leq \mu_t^{\min} \perp P_{G,j,t} - P_{G,j,\min} \geq 0 \quad (57)$$

$$0 \leq \mu_t^{\max} \perp P_{G,j,\max} - P_{G,j,t} \geq 0 \quad (58)$$

$$0 \leq \varphi_t^{\min} \perp Q_{G,j,t} - Q_{G,j,\min} \geq 0 \quad (59)$$

$$0 \leq \varphi_t^{\max} \perp Q_{G,j,\max} - Q_{G,j,t} \geq 0 \quad (60)$$

$$0 \leq \rho_t^{\min} \perp P_{DG,j,t} - P_{DG,j,\min} \geq 0 \quad (61)$$

$$0 \leq \rho_t^{\max} \perp P_{DG,j,\max} - P_{DG,j,t} \geq 0 \quad (62)$$

$$0 \leq \zeta_t^{\min} \perp Q_{DG,j,t} - Q_{DG,j,\min} \geq 0 \quad (63)$$

$$0 \leq \zeta_t^{\max} \perp Q_{DG,j,\max} - Q_{DG,j,t} \geq 0 \quad (64)$$

$$0 \leq \lambda_t^{\min} \perp u_{j,t} - (V_{j,\min})^2 \geq 0 \quad (65)$$

$$0 \leq \lambda_t^{\max} \perp (V_{j,\max})^2 - u_{j,t} \geq 0 \quad (66)$$

#### 3.2 MPEC 求解

所提出的 MPEC 模型中存在非线性的双线性项和互补约束条件, 难以直接求解。本节中, 首先将非线性互补约束转换为线性约束, 然后将目标函数中的双线性项进行线性化, 从而使所提出的 MPEC 模型转换为 MISOCP 模型, 实现模型的高效求解。

互补条件如式(57)一式(66), 每个互补约束的  $0 \leq \psi \perp g(x) \geq 0$  公式可基于大 M 方法进行线性化, 替换为  $0 \leq \psi \leq gM$  和  $0 \leq g(x) \leq (1-g)M$ , 其中  $g$  和  $M$  分别为二元变量和足够大的正常数。MPEC 的补充约束可转换为

$$0 \leq \mu_t^{\min} \leq g_{\mu,t}^{\min} M_{\mu}^{\min} \quad (67)$$

$$0 \leq P_{G,j,t} - P_{G,j,\min} \leq (1 - g_{\mu,t}^{\min}) M_{\mu}^{\min} \quad (68)$$

$$0 \leq \mu_t^{\max} \leq g_{\mu,t}^{\max} M_{\mu}^{\max} \quad (69)$$

$$0 \leq P_{G,j,\max} - P_{G,j,t} \leq (1 - g_{\mu,t}^{\max}) M_{\mu}^{\max} \quad (70)$$

$$0 \leq \varphi_t^{\min} \leq g_{\varphi,t}^{\min} M_{\varphi}^{\min} \quad (71)$$

$$0 \leq Q_{G,j,t} - Q_{G,j,\min} \leq (1 - g_{\varphi,t}^{\min}) M_{\varphi}^{\min} \quad (72)$$

$$0 \leq \varphi_t^{\max} \leq g_{\varphi,t}^{\max} M_{\varphi}^{\max} \quad (73)$$

$$0 \leq Q_{G,j,\max} - Q_{G,j,t} \leq (1 - g_{\varphi,t}^{\max}) M_{\varphi}^{\max} \quad (74)$$

$$0 \leq \rho_t^{\min} \leq g_{\rho,t}^{\min} M_{\rho}^{\min} \quad (75)$$

$$0 \leq P_{DG,j,t} - P_{DG,j,\min} \leq (1 - g_{\rho,t}^{\min}) M_{\rho}^{\min} \quad (76)$$

$$0 \leq \rho_t^{\max} \leq g_{\rho,t}^{\max} M_{\rho}^{\max} \quad (77)$$

$$0 \leq P_{DG,j,\max} - P_{DG,j,t} \leq (1 - g_{\rho,t}^{\max}) M_{\rho}^{\max} \quad (78)$$

$$0 \leq \zeta_t^{\min} \leq g_{\zeta,t}^{\min} M_{\zeta}^{\min} \quad (79)$$

$$0 \leq Q_{DG,j,t} - Q_{DG,j,\min} \leq (1 - g_{\zeta,t}^{\min}) M_{\zeta}^{\min} \quad (80)$$

$$0 \leq \zeta_t^{\max} \leq g_{\zeta,t}^{\max} M_{\zeta}^{\max} \quad (81)$$

$$0 \leq Q_{DG,j,\max} - Q_{DG,j,t} \leq (1 - g_{\zeta,t}^{\max}) M_{\zeta}^{\max} \quad (82)$$

$$0 \leq \lambda_t^{\min} \leq g_{\lambda,t}^{\min} M_{\lambda}^{\min} \quad (83)$$

$$0 \leq u_{j,t} - (V_{j,\min})^2 \leq (1 - g_{\lambda,t}^{\min}) M_{\lambda}^{\min} \quad (84)$$

$$0 \leq \lambda_t^{\max} \leq g_{\lambda,t}^{\max} M_{\lambda}^{\max} \quad (85)$$

$$0 \leq (V_{j,\max})^2 - u_{j,t} \leq (1 - g_{\lambda,t}^{\max}) M_{\lambda}^{\max} \quad (86)$$

由于目标函数中包含双线性项  $P_{pcc,t} \cdot \lambda_{grid,t}$ ，双线性项可以基于强对偶理论进行线性化<sup>[7]</sup>：

$$\begin{aligned} \lambda_{grid,t} P_{pcc,t} = & -\alpha_t^p P_{j,t}^d + B_{G,t} P_{G,t} + B_{DG,t} P_{DG,t} - \\ & \lambda_t^{\min} (V_{j,\min})^2 + \lambda_t^{\max} (V_{j,\max})^2 - \\ & \mu_t^{\min} P_{G,j,\min} + \mu_t^{\max} P_{G,j,\max} - \\ & \varphi_t^{\min} Q_{G,j,\min} + \varphi_t^{\max} Q_{G,j,\max} - \\ & \rho_t^{\min} P_{DG,j,\min} + \rho_t^{\max} P_{DG,j,\max} - \\ & \varsigma_t^{\min} Q_{DG,j,\min} + \varsigma_t^{\max} Q_{DG,j,\max} \end{aligned} \quad (87)$$

利用 MEPC 的线性化形式，将双层规划问题重新表述为 MISOCP 问题，转化后目标函数如下：

$$\begin{aligned} \min \{ & \sum_{t=1}^{N_t} [ -\alpha_t^p P_{j,t}^d + B_{G,t} P_{G,t} + B_{DG,t} P_{DG,t} - \\ & \lambda_t^{\min} (V_{j,\min})^2 + \lambda_t^{\max} (V_{j,\max})^2 - \mu_t^{\min} P_{G,j,\min} + \\ & \mu_t^{\max} P_{G,j,\max} - \varphi_t^{\min} Q_{G,j,\min} + \varphi_t^{\max} Q_{G,j,\max} - \\ & \rho_t^{\min} P_{DG,j,\min} + \rho_t^{\max} P_{DG,j,\max} - \varsigma_t^{\min} Q_{DG,j,\min} + \\ & \varsigma_t^{\max} Q_{DG,j,\max} ] \} \end{aligned} \quad (88)$$

约束条件为式(2)一式(26)、式(28)一式(35)、式(37)一式(46)以及式(67)一式(86)。

以上模型可通过在 Matlab 2018a 中使用 Yalmip 工具箱建模，并调用 Cplex 求解器进行求解。

### 4 算例分析

本文以小系统 IEEE 9 节点配电系统和大系统 IEEE 85 节点配电系统为例，对考虑不同工业生产流程的可调控性以及引入地源热泵系统后的能效进行算例分析。其中，小系统为含短流程炼钢厂的工业园区微电网与 IEEE 9 节点配电系统耦合的算例系统，大系统为含短流程炼钢厂和水泥厂的工业园区微电网与 IEEE 85 节点配电系统的算例系统。

#### 4.1 IEEE 9 节点系统

本节以 IEEE 9 节点配电系统与短流程炼钢厂工业园区为例进行算例分析，该园区微电网接入配电网 5 节点。其中，短流程炼钢厂流程主要分为冶炼、脱碳、精炼、连铸以及轧制 5 个流程，但由于轧制形状不同，所需时间、用电量均不相同，本文不考虑轧制流程，系统结构如图 3 所示。

工业园区微电网内地源热泵设备<sup>[29]</sup>参数如表 1 所示，短流程炼钢厂各个生产线用电功率参数见文献[14]，蓄电池额定容量为 2000 kWh，单次最大充放电功率为 600 kW。图 4 给出了配电网典型日负荷和工业园区微电网内光伏的输出功率。图 5 给出了配电网从上级电网购买有功功率的电价。

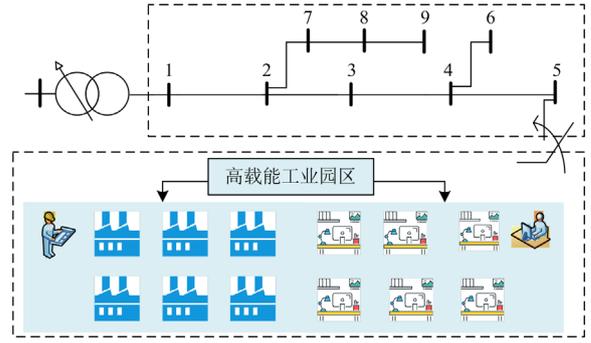


图 3 系统结构图

Fig. 3 System structure diagram

表 1 地源热泵系统参数

Table 1 Parameters of ground heat pump system

制热功率/kW	制冷功率/kW	制热效率	制冷效率
500	400	3.35	3.25

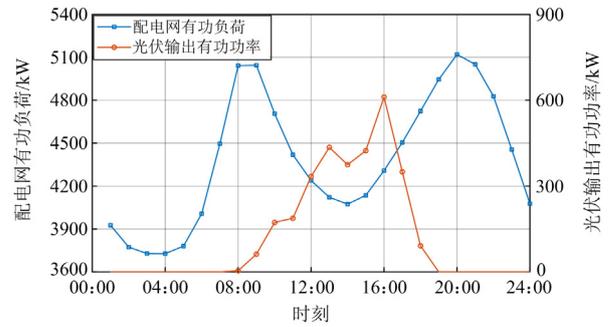


图 4 配电网负荷和工业园区光伏输出功率

Fig. 4 Load curve of distribution network and PV power output of industrial park

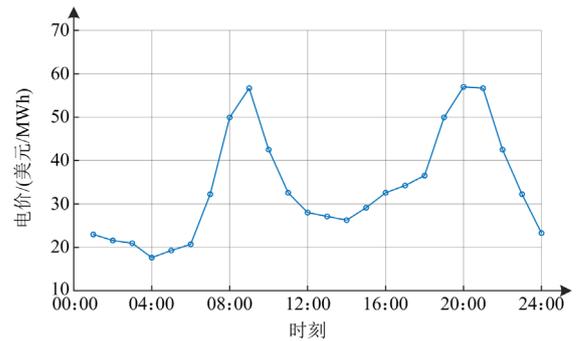


图 5 从上级电网购买有功功率电价

Fig. 5 Electricity price for purchasing active power from the superior power grid

其中，工业园区微电网内所需的冷热能主要分为两部分：与工业生产流程相关联的冷热能以及工业园区微电网内维持室内温度所需的固定冷、热能，均由地源热泵系统保证冷、热能的供应。

对短流程炼钢厂的工业生产流程划定如下: 初炼流程和脱碳流程为并行流程, 脱碳流程和精炼流程为顺序流程, 精炼流程与连铸流程为互锁流程, 间隔时间为 1 h; 并且初炼、脱碳、精炼以及连铸流程均为离散流程。

为了分析在工业园区微电网参与配电市场交易时, 工业生产流程的可调控性以及考虑地源热泵系统对工业园区用能管理的影响, 依据本文所提模型和方法, 分别对以下 3 个场景进行算例分析, 其中研究周期为 24 h。

场景 1: 未考虑工业生产过程的可调控性, 生产设备每天固定在相同时间段运行。考虑在工业园区微电网内使用地源热泵系统提供冷、热能。

场景 2: 考虑工业生产过程的可调控性, 根据结算电价以运行成本最小化为目标对各时段生产设备进行优化调度。未考虑在工业园区微电网内部使用地源热泵系统提供冷、热能, 由空调提供冷能, 由电锅炉提供热能。

场景 3(所提出方法): 考虑工业生产过程的可调控性, 根据结算电价以运行成本最小化为目标对各时段生产设备进行优化调度。考虑在工业园区微电网内使用地源热泵系统提供冷、热能。

#### 4.1.1 工业园区微电网工业生产流程可调控性对园区用能管理的影响

为分析工业生产流程调度对 IPO 购电功率的影响, 图 6 给出了 3 种场景下 IPO 购电功率结果。

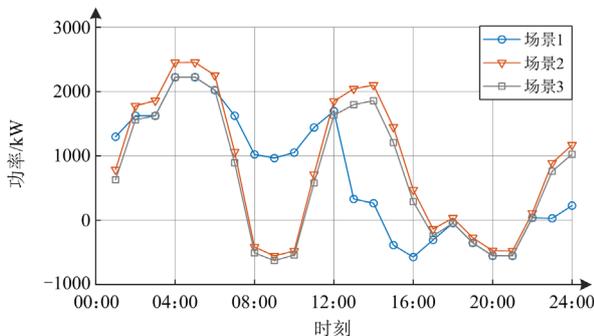


图 6 不同场景下的 IPO 购电功率

Fig. 6 Purchased power of IPO in different scenes

如图 6 所示, 3 种场景下 IPO 购电功率差异性主要集中在 07:00—11:00 时段和 13:00—17:00 时段。在 07:00—11:00 电价较高时段, 场景 1 购电功率较大, 在 13:00—17:00 时段以及 22:00—24:00 电价较低时段购电功率较小, 这是因为场景 1 不考虑工业生产流程可调控性, 导致了工业生产流程集中在 01:00—13:00 时段运行, 在 14:00—24:00 时段停止运行, 并不会依据电价调节工业生

产流程运行时间; 场景 2 和 3 的购电功率整体分布较接近, 场景 3 在 07:00—12:00 电价高峰时段购电功率最小, 在 13:00—17:00 电价较低时段购电功率较多, 原因在于场景 3 考虑了工业生产流程可调控性并使用地源热泵, 生产线在高峰电价时期不安排生产任务, 利用生产过程的可调控性, 响应电价, 从而减少生产成本; 同时, 相较于场景 2, 场景 3 的购电功率较少, 原因在于场景 3 下利用地源热泵制冷制热的高效性, 减少了 3730 kWh 用电量, 较场景 2 降低了 18.04% 的用电量, 达到了进一步降低用能成本的目的。

如图 6 所示, 场景 1 的最大负荷峰谷差为 2850.82 kW, 场景 2 的最大负荷峰谷差为 3010.56 kW, 场景 3 的最大负荷峰谷差为 2796.12 kW, 相较于场景 1, 负荷峰谷差下降 1.92%, 相较于场景 2, 下降 7.12%, 达到了削峰填谷的效果。

为分析生产过程可调控性对工业生产运行状态的影响, 图 7 给出了场景 1 和场景 3 下精炼生产线的运行状态结果。

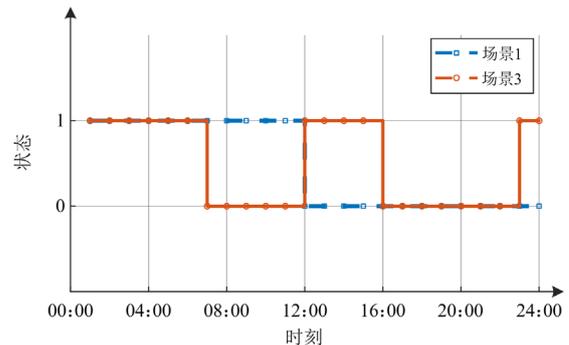


图 7 不同场景下精炼生产线运行状态

Fig. 7 Operation status of refining production line in different scenes

如图 7 所示, 可以看出不同场景下精炼生产线运行时间分布不同。由于总任务量和每小时产量固定, 工业园区微电网内部每一工业生产流程生产线都运行 12 h。场景 1 从 01:00—12:00 时段精炼生产线一直处于生产状态, 而场景 3 下的精炼生产线在 01:00—06:00、12:00—14:00 电价较低时段正常运行, 在 07:00—10:00、17:00—21:00 电价较高时段停止运行。这是因为场景 3 下 IPO 在参与配电市场交易时考虑了生产过程的可调控性, 使得生产任务转移到结算电价较低的时段, 从而降低运行成本。

以上结果表明了考虑工业生产过程的可调控性后, IPO 可根据结算电价合理安排生产任务用电, 这有利于降低工业园区微电网运行费用, 并实现削峰填谷, 缓解电网调峰压力。

#### 4.1.2 地源热泵对工业园区微电网用能管理的影响

工业园区微电网工业生产流程的生产用热和维持室内温度的能量供应均以地源热泵系统为主,图 8 和图 9 分别给出了园区冷、热能对应消耗的电功率在场景 2 和场景 3 下的结果对比。

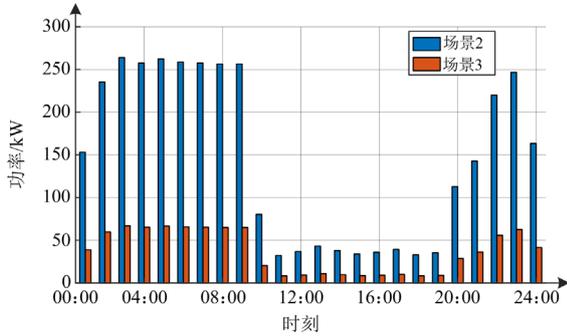


图 8 不同场景下工业园区微电网制热功率

Fig. 8 Heating power of industrial parks microgrid in different scenes

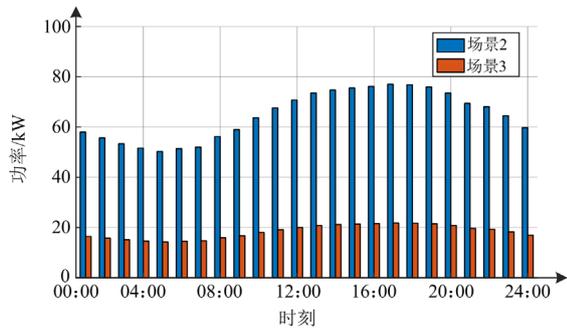


图 9 不同场景下工业园区微电网制冷功率

Fig. 9 Cooling power of industrial parks microgrid in different scenes

如图 8 和图 9 所示,场景 3 在全天 24 h 制热用电量与制冷用电量均远低于场景 2,这是因为引入地源热泵后,充分发挥其高效制冷性和制热性,实现了地源热泵消耗少量电能供应大量冷热负荷的效果,可节省超 60%的制冷制热用电量,从而降低工业园区微电网购电成本;如图 6 所示,场景 2 在 02:00—06:00、12:00—24:00 时段购电功率高于场景 3 下的购电功率,原因在于场景 2 未使用地源热泵,而使用了效率相对较低的电锅炉、工业空调进行冷、热负荷的供应,在需要等量的冷热负荷时消耗了更多的电能,导致了该时段购电功率增大。以上结果证明了采用地源热泵为园区供应冷、热能,可有效降低园区的购电功率。

#### 4.1.3 工业园区用能管理对配电市场出清的影响

为分析考虑生产过程可调控性的工业园区用能

策略对配电市场出清的影响,图 10 给出了场景 1 和场景 3 下配电网所有节点的 DLMPs。如图 10 所示,场景 1 在 01:00—11:00 和 15:00—24:00 时段,DLMPs 均明显高于场景 3,这是因为场景 1 不考虑工业生产流程的可调控性,在该时段购电功率较大,使网络阻塞更加严重,导致 DLMPs 高于场景 3;场景 3 在 07:00—11:00、18:00—22:00 工业园区微电网购电功率减少时段,配电网出清得到的 DLMPs 降低,这是因为考虑了生产过程的可调控性后,工业园区用电负荷发生转移,导致配电网网络潮流发生变化,缓解了网络阻塞,从而降低了相应时段的 DLMPs。以上结果证明了所提出的工业园区用能管理策略可降低配电系统的 DLMPs,缓解配电网的网络阻塞。

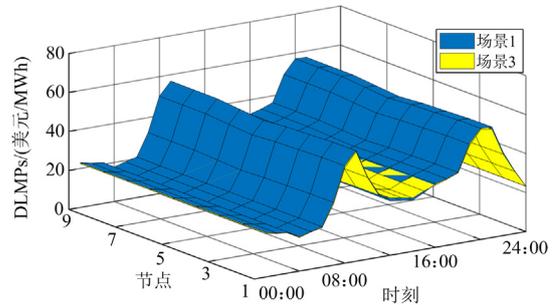


图 10 场景 1 和 3 下 DLMPs 结果对比

Fig. 10 Comparison of DLMPs results in scenes 1 and 3

#### 4.1.4 工业园区用能管理对经济性的影响分析

为分析所提出工业园区用能管理策略对园区运行经济性的影响,表 2 给出了在 3 种场景下工业园区微电网和配电网的用能成本对比。

表 2 不同场景下 IPO 购电成本及配电网运行成本对比

Table 2 Comparison of IPO power purchasing costs and total operating costs of distribution network in different scenes

场景	IPO 购电成本/美元	配电网运行成本/美元
场景 1	$6.13 \times 10^4$	$1.21 \times 10^5$
场景 2	$6.08 \times 10^4$	$1.22 \times 10^5$
<b>场景 3</b>	<b><math>5.09 \times 10^4</math></b>	<b><math>1.10 \times 10^5</math></b>

如表 2 所示,场景 1 下的 IPO 购电成本最高,场景 2 下的配电网运行成本最高,场景 3 下 IPO 和配电网运行成本最低。相比于场景 1,场景 3 考虑了生产过程的可调控潜力,生产任务从结算电价较高时段转移到了结算电价较低时段,使得 IPO 购电成本减少了 16.97%,配电网运行成本减少了 9.09%;相比于场景 2,场景 3 在考虑了生产过程可调控性的基础上,又考虑了地源热泵系统,使得工业园区的制冷、制热用电量有所降低,因此场景 3 相较于

场景 2 减少了 16.28% 的园区购电费用, 配电网运营成本减少了 9.84%。以上结果表明, 在参与配电市场时, 工业园区微电网的能量管理中引入带有生产约束的生产任务调度, 并考虑使用地源热泵系统提供冷、热能后, 可以有效地降低工业园区微电网及配电网的运行成本。

#### 4.2 实际数据算例分析

选取北京市某工业园区微电网的实际数据<sup>[32]</sup>, 验证本文所提出模型的合理性与有效性。储能系统的最大容量为 1.5 MWh, 最大充放电功率均为 600 kW。传统溴化锂制冷机的制冷系数为 0.7, 制热系数为 0.8, 本文所引入的地源热泵设备制冷系数为 3.25, 制热系数为 3.35。本节中光伏装机容量、预测出力、短流程炼钢厂各生产线用电功率<sup>[12]</sup>、配电网从上级电网购买有功功率的电价以及短流程炼钢厂各生产流程的划定同 4.1 节, 某典型日微电网的冷、热、电负荷曲线图如图 11 所示。

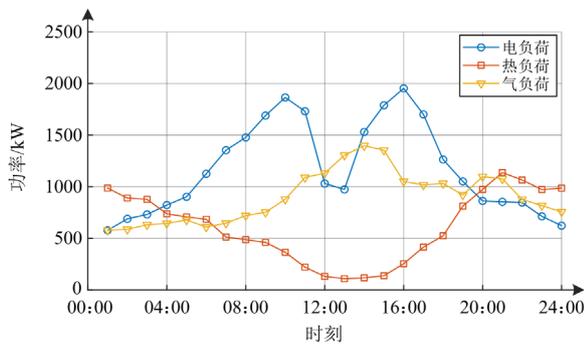


图 11 某典型日微电网的冷、热、电负荷曲线图

Fig. 11 Cold, heat and electricity load profiles for microgrid for a typical day

为了分析在工业园区微电网参与配电市场交易时, 工业生产流程的可调控性以及考虑地源热泵系统对工业园区用能管理的影响, 给出了不同场景下各时段 IPO 购电功率, 如图 12 所示。

如图 12 所示, 3 种场景下 IPO 购电功率不同, 差异性主要集中在 07:00—11:00 时段和 13:00—17:00 时段。场景 1 不考虑工业生产流程的可调控性, 导致了工业生产流程集中在 01:00—13:00 时段运行, 在 14:00—24:00 时段停止运行, 并不会依据电价调节工业生产流程运行时间; 场景 2 和场景 3 的购电功率整体分布较接近, 场景 3 考虑了工业生产流程可调控性并使用地源热泵, 生产线在高峰电价时期不安排生产任务, 利用生产过程的可调控性, 响应电价, 从而减少生产成本; 通过考虑实际需求, 采用实际数据进行算例分析, 证明了在考虑工业生产流程的可调控性后, IPO 可根据结算电

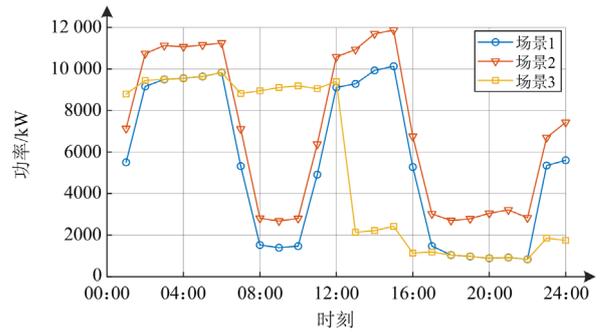


图 12 不同场景下的 IPO 购电功率

Fig. 12 Purchased power of IPO in different scenes

价合理安排生产任务用电, 降低工业园区微电网运行费用; 采用地源热泵为园区供应冷、热能, 利用其制冷制热的高效性, 可进一步降低园区的购电功率, 并实现削峰填谷, 缓解电网调峰压力。

#### 4.3 IEEE 85 节点系统

为了进一步说明所提出模型的有效性, 基于 IEEE 85 节点配电系统和短流程炼钢厂与水泥厂典型工业园区微电网进行算例分析, 系统结构图如图 13 所示。

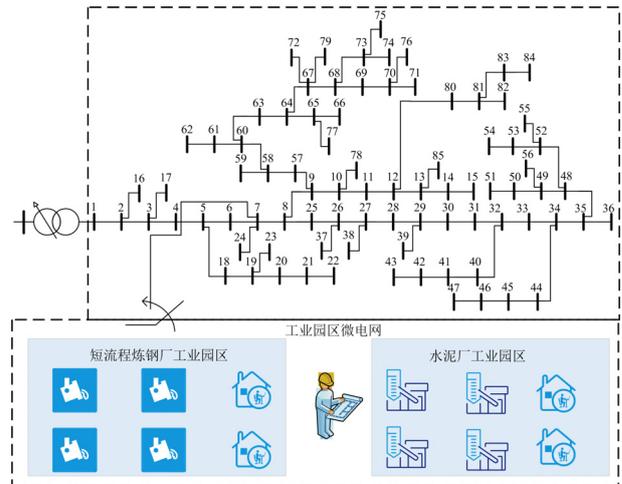


图 13 系统结构图

Fig. 13 System structure diagram

本节中光伏装机容量、预测出力、地源热泵设备参数、短流程炼钢厂各生产线用电功率、配电网从上级电网购买有功功率的电价以及短流程炼钢厂各生产流程的划定同 4.1 节, 水泥厂中生料制备、生料研磨和熟料煅烧为顺序流程, 熟料煅烧和水泥制成为互锁流程, 间隔时间同样为 1 h; 熟料煅烧为连续流程, 其他 3 种流程均为离散流程。

为了分析在工业园区微电网参与配电市场交易时, 工业生产流程的可调控性以及考虑地源热泵系统对工业园区用能管理的影响, 给出了不同场景

下各时段 IPO 购电功率, 如图 14 所示。

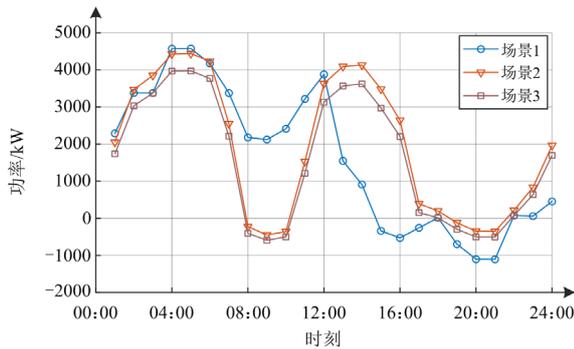


图 14 不同场景下的 IPO 购电功率

Fig. 14 Purchased power of IPO in different scenes

如图 14 所示, 3 种场景下 IPO 购电功率不同, 差异性主要集中在 07:00—11:00 时段和 13:00—17:00 时段。场景 1 在 07:00—11:00 电价较高时段, 购电功率较大, 在 13:00—24:00 电价较低时段, 购电功率较小, 这是因为场景 1 不考虑工业生产流程的可调控性, 导致工业生产流程集中在 01:00—13:00 时段运行, 在 14:00—24:00 时段停止运行, 并不会依据电价调节工业生产流程运行时间; 场景 2 和场景 3 的购电功率整体分布较接近, 场景 3 在 07:00—11:00 电价较高时段购电功率最小, 在 13:00—17:00 电价较低时段购电功率较多, 原因在于场景 3 考虑了工业生产流程可调控性并使用地源热泵, 生产线在高峰电价时期不安排生产任务, 利用生产过程的可调控性, 响应电价, 从而减少生产成本; 同时, 相比于场景 2, 场景 3 的购电功率较少, 原因在于场景 3 下利用地源热泵制冷制热的高效性, 减少用电量, 达到了进一步降低用能成本的目的。以上结果进一步证明了在考虑工业生产过程的可调控性后, IPO 可根据结算电价合理安排生产任务用电, 降低工业园区微电网运行费用; 采用地源热泵为园区供应冷、热能, 利用其制冷制热的高效性, 可进一步降低园区的购电功率, 并实现削峰填谷, 缓解电网调峰压力。

在此算例系统和计算环境下, 由于同时优化短流程炼钢厂和水泥厂两种生产流程, 系统规模较大, 故计算时间较长, 模型的计算时间为 401 s, 但短流程炼钢厂与水泥厂的生产流程均能通过工业园区微电网工业生产流程与用能关系的通用模型来建模体现, 并实现优化运行, 很好地证明了该模型的通用性及普适性。

## 5 结论

本文提出了一种基于通用化生产流程模型的

工业园区微电网参与配电市场的能量管理与生产流程协同优化模型和方法。首先, 本文介绍了含地源热泵的工业园区微电网的用能架构, 构建了工业园区微电网工业生产流程与用能关系的通用模型; 其次, 提出了一个基于通用化生产流程模型的工业园区微电网参与配电市场双层优化模型; 然后, 基于 KKT 条件、对偶原理以及大 M 法将双层模型转化为混合整数二阶锥规划模型; 最后, 通过算例分析验证了所提模型及方法的正确性、有效性和通用性, 相关结论如下:

(1) 所构建的工业园区工业生产流程通用模型能够解决多种工业生产流程的复杂建模问题, 具有良好的适应性。

(2) 与传统的计划生产相比, 含生产任务流程调度的工业园区微电网能量管理模型可根据结算电价等信息, 优化调整各生产线的生产任务, 为园区能量管理提供了调控灵活性。

(3) 与传统电锅炉、工业空调等制冷制热设备相比, 本文中所考虑的地源热泵系统能够充分发挥其制冷、制热的高效性, 降低工业园区内冷热能用电需求, 减少工业园区的生产用电量。基于本文所用算例数据, 生产用电量降低效果可以达到 18.04%。

(4) 计及 IPO 与 DSO 交互影响关系, 所提方法可使 IPO 总购电成本降低的同时, 减小 DLMP, 缓解配电网网络阻塞, 并降低了配电网运行成本。

本文所研究的模型仅考虑了单个工业园区微电网的优化, 并且未计及光伏出力的不确定性问题, 在未来工作中, 将考虑多个工业园区微电网的优化运行和光伏出力不确定性。

## 参考文献

- [1] 刘一欣, 郭力, 王成山. 多微电网参与下的配电侧电力市场竞价博弈方法[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2469-2476.  
LIU Yixin, GUO Li, WANG Chengshan. Optimal bidding strategy for microgrids in electricity distribution market[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2469-2476.
- [2] 刘任, 刘洋, 许立雄, 等. 计及分布式需求响应的多微电网系统协同优化策略[J]. 电力建设, 2023, 44(5): 72-83.  
LIU Ren, LIU Yang, XU Lixiong, et al. Multi-microgrid system collaborative optimization strategy considering distributed demand response[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(5): 72-83.
- [3] 周宁, 杨知方, 钟海旺, 等. 售电侧市场的工业园区能源代理模式设计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 147-152.

- ZHOU Ning, YANG Zhifang, ZHONG Haiwang, et al. Energy agent mechanism design for industrial parks in retail electricity markets[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(17): 147-152.
- [4] 陈逸琿, 刘怀远, 吴军, 等. 考虑绿色化工的工业园区微电网多层规划方法[J]. *电网与清洁能源*, 2024, 40(3): 119-127.
- CHEN Yihui, LIU Huaiyuan, WU Jun, et al. A multi-layer planning method of the microgrid in the industrial park considering green chemical industry[J]. *Power System and Clean Energy*, 2024, 40(3): 119-127.
- [5] 王莉, 吴国沛, 曾顺奇, 等. 考虑上级电网与工业园区互动的综合需求响应[J]. *电力建设*, 2019, 40(9): 52-63.
- WANG Li, WU Guopei, ZENG Shunqi, et al. The strategy of integrated demand response considering the interaction between distribution grid and industrial park[J]. *Electric Power Construction*, 2019, 40(9): 52-63.
- [6] SHI W, LI N, CHU C, et al. Real-time energy management in microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(1): 228-238.
- [7] 齐志远, 张如意, 张慧敏, 等. 柔性边界控制的微电网协调调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(23): 179-186.
- QI Zhiyuan, ZHANG Ruyi, ZHANG Huimin, et al. Coordinated scheduling with flexible boundary control of a microgrid[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(23): 179-186.
- [8] 孔令国, 史立昊, 石振宇, 等. 基于交替方向乘子法的园区电-氢-热系统低碳优化调度[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(11): 2932-2944.
- KONG Lingguo, SHI Lihao, SHI Zhenyu, et al. Low-carbon optimal dispatch of electric-hydrogen-heat system in park based on alternating direction method of multipliers[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(11): 2932-2944.
- [9] 窦晓波, 晓宇, 袁晓冬, 等. 基于改进模型预测控制的微电网能量管理策略[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(22): 56-65.
- DOU Xiaobo, XIAO Yu, YUAN Xiaodong, et al. Energy management strategy based on improved model predictive control for microgrid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(22): 56-65.
- [10] 郭思琪, 袁越, 张新松, 等. 多时间尺度协调控制的独立微网能量管理策略[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(2): 122-129.
- GUO Siqi, YUAN Yue, ZHANG Xinsong, et al. Energy management strategy of isolated microgrid based on multi-time scale coordinated control[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(2): 122-129.
- [11] WANG J, SHI Y, YUE Z. Intelligent demand response for industrial energy management considering thermostatically controlled loads and EVs[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(6): 3432-3442.
- [12] YUE M, SEUNG H, XIAO H. A demand response energy management scheme for industrial facilities in smart grid[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, 10(4): 2257-2269.
- [13] BARÁN B, LÜCKEN C V, SOTELO A. Multi-objective pump scheduling optimisation using evolutionary strategies[J]. *Advances in Engineering Software*, 2005, 36(1): 39-47.
- [14] 王海博, 张利. 计及短流程钢铁企业生产过程的供需互动调度模型[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(15): 64-76.
- WANG Haibo, ZHANG Li. Supply-demand interactive scheduling model considering short production process of steel enterprises[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(15): 64-76.
- [15] ZHANG R, LI G, JIANG T, et al. Incorporating production task scheduling in energy management of an industrial microgrid: a regret-based stochastic programming approach[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(03): 2663-2673.
- [16] JUN S, RUI G, LEI W, et al. A bi-level approach for determining optimal dynamic retail electricity pricing of large industrial customers[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(2): 2267-2277.
- [17] 杨晓辉, 袁志鑫, 肖锦扬, 等. 考虑电池寿命的混合储能微电网优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(4): 22-31.
- YANG Xiaohui, YUAN Zhixin, XIAO Jinyang, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage microgrid considering battery life[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(4): 22-31.
- [18] LI R, WU Q, SHMUEL S. Distribution locational marginal pricing for optimal electric vehicle charging management[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(1): 203-211.
- [19] 臧云帆, 夏晟, 李嘉文, 等. 含共享储能的微电网群分布鲁棒博弈优化调度方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(24): 90-101.
- ZANG Yunfan, XIA Sheng, LI Jiawen, et al. A robust game optimization scheduling method for shared energy storage micro electric network group distribution[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(24): 90-101.
- [20] 赵杰, 王聪, 李冠冠, 等. 考虑需求响应的多微网 P2P 能源交易低碳运行策略[J]. *电力建设*, 2023, 44(12): 54-65.
- ZHAO Jie, WANG Cong, LI Guanguan, et al. Low-carbon

- operation strategy for P2P energy trading among multiple microgrids considering demand response[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(12): 54-65.
- [21] 孙文杰, 武家辉, 张强. 基于双层博弈的配电网与多综合能源微网协调优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(2): 25-38.  
SUN Wenjie, WU Jiahui, ZHANG Qiang. Coordinated optimization of a distribution network and multi-integrated energy microgrid based on a double-layer game[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(2): 25-38.
- [22] 马燕峰, 谢家荣, 赵书强, 等. 考虑园区综合能源系统接入的主动配电网多目标优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(13): 53-61.  
MA Yanfeng, XIE Jiarong, ZHAO Shuqiang, et al. Multi-objective optimal dispatching for active distribution network considering park-level integrated energy system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(13): 53-61.
- [23] HANIF S, ZHANG K, HACKL C, et al. Decomposition and equilibrium achieving distribution locational marginal prices using trust-region method[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(3): 3269-3281.
- [24] 何黎君, 程杉, 陈梓铭. 考虑交互功率控制和双边竞价交易的多微电网双层优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(11): 10-17.  
HE Lijun, CHENG Shan, CHEN Ziming. A scheduling model of a multi-microgrid system based on bi-layer optimization with consideration of PCC power control and bilateral bidding[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(11): 10-17.
- [25] JIANG T, WU C, ZHANG R, et al. Flexibility clearing in joint energy and flexibility markets considering TSO-DSO coordination[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2023, 14(2): 1376-1387.
- [26] CHEN H, FU L, BAI L, et al. Distribution market-clearing and pricing considering coordination of DSOs and ISO: an EPEC approach[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(4): 3150-3162.
- [27] 曲子清, 辛洁晴, 吴亮, 等. 商业用户电能采暖替代技术选型的边界条件论证[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(13): 48-54.  
QU Ziqing, XIN Jieqing, WU Liang, et al. Argument on boundary conditions of selection electric energy substitution technologies with electric heating for commercial customers[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(13): 48-54.
- [28] 杨先亮, 牛帅, 毛杭倩媛, 等. 基于光伏发电余热的地源热泵系统动态模拟分析[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(10): 341-348.  
YANG Xianliang, NIU Shuai, MAO Hangqianyuan, et al. Dynamic simulation analysis of ground source heat pump system based on photovoltaic power waste heat[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(10): 341-348.
- [28] 杨志鹏, 张峰, 梁军, 等. 含热泵和储能的冷热电联供型微网经济运行[J]. *电网技术*, 2018, 42(6): 1735-1743.  
YANG Zhipeng, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Economic generation scheduling of CCHP microgrid with heat pump and energy storage[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(6): 1735-1743.
- [30] 徐卫君, 张伟, 胡宇涛, 等. 先进绝热压缩空气储能多能流优化调度模型[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(23): 5944-5955.  
XU Weijun, ZHANG Wei, HU Yutao, et al. Multi energy flow optimal scheduling model of advanced adiabatic compressed air energy storage[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(23): 5944-5955.
- [31] 刘斌, 刘锋, 梅生伟, 等. 基于二阶锥优化的含有载调压变压器主动配电网最优潮流[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(19): 40-47.  
LIU Bin, LIU Feng, MEI Shengwei, et al. Optimal power flow in active distribution networks with on-load tap changer based on second-order cone programming[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(19): 40-47.
- [32] 德格吉日夫, 谭忠富, 杨莘博, 等. 电力市场环境考虑投标决策的微电网运行鲁棒优化[J]. *可再生能源*, 2018, 36(11): 1697-1703.  
DE Gejirifu, TAN Zhongfu, YANG Shenbo, et al. Robust optimization of micro-grid operation considering bidding decisions in electricity market environment[J]. *Renewable Energy Resources*, 2018, 36(11): 1697-1703.

收稿日期: 2024-01-02; 修回日期: 2024-04-09

作者简介:

张儒峰(1990—), 男, 博士, 教授, 研究方向为综合能源系统建模、分析与优化运行; E-mail: zhangrufeng@ncepu.edu.cn

曲锐(1988—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电力系统低碳优化运行与市场交易。E-mail: 453704769@qq.com

(编辑 魏小丽)