

# 基于滚动优化的高载能工业园区优化调度策略

宋卓然<sup>1</sup>, 窦文雷<sup>1</sup>, 李剑峰<sup>1</sup>, 姜涛<sup>1</sup>, 芦思辰<sup>1</sup>, 季寒松<sup>2</sup>

(1. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110006;

2. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘要:**为提高含多工业园区的配电系统的运行经济性,并抑制配-微联络线功率波动,提出了一种基于滚动优化原理的含多工业园区的配电系统多时间尺度优化调度策略。首先对工业园区内部设备的用能特性进行分析并建模;然后构建了含多工业园区的配电系统两阶段优化调度模型。其中,日前优化调度通过协调工业园区与配电系统之间的交互功率以及各工业园区和配电系统内部的设备运行功率达到提升含多工业园区的配电系统运行经济性的目标;日内优化调度通过对工业园区内部设备的运行工况进行修正,抑制配-微联络线交互功率的波动。最后通过算例对比验证了所提模型和方法在提升工业园区和配电系统运行经济性以及降低配-微联络线功率波动方面的有效性。

**关键词:**工业园区;多时间尺度;滚动优化;配电系统

**中图分类号:**TM73 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed24455

## Optimization Scheduling Strategy for High Capacity Industrial Parks Based on Rolling Optimization

SONG Zhuoran<sup>1</sup>, DOU Wenlei<sup>1</sup>, LI Jianfeng<sup>1</sup>, JIANG Tao<sup>1</sup>, LU Sichen<sup>1</sup>, JI Hansong<sup>2</sup>

(1. State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd., Shenyang 110006, Liaoning, China; 2. School of

Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, Jilin, China)

**Abstract:** In order to improve the operation economy of the distribution system with multiple industrial parks and restrain the power fluctuation of the distribution-micro tie line, a multi-time scale optimization scheduling strategy for the distribution system with multiple industrial parks was proposed based on the rolling optimization principle. Firstly, the energy characteristics of industrial parks' internal equipment were analyzed and modeled. Then a two-stage optimal scheduling model of distribution system with multiple industrial parks was constructed. Among them, the interactive power between industrial parks and the distribution system as well as the operation power of the equipment inside each industrial park and distribution system were coordinated by the day-ahead optimization scheduling, the goal of improving the operation economy of the distribution system with multiple industrial parks was achieved. The operating conditions of the internal equipment of industrial parks could be corrected by the intra-day optimization scheduling, the fluctuation of the interaction power of the distribution-micro tie line was suppressed. Finally, the effectiveness of the proposed model and method in improving the operational economy of industrial parks and distribution systems and reducing the power fluctuation of the distribution-micro tie line was verified by an example.

**Key words:** industrial parks; multi-time scale; rolling optimization; distribution system

随着能源需求的不断增大,能源短缺问题和化石能源燃烧带来的环境污染问题日益严重<sup>[1-2]</sup>。为促进能源系统的低碳化转型,我国于2020年提出了“双碳”目标。在此背景下,可再生能源因其清洁性得到了大力发展。然而可再生能源出力的随机性和间歇性对配电系统运行的安全性和

经济性带来了巨大挑战<sup>[3]</sup>。工业园区型微网因其能源消耗量大、供能区域集中和多能互补等特点成为了新能源发电消纳的主力军<sup>[4-5]</sup>。

分布式新能源接入工业园区后对工业园区自身的运行经济性也带来了新的挑战。目前针对单个工业园区运行经济性已有大量研究<sup>[6-19]</sup>。

**基金项目:**国网辽宁省电力有限公司科技项目(20210200X)

**作者简介:**宋卓然(1985—),男,硕士,高级工程师,Email:40420833@qq.com

文献[6-10]通过考虑电池储能作用提高了工业园区的运行经济性。文献[11-12]中构建了工业园区内不同供能设备的需求响应模型,降低了工业园区的运行成本。文献[13-15]通过发掘园区需求响应能力提高了工业园区运行经济性。文献[16]提出了一种基于后悔度风险规避的随机生产任务和能量管理模型,降低了工业园区的运行成本。上述文献通过不同的优化调度策略提高了微网的运行经济性。然而,上述文献均对单一工业园区优化调度问题进行研究,忽略了配电系统和多个工业园区同时接入时对工业园区优化调度结果的影响,可能导致优化调度结果在多个工业园区同时接入配电系统的实际情况中无法应用。

针对含多微网配电系统的能量管理问题,文献[20]提出了一种含多工业园区的配电系统优化调度模型,降低了工业园区的用能成本。文献[21]提出一种基于双层规划的含多微网的配电系统优化调度模型,可以有效提高系统的运行稳定性和鲁棒性。文献[22-24]分别提出了不同的协同优化策略,通过协调各工业园区运行功率提高了各工业园区的运行经济性。文献[25]针对含多微网的配电系统提出一种新的交易策略,以提高系统整体的运行经济性。上述研究均是在单一时间尺度下对工业园区进行日前优化调度,通过一次求解下发调度周期内的所有控制指令,对可再生能源出力不确定性和负荷波动性的应对能力较差。

针对上述问题,本文提出了一种含多工业园区的配电系统能量管理策略。该策略同时考虑配电系统的经济性及其运行约束对工业园区优化调度结果的影响。其次,构建含多工业园区的配电系统两阶段优化调度模型,其中第一阶段为以系统总运行成本最小为目标函数的日前优化调度,求取工业园区设备的运行功率和配-微联络线功率;第二阶段为日内滚动优化调度,通过实时更新可再生能源出力和负荷预测值来降低预测误差,并基于最新数据对日前优化调度结果中配-微联络线功率进行追踪,以降低配-微联络线交互功率与日前计划值的偏差。最后,通过算例对所提模型和算法的有效性进行分析验证。

### 1 多工业园区配电系统协同优化调度框架

含多工业园区的配电系统框架如图1所示。各个工业园区与配电系统通过不同节点相连,可

以根据电价调节自身设备的运行状态,进而调整其与配电系统联络线上的交互功率,从而提高含多工业园区的配电系统总体运行经济性。



图1 含多工业园区的配电系统结构图

Fig.1 Structure of distribution system with multiple industrial parks

工业园区内部供用能关系如图2所示。其中,由空调系统和冰蓄冷系统对园区所需冷能进行供给;由微燃机和电锅炉对所需热能进行供给;由压缩空气系统对所需压缩空气能进行供给;由微燃机、光伏电源和配电系统对所需电能进行供给。此外,工业园区内部还包含电储能装置,利用该装置进行电能存储,以此改变不同时刻工业园区向配电系统的购电功率,进一步提升工业园区运行经济性。

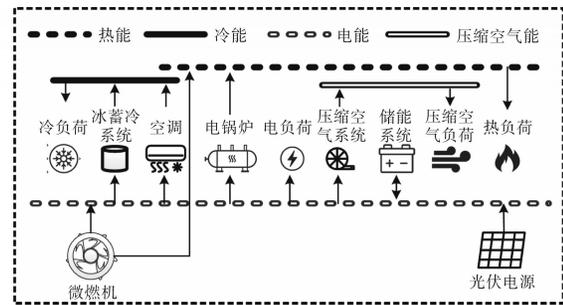


图2 工业园区供用能关系示意图

Fig.2 Schematic diagram of energy supply and use relationship of industrial parks

### 2 多工业园区与配电系统日前协同优化调度模型

多工业园区与配电系统日前协同优化调度框架如图3所示。

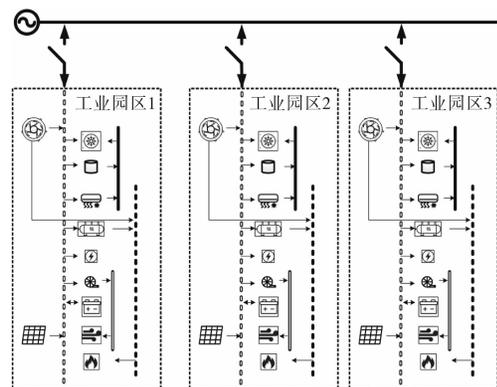


图3 含多工业园区的配电系统优化调度框架

Fig.3 Optimization scheduling framework of distribution system with multiple industrial parks

各个工业园区根据电价对自身设备的运行状态进行调整,从而提高自身的运行经济性。同时,配电系统在满足潮流平衡等运行约束的情况下追求自身用能成本最小。因此,配电系统与各微网联络线功率会影响各工业园区与配电系统的优化调度结果。本节介绍通过协调联络线交互功率、配电系统和各工业园区内部设备的运行状态,提升含多工业园区配电系统运行经济性的含多工业园区的配电系统优化调度模型。

### 2.1 目标函数

目标函数为最小化含多工业园区的配电系统运行成本,如下式所示:

$$C_{obj} = \min \left[ \sum_{g=1}^{N_g} \sum_{t=1}^{N_t} C_{DG,g,t} P_{DG,t} + \sum_{t=1}^{N_t} C_t P_t + \sum_{t=1}^{N_t} (C_{M1,t} P_{M1,t} + Gas_{M1,t} C_{gas}) + \sum_{t=1}^{N_t} (C_{M2,t} P_{M2,t} + Gas_{M2,t} C_{gas}) + \sum_{t=1}^{N_t} (C_{M3,t} P_{M3,t} + Gas_{M3,t} C_{gas}) \right] \quad (1)$$

式中: $C_{obj}$ 为目标运行成本;下标“ $g$ ”为第 $g$ 台微燃机的相应变量;下标“ $t$ ”为 $t$ 时刻的相应变量; $N_g$ 为分布式微燃机的总台数; $N_t$ 为总时间; $C_{DG,g,t}$ 、 $P_{DG,t}$ 分别为分布式微燃机的单位发电成本和发电功率; $C_t$ 、 $P_t$ 分别为配电系统从上级电网的购电价格和购电功率; $C_{M1,t}$ 、 $C_{M2,t}$ 、 $C_{M3,t}$ 分别为工业园区1、工业园区2和工业园区3从配电系统的购电价格; $P_{M1,t}$ 、 $P_{M2,t}$ 、 $P_{M3,t}$ 分别为工业园区1、工业园区2和工业园区3从配电系统的购电功率; $Gas_{M1,t}$ 、 $Gas_{M2,t}$ 、 $Gas_{M3,t}$ 分别为工业园区1、工业园区2和工业园区3从配气系统的购气量; $C_{gas}$ 为工业园区从配气系统的购气价格。

目标运行成本包含配电系统从上级输电网的购电成本、配电系统分布式电源发电成本、各工业园区从配电系统的购电成本和各工业园区从配气系统的购气成本。

### 2.2 约束条件

#### 2.2.1 配电系统约束条件

1)功率平衡约束。配电系统的潮流平衡约束受到各节点负荷、微燃机出力、配电系统从上级电网购电功率以及各微网负荷的影响,具体如下式所示:

$$\begin{cases} \sum_{i \in v_1(j)} (P_{ij,t} - l_{ij,t} r_{ij}) - \sum_{h \in v_2(j)} P_{jh,t} + P_{DG,j,t} - P_{D,j,t} - P_{M,j,t} = 0 \\ \sum_{i \in v_1(j)} (Q_{ij,t} - l_{ij,t} x_{ij}) - \sum_{h \in v_2(j)} Q_{jh,t} + Q_{DG,j,t} - Q_{D,j,t} - Q_{M,j,t} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i, v_1(j)$ 分别为功率流向节点 $j$ 的线路始端节点及所有始端节点合集; $h, v_2(j)$ 分别为功率流出节点 $j$ 的线路终端节点及所有终端节点合集; $P_{ij,t}$ 、 $Q_{ij,t}$ 分别为 $t$ 时刻线路 $ij$ 的有功、无功功率; $P_{DG,j,t}$ 、 $Q_{DG,j,t}$ 分别为 $t$ 时刻与节点 $j$ 所接的微燃机有功、无功出力; $P_{D,j,t}$ 、 $Q_{D,j,t}$ 分别为 $t$ 时刻节点 $j$ 除微网负荷外的其他负荷有功、无功出力; $P_{M,j,t}$ 、 $Q_{M,j,t}$ 分别为 $t$ 时刻与节点 $j$ 所接微网的有功、无功出力; $l_{ij,t}$ 为线路 $ij$ 在 $t$ 时刻电流的平方项; $r_{ij}$ 、 $x_{ij}$ 分别为节点 $i$ 与 $j$ 之间的电阻以及电抗。

2)线路潮流约束的二阶锥形:

$$\begin{cases} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ |l_{ij,t} - V_{i,t}^2| \end{cases} \leq l_{ij,t} + V_{i,t}^2 \quad (3)$$

式中: $V_{i,t}$ 为 $t$ 时刻节点 $i$ 电压。

3)电压降方程:

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

4)节点电压上、下限约束:

$$V_{i,\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,\max} \quad (5)$$

式中: $V_{i,\min}$ 、 $V_{i,\max}$ 分别为节点 $i$ 电压幅值的最小、最大值。

5)线路传输容量约束:

$$\begin{cases} -P_{ij}^{\max} \leq P_{ij,t} \leq P_{ij}^{\max} \\ -Q_{ij}^{\max} \leq Q_{ij,t} \leq Q_{ij}^{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{ij}^{\max}$ 、 $Q_{ij}^{\max}$ 分别为线路 $ij$ 的最大有功、无功功率传输容量。

6)微燃机出力上、下限约束:

$$\begin{cases} P_{DG,\min}^g \leq P_{DG,t}^g \leq P_{DG,\max}^g \\ Q_{DG,\min}^g \leq Q_{DG,t}^g \leq Q_{DG,\max}^g \end{cases} \quad (7)$$

式中: $P_{DG,t}^g$ 、 $Q_{DG,t}^g$ 分别为微燃机 $g$ 在时刻 $t$ 的有功、无功出力; $P_{DG,\min}^g$ 、 $P_{DG,\max}^g$ 分别为微燃机 $g$ 有功出力的最小、最大值; $Q_{DG,\min}^g$ 、 $Q_{DG,\max}^g$ 分别为微燃机 $g$ 无功出力最小、最大值。

7)微燃机爬坡约束:

$$\begin{cases} P_{DG,t+\Delta t}^g - P_{DG,t}^g \leq \min \{ P_{DG,\max}^g - P_{DG,t}^g, R_{up} \cdot \Delta t \} \\ P_{DG,t}^g - P_{DG,t+\Delta t}^g \leq \min \{ P_{DG,t}^g - P_{DG,\min}^g, -R_{down} \cdot \Delta t \} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $R_{up}$ 、 $R_{down}$ 分别为燃气轮机向上、向下爬坡速率。

#### 2.2.2 工业园区约束条件

1)空调约束:

$$\begin{cases} P_{ae}^{\min} \leq P_t^{ae} \leq P_{ae}^{\max} \\ C_t^{ae} = \eta_{ae} P_t^{ae} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $P_{ae}^{\min}$ ,  $P_{ae}^{\max}$  分别为空调运行功率的最小、最大值;  $C_t^{ae}$  为空调的制冷功率;  $P_t^{ae}$  为空调的运行功率;  $\eta_{ae}$  为空调将电能转化为冷能的效率。

2) 冰蓄冷系统约束。冰蓄冷系统中含有储冷罐、制冰机和融冰机, 其约束包含储冷量等式约束、储冷量上下限约束、融冰功率上下限约束和制冰功率上下限约束, 分别如下所示:

$$\begin{cases} C_t^{ac} = C_{t-1}^{ac} + \eta_p P_t^{ac} - \eta_M M_t^{ac} \\ C_{t,\min}^{ac} \leq C_t^{ac} \leq C_{t,\max}^{ac} \\ M_{t,\min}^{ac} \leq M_t^{ac} \leq M_{t,\max}^{ac} \\ P_{t,\min}^{ac} \leq P_t^{ac} \leq P_{t,\max}^{ac} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $C_t^{ac}$ ,  $C_{t,\min}^{ac}$ ,  $C_{t,\max}^{ac}$  分别为  $t$  时刻储冷罐中的存储量、存储量最小值及存储量最大值;  $P_t^{ac}$ ,  $P_{t,\min}^{ac}$ ,  $P_{t,\max}^{ac}$  分别为  $t$  时刻制冰机的运行功率及其运行功率的最小、最大值;  $M_t^{ac}$ ,  $M_{t,\min}^{ac}$ ,  $M_{t,\max}^{ac}$  分别为  $t$  时刻融冰机运行功率及其运行功率的最小、最大值;  $\eta_p$ ,  $\eta_M$  分别为制冰效率和融冰效率。

3) 电锅炉约束:

$$H_t^{eb} = P_t^{eb} \cdot \eta_{eb} \quad (11)$$

式中:  $H_t^{eb}$  为电锅炉的制热功率;  $P_t^{eb}$  为电锅炉的运行功率;  $\eta_{eb}$  为电锅炉将电能转化为热能的效率。

4) 微燃机约束:

$$\begin{cases} H_t^{MT} = P_t^{MT} R_{MT} \\ P_t^{MT} = \eta_{MT} H_{gas,t} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $H_t^{MT}$ ,  $P_t^{MT}$  分别为  $t$  时刻微燃机的热出力以及电出力;  $R_{MT}$  为微燃机的热电比;  $\eta_{MT}$  为微燃机的运行效率;  $H_{gas,t}$  为微燃机用气量。

5) 压缩空气系统约束:

$$\begin{cases} G_t^{cas} = G_{t-1}^{cas} - E_t^{cas} \cdot \Delta t + \eta_{cas} \cdot P_t^{cas} \cdot \Delta t \\ G_0^{cas} \cdot 0.8 \leq G_t^{cas} \leq G_0^{cas} \cdot 1.2 \\ V_{cas} \cdot p^{cas,\min} \leq G_t^{cas} \leq V_{cas} \cdot p^{cas,\max} \\ P_t^{cas} = r_{v_t}^{cas} \cdot P_r^{cas} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $G_t^{cas}$ ,  $E_t^{cas}$ ,  $P_t^{cas}$  分别为储气罐储气量、时间  $\Delta t$  内的放气量及空气压缩机的运行功率;  $\eta_{cas}$  为压缩机制备压缩空气的效率;  $G_0^{cas}$  为储气罐在初始时刻的储气量;  $V_{cas}$  为储气罐的体积;  $p^{cas,\min}$ ,  $p^{cas,\max}$  分别为储气罐压强的最小、最大值;  $r_{v_t}^{cas}$  为 0-1 变量, 若压缩机运行则取 1, 否则取 0;  $P_r^{cas}$  为压缩机的额定功率。

6) 光伏电源出力约束:

$$P_t^{PV} = \eta_{PV} (1 - r_{PV}) (S_n + \Delta S_n) \quad (14)$$

式中:  $P_t^{PV}$  为光伏电源出力;  $\eta_{PV}$  为光伏电源的光热转换效率;  $r_{PV}$  为反射系数;  $S_n$  为太阳辐射强度;

$\Delta S_n$  为太阳辐射强度的预测误差。

7) 蓄电池约束:

$$\begin{cases} SOC_t = SOC_{t-1} + P_t^c \Delta t - P_t^d \Delta t \\ SOC_{\min} \leq SOC_t \leq SOC_{\max} \\ SOC_0 = SOC_{end} \\ P_{\min}^c \leq P_t^c \leq P_{\max}^c \\ P_{\min}^d \leq P_t^d \leq P_{\max}^d \\ P_t^{soc} = P_t^c - P_t^d \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $SOC_t$  为  $t$  时刻蓄电池荷电状态;  $SOC_{\min}$ ,  $SOC_{\max}$  分别为蓄电池荷电状态的最小、最大值;  $SOC_0$ ,  $SOC_{end}$  分别为蓄电池荷电状态的初始值与最终值;  $P_t^c$  为蓄电池充电功率;  $P_t^d$  为蓄电池放电功率;  $P_{\min}^c$ ,  $P_{\max}^c$  分别为蓄电池充电功率最小、最大值;  $P_{\min}^d$ ,  $P_{\max}^d$  分别为蓄电池放电功率最小、最大值;  $P_t^{soc}$  为蓄电池运行功率。

8) 能量平衡约束。能量平衡约束包含冷能、热能、压缩空气能和电能平衡方程, 分别如下:

$$\begin{cases} \eta_M \cdot M_t^{ac} + C_t^{ae} = C_t^{load} + \Delta C_t^{load} \\ H_t^{MT} + H_t^{eb} = H_t^{load} + \Delta H_t^{load} \\ E_t^{cas} = E_t^{load} + \Delta E_t^{load} \\ P_t^{MT} + P_t^{PV} + P_t^{M1} = P_t^{cas} + P_t^{ac} + P_t^{ac} + P_t^{eb} + \\ P_t^{soc} + (P_t^{load} + \Delta P_t^{load}) \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $C_t^{load}$  为工业园区冷负荷;  $\Delta C_t^{load}$  为工业园区冷负荷的预测误差;  $H_t^{load}$  为工业园区热负荷;  $\Delta H_t^{load}$  为工业园区热负荷的预测误差;  $E_t^{load}$  为工业园区压缩空气负荷;  $\Delta E_t^{load}$  为工业园区压缩空气负荷的预测误差;  $P_t^{M1}$  为工业微网 1 从配电系统购电功率;  $P_t^{load}$  为工业园区其他固定电负荷;  $\Delta P_t^{load}$  为工业园区其他固定电负荷的预测误差。

### 3 含多工业园区的配电系统日内滚动优化调度模型

传统的日前优化调度往往只进行一次求解就得出整个调度区间内的调度计划, 对电价、负荷和新能源出力等不确定信息的预测误差和波动性的应对能力较差。因此, 本文采用基于模型预测控制的滚动优化原理对含多工业园区的配电系统日内滚动优化调度模型进行求解, 将调度区间分为多个预测区间和控制区间, 在日内依次对每个预测区间进行求解, 并只执行控制区间的调度计划, 直至完成整个调度区间内的求解。通过日内优化调度可以有效降低不确定信息对优化调度结果的影响, 提高配电系统对新能源发电的消纳。其中, 日内滚动优化所采用的负荷、天

气等不确定信息为基于最新时刻所预测的数值,与日前预测数据相比可降低预测值与实际值之间的误差,通过日内滚动优化实时更新工业园区的运行策略,从而实现校正作用。

不确定信息预测不准确性会使得配-微联络线功率产生波动,进而对配电系统功率分布产生影响,从而影响配电系统各节点电压和频率质量,为配电系统的运行安全性和可靠性带来挑战<sup>[26]</sup>。同时,当负荷发生突变时,可能会导致分布式电源爬坡速率达到上限,不利于配电系统的运行。为了消除联络线日内实际功率与日前计划值的偏差,将日前计划值作为跟踪项,以最小化预测域内联络线日内实际功率与日前计划值偏差量为目标函数构建含多工业园区的配电系统日内优化调度模型,目标函数如下式:

$$P_{obj} = \min [(P_{M1}^{day} - P_{M1})(P_{M1}^{day} - P_{M1})^T + (P_{M2}^{day} - P_{M2})(P_{M2}^{day} - P_{M2})^T + (P_{M3}^{day} - P_{M3})(P_{M3}^{day} - P_{M3})^T] \quad (17)$$

式中: $P_{obj}$ 为目标优化功率; $P_{M1}, P_{M2}, P_{M3}$ 分别为日前调度计划中工业园区1、工业园区2和工业园区3在预测域内从配电系统的购电功率向量; $P_{M1}^{day}, P_{M2}^{day}, P_{M3}^{day}$ 分别为日内调度计划中工业园区1、工业园区2和工业园区3在预测域内从配电系统的购电功率向量。

约束条件与式(2)~式(16)相同,不再赘述。

含多工业园区的配电系统日内滚动优化调度求解流程图如图4所示。

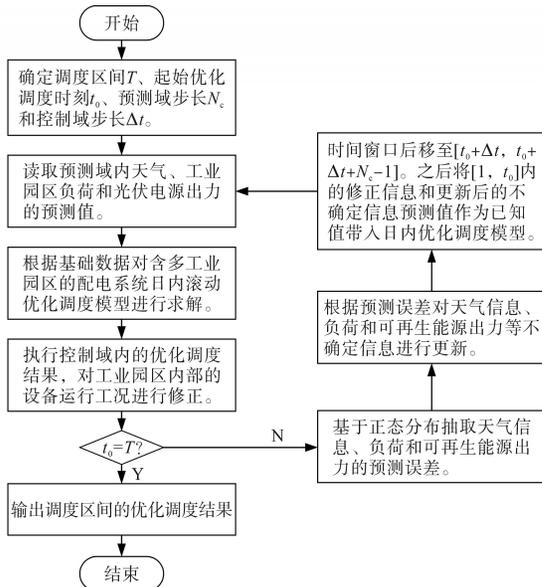


图4 含多工业园区的配电系统日内滚动优化求解流程图

Fig.4 Flow chart for solving intra-day rolling optimal scheduling model of power distribution system with multiple industrial parks

含多工业园区的配电系统日内滚动优化调度具体流程如下:

- 1)确定调度区间 $T$ 、起始优化调度时刻 $t_0$ 、预测域步长 $N_c$ 和控制域步长 $\Delta t$ ;
- 2)读取预测域内天气、工业园区负荷和光伏电源出力的预测值;
- 3)根据基础数据对含多工业园区的配电系统日内滚动优化调度模型进行求解;
- 4)执行控制域内的优化调度结果,对工业园区内部的设备运行工况进行修正;
- 5)判断 $t_0$ 是否等于 $T$ 。若等于,则输出整个调度区间的优化调度结果;若不等于,转步骤6);
- 6)基于正态分布抽取天气信息、负荷和可再生能源出力的预测误差;
- 7)根据预测误差对天气信息、负荷和可再生能源出力等不确定信息进行更新;
- 8)时间窗口后移至 $[t_0+\Delta t, t_0+\Delta t+N_c-1]$ 。之后将 $[1, t_0]$ 内的修正信息和更新后的不确定信息预测值作为已知值代入日内优化调度模型,转步骤2)。

## 4 算例分析

### 4.1 基础数据

本文以IEEE-33节点配电系统与3个工业园区耦合的系统为例进行算例分析。工业园区1、工业园区2和工业园区3分别接入配电系统的6节点、18节点和26节点,拓扑结构如图5所示。

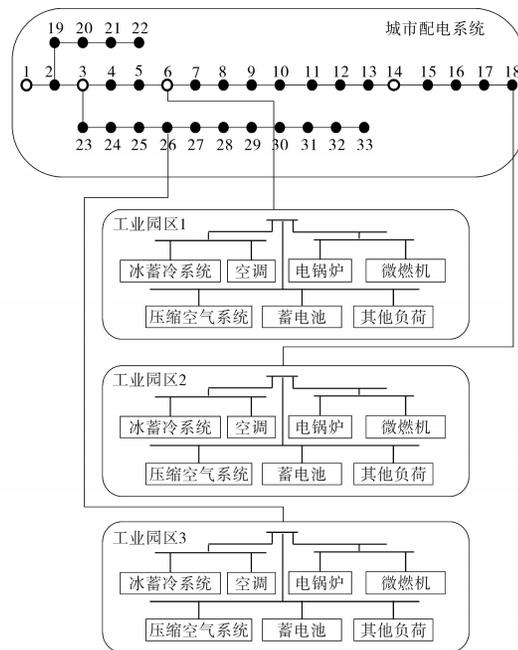


图5 IEEE-33节点配电系统与多工业园区耦合拓扑图

Fig.5 Topology of IEEE-33 node power distribution system with multiple industrial parks

工业园区内部包含工业空调系统、冰蓄冷系统、电锅炉、微燃机、压缩空气系统、蓄电池及其他负荷(光伏电源等),设备具体参数见文献[5, 16]。选取夏季某典型日进行优化调度,设置调度周期为24 h,日内滚动优化调度的滚动步长 $\Delta t$ 为1 h。假设采取日前优化调度时天气和负荷的预测值与实际值之间存在期望为0、标准差为10%的随机误差,日内滚动优化时可将误差的标准差降低为3%。为分析考虑含多工业园区的配电系统需求响应特性前、后各工业园区的设备运行情况以及购电成本,设置以下场景:

场景1:不考虑多工业园区内部设备需求响应特性(内部设备采用固定工况运行,不对电价进行响应)。

场景2:考虑多工业园区内部设备需求响应特性。

为验证采用基于模型预测控制(model predictive control, MPC)的滚动优化原理进行求解时对抑制联络线功率波动性的有效性,设置场景2为以下2种场景:

场景3:考虑多工业园区内部设备需求响应特性,由于预测误差产生的联络线差额由外部电网进行补偿。

场景4:考虑多工业园区内部设备需求响应特性,由于预测误差产生的联络线差额由工业园区通过改变设备运行功率进行补偿。

#### 4.2 日前优化调度结果分析

以下分析以工业园区1为例,其余两个工业园区的设备运行情况与总购电功率结果分析与工业园区1类似,故不再赘述。

图6为工业园区1中供热设备的运行功率曲线图,包含微燃机与电锅炉。可以看出,在场景2下,在初期电价低谷时刻,由于采用微燃机进行发电和供热时价格较高,故微燃机一直处于运行功率下限,采用电锅炉和外部电网对工业园区内部的热能和电能进行供给;而在电价较高时刻,采用微燃机进行热能和电能的供给较为划算,在电价高峰时刻由于采用微燃机进行供热足够满足工业园区的热能需求,故电锅炉出力为0。通过上述策略可有效降低工业园区热能用能成本。

图7为工业园区1内部供冷系统的运行功率曲线。可以看出,在场景2下,电价低谷时刻主要使用空调进行制冷,同时,冰蓄冷系统处于制冰状态,将冷能进行存储;在电价峰时,即11:00—

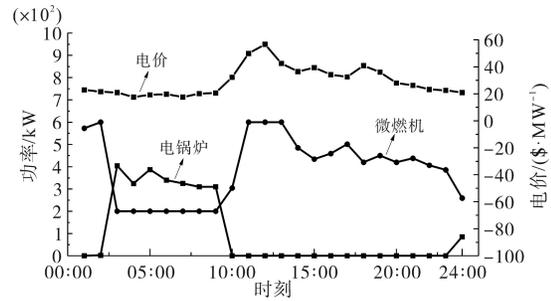


图6 供热系统运行功率

Fig.6 Operating power of heating system

13:00时间段,降低了空调系统的出力,通过冰蓄冷系统的融冰过程将存储的冷能释放出来以供给工业园区的冷能需求,有效地降低了工业园区供冷系统的运行成本。

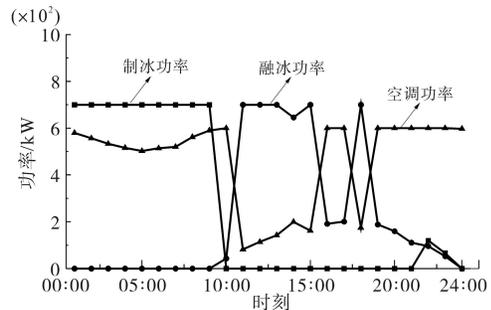


图7 供冷系统运行功率

Fig.7 Operating power of cooling system

图8为工业园区1内部蓄电池的充放电功率曲线图。可以看出,在电价较低的00:00—09:00时间段,蓄电池由于自身容量的限制并未一直处于充电状态,而是选择在电价最低的04:00—05:00及07:00时间段进行充电。在电价高峰时刻,即11:00—13:00, 15:00及18:00—19:00时间段将存储的电能释放出来供给自身使用,以降低电价高峰时刻自身的购电功率。通过蓄电池充放电过程对工业园区不同时刻购电功率进行调整,有效地降低了工业园区的购电成本。

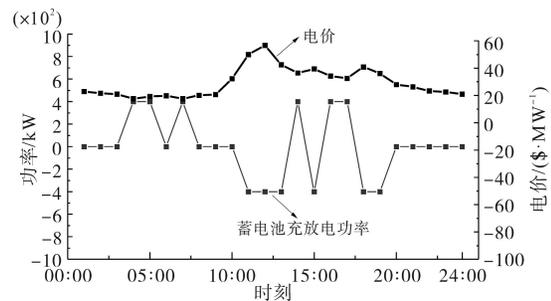


图8 蓄电池运行功率

Fig.8 Operating power of battery

图9为工业园区1在调度区内从配电系统的购电功率曲线图。由图9可以看出,相较于场景1,场景2下的工业园区在电价高峰时刻,即

11:00—12:00, 15:00 及 18:00 时间段的购电功率均出现了明显的降低,将部分耗能过程转移到了电价低谷时刻。通过本文所提策略,工业园区 1 在 24 h 内的购电成本相较于场景 1 降低了 35.7%。

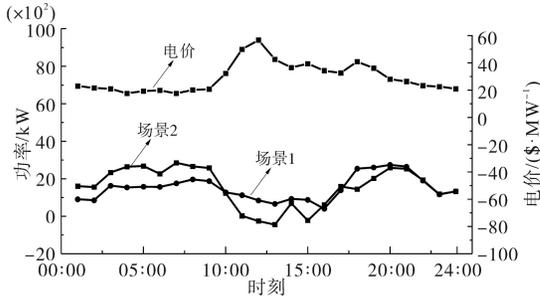


图9 工业园区 1 从配电系统购电功率  
Fig.9 Purchases power from the distribution system by industrial park 1

为更加直观地对场景 1 和场景 2 下各工业园区的购电成本进行分析,表 1 给出了场景 1 和场景 2 下各工业园区的购电成本。可以看出,相较于场景 1,场景 2 下工业园区 1、工业园区 2 和工业园区 3 从配电系统的购电成本分别降低了 299.2 \$, 322.3 \$ 和 231.2 \$。

表 1 场景 1 和场景 2 下各工业园区运行成本

Tab.1 Costs of each industrial park under scenario 1 and scenario 2

	工业园区 1 购电成本/\$	工业园区 2 购电成本/\$	工业园区 3 购电成本/\$
场景 1	1 006.3	1 654.5	1 274.4
场景 2	707.1	1 332.2	1 043.2

### 4.3 日内滚动优化调度结果分析

分析日内滚动优化时场景 3 和场景 4 下工业园区与配电系统联络线功率与日前优化配-微联络线的功率偏差,图 10 为场景 3、场景 4 下日内滚动优化工业园区 1 配-微联络线的功率曲线图,其余两个工业园区联络线结果与其类似,故不再赘述。由图 10 可以看出,相较于场景 3,在场景 4 下,日内滚动优化各个时刻配-微联络线交互功率与日前优化配-微联络线功率的偏差值明显降低。对于 00:00—07:00 和 18:00—24:00 时间段,由于此时仅存在各个工业园区自身冷、热、电负荷的预测偏差,而不存在光伏电源出力的偏差,故场景 4 较于场景 3,配-微联络线功率与日前计划下的配-微联络线功率偏差值减小得不明显。在 08:00—18:00 时间段,同时存在上述两种预测偏差,故场景 4 相较于场景 3,配-微联络线的功率偏差值降低较为明显。通过上述策略,可有效降低实际运行情况下各工业园区从配电系统的购电功率与日前计划值的偏差,有效抑制了

由于预测误差导致的配-微联络线功率波动。

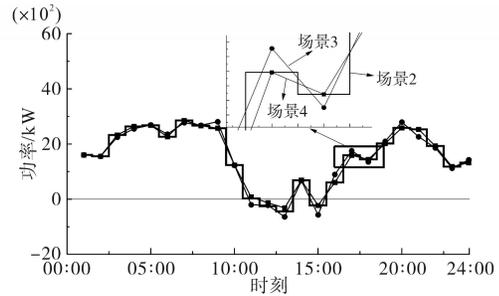


图 10 日内滚动优化时工业园区 1 从配电系统购电功率  
Fig.10 Purchases power from the distribution system by industrial park 1 under intra-day rolling optimization

图 11 为场景 3 与场景 4 下各发电机的出力曲线图。由图 11 可以看出,在场景 3 下,由于需要配电系统改变分布式电源出力对预测误差导致的功率波动进行补偿,各分布式电源的出力波动较大,在 09:00—11:00 时间段,由于预测误差导致的功率波动较大,分布式电源出力出现了明显波动,其功率变化已经达到了爬坡速率的限值,剩余功率波动需要通过调整从上级输电网的购电量来满足功率平衡,不利于配电系统运行的经济性和可靠性。而在场景 4 下则通过工业园区对功率波动进行补偿,配电系统内分布式电源出力变化较为平缓,且拥有一定裕度,更加有利于配电系统运行的安全性和可靠性。

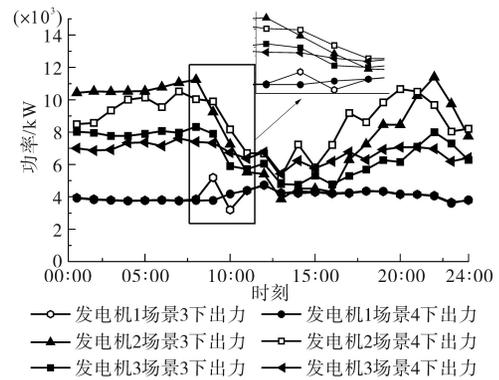


图 11 分布式电源出力  
Fig.11 Power of distributed generation

图 12 为各配-微耦合节点在调度区间 24 h 内的电压水平。由图 12 可以看出,在场景 3 下,由于联络线功率波动由配电系统进行补偿,当预测信息波动较大时会对配电系统的潮流平衡产生影响,从而影响配-微耦合节点的电压水平,在 09:00—11:00 时间段,配-微耦合节点电压出现了明显波动,不利于工业园区内部设备的正常运行。而场景 4 下各配-微耦合节点电压基本处于无波动状态。由上述分析可知,在场景 4 下,通过工业园区改变设备运行状态对预测误差造成的

联络线功率波动进行补偿时更加有利于配-微耦合节点的电压质量,能够更好地保证工业园区内部设备的正常运转。

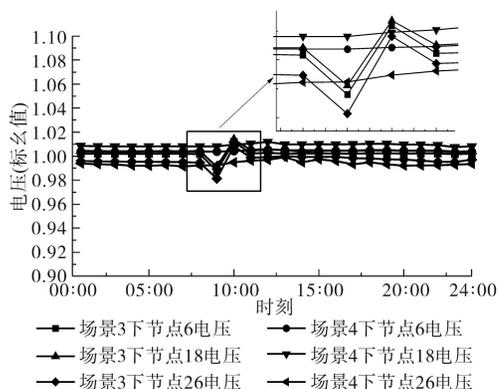


图12 配网与工业园区耦合节点电压  
Fig.12 Voltage of coupling nodes of distribution system and industrial park

表2为场景3与场景4下各工业园区的购电成本。由于工业园区的购电成本主要取决于其向配电系统的购电功率,场景4下工业园区通过改变自身设备运行功率对联络线功率波动进行补偿,联络线功率与日前优化调度中联络线功率相近,故各工业园区购电成本与日前优化调度相近。而场景3下则通过外电网对联络线功率波动进行补偿,工业园区仍以自身运行经济性最优为目标,故成本进一步降低。由此可以看出,当工业园区通过改变自身运行功率对联络线功率波动进行补偿时会牺牲一定经济性。为增强工业园区参与联络线功率波动补偿的积极性,可采用合理的奖励、惩罚机制<sup>[27-29]</sup>。且通过对图12分析可知,在场景4下配-微耦合节点的电压质量更好,更加有利于工业园区设备的运行,也可在一定程度上增加工业园区参与联络线功率波动补偿操作的积极性。

表2 场景3和场景4下各工业园区运行成本

Tab.2 Costs of each industrial park under scenario 3 and scenario 4

	工业园区1 购电成本/\$	工业园区2 购电成本/\$	工业园区3 购电成本/\$
场景3	552.9	1 210.4	949.4
场景4	734.5	1 386.7	1 068.5

## 5 结论

分布式新能源出力不确定性为配电系统运行安全性和经济性带来了挑战,基于工业园区可有效整合各类分布式新能源这一特点,本文提出了一种含多工业园区的配电系统多时间尺度优化调度策略;构建了以运行经济性最优为目标的

含多工业园区的配电系统日前优化调度模型和以联络线功率偏差最小为目标的含多工业园区的配电系统日内滚动优化调度模型。

由算例分析可知,本文所提的含多工业园区的配电系统多时间尺度优化调度策略,可以有效降低各个工业园区的购电成本,其中工业园区1、工业园区2和工业园区3分别降低了35.7%,19.5%和18.2%。通过含多工业园区的配电系统日内滚动优化调度策略,有效地抑制了由于日前预测误差而导致的实际运行情况下配-微联络线交互功率的波动,保证了配电系统各节点的电压质量和运行安全性。

## 参考文献

- [1] 罗金山,路畅,孟繁骏.碳排放及燃煤约束下的电源规划及其效益评价[J].电力系统自动化,2016,40(11):47-52.  
LUO Jinshan, LU Chang, MENG Fanjun. Generation expansion planning and its benefit evaluation considering carbon emission and coal supply constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11):47-52.
- [2] 鲁宗相,李海波,乔颖.高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J].中国电机工程学报,2017,37(1):9-19.  
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1):9-19.
- [3] 于汀,刘广一,蒲天骄,等.计及柔性负荷的主动配电网多源协调优化控制[J].电力系统自动化,2015,39(9):95-100.  
YU Ting, LIU Guangyi, PU Tianjiao, et al. Multiple coordinated optimization network considering flexible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9):95-100.
- [4] 肖峻,李振生,张跃.基于最大供电能力的智能配电网规划与运行新思路[J].电力系统自动化,2012,36(13):8-14.  
XIAO Jun, LI Zhensheng, ZHANG Yue. New ideas on planning and operation of intelligent distribution network based on maximum power supply capacity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(13):8-14.
- [5] 马昕,裴玮,肖浩,等.考虑复杂生产约束的电池生产工业园区能源网络与生产管理综合优化运行[J].电网技术,2018,42(11):3566-3575.  
MA Xin, PEI Wei, XIAO Hao, et al. Integrated energy network and production management optimization operation of battery production industrial estate considering complex production constraints[J]. Power System Technology, 2018, 42(11):3566-3575.
- [6] 胡泉,徐国栋,尚策,等.工业园区参与调峰的电池储能一需求响应联合规划[J].电力系统自动化,2019,43(15):116-123.

- HU Xiao, XU Guodong, SHANG Ce, et al. Joint planning of battery energy storage and demand response for industrial park participating in peak shaving[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 116-123.
- [7] 张淑婷, 陆海, 林小杰, 等. 考虑储能的工业园区综合能源系统日前优化调度[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 93-103.
- ZHANG Shuting, LU Hai, LIN Xiaojie, et al. Operation scheduling optimization of integrated-energy system in industrial park in consideration of energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 93-103.
- [8] 张涛允, 张玉刚, 白文远, 等. 计及不确定性的风-柴-储组合微电网规划[J]. 电气传动, 2022, 52(6): 40-46.
- ZHANG Taoyun, ZHANG Yugang, BAI Wenyuan, et al. Wind-diesel-storage combination microgrid planning considering uncertainty[J]. Electric Drive, 2022, 52(6): 40-46.
- [9] 马磊, 张超, 钟鸣, 等. 光储气微网优化运行研究[J]. 电气传动, 2021, 51(9): 67-74.
- MA Lei, ZHANG Chao, ZHONG Ming, et al. Research on economical operation of the micro-grid with photovoltaic and natural gas[J]. Electric Drive, 2021, 51(9): 67-74.
- [10] 周步祥, 邹家惠, 董申, 等. 基于共享储能的微网园区系统能量协同优化[J]. 电气传动, 2021, 51(18): 70-75.
- ZHOU Buxiang, ZOU Jiahui, DONG Shen, et al. Energy cooperative optimization of micro-grid campus system based on shared energy storage[J]. Electric Drive, 2021, 51(18): 70-75.
- [11] DIEKERHO F, MICHAEL L, HECKER S, et al. Modeling and optimization of industrial compressed-air energy systems for demand response[C]//2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), Leuven, Belgium; IEEE, 2016: 1-6.
- [12] XU Xiandong, SUN Wenqiang, ABEYSEKERA Muditha, et al. Quantifying the flexibility from industrial steam systems for supporting the power grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 36(1): 313-322.
- [13] 李明轩, 齐步洋, 贺大玮. 工业园区需求响应资源聚合优化配置方法[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3543-3549.
- LI Mingxuan, QI Buyang, HE Dawei. Optimization method of the aggregation of the demand response resources in an industrial park[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3543-3549.
- [14] CHOUBINEH M, MOHAGHEGHI S. Optimal energy management in an industrial plant using on-site generation and demand scheduling[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(3): 1945-1952.
- [15] REKA S Sofana, RAMESH V. Industrial demand side response modelling in smart grid using stochastic optimisation considering refinery process[J]. Energy & Buildings, 2016, 127(9): 84-94.
- [16] ZHANG Rufeng, LI Guoqing, JIANG Tao, 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, 3(36): 2663-2673.
- [17] 徐成司, 董树锋, 张舒鹏, 等. 面向工业园区的集中-分布式综合需求响应方法[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 489-500.
- XU Chengsi, DONG Shufeng, ZHANG Shupeng, et al. Centralized-distributed integrated demand response method for industrial park[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 489-500.
- [18] 何仲潇, 徐成司, 刘育权, 等. 考虑多能协同的工厂综合需求侧响应模型[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 69-74.
- HE Zhongxiao, XU Chengsi, LIU Yuquan, et al. Industrial park IDR model considering multi-energy cooperation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 69-74.
- [19] HUANG X, HONG S H, LI Y. Hour-ahead price based energy management scheme for industrial facilities[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(6): 2886-2898.
- [20] 戴志辉, 陈冰研, 谢军, 等. 含多微网的主动配电网分层调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 121-127.
- DAI Zhihui, CHEN Bingyan, XIE Jun, et al. Hierarchical scheduling strategy for active distribution network with multi-microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 121-127.
- [21] 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.
- [22] 吴利兰, 荆朝霞, 吴青华, 等. 基于Stackelberg博弈模型的综合能源系统均衡交互策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 142-150, 207.
- WU Lilan, JING Chaoxia, WU Qinghua, et al. Equilibrium strategies for integrated energy systems based on Stackelberg game model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 142-150, 207.
- [23] LIU W, GU W, WANG J, et al. Game theoretic non-cooperative distributed coordination control for multi-microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6986-6997.
- [24] 李鹏, 吴迪凡, 李雨薇, 等. 基于综合需求响应和主从博弈的多微网综合能源系统优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1307-1321, 1538.
- LI Peng, WU Difan, LI Yuwei, et al. Optimal dispatch of multi-microgrids integrated energy system based on integrated demand response and stackelberg game[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1307-1321, 1538.
- [25] 赵毅, 陈雨婷, 孙文瑶. 多微网配电系统区间调度方法与市场交易策略研究[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 47-56.
- ZHAO Yi, CHEN Yuting, SUN Wenyao. Research on region dispatch method for multi microgrid distribution system and market trading strategy[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 47-56.
- [26] 赵波, 薛美东, 陈荣柱, 等. 高可再生能源渗透率下考虑预测误差的微电网经济调度模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(7): 1-8.

(下转第62页)

45 (7):2647-2656.

[7] HUO Y, BOUFFARD F, JOOS G. Spatio-temporal flexibility management in low-carbon power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2593-2605.

[8] ZHOU B, FANG J, AI X, et al. Flexibility-enhanced continuous-time scheduling of power system under wind uncertainties[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(4): 2306-2320.

[9] GARCIA-TORRES F, BORDONS C, TOBAJAS J, et al. Stochastic optimization of microgrids with hybrid energy storage systems for grid flexibility services considering energy forecast uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 5537-5547.

[10] EVANGELOPOULOS V A, AVRAMIDIS I I, GEORGILAKIS P S. Flexibility services management under uncertainties for power distribution systems: stochastic scheduling and predictive real-time dispatch[J]. IEEE Access, 2020 (8): 38855-38871.

[11] DEHGHAN S, AMJADY N, ARISTIDOU P A. Robust coordinated expansion planning model for wind farm-integrated power systems with flexibility sources using affine policies[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(3): 4110-4118.

[12] CHEN X, LI N. Leveraging two-stage adaptive robust optimization for power flexibility aggregation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 3954-3965.

[13] SHI Y, DONG S, GUO C, et al. Enhancing the flexibility of storage integrated power system by multi-stage robust dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2314-2322.

[14] KIANI H, HESAMI K, AZARHOOSHANG A, et al. Adaptive robust operation of the active distribution network including renewable and flexible sources[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2021(26): 100476.

[15] 谢云云, 杨正婷, 蔡胜, 等. 基于鲁棒模型预测控制的配电网供电恢复策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(23): 123-131. XIE Yunyun, YANG Zhengting, CAI Sheng, et al. Power supply restoration strategy for distribution network based on robust model prediction control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(23): 123-131.

[16] NOTARNICOLA I, NOTARSTEFANO G. Constraint-coupled distributed optimization: a relaxation and duality approach[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2020, 7(1): 483-492.

[17] 田坤鹏, 孙伟卿, 韩冬, 等. 基于两阶段鲁棒优化的可再生能源DNE极限评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 73-80. TIAN Kunpeng, SUN Weiqing, HAN Dong, et al. DNE limit assessment of renewable energy based on two-stage robust optimization[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 73-80.

[18] DING T, BO R, GU W, et al. Big-M based MIQP method for economic dispatch with disjoint prohibited zones[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 976-977.

[19] ZHANG Z, CHEN Y, LIU X, et al. Two-stage robust security-constrained unit commitment model considering time autocorrelation of wind/load prediction error and outage contingency probability of units[J]. IEEE Access, 2019(7): 25398-25408.

[20] DAI C, LEI W, WU H. A multi-band uncertainty set based robust SCUC with spatial and temporal budget constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 4988-5000.

[21] BERTSIMAS D, LITVINOV E, SUN X A, et al. Adaptive robust optimization for the security constrained unit commitment problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 52-63.

[22] YE H, LI Z. Robust security-constrained unit commitment and dispatch with recourse cost requirement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3527-3536.

[23] HU B, WU L, MARWALI M. On the robust solution to SCUC with load and wind uncertainty correlations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 2952-2964.

收稿日期: 2022-04-07  
修改稿日期: 2022-05-30

(上接第24页)

ZHAO Bo, XUE Meidong, CHEN Rongzhu, et al. An economic dispatch model for microgrid with high renewable energy resource penetration considering forecast errors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(7): 1-8.

[27] 吴栋梁, 王扬, 郭创新, 等. 电力市场环境下考虑风电预测误差的经济调度模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 23-28. WU Dongliang, WANG Yang, GUO Chuangxin, et al. An economic dispatch model considering wind power forecast errors in electricity market environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 23-28.

[28] 冯雷, 蔡泽祥, 王奕, 等. 计及负荷储能特性的微网荷储协调联络线功率波动平抑策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 22-28. FENG Lei, CAI Zexiang, WANG Yi, et al. Strategy for tie line power fluctuation suppressing of load-energy storage coordinated microgrid considering energy-storage characteristic of load [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 22-28.

[29] 姚焱, 张沛超. 基于市场控制的空调负荷参与平抑微网联络线功率波动的方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 782-791. YAO Yao, ZHANG Peichao. A market-based control method for air conditioner loads to smooth microgrid tie-line power fluctuation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 782-791.

收稿日期: 2022-06-30  
修改稿日期: 2022-07-29