

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250130

## 考虑超分辨率风电不确定性的鲁棒安全经济调度

李本新<sup>1</sup>, 樊鑫<sup>1</sup>, 姜涛<sup>1</sup>, 陈厚合<sup>1</sup>, 郑雪瑞<sup>2</sup>, 董墨庭<sup>2</sup>

(1. 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;

2. 国网吉林省电力有限公司吉林供电公司, 吉林 吉林 132000)

**摘要:** 针对风电功率在时刻间超分辨率下不可预知的非线性波动所引发的电力失衡和线路潮流越限风险, 提出一种考虑超分辨率风电不确定性的鲁棒安全经济调度方法。首先, 基于主时间尺度各时刻风电功率预测值和次时间尺度风电功率波动速度的区间变动范围, 提出了精细考虑超分辨率波动不确定性的风电出力模型。在此基础上, 通过引入次时间尺度运行可行性约束建立考虑超分辨率风电不确定性的鲁棒安全实时经济调度模型。然后, 针对含随机变量的次时间尺度运行约束所导致的模型难以直接求解的问题, 在约束机理分析基础上, 将其等效变换为由若干严峻场景表达的易于求解的确定性约束。最后, 以修改的6节点系统和IEEE118节点系统为例进行分析, 验证了所提模型和方法能够有效解决时刻间风电功率非线性波动所引起的电力失衡和潮流越限问题。

**关键词:** 经济调度; 鲁棒优化; 多时间尺度; 超分辨率不确定性

### Robust security-constrained economic dispatch considering super-resolution wind power uncertainty

LI Benxin<sup>1</sup>, FAN Xin<sup>1</sup>, JIANG Tao<sup>1</sup>, CHEN Houhe<sup>1</sup>, ZHENG Xuerui<sup>2</sup>, DONG Moting<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China; 2. Jilin Power Supply Company, State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Jilin 132000, China)

**Abstract:** Aiming at the risk of power imbalance and line overload caused by unpredictable fluctuations of wind power at super-resolution time scales, this paper proposes a robust security-constrained economic dispatch method considering super-resolution wind power uncertainty. First, a wind power output model is developed to capture super-resolution uncertainty with high granularity based on the interval variation ranges of wind power forecasts at the primary time scale and the fluctuation rates at the secondary time scale. On this basis, by introducing feasible operation constraints at the secondary time scale, a robust real-time security-constrained economic dispatch model incorporating super-resolution wind uncertainty is formulated. Then, since the secondary time-scale operational constraints involve stochastic variables, making the model difficult to solve directly, the constraints are analyzed and equivalently transformed into a set of tractable deterministic constraints represented by several worst-case scenarios. Finally, case studies on the modified 6-bus and IEEE 118-bus systems demonstrate that the proposed model and methodology can effectively address the issues of power imbalance and line flow violations caused by nonlinear inter-temporal wind power fluctuations.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB2404000).

**Key words:** economic dispatch; robust optimization; multi-time scales; super-resolution uncertainty

## 0 引言

风电的大规模开发利用是加速构建新型电力系

统实现“双碳”目标的有效途径<sup>[1]</sup>。然而, 风电出力具有不可预知的随机性和时变的波动性, 随着新型电力系统灵活性资源供应日趋紧张, 其大规模并网将会引发电力系统频率和潮流安全风险, 处理不当不仅影响风电的充分消纳, 而且会威胁电网的安全稳定运行。

**基金项目:** 国家重点研发计划项目资助(2022YFB2404000);  
国网吉林省电力公司科技项目资助(2024-11)

为有效处理风电出力不确定性给调度带来的不利影响,提升电力系统消纳新能源发电的能力,国内外学者进行了大量探索<sup>[2-4]</sup>。根据风电不确定性的处理方式,提出了诸如随机优化<sup>[5]</sup>、鲁棒优化<sup>[6-9]</sup>、随机鲁棒结合<sup>[10]</sup>以及基于人工智能技术的不确定调度方法<sup>[11-13]</sup>。然而,上述方法均按一定时间颗粒度(如 15 min)将研究周期离散为若干时刻点,然后采用概率、模糊或区间不确定性理论对各时刻点的不确定性进行精细刻画,对于相邻时刻点间的超分辨率风电出力与线路潮流,其过渡过程可采用规则的线性变化模型加以描述,没有考虑时刻点间风电出力各种不规则、非线性的波动场景,在灵活性资源日益稀缺的背景下,采用上述方法可能无法有效应对预期外的不确定性,从而导致出现电力失衡和线路功率越限风险<sup>[14]</sup>。

随着风电渗透率的持续上升,风电出力在不同时刻点的不规则波动所导致的安全风险日益受到关注。文献[15]提出一种计及次小时尺度风电不确定性的随机经济调度优化模型,通过在小时级慢速机组出力决策中考虑次小时尺度风电不确定性的影响,提升了调度策略的可执行性。文献[16]考虑小时内系统爬坡需求,提出小时级和小时内的双时间尺度调度周期储能最优容量配置模型,该方法可以有效提高风电接入系统的可靠性。文献[17]针对风电出力剧烈波动导致的时刻间短时爬坡不足问题,提出计及超分辨率不确定性的电力系统连续时间调度模型,提高了调度方案的鲁棒性。文献[18]采用 Bernstein 多项式刻画风电在不同时刻点的出力波动过程,并协调快、慢灵活性资源联合应对风电不确定性,有效缓解了时段内灵活性不足的问题。文献[19]统筹考虑了调度时刻自动发电控制(automatic generation control, AGC)出力及其应对时刻间净负荷波动的能力,构建了计及 AGC 动态特性约束的经济调度模型,改善了电网频率质量。文献[20]针对风电出力在不同时刻点的波动不确定性构建了最苛刻的波动场景,提出计及间歇性特征的电力系统区间经济调度模型,有效提高了决策的鲁棒性。文献[21]计及风电不规则波动在超分辨率下引发的潮流安全风险,提出考虑时段内潮流安全的经济调度模型。文献[22]针对时刻间净负荷波动过程不确定性导致的潮流安全问题,提出计及净负荷时序波动不确定性的精细化调度策略。上述研究从系统爬坡能力和潮流安全角度出发,考虑时刻间风电出力波动不确定性对调度策略的影响,有效提升了电网的控制性能,但没有考虑风电出力平均波动速度随时间递增而递减的时间平滑效应<sup>[23]</sup>,对时刻间超分辨

率下不确定量的时序波动过程刻画略显粗放,影响调度策略的执行效果。

为此,在以上研究的基础上,本文首先计及风电出力波动的时间平滑效应,从波动速度和波动幅值特征出发,构建基于多时间颗粒度的超分辨率风电出力波动过程的精细化区间模型,在此基础上,考虑各时刻以及时刻间电网运行的安全约束,提出考虑超分辨率风电出力不确定性的鲁棒安全实时经济调度模型和高效求解方法。该方法能够自动辨识超分辨率下系统潜在的爬坡需求和潮流安全风险,自适应调整 AGC 机组基点功率及参与因子,有效提高经济调度策略的鲁棒性。

## 1 精细考虑超分辨率不确定性的风电出力模型

### 1.1 基于多颗粒度的风电波动速度不确定性刻画

风电的不确定性有两重属性,一是任意时刻风电功率变动范围的不确定性;二是任意时刻风电爬坡速度的不确定性。对于后者,在对研究周期进行离散化的基础上,往往以相邻调度时刻间风电功率的平均波动速度近似表征,如式(1)所示。

$$\bar{V} = \frac{P_0^W - P_T^W}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt \quad (1)$$

式中:  $\bar{V}$  为  $[0, T]$  时段内风电出力平均爬坡速度;  $T$  为调度时段时长;  $P_0^W$ 、 $P_T^W$  分别为 0 时刻和  $T$  时刻的风电出力;  $V(t)$  为  $t$  时刻风电出力的瞬时爬坡速度。

根据式(1),有

$$\min_{0 \leq t \leq T} V(t) \leq \bar{V} \leq \max_{0 \leq t \leq T} V(t) \quad (2)$$

分析可知,采用平均爬坡速度描述调度时刻间风电出力波动速度的不确定性,若选取的时间粒度过大,将容易淹没小颗粒度下风电功率陡升陡降的快速波动过程,难以精细刻画风电剧烈波动对系统爬坡灵活性的动态需求。若处理不当,容易出现常规机组响应速度无法跟踪的问题。

为此,本文在主时间尺度基础上引入更为精细的次时间尺度,如图 1 所示,主时间尺度的最小时间粒度设为  $\Delta T$ ,次时间尺度的最小时间粒度设为  $\Delta t$ ,且满足式(3)。

$$\Delta t = \frac{\Delta T}{N} \quad (3)$$

式中:  $N$  为  $\Delta T$  在粒度  $\Delta t$  下可进一步细分的颗粒数。

如附录 A 所示,采用平均爬坡速度观测到的风电最大波动速度随量化时间颗粒度的增大而减小,呈现一定的时间平滑效应,即风电波动速度在不同

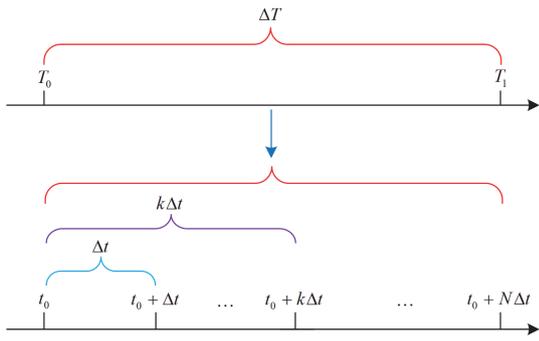


图 1 主、次时间尺度关系图

Fig. 1 Primary and secondary time-scale relationship diagram

时间颗粒度下呈现不同的不确定性特征，为此本文通过式(4)所示的次时间尺度下多时间颗粒度的组合，精细刻画在超分辨率下主时间尺度相邻时刻间风电波动速度的不确定性。

$$\begin{cases} -\delta_{h,k}^d \leq \frac{p_{h,t}^W - p_{h,t-k}^W}{k\Delta t} \leq \delta_{h,k}^u \\ t = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, \min\{K, t\} \end{cases} \quad (4)$$

式中：\$p\_{h,t}^W\$ 表示风电场 \$h\$ 在次时间尺度 \$t\$ 时刻的预测功率；\$\delta\_{h,k}^u\$、\$\delta\_{h,k}^d\$ 分别为风电场 \$h\$ 在 \$k\Delta t\$ 粒度下所观测的最大向上、向下爬坡速度，由于风电功率的时间平滑效应，一般情况下，\$k\$ 越大，\$\delta\_{h,k}^u\$、\$\delta\_{h,k}^d\$ 的数值越小；\$K\$ 为考虑的最大时间颗粒度。

### 1.2 次时间尺度风电功率变动范围的精细化评估

若风电场 \$h\$ 在主时间尺度一个调度时段首、末时刻的预测功率分别为 \$p\_{h,0}^W\$、\$p\_{h,N}^W\$，根据式(4)中不同颗粒度下时刻间风电功率的牵制关系，如图 2 所示。可分别从调度时段的首(末)时刻开始顺(逆)序推导次时间尺度各时刻风电功率可能的上、下限，分别如式(5)和式(6)所示。

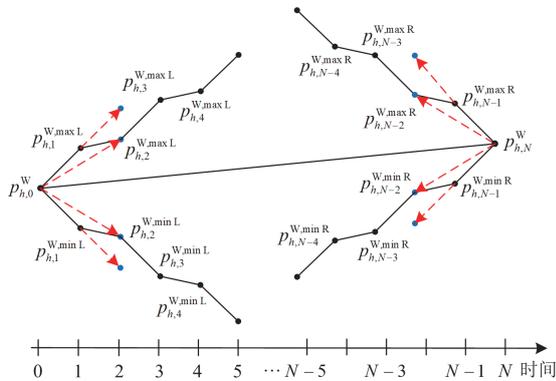


图 2 次时间尺度风电功率波动范围推导示意图

Fig. 2 Deduction diagram of wind power fluctuation range at sub-time scales

$$\begin{cases} p_{h,t}^{W,max,L} = \min(p_{h,t-k}^{W,max,L} + k\delta_{h,k}^u \Delta t) \\ p_{h,t}^{W,min,L} = \max(p_{h,t-k}^{W,min,L} - k\delta_{h,k}^d \Delta t) \\ t = 1, 2, \dots, N-1; k = 1, 2, \dots, \min\{K, t\} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} p_{h,t}^{W,max,R} = \min(p_{h,t+k}^{W,max,R} + k\delta_{h,k}^d \Delta t) \\ p_{h,t}^{W,min,R} = \max(p_{h,t+k}^{W,min,R} - k\delta_{h,k}^u \Delta t) \\ t = 1, 2, \dots, N-1; k = 1, 2, \dots, \min\{K, N-t\} \end{cases} \quad (6)$$

式中：\$p\_{h,t}^{W,max,L}\$、\$p\_{h,t}^{W,min,L}\$ 分别为按由左到右顺时间轴次序推算的风电场 \$h\$ 在 \$t\$ 时刻输出功率的上、下限；\$p\_{h,t}^{W,max,R}\$、\$p\_{h,t}^{W,min,R}\$ 分别为按逆时间轴次序推算的风电场 \$h\$ 在 \$t\$ 时刻输出功率的上、下限。

分析可知，式(5)和式(6)计算的各时刻风电功率上、下限取交集，即可得多时间颗粒度约束下风电场输出功率的上、下限，表示为

$$\begin{cases} p_{h,t}^{W,max} = \min\{p_{h,t}^{W,max,L}, p_{h,t}^{W,max,R}\} \\ p_{h,t}^{W,min} = \max\{p_{h,t}^{W,min,L}, p_{h,t}^{W,min,R}\} \end{cases} \quad (7)$$

式中：\$p\_{h,t}^{W,max}\$、\$p\_{h,t}^{W,min}\$ 分别为次时间尺度下风电场 \$h\$ 在 \$t\$ 时刻输出功率的上、下限。

根据上述内容，精细考虑超分辨率波动不确定性的风电出力模型可表示为

$$\begin{cases} p_{h,t}^{W,min} \leq p_{h,t}^W \leq p_{h,t}^{W,max} \\ -k\delta_{h,k}^d \Delta t \leq p_{h,t}^W - p_{h,t-k}^W \leq k\delta_{h,k}^u \Delta t \\ t = 1, 2, \dots, N-1; k = 1, 2, \dots, \min\{K, t\} \end{cases} \quad (8)$$

## 2 数学模型

本文所提出的考虑超分辨率风电出力不确定性的鲁棒安全实时经济调度模型，其核心在于精细考虑主时间尺度一个调度时段内风电不确定性波动过程(如式(8)所示)，及其可能引发的次时间尺度超分辨率下的潮流安全风险，通过优化常规机组基点功率及 AGC 机组的参与因子，合理预留爬坡容量及响应能力，保障电网的安全经济运行。由于本文重点关注超分辨率下的风电出力不确定性及潮流安全约束对各调度时刻经济调度策略的影响，因此，本文假设主时间尺度各时刻的新能源出力预测值是准确的，仅考虑超分辨率下次时间尺度风电出力的不确定性。

### 2.1 目标函数

由于风力发电本身不消耗燃料，因此本文忽略风电成本，仅以常规火电机组发电成本和 AGC 机组为应对时段内风电不确定性预留的上调备用和下调备用成本之和最小为目标，即

$$\min \left[ \sum_{i=1}^{N_G} c_i P_{i,T_1} + \sum_{m=1}^{N_{AGC}} (c_m^u r_{m,T_1}^u + c_m^d r_{m,T_1}^d) \right] \quad (9)$$

式中:  $N_G$  为常规火电机组数;  $N_{AGC}$  为常规机组中的 AGC 机组数;  $c_i$  为机组  $i$  的单位发电成本;  $P_{i,T_1}$  为机组  $i$  在主时间尺度  $T_1$  时刻的功率;  $c_m^u$  和  $c_m^d$  分别为 AGC 机组  $m$  的单位向上调节成本和单位向下调节成本;  $r_{m,T_1}^u$  和  $r_{m,T_1}^d$  分别为 AGC 机组  $m$  在调度时段为应对次时间尺度风电波动预留的最大向上调节容量和向下调节容量。

## 2.2 主时间约束条件

主时间尺度由于时间颗粒度大,难以观测超分辨率下风电非线性波动所引发的潮流安全风险,因此,主时间尺度约束仅包含  $\Delta T$  颗粒度下系统和机组的运行约束,具体如下。

### 1) 发电负荷功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{i,T_1} + \sum_{h=1}^{N_W} P_{h,T_1}^W = \sum_{d=1}^{N_D} P_{d,T_1} \quad (10)$$

式中:  $N_W$  为风电场总数;  $N_D$  为负荷总数;  $P_{d,T_1}$  为主时间尺度  $T_1$  时刻负荷  $d$  的预测值;  $P_{h,T_1}^W$  为主时间尺度  $T_1$  时刻风电场  $h$  的预测出力。

### 2) 机组输出功率上、下限约束

$$P_i^{\min} \leq P_{i,T_1} \leq P_i^{\max} \quad (11)$$

式中:  $P_i^{\max}$ 、 $P_i^{\min}$  分别为机组  $i$  允许的最大、最小出力。

### 3) 机组输出功率爬坡约束

$$-R_i^d \Delta T \leq P_{i,T_1} - P_{i,T_0} \leq R_i^u \Delta T \quad (12)$$

式中:  $R_i^u$ 、 $R_i^d$  分别为机组  $i$  输出功率最大的向上、向下调节速率;  $P_{i,T_0}$  为机组  $i$  在主时间尺度  $T_0$  时刻的功率。

### 4) 线路传输功率约束

$$\sum_{i=1}^{N_G} A_{l-i} P_{i,T_1} + \sum_{h=1}^{N_W} A_{l-h} P_{h,T_1}^W - \sum_{d=1}^{N_D} A_{l-d} P_{d,T_1} \leq f_{l,\max} \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^{N_G} A_{l-i} P_{i,T_1} + \sum_{h=1}^{N_W} A_{l-h} P_{h,T_1}^W - \sum_{d=1}^{N_D} A_{l-d} P_{d,T_1} \geq -f_{l,\max} \quad (14)$$

式中:  $f_{l,\max}$  为线路  $l$  的最大允许传输功率;  $A_{l-i}$ 、 $A_{l-h}$ 、 $A_{l-d}$  分别为机组、风电场以及负荷所在节点对线路  $l$  的转移功率因子。

## 2.3 次时间约束条件

引入次时间尺度运行可行性约束,旨在确保主时间尺度决策能够规避超分辨率下的功率失衡与潮流越限风险,即在主时间尺度火电机组基点功率和参与因子决策中,协调计及次时间尺度应对风电功

率波动的能力。

假设常规机组的基点功率、风电的预测功率和负荷功率在  $[T_0, T_1]$  内线性变化,则在  $[T_0, T_1]$  内任一时刻  $t$ , 机组的基点功率  $p_{i,t}$ 、风电预测功率  $p_{h,t}^W$  和负荷功率  $p_{d,t}$  可以表示为

$$p_{i,t} = P_{i,T_0} + \frac{P_{i,T_1} - P_{i,T_0}}{N} t \quad (15)$$

$$p_{d,t} = P_{d,T_0} + \frac{P_{d,T_1} - P_{d,T_0}}{N} t \quad (16)$$

$$p_{h,t}^W = P_{h,T_0}^W + \frac{P_{h,T_1}^W - P_{h,T_0}^W}{N} t \quad (17)$$

式中:  $P_{d,T_0}$  为主时间尺度  $T_0$  时刻负荷  $d$  的预测值;

$P_{h,T_0}^W$  为主时间尺度  $T_0$  时刻风电场  $h$  的预测出力。

对于式(8)所描述的风电不确定集合内的任意不确定场景,考虑次时间尺度的功率平衡和线路潮流约束,各 AGC 机组应满足式(15)约束。

### 1) AGC 机组输出功率约束

$$P_m^{\min} \leq \tilde{p}_{m,t} \leq P_m^{\max} \quad (18)$$

式中:  $\tilde{p}_{m,t}$  表示在次时间尺度  $t$  时刻考虑风电功率偏离预测功率时 AGC 机组  $m$  的出力。

### 2) AGC 机组爬坡约束

$$-R_m^d \Delta t \leq \tilde{p}_{m,t} - \tilde{p}_{m,t-1} \leq R_m^u \Delta t \quad (19)$$

### 3) AGC 机组参与因子约束

在调度过程中,风电波动引起的不平衡功率按参与因子在各 AGC 机组间分配,AGC 机组实际出力需满足如下约束。

$$\tilde{p}_{m,t} = p_{m,t} - \alpha_{m,T} \sum_{h=1}^{N_W} (\tilde{p}_{h,t}^W - p_{h,t}^W) \quad (20)$$

$$\sum_{m=1}^{N_{AGC}} \alpha_{m,T} = 1, \alpha_{m,T} \geq 0 \quad (21)$$

式中:  $p_{m,t}$  表示在次时间尺度  $t$  时刻 AGC 机组  $m$  的出力;  $\alpha_{m,T}$  为 AGC 机组在  $[T_0, T_1]$  时段的参与因子;  $\tilde{p}_{h,t}^W$  表示风电场  $h$  在次时间尺度  $t$  时刻的随机出力。

### 4) AGC 机组备用约束

受物理条件的限制,在次时间尺度,每台 AGC 机组所能提供的调节容量是有限的,即

$$r_{m,t}^u \leq r_{m,T_1}^u \quad (22)$$

$$r_{m,t}^d \leq r_{m,T_1}^d \quad (23)$$

$$-r_{m,t}^d \leq -\alpha_{m,T} \sum_{h=1}^{N_W} (\tilde{p}_{h,t}^W - p_{h,t}^W) \leq r_{m,t}^u \quad (24)$$

$$p_{m,t} + r_{m,t}^u \leq P_m^{\max} \quad (25)$$

$$p_{m,t} - r_{m,t}^d \geq P_m^{\min} \quad (26)$$

式中:  $r_{m,t}^u$  和  $r_{m,t}^d$  分别表示 ACG 机组在次时间尺度  $t$  时刻预留的向上、向下调节容量。

5) 线路功率传输容量约束

$$p_{l,t} + \sum_{h=1}^{N_W} A_{l-h}^R (\tilde{p}_{h,t}^W - p_{h,t}^W) \leq f_{l,\max} \quad (27)$$

$$p_{l,t} + \sum_{h=1}^{N_W} A_{l-h}^R (\tilde{p}_{h,t}^W - p_{h,t}^W) \geq -f_{l,\max} \quad (28)$$

$$p_{l,t} = \sum_{i=1}^{N_G} A_{l-i} p_{i,t} + \sum_{h=1}^{N_W} A_{l-h} p_{h,t}^W - \sum_{d=1}^{N_D} A_{l-d} p_{d,t} \quad (29)$$

$$A_{l-h}^R = A_{l-h} - \sum_{m=1}^{N_{AGC}} A_{l-m} \alpha_{m,T} \quad (30)$$

式中:  $p_{l,t}$  为线路  $l$  的基态功率, 即各风电场功率为预测功率时线路  $l$  流过的功率;  $A_{l-h}^R$  为计及 AGC 机组功率调整的风电场  $h$  对线路  $l$  的转移功率因子;  $A_{l-m}$  为 AGC 机组  $m$  对线路  $l$  的转移功率因子。

由式(8)一式(30)构成的模型即为本文提出的精细考虑超分辨率风电出力不确定性的鲁棒安全实时经济调度模型, 其采用式(8)所示的多时间颗粒度组合精细化描述超分辨率下风电不确定性, 既可避免因主时间尺度颗粒度过大而忽视次时间尺度动态, 从而导致决策冒进并引发爬坡风险的问题, 又可以避免仅考虑次时间尺度最小时间颗粒度时, 因忽略风电功率的时间平滑效应, 使风电波动场景刻画过于苛刻而导致决策结果过于保守。同时, 该模型中 AGC 机组可根据超分辨率下潜在的爬坡需求(式(19))和潮流安全约束(式(27)一式(30))自适应配置参与因子, 提升经济调度策略的鲁棒性和安全性。

### 3 模型求解

对于所提的精细考虑超分辨率风电出力不确定性的鲁棒安全实时经济调度模型, 分析可知, 次时间尺度约束中含有的随机变量  $\tilde{p}_{h,t}^W$  使模型难以直接求解。为此, 本节对含随机变量的约束进行等效变换, 将其由含随机变量的鲁棒优化问题等效转化为由若干严峻场景描述的确定性优化问题。

1) AGC 机组输出功率上、下限约束等效变换  
考虑风电功率的波动范围, 式(18)可等效为

$$p_{m,t} - \alpha_{m,T} \sum_{h=1}^{N_W} (p_{h,t}^{W,\min} - p_{h,t}^W) \leq P_m^{\max} \quad (31)$$

$$p_{m,t} - \alpha_{m,T} \sum_{h=1}^{N_W} (p_{h,t}^{W,\max} - p_{h,t}^W) \geq P_m^{\min} \quad (32)$$

2) AGC 机组爬坡约束等效变换

将式(20)代入式(19)后可得

$$-R_m^d \Delta t \leq p_{m,t} - \alpha_{m,T} \sum_{h=1}^{N_W} (\tilde{p}_{h,t}^W - p_{h,t}^W) - p_{m,t-1} + \quad (33)$$

$$\alpha_{m,T} \sum_{h=1}^{N_W} (\tilde{p}_{h,t-1}^W - p_{h,t-1}^W) \leq R_m^u \Delta t$$

当  $t=1$  时, 式(33)可以简化为

$$-R_m^d \Delta t \leq p_{m,1} - \alpha_{m,T} \sum_{h=1}^{N_W} (\tilde{p}_{h,1}^W - p_{h,1}^W) - P_{m,T_0} \leq R_m^u \Delta t \quad (34)$$

式中:  $P_{m,T_0}$  表示机组  $m$  在主时间尺度  $T_0$  时刻的功率。

考虑风电功率在次时间尺度的波动区间, 式(34)对应的最苛刻场景为

$$\begin{cases} p_{m,t} - \alpha_{m,T} \sum_{h=1}^{N_W} (p_{h,t}^{W,\min} - p_{h,t}^W) - P_{m,T_0} \leq R_m^u \Delta t \\ p_{m,t} - \alpha_{m,T} \sum_{h=1}^{N_W} (p_{h,t}^{W,\max} - p_{h,t}^W) - P_{m,T_0} \geq -R_m^d \Delta t \end{cases} \quad (35)$$

当  $t=2, \dots, N-1$  时, 式(33)可进一步转化为

$$\begin{cases} \frac{P_{m,T_1} - P_{m,T_0}}{N} + \alpha_{m,T} \sum_{h=1}^{N_W} (\tilde{p}_{h,t-1}^W - \tilde{p}_{h,t}^W + p_{h,t}^W - p_{h,t-1}^W) \leq R_m^u \Delta t \\ \frac{P_{m,T_1} - P_{m,T_0}}{N} + \alpha_{m,T} \sum_{h=1}^{N_W} (\tilde{p}_{h,t-1}^W - \tilde{p}_{h,t}^W + p_{h,t}^W - p_{h,t-1}^W) \geq -R_m^d \Delta t \end{cases} \quad (36)$$

在次时间尺度下, 风电功率针对式(36)的最苛刻场景分别为  $\{\tilde{p}_{h,t-1}^W = p_{h,t-1}^{W,\max}, \tilde{p}_{h,t}^W = p_{h,t}^{W,\min}, \forall h\}$  和  $\{\tilde{p}_{h,t-1}^W = p_{h,t-1}^{W,\min}, \tilde{p}_{h,t}^W = p_{h,t}^{W,\max}, \forall h\}$ , 由此式(36)可进一步等效简化为

$$\begin{cases} (P_{m,T_1} - P_{m,T_0})/N + \alpha_{m,T} \sum_{h=1}^{N_W} (p_{h,t-1}^{W,\max} - p_{h,t}^{W,\min} + (P_{h,T_1}^W - P_{h,T_0}^W)/N) \leq R_m^u \Delta t \\ (P_{m,T_1} - P_{m,T_0})/N + \alpha_{m,T} \sum_{h=1}^{N_W} (p_{h,t-1}^{W,\min} - p_{h,t}^{W,\max} + (P_{h,T_1}^W - P_{h,T_0}^W)/N) \geq -R_m^d \Delta t \end{cases} \quad (37)$$

当  $t=N$  时, 式(33)可以转化为

$$-R_m^d \Delta t \leq P_{m,T_1} - p_{m,N-1} + \alpha_{m,T} \sum_{h=1}^{N_W} (\tilde{p}_{h,N-1}^W - p_{h,N-1}^W) \leq R_m^u \Delta t \quad (38)$$

分析可知,  $\{\tilde{p}_{h,N-1}^W = p_{h,N-1}^{W,\max}, \forall h\}$  和  $\{\tilde{p}_{h,N-1}^W = p_{h,N-1}^{W,\min}, \forall h\}$  为式(38)需满足的最苛刻场景, 因此, 式(38)可等效变换为

$$\begin{cases} P_{m,T_1} - p_{m,N-1} + \alpha_{m,T} \sum_{h=1}^{N_W} (p_{h,N-1}^{W,\max} - p_{h,N-1}^W) \leq R_m^u \Delta t \\ P_{m,T_1} - p_{m,N-1} + \alpha_{m,T} \sum_{h=1}^{N_W} (p_{h,N-1}^{W,\min} - p_{h,N-1}^W) \geq -R_m^d \Delta t \end{cases} \quad (39)$$

3) AGC 机组备用约束简化

AGC 机组备用约束中仅式(24)含有随机变量,按照最苛刻风电波动场景对式(24)进行等效变换可得

$$\begin{cases} -\alpha_{m,T} \sum_{h=1}^{N_W} (p_{h,t}^{W,\min} - p_{h,t}^W) \leq r_{m,t}^u \\ -\alpha_{m,T} \sum_{h=1}^{N_W} (p_{h,t}^{W,\max} - p_{h,t}^W) \geq -r_{m,t}^d \end{cases} \quad (40)$$

#### 4) 线路功率传输容量约束等效变换

对于含有随机变量的式(27)、式(28),由于  $\tilde{p}_{h,t}^W$  可在  $[p_{h,t}^{W,\min}, p_{h,t}^{W,\max}]$  任意取值,因此线路功率传输容量约束需满足:

$$p_{l,t} + \max_{p_{h,t} \in [p_{h,t}^{W,\min}, p_{h,t}^{W,\max}]} \sum_{h=1}^{N_W} A_{l-h}^R (\tilde{p}_{h,t}^W - p_{h,t}^W) \leq f_{l,\max} \quad (41)$$

$$p_{l,t} + \min_{p_{h,t} \in [p_{h,t}^{W,\min}, p_{h,t}^{W,\max}]} \sum_{h=1}^{N_W} A_{l-h}^R (\tilde{p}_{h,t}^W - p_{h,t}^W) \geq -f_{l,\max} \quad (42)$$

由式(30)可知,  $A_{l-h}^R$  表达式中包含待求变量  $\alpha_{m,T}$ , 其正负无法确定,因此无法直接找到式(41)、式(42)最严峻场景的对应表达。参照文献[24]的处理方法将其转换为式(43)、式(44)等效的解析表达。

$$\begin{cases} p_{l,t} + \sum_{h=1}^{N_W} [A_{l-h}^R (p_{h,t}^{W,\min} - p_{h,t}^W) + \eta_{l-h,t}^{\text{up}}] \leq f_{l,\max} \\ \eta_{l-h,t}^{\text{up}} \geq A_{l-h}^R (p_{h,t}^{W,\max} - p_{h,t}^{W,\min}) \\ \eta_{l-h,t}^{\text{up}} \geq 0 \end{cases} \quad (43)$$

$$\begin{cases} p_{l,t} + \sum_{h=1}^{N_W} [A_{l-h}^R (p_{h,t}^{W,\max} - p_{h,t}^W) + \eta_{l-h,t}^{\text{dn}}] \geq -f_{l,\max} \\ \eta_{l-h,t}^{\text{dn}} \leq -A_{l-h}^R (p_{h,t}^{W,\max} - p_{h,t}^{W,\min}) \\ \eta_{l-h,t}^{\text{dn}} \leq 0 \end{cases} \quad (44)$$

式中:  $\eta_{l-h,t}^{\text{up}}$ 、 $\eta_{l-h,t}^{\text{dn}}$  分别为新引入的辅助变量。

当系数矩阵  $A_{l-h}^R \geq 0$  时,由于  $p_{h,t}^{W,\max} - p_{h,t}^{W,\min} \geq 0$  恒成立,此时  $\eta_{l-h,t}^{\text{up}}$  的取值为  $A_{l-h}^R (p_{h,t}^{W,\max} - p_{h,t}^{W,\min})$ 。由此可得,式(43)第1式第2个多项式中关于风电场  $h$  的部分可表示为  $A_{l-h}^R (p_{h,t}^{W,\min} - p_{h,t}^W) + A_{l-h}^R (p_{h,t}^{W,\max} - p_{h,t}^{W,\min}) = A_{l-h}^R (p_{h,t}^{W,\max} - p_{h,t}^W)$ , 对应为  $A_{l-h}^R \geq 0$  时式(43)第1式左边项的最大值,由此可保证式(41)的约束成立。当系数矩阵  $A_{l-h}^R \leq 0$  时,  $A_{l-h}^R (p_{h,t}^{W,\max} - p_{h,t}^{W,\min}) \leq 0$ , 此时  $\eta_{l-h,t}^{\text{up}}$  的取值为 0。由此,式(43)中第1式第2个多项式中关于风电场  $h$  的部分可表示为  $A_{l-h}^R (p_{h,t}^{W,\min} - p_{h,t}^W)$ , 为  $A_{l-h}^R \leq 0$  时式(43)第1式

左边项的最大值,也可以保证式(41)约束成立。由此,变换后的式(43)潮流约束可以根据  $A_{l-h}^R$  的正负在风电功率扰动范围内自适应地选择相应的上、下限值,使式(41)左边项总能取得最大值,保证结果的鲁棒性。同理,式(44)也可通过相同的证明方法验证约束的有效性,此处不再赘述。

通过上述分析可知:线路功率传输容量约束式(41)、式(42)经过上述变换,可以由含随机变量的非线性形式变为式(43)、式(44)基于严峻场景的确定性的线性约束形式,且式(43)、式(44)与式(41)、式(42)完全等价,可以保证变换后约束的精确性。

可见,通过约束等价转换,本文所提的精细考虑超分辨率风电出力不确定性的鲁棒安全实时经济调度模型可变为由式(9)一式(17)、式(22)、式(23)、式(25)、式(26)、式(29)一式(32)、式(35)、式(37)、式(39)、式(40)、式(43)、式(44)组成等价的确定性线性优化问题,可直接调用 CPLEX 求解器快速求解。

## 4 算例分析

为验证本文所提模型和方法的有效性,分别采用修改的 6 节点系统和修改的 IEEE118 节点系统进行说明验证,其中  $\Delta T = 15 \text{ min}$ ,  $\Delta t = 1 \text{ min}$ 。本文在 MATLAB 2018b 平台通过 Yalmip 工具箱调用 CPLEX 12.8 求解器进行求解。所有算例分析均在配置为 Intel Core i5-9300H 处理器、2.40 GHz 主频、8 G 内存的工作站上实现。

### 4.1 6 节点系统算例

本算例基于修改后的 6 节点系统,算例拓扑如图 3 所示,算例包含 3 台火电机组和 1 个风电场,火电机组数据见表 1,其中的  $G_1$ 、 $G_2$  为 AGC 机组,  $G_3$  为非 AGC 机组;风电场数据见表 2;负荷数据见表 3;支路参数见表 4。

#### 4.1.1 基于多时间颗粒度的风电波动速度刻画对调度策略的影响分析

为验证本文所提基于多时间颗粒度的风电波动速度不确定性刻画方法对调度策略的影响,设置如

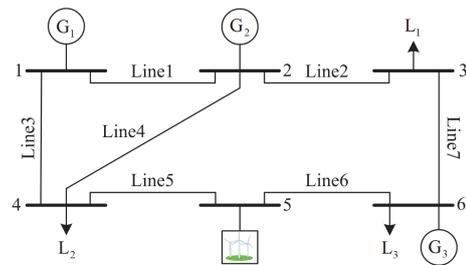


图 3 6 节点系统接线图

Fig. 3 Wiring diagram for 6-bus system

表 1 火电机组参数

Table 1 Parameters of the generator unit

机组	运行成本/ (美元/MW)	调节成本/ (美元/MW)	最大 出力/MW	最小 出力/MW	爬坡速率/ (MW/min)
G <sub>1</sub>	27.5	5.5	180	50	10
G <sub>2</sub>	32.5	6.5	100	40	6
G <sub>3</sub>	25	□	250	100	5

表 2 6 节点系统风电场数据

Table 2 Wind farm data of 6-bus system

位置	$P_{h,t_0}^w$ /MW	$P_{h,t_1}^w$ /MW	$\delta_{h,1}^u = \delta_{h,1}^d$ / (MW/min)	$\delta_{h,2}^u = \delta_{h,2}^d$ / (MW/min)
5	100	112	5	4

表 3 负荷数据

Table 3 Load data

时刻	L <sub>1</sub> /MW	L <sub>2</sub> /MW	L <sub>3</sub> /MW
T <sub>0</sub>	98.4	259.2	98.4
T <sub>1</sub>	129.43	276.34	129.43

表 4 支路参数

Table 4 Branch data

支路	电抗/p.u.	传输限制/MW
Line1	0.17	100
Line2	0.37	130
Line3	0.258	110
Line4	0.197	50
Line5	0.37	140
Line6	0.140	80
Line7	0.18	40

下 3 种方案进行对比分析。

方案 1: 采用传统仅考虑主时间尺度的经济调度模型, 即式(9)一式(14)构成的模型。

方案 2: 采用本文模型, 但不考虑风电波动的时间平滑效应, 即认为各时间颗粒度下的风电向上、向下爬坡速度均等于次时间尺度最小时间颗粒度下的风电向上、向下爬坡速度, 即假设  $\delta_{h,1}^u = \delta_{h,1}^d = \delta_{h,2}^u = \delta_{h,2}^d = 5 \text{ MW/min}$ 。

方案 3: 采用本文模型, 且考虑多颗粒度下风电波动速度的时间平滑效应, 即假设  $\delta_{h,1}^u = \delta_{h,1}^d = 5 \text{ MW/min}$ ,  $\delta_{h,2}^u = \delta_{h,2}^d = 4 \text{ MW/min}$ 。

表 5 给出了 3 种方案对应的系统总成本、调节容量以及 AGC 机组的运行基点。

由表 5 可知, 由于方案 1 仅考虑主时间尺度约束, 无需为应对次时间尺度风电出力不确定性预留备用容量, 因此, 其总成本最小, 且预留的向上、向下调节容量均为 0, 将难以应对超分辨率下风电

场出力偏离预测场景的情况, 不利于维持系统安全稳定运行; 与方案 1 相比, 方案 2 和方案 3 计及次时间尺度更小时间颗粒度下的风电非线性波动, 系统需要配置更多备用, 导致机组的运行基点偏离最优经济运行位置, 系统运行总成本相应提高。

表 5 不同方案下系统的运行情况

Table 5 System operation state of different schemes

	方案 1	方案 2	方案 3
总成本/美元	11 467	13 195	12 659
向上调节容量/MW	0	57.6	41.6
向下调节容量/MW	0	57.6	41.6
G <sub>1</sub> 运行基点/MW	116.00	125.95	156.23
G <sub>2</sub> 运行基点/MW	40.00	71.45	66.97

对比分析方案 2 和方案 3 可知: 方案 2 由于未考虑风电功率波动的时间平滑效应, 所刻画的次时间尺度风电功率的波动更为剧烈, 对机组爬坡能力的要求更加苛刻, 因此迫使系统预留更多的备用容量, 导致方案 2 的总成本增加。方案 3 计及风电功率波动的时间平滑效应, 刻画的风电波动相对平缓, 由此上调经济性较好机组 G<sub>1</sub> 的运行基点, 相应下调经济性较差机组 G<sub>2</sub> 的运行基点, 以此提高系统运行的经济性。

可见, 采用多个时间颗粒度精细刻画超时间分辨率下风电爬坡速度的不确定性, 既可以避免因颗粒度过大而忽视风电功率剧烈波动引起的风险, 又可以避免因仅考虑次时间尺度最小时间颗粒度使风电波动场景刻画过于苛刻而导致系统运行成本增加。

#### 4.1.2 AGC 机组参与因子配置方式对模型的影响

参与因子能够反映各台 AGC 机组在平抑风电功率波动时的贡献度, 对决策结果产生影响。为比较参与因子设置方法对决策结果的影响, 将本文自适应配置方法记为方法 1; 方法 2 中每台 AGC 机组的参与因子按文献[25]的方法设置为正比于机组容量; 方法 3 按文献[26]设置为正比于机组响应速度。方法 4 按文献[27]的方法依据机组的经济性指标进行设置; 方法 5 按文献[28]的方法按比例设置。

图 4 给出 5 种不同参与因子配置方法下系统的运行成本情况。分析可知, 随着机组 G<sub>1</sub>(G<sub>2</sub>)的参与因子不断减小(提高), 系统的总成本呈上升趋势, 这是由于机组 G<sub>1</sub> 的单位发电成本和调节成本均小于机组 G<sub>2</sub>, 且机组 G<sub>1</sub> 拥有更好的爬坡性能, 提升机组 G<sub>1</sub> 的参与因子, 使系统更容易跟踪风电功率的波动。可见, 参与因子的配置方式会直接影响调度结果, 按本文方法配置机组的参与因子, 可以以更低的成本实现对风电功率波动的有效跟踪。

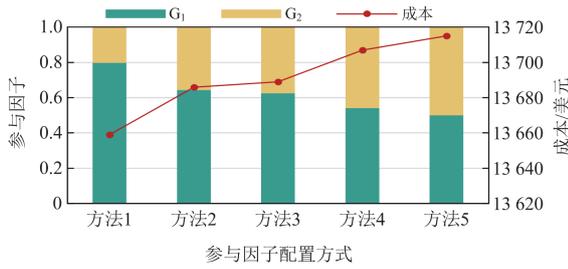


图4 不同参与因子配置方式下的运行成本  
Fig. 4 Operation cost with different configuration of participation factors

4.1.3 超分辨率风电不确定性对潮流安全的影响

为说明超分辨率风电不确定性对网络安全的影响,验证本文模型应对超分辨率风电不确定性的潮流越限能力,设计以下2种方案进行分析。

方案1: 计及超分辨率风电不确定性,但仅考虑主时间尺度线路功率传输约束,不考虑次时间尺度超分辨率线路功率传输约束。

方案2: 采用本文模型,即在方案1基础上再考虑次时间尺度线路功率传输约束。

如图5所示,由于方案1仅考虑主时间尺度的潮流安全约束而不考虑超分辨率下线路功率非线性波动导致的安全风险,针对式(8)所刻画的一风电波动场景,线路1在主时间尺度可观的  $t=0\text{ min}$  和  $t=15\text{ min}$  时刻潮流不越限,但在次时间尺度的  $t \in [4,14]\text{ min}$  出现潮流越限的情况。

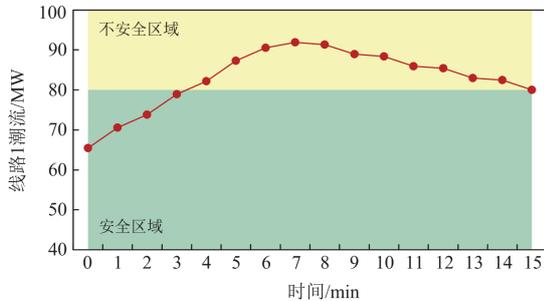


图5 线路1潮流越限情况  
Fig. 5 Power flow overloaded of line 1

表6给出了2种方案对应的运行成本。分析可知,方案2的运行成本为12659美元,比方案1高30美元。其原因在于方案2计及了超分辨率风电出力的非线性波动对网络安全的影响,为避免方案1出现在超分辨率下线路1潮流越限的情况,不得不改变方案1机组功率的经济分配结果。可见,当不考虑超分辨率风电非线性波动对潮流安全的影响时,所得结果往往过于乐观,无法保证时段内部线路潮流处于安全运行范围内,危害系统安全稳定运行。

表6 2种方案对应的运行成本

Table 6 Operation cost of two cases

方案	方案1	方案2
运行成本/美元	12629	12659

4.1.4 鲁棒调度方法对比

表7为本文所提方法与其他鲁棒调度方法的对比结果。可以看出,方法1仅考虑次时间尺度各时刻风电出力的波动范围,未考虑超分辨率风电波动速度的牵制以及潮流安全约束,所得经济调度策略的运行成本为13108美元。相比方法1,方法2考虑了次时间尺度风电波动的牵制作用,剔除方法1中因风电波动速度限制而产生的无效波动场景,实现了对超分辨率风电出力不确定性更精细的刻画,对应的运行成本由13269美元减少为12629美元,降低640美元。在方法2的基础上,本文方法进一步考虑了次时间尺度潮流安全约束,虽然系统的运行成本略有提高,但可以避免在次时间尺度上出现潮流越限。此外,本文方法相比于方法2增加了30美元,体现了为提升经济调度策略鲁棒性和安全性所需要付出的经济代价。

表7 不同鲁棒方法的运行结果

Table 7 Operation results of different robust scheduling methods

调度方法	是否考虑次时间尺度风电波动速度牵制	是否考虑次时间尺度潮流安全约束	运行成本/美元
方法1	否	否	13108
方法2	是	否	12629
本文方法	是	是	12659

4.2 IEEE118节点系统算例

为进一步说明所提模型的有效性,基于修改的IEEE118节点电力系统进行分析验证。修改的IEEE118节点系统包括54台火电机组、3个风电场、186条输电线路和91个负荷。风电场数据如表8所示。火电机组容量从20MW到650MW不等,取11台中等容量机组作为AGC机组,分别位于节点15、18、19、25-27、31、34、36、66、69,并假设各AGC机组每15min的最大爬坡功率为自身容量的50%。

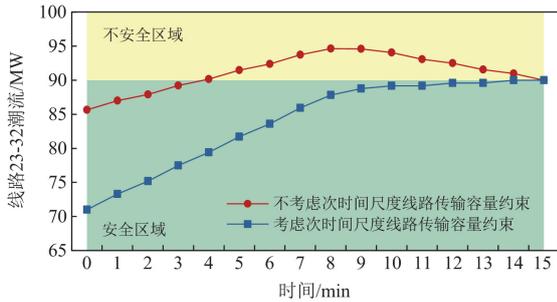
表8 IEEE118节点系统风电场数据

Table 8 Wind farm data of IEEE118-bus system

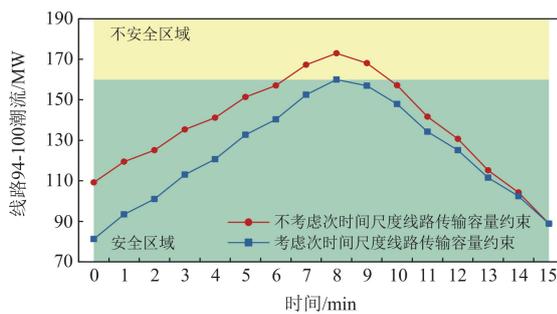
位置	$P_{h,t_0}^w/\text{MW}$	$P_{h,t_1}^w/\text{MW}$	$\delta_{h,1}^u = \delta_{h,1}^d / (\text{MW}/\text{min})$	$\delta_{h,2}^u = \delta_{h,2}^d / (\text{MW}/\text{min})$
61	150	170	8	6
77	200	215	10	8
100	200	215	10	8

为说明超分辨率风电不确定性对网络安全的影响,对比分析考虑与不考虑次时间尺度线路功率传

输约束的两种情形。如图 6 所示, 当不考虑次时间尺度线路功率传输容量约束时, 在主时间尺度颗粒度下不可观的 5~14 min, 连接节点 23 与节点 32 的线路出现了潮流越限, 在 7~9 min, 连接节点 94 和节点 100 的线路出现潮流越限, 由于在计算中考虑了次时间尺度约束, 本文方法所得的潮流分布均能保持在安全阈值内, 验证了本文所提模型在较大规模系统上的有效性。



(a) 线路23-32潮流分布情况



(b) 线路94-100潮流分布情况

图 6 次时间尺度线路潮流分布情况

Fig. 6 Power flow distribution in sub-time scales

图 7 给出系统运行总成本与风电装机容量和风电爬坡速度的关系。可以发现, 风电装机容量越小、风电爬坡速度越大, 系统的总运行成本越高。分析可知, 风电装机容量对运行成本的影响更大, 这是因为风电装机容量与电量平衡紧密相关, 风电装机容量越高, 风电出力越多, 火电机组整体出力相应减小, 从而使系统总运行费用显著减小; 而风电爬坡速度则主要通过改变负荷在不同火电机组间的分配提升系统的爬坡响应能力, 对常规机组承担的负荷总量影响较小, 因此总运行成本随风电波动速度增大而增加的幅度相对较小。

为进一步验证本文所提方法的有效性, 本文基于修改的 IEEE118 节点系统将所提方法与其他鲁棒调度方法进行对比。由表 9 可以看出, 本文计及次时间尺度风电波动速度牵制, 可实现系统运行成本的降低。此外, 本文方法相比方法 2 运行成本增加

约 0.2%, 可以以较低的经济代价提升系统在超时间分辨率下的潮流安全性。

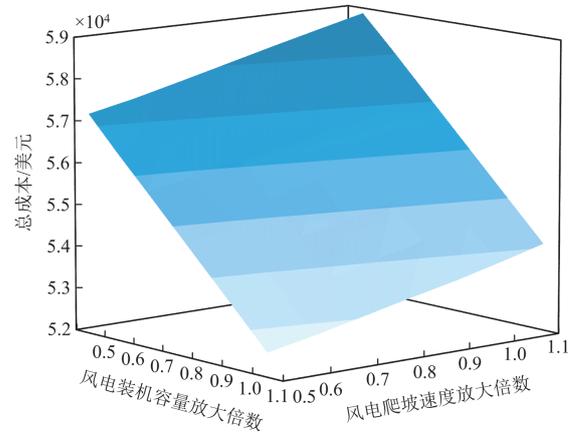


图 7 系统运行成本与风电装机容量和风电爬坡速度的关系  
Fig. 7 Relationship among system operation cost, wind power capacity and wind power ramp

表 9 IEEE118 节点系统不同鲁棒方法的运行结果

Table 9 Operation results of different robust scheduling methods in IEEE118-bus system

调度方法	是否考虑次时间尺度风电波动速度牵制	是否考虑次时间尺度潮流安全约束	运行成本/美元
方法 1	否	否	55 142
方法 2	是	否	54 483
本文方法	是	是	54 594

表 10 给出了考虑和不考虑次时间尺度约束两种情况下的经济调度模型的计算时间。结果表明, 当考虑次时间尺度运行可行性约束时, 模型的约束条件数量由 1202 增至 24 322, 约增加 1923%, 但模型计算时间仅由 0.293 s 增至 0.747 s, 仍处于同一数量级, 可满足实时计算需求, 即本文所提的模型没有显著增加计算的复杂度。

表 10 不同经济调度模型的计算时间

Table 10 Calculation time of different economic dispatch models

模型	不考虑次时间尺度约束	考虑次时间尺度约束
约束数	1202	24 322
计算时间/s	0.293	0.747

## 5 结论

本文提出了一种精细考虑超分辨率风电出力不确定性的鲁棒安全实时经济调度方法, 通过分析得到以下结论。

1) 考虑时间平滑效应, 采用多时间颗粒度构建了超分辨率下风电出力不确定性的精细化模型, 基于该模型可以更经济地跟踪风电功率波动。

2) 引入次时间尺度运行可行性约束, 构建了考虑超分辨率风电不确定性的鲁棒安全实时经济调度模型, 可有效应对风电功率非线性波动引起的电力失衡及线路潮流越限风险。

3) 通过等价变换将难以直接求解的鲁棒安全经济调度模型转换为易于求解的确定性线性规划模型, 实现了鲁棒安全经济调度策略的快速求解。

需要说明的是, 本文研究旨在分析超分辨率风电出力的不确定性, 并评估其对调度策略的影响, 没有考虑各调度时刻风电出力的不确定性, 在未来的工作中, 将综合考虑各调度时刻及时刻间超分辨率风电出力不确定性, 在日前时间尺度下研究考虑超分辨率风电不确定性的鲁棒安全动态经济调度策略。

## 附录 A

假设两种量化风电功率平均波动速度的时间颗粒度  $\Delta T$ 、 $\Delta t$  满足  $\Delta T = N\Delta t$  ( $N$  为整数), 在上述两种时间颗粒度下所观测到的风电功率最大平均波动速度分别为  $V_{\max}$  和  $v_{\max}$ , 则有

$$V_{\max} \Delta T = \sum_{t=1}^N v_t \Delta t \quad (\text{A1})$$

式中:  $v_t$  表示最小时间颗粒度  $\Delta t$  下第  $t$  个时刻的风电功率平均波动速度。

由于

$$v_t \leq v_{\max} \quad (\text{A2})$$

因此, 将式(A2)代入式(A1)可得

$$V_{\max} \Delta T = \sum_{t=1}^N v_t \Delta t \leq v_{\max} \sum_{t=1}^N \Delta t = v_{\max} N \Delta t \quad (\text{A3})$$

将  $\Delta T = N\Delta t$  代入式(A3)可得

$$V_{\max} \leq v_{\max} \quad (\text{A4})$$

即采用平均爬坡速度观测到的风电最大波动速度, 随量化时间颗粒度的增大出现减小的趋势, 呈现一定的时间平滑效应。

## 参考文献

[1] 李璐, 张泽端, 毕贵红, 等. “双碳”目标下基于系统动力学的发电行业碳减排政策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 69-81.  
LI Lu, ZHANG Zeduan, BI Guihong, et al. Carbon emission reduction policy in the power generation sector based on system dynamics with “dual carbon” targets[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 69-81.

[2] 林舜江, 冯祥勇, 梁炜焜, 等. 新能源电力系统不确定优化调度方法研究现状及展望[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(10): 20-41.  
LIN Shunjiang, FENG Xiangyong, LIANG Weikun, et al. Research status and prospect of uncertain optimal dispatch methods for renewable energy power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(10): 20-41.

[3] 刘颂凯, 秦浩, 胡畔, 等. 可量化风电不确定性风险的暂态稳定约束最优潮流模型[J]. 智慧电力, 2025, 53(9): 28-36.  
LIU Songkai, QIN Hao, HU Pan, et al. Transient stability constrained optimal power flow model quantifying wind power uncertainty risk[J]. Smart Power, 2025, 53(9): 28-36.

[4] 杨锡勇, 张仰飞, 林纲, 等. 考虑需求响应的源-荷-储多时间尺度协同优化调度策略[J]. 发电技术, 2023, 44(2): 253-260.  
YANG Xiyong, ZHANG Yangfei, LIN Gang, et al. Multi-time scale collaborative optimal scheduling strategy for source-load-storage considering demand response[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(2): 253-260.

[5] WANG Jian, XIE Ning, HUANG Chunyi, et al. Two-stage stochastic-robust model for the self-scheduling problem of an aggregator participating in energy and reserve markets[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(3): 752-771.

[6] 易文飞, 朱卫平, 郑明忠. 计及数据中心和风电不确定性的微电网经济调度[J]. 中国电力, 2024, 57(2): 19-26.  
YI Wenfei, ZHU Weiping, ZHENG Mingzhong. Economic dispatch of microgrid considering data center and wind power uncertainty[J]. Electric Power, 2024, 57(2): 19-26.

[7] 郑丁园, 崔双喜, 樊小朝, 等. 计及风电不确定性的综合能源系统多目标分布鲁棒优化调度[J]. 智慧电力, 2024, 52(8): 1-8, 18.  
ZHENG Dingyuan, CUI Shuangxi, FAN Xiaochao, et al. Multi-objective distributionally robust optimization scheduling for integrated energy system considering wind power uncertainty[J]. Smart Power, 2024, 52(8): 1-8, 18.

[8] 张韶华, 王必恒, 石城, 等. 基于分布鲁棒优化的电热综合能源配网系统与氢能源站协同优化[J]. 电测与仪表, 2023, 60(12): 36-43.  
ZHANG Shaohua, WANG Biheng, SHI Cheng, et al. Collaborative optimal dispatching of integrated electricity-heat energy distribution network system and hydrogen fueling station based on distributionally robust optimization[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(12): 36-43.

[9] 陈金玉, 陈大玮, 张抒凌, 等. 面向风电功率波动平抑的储能系统鲁棒模型预测控制[J]. 供用电, 2023, 40(8): 28-33.  
CHEN Jinyu, CHEN Dawei, ZHANG Shuling, et al. Robust model predictive control of energy storage system for wind power fluctuation smoothing[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(8): 28-33.

[10] 曾捷, 童晓阳, 范嘉乐. 计及需求响应不确定性的电气耦合配网系统动态分布鲁棒优化[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1877-1888.  
ZENG Jie, TONG Xiaoyang, FAN Jiale. Dynamic distributionally robust optimization of integrated electric-gas distribution system considering demand response uncertainty[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1877-1888.

[11] FATHABAD A M, CHENG Jianqiang, PAN Kai, et al.

- Data driven planning for renewable distributed generation integration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4357-4368.
- [12] 张佳辉, 张洪福, 牛玉广, 等. 考虑新能源出力不确定性的风-光-柴-储系统调度策略[J]. 电测与仪表, 2024, 61(3): 20-25.  
ZHANG Jiahui, ZHANG Hongfu, NIU Yuguang, et al. Dispatching strategy of wind-solar-diesel-battery hybrid power generation considering renewable energy output uncertainty[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(3): 20-25.
- [13] 刘国伟, 吴杰康, 马楠, 等. 考虑“风-荷”不确定性的海上“风-储”协同调峰优化模型[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(7): 1-10.  
LIU Guowei, WU Jiekang, MA Nan, et al. A collaborative peak shaving optimization model for offshore “wind-storage” considering the uncertainties of “wind-load”[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(7): 1-10.
- [14] 臧延雪, 边晓燕, 梁思琪, 等. 计及线路传输能力的新能源电力系统灵活性评估及优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 15-26.  
ZANG Yanxue, BIAN Xiaoyan, LIANG Siqi, et al. Flexibility evaluation and optimal dispatching method of a renewable energy power system considering line transmission capacity[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 15-26.
- [15] GANGAMMANAVAR H, SEN S, MZAVALA V. Stochastic optimization of sub-hourly economic dispatch with wind energy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 32(6): 949-959.
- [16] 吴雅仪, 陈红坤, 徐坤领, 等. 考虑双时间尺度调度周期的储能最优容量配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 106-113.  
WU Yayi, CHEN Hongkun, XU Kunling, et al. Optimal capacity allocation of energy storage system considering two time scale scheduling cycles[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 106-113.
- [17] 周博, 艾小猛, 方家琨, 等. 计及超分辨率风电出力不确定性的连续时间鲁棒机组组合[J]. 电工技术学报, 2021, 36(7): 1456-1467.  
ZHOU Bo, AI Xiaomeng, FANG Jiakun, et al. Continuous-time modeling based robust unit commitment considering beyond-the-resolution wind power uncertainty[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(7): 1456-1467.
- [18] NIKOBAKHT A, AGHAEI J, SHAFIEKHAH M, et al. Continuous-time co-operation of integrated electricity and natural gas systems with responsive demands under wind power generation uncertainty[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 3156-3170.
- [19] ZHANG Guangyuan, MCCALLEY J, WANG Qin. An AGC dynamics-constrained economic dispatch model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3931-3940.
- [20] 王士柏, 韩学山, 杨明, 等. 计及间歇性特征的电力系统区间经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 2966-2977.  
WANG Shibo, HAN Xueshan, YANG Ming, et al. Interval economic dispatch of power system considering intermittent feature[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 2966-2977.
- [21] CHE Liang, LIU Xuan, ZHU Xin, et al. Intra-interval security based dispatch for power systems with high wind penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1243-1255.
- [22] 杨雪, 王明强, 胡召永, 等. 精细考虑时刻间净负荷波动不确定性的机组组合[J]. 高电压技术, 2023, 49(11): 4839-4848.  
YANG Xue, WANG Mingqiang, HU Zhaoyong, et al. Unit commitment considering fluctuation uncertainty of net load between adjacent periods[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4839-4848.
- [23] 汪宁渤. 大规模风电送出与消纳[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [24] SOYSTER A L. Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming[J]. Operation Research, 1973, 21(5): 1154-1157.
- [25] LI Zhigang, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Adjustable robust real-time power dispatch with large-scale wind power integration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(2): 357-368.
- [26] 于丹文, 杨明, 韩学山, 等. 计及风电概率分布特征的鲁棒实时调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 727-738.  
YU Danwen, YANG Ming, HAN Xueshan, et al. Robust real-time dispatch considering probabilistic distribution of wind generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 727-738.
- [27] 王士柏, 韩学山, 杨明, 等. 计及不确定性的等备用边际效用约束的电力系统经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1143-1152.  
WANG Shibo, HAN Xueshan, YANG Ming, et al. Economic dispatch of power system including wqual marginal reserve utility constraint considering uncertainties[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1143-1152.
- [28] 张倩文, 王秀丽, 杨廷天, 等. 含风电场电力系统的鲁棒优化调度[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1451-1463.  
ZHANG Qianwen, WANG Xiuli, YANG Tingtian, et al. A robust dispatch method for power grid with wind farms[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1451-1463.

收稿日期: 2025-02-09; 修回日期: 2025-09-30

作者简介:

李本新(1987—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: bxli@ncepu.edu.cn

樊鑫(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行。E-mail: 2990068633@qq.com

(编辑 许威)