


2020 第九届电工技术前沿问题学术论坛暨
第十三届中国电工装备创新与发展论坛(FAFEE2020)

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

周博 艾小猛 方家琨 姚伟 文劲宇

华中科技大学 电气与电子工程学院

强电磁工程与新技术 国家重点实验室

2020年8月28日

提纲

主要内容

1、研究背景

2、连续时间鲁棒机组组合

3、求解方法

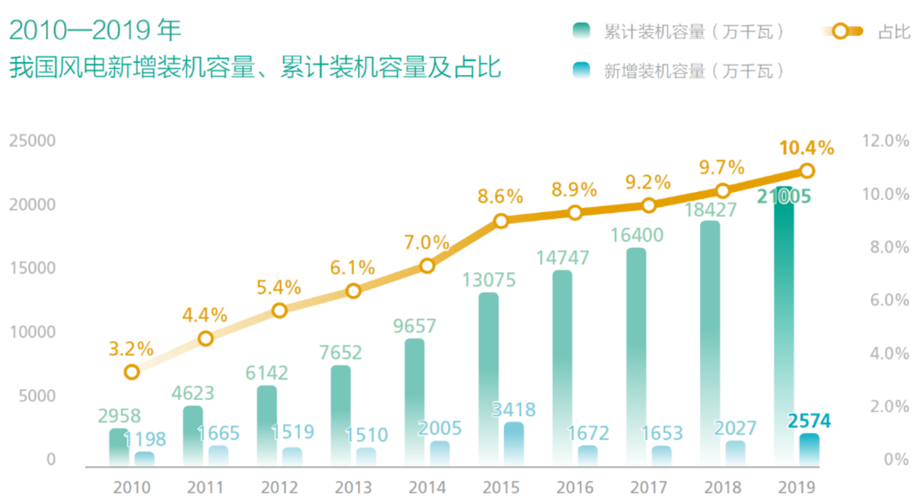
4、算例分析

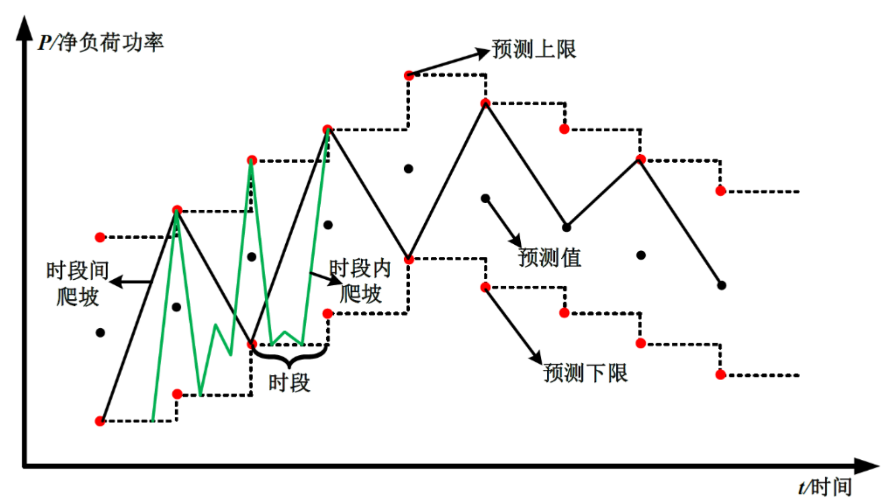
5、结论与展望

研究背景

时段内波动　　超分辨率不确定性

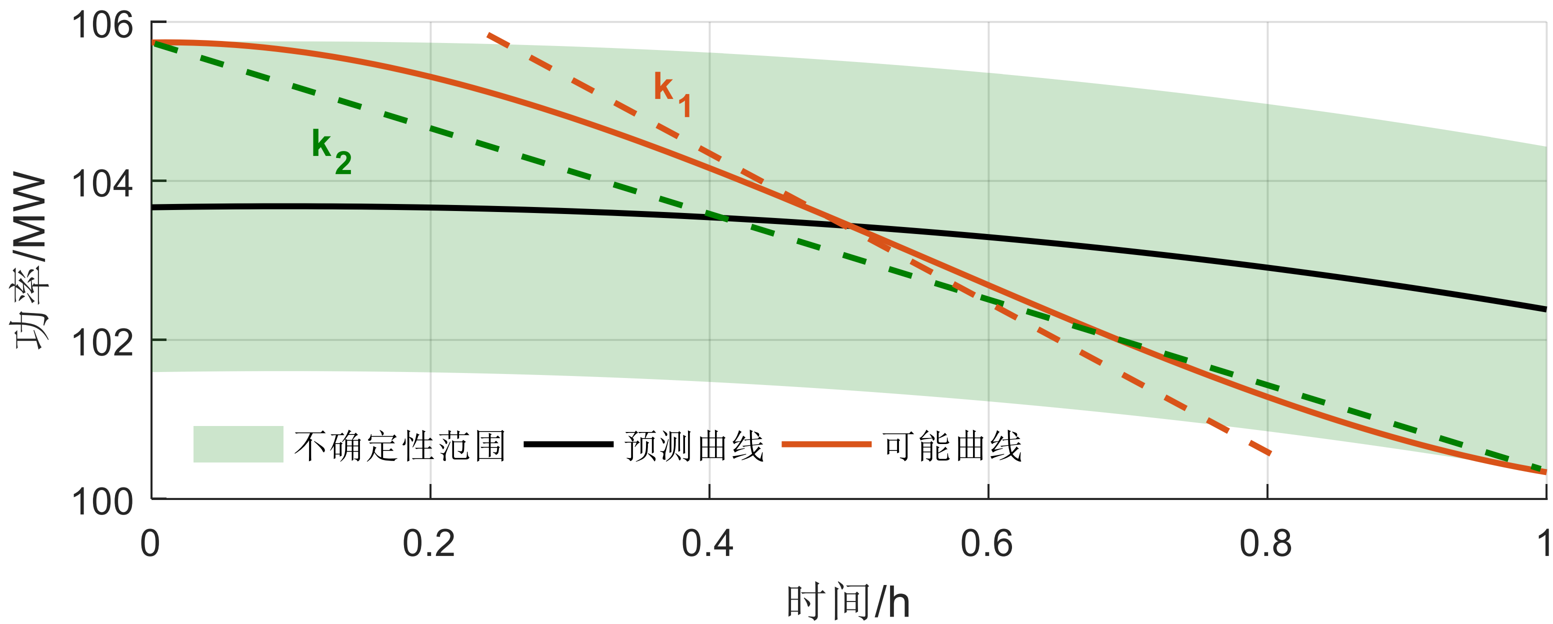
- 截止2019年底，全国新增风电并网装机2574万千瓦，**累计风电装机2.1亿千瓦**，约占全部发电装机的**10.4%**；2019年风电发电量4057亿千瓦时，约占全部发电量的5.5%。
- 随着风电渗透率的持续上升，其**时段内出力波动**愈发剧烈，可能导致时段内爬坡不足，威胁电力系统运行安全。
- 现有研究多考虑对调度时段的划分进行灵活调整，但多数文献在其调度分辨率下，**时段内部的变化仍然无法体现**，部分文献考虑了超出调度分辨率的随机变化，但考虑的变化类型较为单一，对时段内出力变化的描述不够灵活，**无法充分考虑超分辨率随机性**。





研究背景

时段内波动 | 超分辨率不确定性



可能的某条实际风电曲线最大功率变化率为k_1，传统调度能够计及的最大风电出力变化为k_2，$|k_2| < |k_1|$，说明考虑到的最大出力变化可能小于实际出力变化，可能导致爬坡不足， 从而影响实际运行安全。

如何将超分辨率风电出力不确定性纳入调度模型中，保证电力系统时段内的运行安全?

提纲

主要内容

1、研究背景

2、连续时间鲁棒机组组合

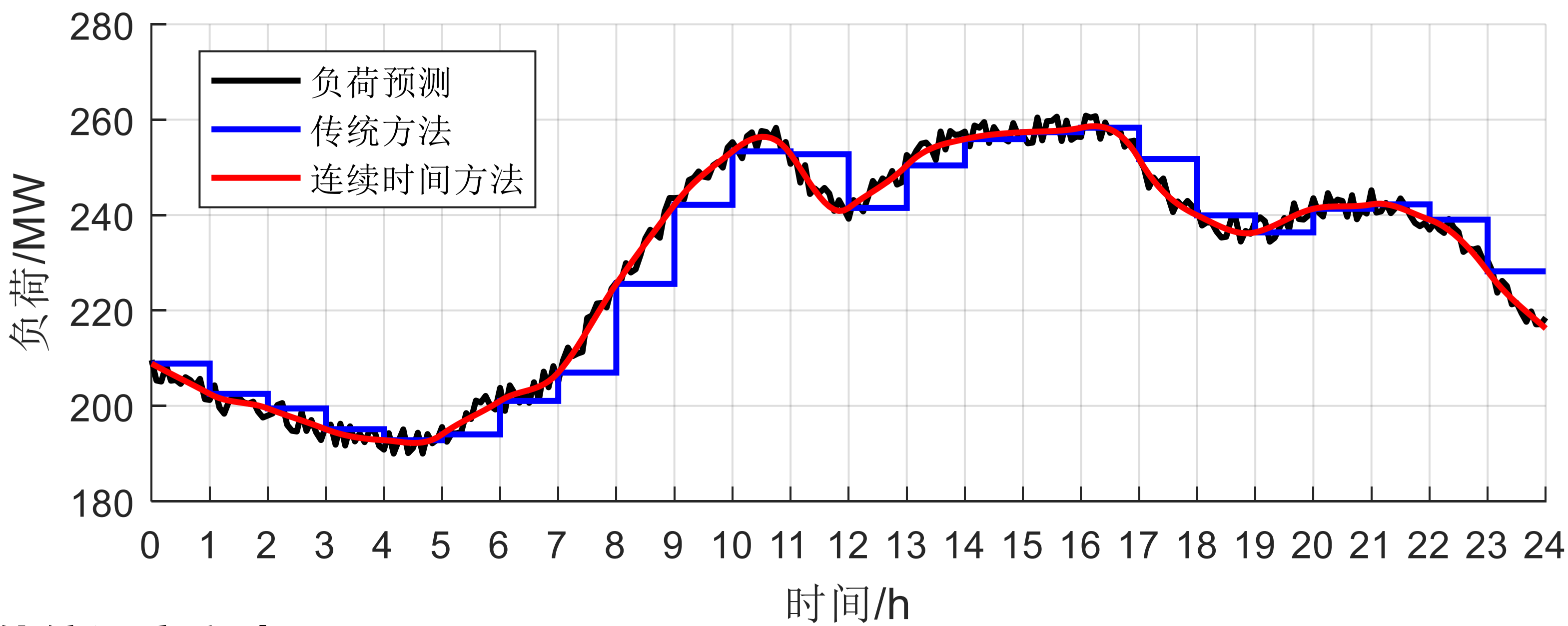
3、求解方法

4、算例分析

5、结论与展望

连续时间鲁棒机组组合

基本思路 | 连续时间机组组合 | 超分辨率随机性引入



- **传统调度方法**

  调度周期被均匀划分，并假定每个时段功率值不变，对预测负荷曲线的拟合程度较低，未充分利用预测信息且不能体现时段内的功率变化

- **连续时间建模方法**

  若采用连续时间光滑曲线来拟合预测负荷曲线，可以计及超出传统调度方法分辨率的时段内功率变化

连续时间鲁棒机组组合

基本思路 | 连续时间机组组合 | 超分辨率随机性引入

目标函数：启停成本+燃料成本

$$\min \sum_{t=1}^{24}\sum_{i}\int_0^1 (C_{\mathrm{uit}}(\tau)+C_{\mathrm{dit}}(\tau)+C_{\mathrm{fit}}(\tau))\mathrm{d}\tau$$

约束条件：启停成本计算

$$C_{\mathrm{uit}}(\tau)\ge 0,\quad C_{\mathrm{uit}}(\tau)\ge c_{\mathrm{ui}}(I_{git}(\tau^+)-I_{git}(\tau^-))$$

$$C_{\mathrm{dit}}(\tau)\ge 0,\quad C_{\mathrm{dit}}(\tau)\ge c_{\mathrm{dit}}(I_{git}(\tau^-)-I_{git}(\tau^+))$$

燃料成本分段线性化计算

$$\begin{cases} P_{git}(\tau)=P_{gi,\min}I_{git}(\tau)+\sum_{k=1}^{N_{\mathrm{pw}}}p_{gitk}(\tau) \\ C_{\mathrm{fit}}(\tau)=f_{i,\min}I_{git}(\tau)+\sum_{k=1}^{N_{\mathrm{pw}}}\lambda_{ik}p_{gitk}(\tau) \end{cases}$$

启停时间约束

$$\begin{cases} \int_{\tau}^{\tau+T_{\mathrm{on}}} I_{git}(\tau)\mathrm{d}\tau \ge T_{\mathrm{on}}(I_{git}(\tau^+)-I_{git}(\tau^-)) \\ \int_{\tau}^{\tau+T_{\mathrm{off}}} (1-I_{git}(\tau))\mathrm{d}\tau \ge T_{\mathrm{off}}(I_{git}(\tau^-)-I_{git}(\tau^+)) \end{cases}$$

出力范围约束

$$\begin{cases} P_{gi,\min}I_{git}(\tau)\le P_{git}(\tau)\le P_{gi,\max}I_{git}(\tau) \\ 0\le p_{gitk}(\tau)\le I_{git}(\tau)(P_{gi,\max}-P_{gi,\min})/N_{\mathrm{pw}} \end{cases}$$

爬坡约束

$$\begin{cases} (P_{git}(\tau))'\le r_{\mathrm{u}}I_{git}(\tau^-)+r_{\mathrm{su}}(I_{git}(\tau^+)-I_{git}(\tau^-))+M(1-I_{git}(\tau^+)) \\ -(P_{git}(\tau))'\le r_{\mathrm{d}}I_{git}(\tau^+)+r_{\mathrm{sd}}(I_{git}(\tau^-)-I_{git}(\tau^+))+M(1-I_{git}(\tau^-)) \end{cases}$$

功率平衡

$$\sum_i P_{git}(\tau)+\sum_i P_{\mathrm{wit}}(\tau)=\sum_i D_{it}(\tau)$$

潮流约束

$$-P_{\mathrm{lmax},j}\le \sum_i S_{ji}(P_{git}(\tau)+P_{\mathrm{wit}}(\tau)-D_{it}(\tau))\le P_{\mathrm{lmax},j}$$

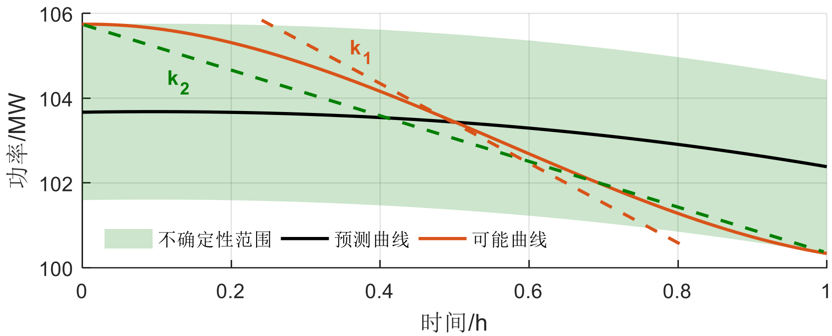
简写形式：连续时间优化，类似最优控制

$$\min \sum_{t=1}^{24}\sum_i \mathbf{f}(\boldsymbol{x}(\tau))$$

$$\text{s.t.}\quad \mathbf{g}(\boldsymbol{x}(\tau),\boldsymbol{y}(\tau),\boldsymbol{u}(\tau))\le 0$$

连续时间鲁棒机组组合

基本思路　连续时间机组组合　超分辨率随机性引入



$$(1-\xi)P_{\text{wit}}^{\text{E}}(\tau)\le P_{\text{wit}}(\tau)\le(1+\xi)P_{\text{wit}}^{\text{E}}(\tau)$$

$$\min \sum_{t=1}^{24}\sum_{i}\mathbf{f}(\boldsymbol{x}(\tau))$$

$$\text{s.t.}\quad \mathbf{g}(\boldsymbol{x}(\tau),\boldsymbol{y}(\tau),\boldsymbol{u}(\tau))\le 0$$

超分辨率随机性引入，鲁棒重构

$$\min \sum_{t=1}^{24}\sum_{i}\mathbf{f}(\boldsymbol{x}(\tau))$$

$$\text{s.t.}\quad \mathbf{g}(\boldsymbol{x}(\tau),\boldsymbol{y}^{\text{E}}(\tau),\boldsymbol{u}^{\text{E}}(\tau))\le 0$$

$$\mathbb{X}=\left\{\boldsymbol{x}(\tau)\middle|\begin{array}{l}\forall\boldsymbol{u}(\tau)\in\mathbb{U}_{\tau},\ \exists\boldsymbol{y}(\tau),\\ \text{满足}\,\mathbf{g}(\boldsymbol{x}(\tau),\boldsymbol{y}(\tau),\boldsymbol{u}(\tau))\le 0\end{array}\right\}$$

复杂的连续时间优化问题，难以求解

提纲

主要内容

1、研究背景

2、连续时间鲁棒机组组合

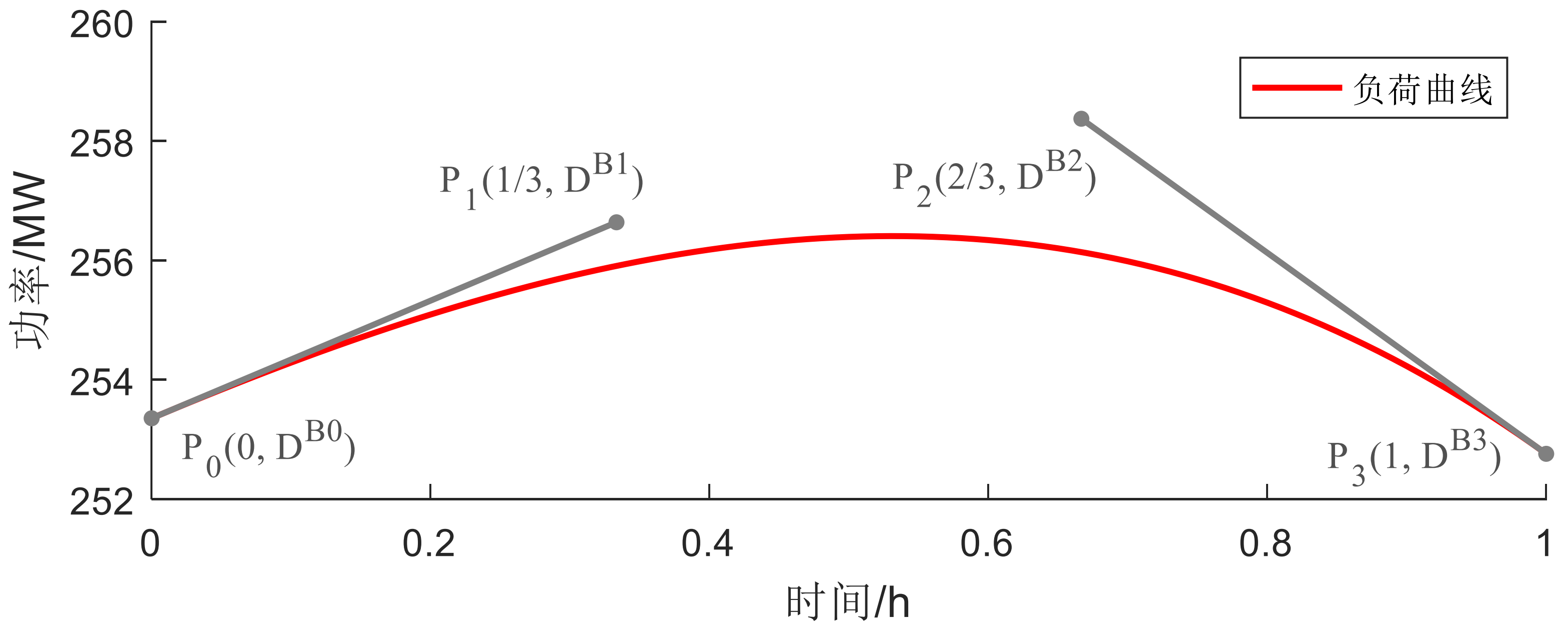
3、求解方法

4、算例分析

5、结论与展望

求解方法

BP插值 | 解空间变换 | 列和约束生成算法



三次Bernstein多项式（BP）插值

$$B_k(\tau)=\mathrm{C}_3^k\tau^k(1-\tau)^{3-k},\ k=0,1,2,3,\ \ \tau\in[0,1]$$

$$D(\tau)=D^{\mathrm{B0}}B_0(\tau)+D^{\mathrm{B1}}B_1(\tau)+D^{\mathrm{B2}}B_2(\tau)+D^{\mathrm{B3}}B_3(\tau)=(\boldsymbol{D}^{\mathbf{B}})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}(\tau)$$

$$\begin{cases} D(0)=D^{\mathrm{B0}},\ D'(0)=3(D^{\mathrm{B1}}-D^{\mathrm{B0}}) \\ D(1)=D^{\mathrm{B3}},\ \ D'(1)=3(D^{\mathrm{B2}}-D^{\mathrm{B3}}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} D^{\mathrm{B0}}=D(0) \\ D^{\mathrm{B1}}=D(0)+D'(0)/3 \\ D^{\mathrm{B2}}=D(1)-D'(1)/3 \\ D^{\mathrm{B3}}=D(1) \end{cases}$$

凸包性质：

插值曲线必然位于控制多边形内部

求解方法

BP插值 | 解空间变换 | 列和约束生成算法

- **积分项变换，$D(\tau)$积分后与时间τ无关。**

$$\int_0^1 D(\tau)\mathrm{d}t = \int_0^1 (\boldsymbol{D}^{\mathrm{B}})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{B}(\tau)\mathrm{d}t = (\boldsymbol{D}^{\mathrm{B}})^{\mathrm{T}} \int_0^1 \boldsymbol{B}(\tau)\mathrm{d}t = (D^{\mathrm{B0}} + D^{\mathrm{B1}} + D^{\mathrm{B2}} + D^{\mathrm{B3}})/4 = \boldsymbol{1}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{D}^{\mathrm{B}}/4$$

- **导数项变换，$D(\tau)$的导数为降一阶后的Bernstein多项式插值曲线。**

$$D'(\tau) = 3[D^{\mathrm{B1}} - D^{\mathrm{B0}}, D^{\mathrm{B2}} - D^{\mathrm{B1}}, D^{\mathrm{B3}} - D^{\mathrm{B2}}]^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\beta}(\tau)$$

式中$\beta_k(\tau) = C_2^k \tau^k (1-\tau)^{2-k}, k = 0,1,2, \tau \in [0,1]$为二次Bernstein多项式。

- **等式方程变换。根据待定系数法，可得**

$$D(\tau) = 0 \Leftrightarrow (\boldsymbol{D}^{\mathrm{B}})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{B}(\tau) = 0 \Leftrightarrow D^{\mathrm{B}k} = 0$$

即若插值曲线恒等于0，则其插值系数也都必为0。

- **不等式方程变换。根据BP插值的凸包性质，$\max\{(\boldsymbol{D}^{B})^{T}\boldsymbol{B}(\boldsymbol{\tau})\} \le \max\{\boldsymbol{D}^{Bk}\}$，可得**

$$D(\tau) \le 0 \Leftrightarrow (\boldsymbol{D}^{\mathrm{B}})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{B}(\tau) \le 0 \Leftarrow \max\{\boldsymbol{D}^{\mathrm{B}}\} \le 0 \Leftrightarrow D^{\mathrm{B}k} \le 0$$

即若要使插值曲线恒小于0，可使插值系数小于0。

求解方法

BP插值 | 解空间变换 | 列和约束生成算法

$$(1-\xi)P_{\mathrm{wit}}^{\mathrm{E}}(\tau) \le P_{\mathrm{wit}}(\tau) \le (1+\xi)P_{\mathrm{wit}}^{\mathrm{E}}(\tau)$$

功率时间图中的带状范围

BP插值

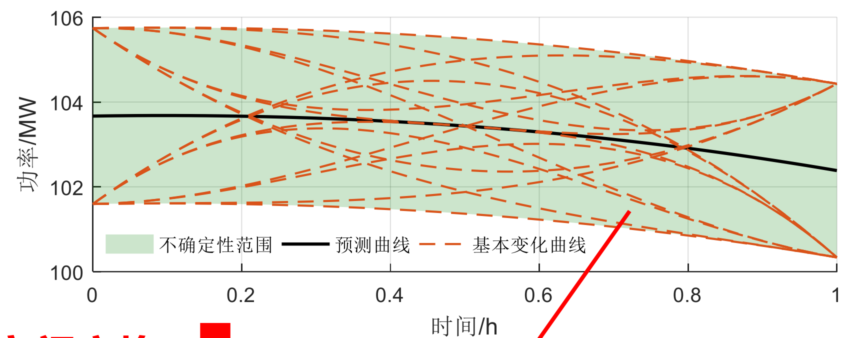
$$\begin{cases} P_{\mathrm{wit}}^{\mathrm{E}}(\tau) = (\boldsymbol{P}_{\mathbf{wit}}^{\mathbf{EB}})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{B}(\tau) \\ P_{\mathrm{wit}}(\tau) = (\boldsymbol{P}_{\mathbf{wit}}^{\mathbf{B}})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{B}(\tau) \end{cases}$$

$$\begin{cases} ((1-\xi)\boldsymbol{P}_{\mathbf{wit}}^{\mathbf{EB}} - \boldsymbol{P}_{\mathbf{wit}}^{\mathbf{B}})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{B}(\tau) \le 0 \\ (\boldsymbol{P}_{\mathbf{wit}}^{\mathbf{B}} - (1+\xi)\boldsymbol{P}_{\mathbf{wit}}^{\mathbf{EB}})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{B}(\tau) \le 0 \end{cases}$$

凸包性质

$$(1-\xi)\boldsymbol{P}_{\mathbf{wit}}^{\mathbf{EB}} \le \boldsymbol{P}_{\mathbf{wit}}^{\mathbf{B}} \le (1+\xi)\boldsymbol{P}_{\mathbf{wit}}^{\mathbf{EB}}$$

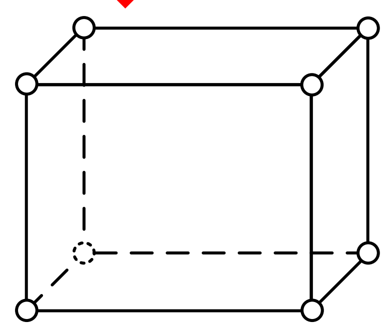
函数空间中的盒式集合



解空间变换

顶点表达

$$\boldsymbol{P}_{\mathbf{wit,en}}^{\mathbf{B}} = \left\{ P_{\mathrm{wit,en}}^{\mathrm{B}k} \,\middle|\, \begin{array}{l} P_{\mathrm{wit,en}}^{\mathrm{B}k} = P_{\mathrm{wit,en}}^{\mathrm{EB}k} + \alpha_k \xi P_{\mathrm{wit,en}}^{\mathrm{EB}k} - (1-\alpha_k)\xi P_{\mathrm{wit,en}}^{\mathrm{EB}k} \\ n = 1 + \alpha_0 + 2\alpha_1 + 4\alpha_2 + 8\alpha_3, \alpha_k \in \{0,1\} \\ k = 0,1,2,3 \end{array} \right\}$$



若能计及所有基本变化曲线，则可保证任意超分辨率变化下的系统安全。

$$\begin{cases} \boldsymbol{P}_{\mathbf{wit}}^{\mathbf{B}} = \sum_{n=1}^{16} \omega_n \boldsymbol{P}_{\mathbf{wit,en}}^{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_{\mathbf{wit,e1}}^{\mathbf{B}} & \boldsymbol{P}_{\mathbf{wit,e2}}^{\mathbf{B}} & \cdots & \boldsymbol{P}_{\mathbf{wit,en}}^{\mathbf{B}} \end{bmatrix} \boldsymbol{\omega} \\ \boldsymbol{\omega} \ge 0, \mathbf{1}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\omega} \le 1 \end{cases}$$

还原到原始代数空间

$$P_{\mathrm{wit}}(\tau) = \boldsymbol{\omega}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_{\mathbf{wit,e1}}^{\mathbf{B}} & \boldsymbol{P}_{\mathbf{wit,e2}}^{\mathbf{B}} & \cdots & \boldsymbol{P}_{\mathbf{wit,e16}}^{\mathbf{B}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{B}(\tau)$$

$$= \sum_{n=1}^{16} \omega_n \boxed{P_{\mathrm{wit,en}}(\tau)}$$

基本变化曲线

求解方法

BP插值 → 解空间变换 → 列和约束生成算法

目标函数

$$\min \sum_t \sum_i (C_{\mathrm{u}it} + C_{\mathrm{d}it} + C_{\mathrm{f}it})$$

约束条件：启停成本计算

$$C_{\mathrm{d}it} \ge 0, \quad C_{\mathrm{d}it} \ge c_{\mathrm{d}i}(I_{git} - I_{gi(t+1)})$$

$$C_{\mathrm{u}it} \ge 0, \quad C_{\mathrm{u}it} \ge c_{\mathrm{u}i}(I_{gi(t+1)} - I_{git})$$

燃料成本分段线性化

$$\begin{cases} \boldsymbol{P}_{git}^{\mathrm{B}} = P_{gi,\min} \boldsymbol{I}_{git}^{\mathrm{B}} + \sum_{k=1}^{N_{\mathrm{pw}}} \boldsymbol{p}_{gikt}^{\mathrm{B}} \\ C_{\mathrm{f}it} = f_{i,\min} \mathbf{1}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{I}_{git}^{\mathrm{B}} / 4 + \sum_{k=1}^{N_{\mathrm{pw}}} \lambda_{ik} \mathbf{1}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{p}_{gikt}^{\mathrm{B}} / 4 \end{cases}$$

启停时间

$$\begin{cases} \sum_{k=t+1}^{t+T_{\mathrm{on}}} I_{gik} \ge T_{\mathrm{on}}(I_{gi(t+1)} - I_{git}) \\ \sum_{k=t+1}^{t+T_{\mathrm{off}}} (1 - I_{gik}) \ge T_{\mathrm{off}}(I_{git} - I_{gi(t+1)}) \end{cases}$$

出力范围

$$\begin{cases} P_{gi,\min} \boldsymbol{I}_{git}^{\mathrm{B}} \le \boldsymbol{P}_{git}^{\mathrm{B}} \le P_{gi,\max} \boldsymbol{I}_{git}^{\mathrm{B}} \\ 0 \le p_{gik}(t) \le \boldsymbol{I}_{git}^{\mathrm{B}} (P_{gi,\max} - P_{gi,\min}) / N_{\mathrm{pw}} \end{cases}$$

爬坡约束

$$\begin{cases} 3(P_{git}^{\mathrm{B1}} - P_{git}^{\mathrm{B0}}) \le r_{\mathrm{u}} I_{git} \\ 3(P_{git}^{\mathrm{B2}} - P_{git}^{\mathrm{B1}}) \le r_{\mathrm{u}} I_{git} \\ \qquad + r_{\mathrm{su}}(I_{gi(t+1)} - I_{git}) + M(1 - I_{gi(t+1)}) \\ 3(P_{git}^{\mathrm{B3}} - P_{git}^{\mathrm{B2}}) \le r_{\mathrm{u}} I_{gi(t+1)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} -3(P_{git}^{\mathrm{B1}} - P_{git}^{\mathrm{B0}}) \le r_{\mathrm{d}} I_{git} \\ -3(P_{git}^{\mathrm{B2}} - P_{git}^{\mathrm{B1}}) \le r_{\mathrm{d}} I_{gi(t+1)} \\ \qquad + r_{\mathrm{sd}}(I_{git} - I_{gi(t+1)}) + M(1 - I_{git}) \\ -3(P_{git}^{\mathrm{B3}} - P_{git}^{\mathrm{B2}}) \le r_d I_{gi(t+1)} \end{cases}$$

功率平衡

$$\sum_i \boldsymbol{P}_{git}^{\mathrm{B}} + \sum_i \boldsymbol{P}_{\mathrm{w}it}^{\mathrm{B}} = \sum_i \boldsymbol{D}_{it}^{\mathrm{B}}$$

潮流约束

$$-P_{l\max,j} \le \sum_i S_{ji}(P_{git}^{\mathrm{B}k} + P_{\mathrm{w}it}^{\mathrm{B}k} - D_{it}^{\mathrm{B}k}) \le P_{l\max,j}$$

一阶连续性约束

$$P_{(\cdot)it}^{\mathrm{B3}} = P_{(\cdot)i(t+1)}^{\mathrm{B0}}, \quad P_{(\cdot)it}^{\mathrm{B3}} - P_{(\cdot)it}^{\mathrm{B2}} = P_{(\cdot)i(t+1)}^{\mathrm{B1}} - P_{(\cdot)i(t+1)}^{\mathrm{B0}}$$

简写形式：MILP

$$\min \sum_{t=1}^{24} \sum_i \boldsymbol{F}\boldsymbol{x}^{\mathrm{B}} + \boldsymbol{G}\boldsymbol{y}^{\mathrm{B}}$$

$$\text{s.t.} \quad \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}^{\mathrm{B}} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{y}^{\mathrm{B}} + \boldsymbol{C}\boldsymbol{u}^{\mathrm{B}} \le \boldsymbol{H}$$

函数空间盒式集合

$$(1-\xi)\boldsymbol{P}_{\mathrm{w}it}^{\mathrm{EB}} \le \boldsymbol{P}_{\mathrm{w}it}^{\mathrm{B}} \le (1+\xi)\boldsymbol{P}_{\mathrm{w}it}^{\mathrm{EB}}$$

鲁棒重构

$$\min \sum_{t=1}^{24} \sum_i \boldsymbol{F}\boldsymbol{x}^{\mathrm{B}} + \boldsymbol{G}\boldsymbol{y}^{\mathrm{EB}}$$

$$\text{s.t.} \quad \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}^{\mathrm{B}} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{y}^{\mathrm{EB}}(\tau) + \boldsymbol{c}\boldsymbol{u}^{\mathrm{EB}}(\tau) \le \boldsymbol{H}$$

$$\mathbb{X} = \left\{ \boldsymbol{x}^{\mathrm{B}} \middle| \begin{array}{l} \forall \boldsymbol{u}^{\mathrm{B}} \in \mathbb{U}_{\mathrm{t}}, \exists \boldsymbol{y}^{\mathrm{B}}, \\ \text{满足} \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}^{\mathrm{B}} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{y}^{\mathrm{B}} + \boldsymbol{C}\boldsymbol{u}^{\mathrm{B}} \le \boldsymbol{H} \end{array} \right\}$$

求解方法

BP插值 → **解空间变换** → **列和约束生成算法**

$$
\begin{aligned}
\min\quad & \sum_{t=1}^{24}\sum_{i} \boldsymbol{F}\boldsymbol{x}^{\mathrm{B}} + \boldsymbol{G}\boldsymbol{y}^{\mathrm{EB}} \\
\text{s.t.}\quad & \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}^{\mathrm{B}} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{y}^{\mathrm{EB}}(\tau) + \boldsymbol{c}\boldsymbol{u}^{\mathrm{EB}}(\tau) \le \boldsymbol{H}
\end{aligned}
$$

$$
\mathbb{X} = \left\{ \boldsymbol{x}^{\mathrm{B}} \,\middle|\, \begin{array}{l} \forall \boldsymbol{u}^{\mathrm{B}} \in \mathbb{U}_t,\ \exists \boldsymbol{y}^{\mathrm{B}}, \\ \text{满足}\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}^{\mathrm{B}} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{y}^{\mathrm{B}} + \boldsymbol{C}\boldsymbol{u}^{\mathrm{B}} \le \boldsymbol{H} \end{array} \right\}
$$

- **主问题：考虑部分极端场景，计算问题的解**
- **子问题：校验主问题结果是否鲁棒，并找到主问题需考虑的极端场景**

分解

主问题MILP

$$
\begin{aligned}
\min\quad & \sum_{t=1}^{24}\sum_{i} \boldsymbol{F}\boldsymbol{x}^{\mathrm{EB}} + \boldsymbol{G}\boldsymbol{y}^{\mathrm{EB}} \\
\text{s.t.}\quad & \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}^{\mathrm{B}} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{y}^{\mathrm{EB}}(\tau) + \boldsymbol{c}\boldsymbol{u}^{\mathrm{EB}}(\tau) \le \boldsymbol{H}
\end{aligned}
$$

$$
\mathbb{X} = \left\{ \boldsymbol{x}^{\mathrm{B}} \,\middle|\, \begin{array}{l} \forall \boldsymbol{u}^{\mathrm{B}} \in \mathbb{U}_t^{\mathrm{MP}},\ \exists \boldsymbol{y}^{\mathrm{B}}, \\ \text{满足}\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}^{\mathrm{B}} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{y}^{\mathrm{B}} + \boldsymbol{C}\boldsymbol{u}^{\mathrm{B}} \le \boldsymbol{H} \end{array} \right\}
$$

迭代求解

子问题MILP

$$
\begin{aligned}
\max\quad & (\boldsymbol{H} - \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}^{\mathrm{B}*} - \boldsymbol{C}(1-\xi)\boldsymbol{u}^{\mathrm{EB}})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega} - \sum_{m} 2\xi u_m^{\mathrm{EB}}\gamma_m \\
\text{s.t.}\quad & \mathbf{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega} \le 0, -\boldsymbol{\omega} \le 1, \boldsymbol{\omega} \ge 0 \\
& -M\beta_m \le \gamma_m \le M\beta_m \\
& -M(1-\beta_m) + \boldsymbol{C}_m^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega} \le \gamma_m \le M(1-\beta_m) + \boldsymbol{C}_m^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega}
\end{aligned}
$$

子问题max-min

$$
\begin{aligned}
\max_{\boldsymbol{u}^{\mathrm{B}} \in \mathbb{U}_t} \min\quad & 1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\delta} \\
\text{s.t.}\quad & \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}^{\mathrm{B}*} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{y}^{\mathrm{B}} + \boldsymbol{C}\boldsymbol{u}^{\mathrm{B}} \le \boldsymbol{D} + \boldsymbol{\delta}, \quad \boldsymbol{\omega}
\end{aligned}
$$

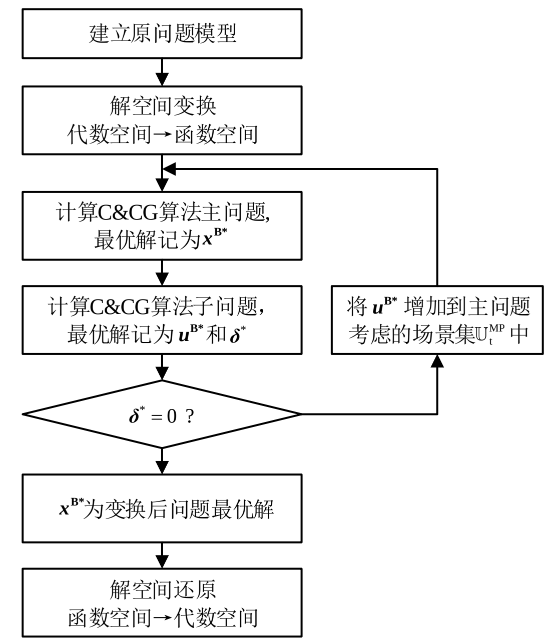
对偶变换

$$
\begin{aligned}
\max\quad & (\boldsymbol{H} - \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}^{\mathrm{B}*} - \boldsymbol{C}\boldsymbol{u}^{\mathrm{B}})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega} \\
\text{s.t.}\quad & \mathbf{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega} \le 0, -\boldsymbol{\omega} \le 1, \boldsymbol{\omega} \ge 0, \\
& (1-\xi)\boldsymbol{u}^{\mathrm{EB}} \le \boldsymbol{u}^{\mathrm{B}} \le (1+\xi)\boldsymbol{u}^{\mathrm{EB}}
\end{aligned}
$$

盒式集合

$$
\begin{aligned}
\max\quad & (\boldsymbol{H} - \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}^{\mathrm{B}*} - \boldsymbol{C}(1-\xi)\boldsymbol{u}^{\mathrm{EB}})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega} \\
& -2\xi(\boldsymbol{u}^{\mathrm{EB}})^{T}\boldsymbol{\beta}^{T}\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega} \\
\text{s.t.}\quad & \mathbf{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega} \le 0, -\boldsymbol{\omega} \le 1, \boldsymbol{\omega} \ge 0
\end{aligned}
$$

大M法



提纲

主要内容

1、研究背景

2、连续时间鲁棒机组组合

3、求解方法

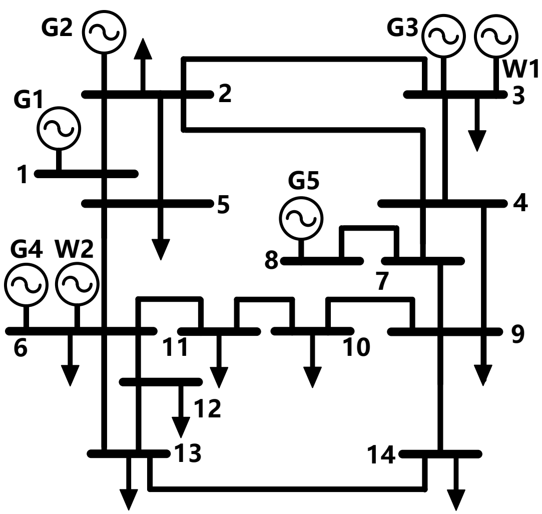
4、算例分析

5、结论与展望

算例分析

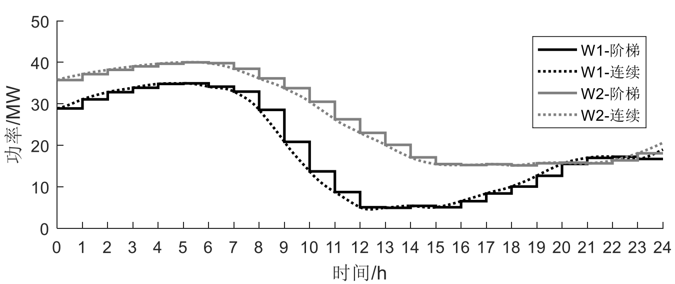
IEEE14节点系统 | IEEE RTS79系统

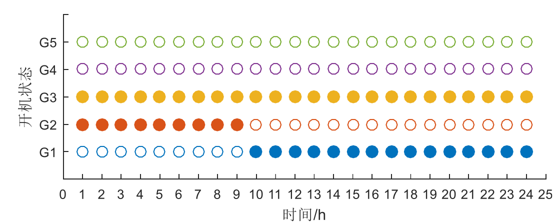
◆ 风电较小时

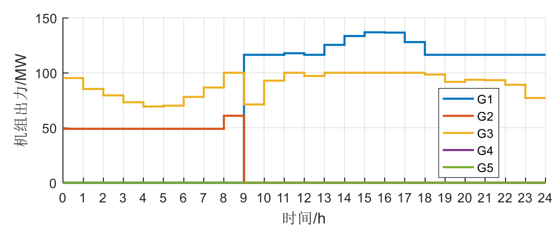


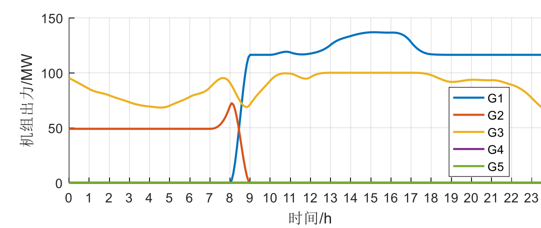
对比项	传统方法	所提方法
负荷电量/MWh	5516.88	5520.92
预测风电量/MWh	1097.40	1084.67
预测场景下机组发电量/MWh	4419.48	4436.25
预测场景下总成本/$	150855.35	151248.18
预测场景下启停成本/$	23620	23620
预测场景下燃料成本/$	127235.35	127628.18
启停次数	2	2
机组在线时长/台时	48	48
鲁棒性	100%	100%

- ➢ 开机方式相同，出力计划相近，说明连续时间方法的正确性
- ➢ 鲁棒性100%，说明风电较小时，两种方法都能较好的应对随机性









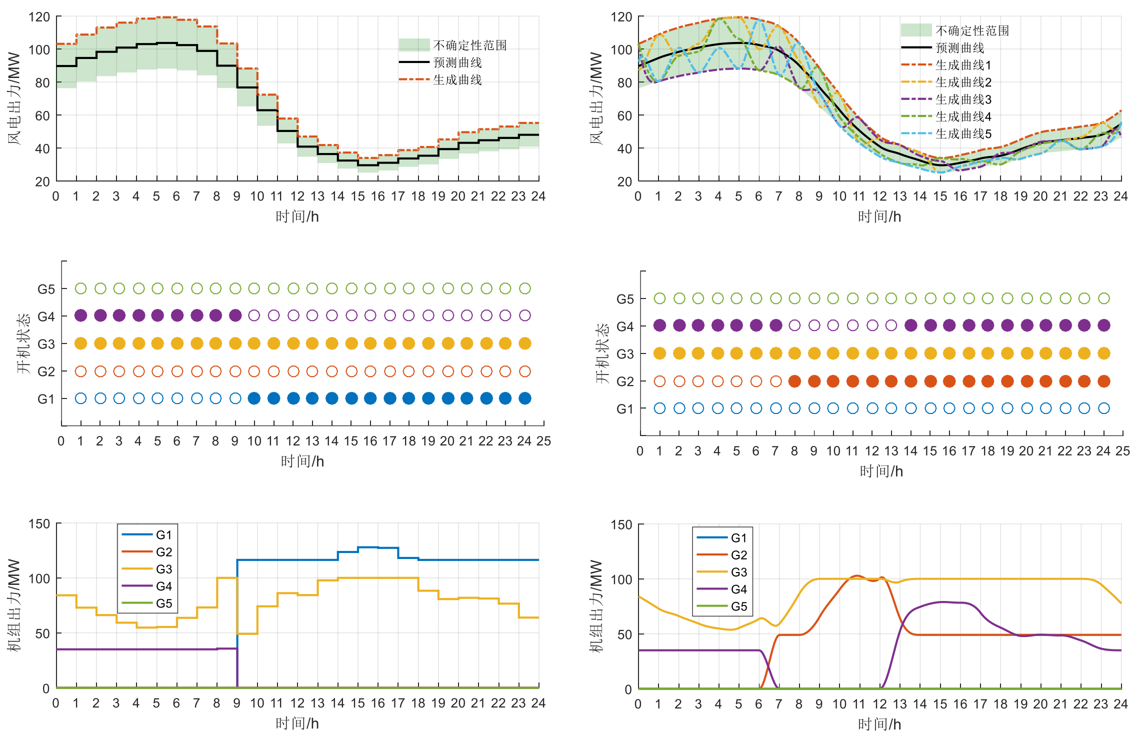
最大负荷259MW，
风电总容量80MW，预测误差15%

算例分析

IEEE14节点系统 | IEEE RTS79系统

◆ 风电较大时

风电容量120MW时



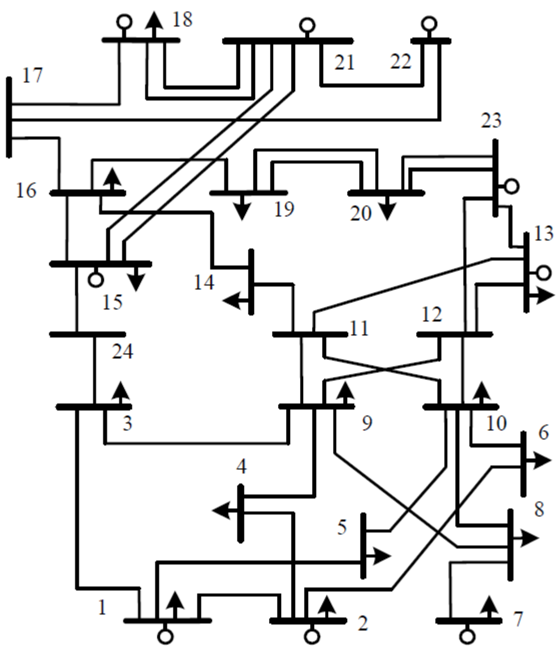
对比项	传统方法	所提方法
负荷电量/MWh	5516.88	5520.92
风电发电量/MWh	1531.18	1513.36
机组发电量/MWh	3985.70	4007.56
预测场景下总成本/$	137377.92	155077.92
预测场景下启停成本/$	21620	17000
预测场景下燃料成本/$	115757.92	138077.92
启停次数	2	3
机组在线时长/h	48	59
鲁棒性	71.35%	99.40%

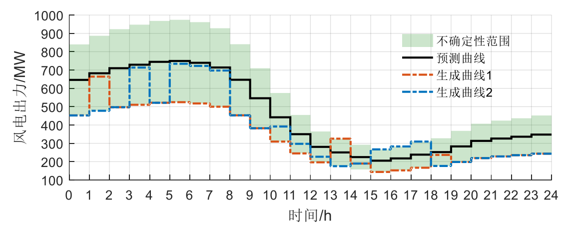
- ➢ **由生成场景，连续时间方法能够计及超分辨率随机性**
- ➢ **增加部分成本，换来更高的鲁棒性**

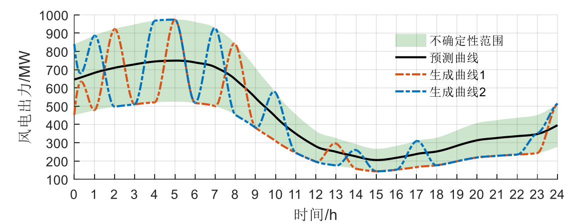
算例分析

IEEE14节点系统　　IEEE RTS79系统

◆ IEEE RTS79系统







最大负荷2850MW，

节点2、14个增设风电，

总容量1000MW

对比项	传统方法	所提方法
负荷电量/MWh	60706.99	60751.52
预测风电量/MWh	10974.03	10846.76
预测场景下机组发电量/MWh	49732.96	49904.75
预测场景下总成本/$	579145.44	606358.07
预测场景下启停成本/$	16500	15000
预测场景下燃料成本/$	562645.44	591358.07
启停次数	11	10
机组在线时长/h	398	434
鲁棒性	43.42%	98.41%

- **未超分辨率不确定性，鲁棒性46.42%，与14节点算例对比，超分辨率随机性影响显著**
- **计及超分辨率不确定性后，鲁棒性98.41%，鲁棒性得到显著提升**

提纲

主要内容

1、研究背景

2、连续时间鲁棒机组组合

3、求解方法

4、算例分析

5、结论与展望

结论与展望

结论：

- 当风电渗透率较低时，超分辨率风电出力不确定性影响不显著，**所提方法能够得到与传统方法相似的结果**；
- 随着风电渗透率的增加，超分辨率风电出力不确定性影响逐渐显著，**传统方法给出的调度结果无法保障足够的鲁棒性，存在较大的安全隐患**；
- 所提方法能够充分**计及超分辨率风电出力不确定性，以牺牲部分经济性为代价，显著提高调度方案的鲁棒性**。

展望：

- 如何实现100%鲁棒
- 鲁棒性与经济性的协调考虑

汇报完毕，

请多指导，

谢谢大家！