

风险量化的新型电力系统概率调度

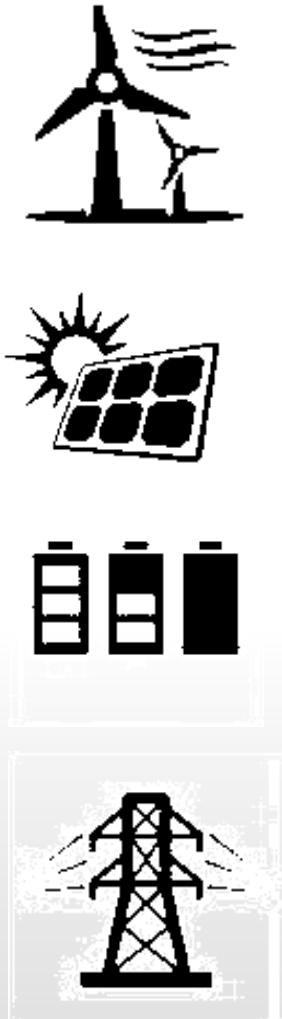
吴文传
清华大学 长聘教授 *IEEE Fellow*

电力系统自动化专业委员会2022年度学术交流会
2022.12.02





- 背景与基本概念
- 新能源出力概率建模
- 概率机组组合与备用决策
- 考虑弃电与有序用电的概率日前调度
- 概率鲁棒实时调度





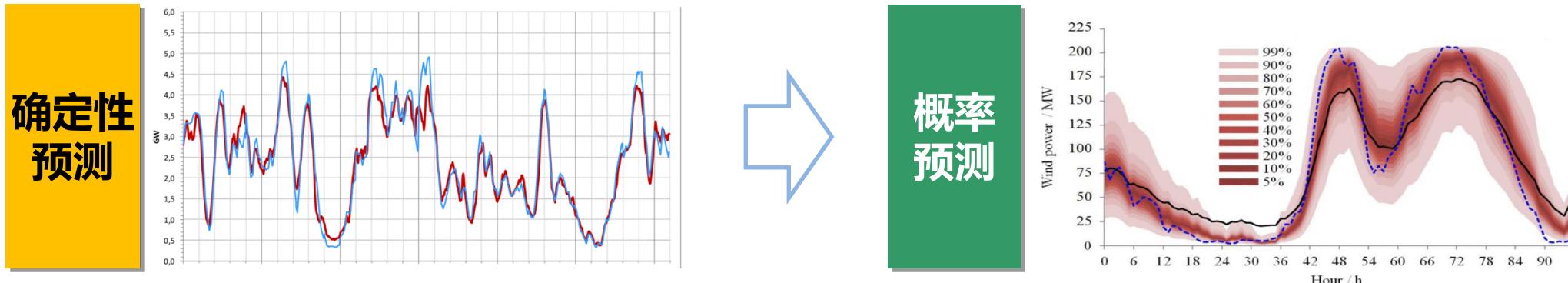
背景与基本概念



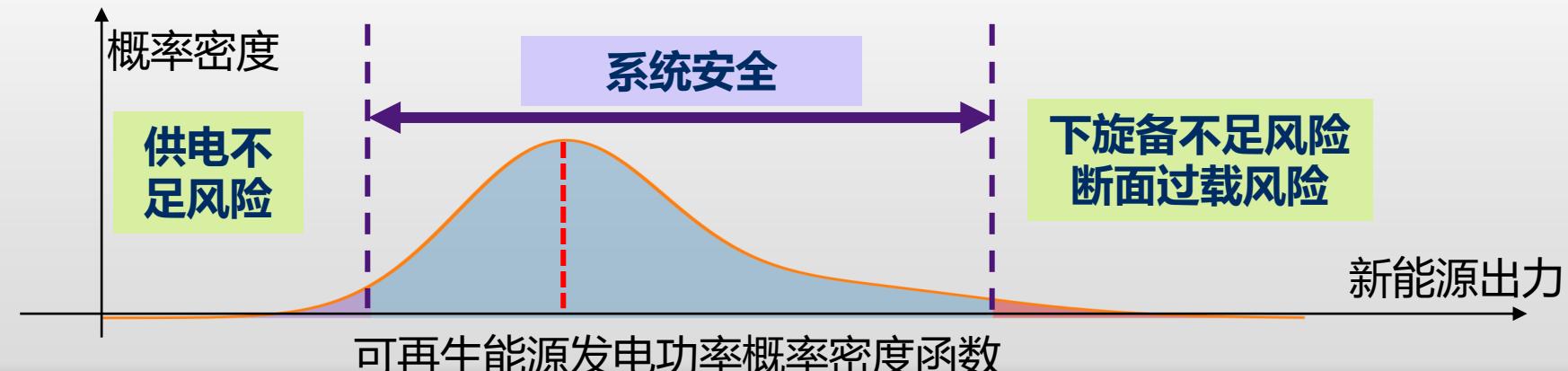
风险量化的新型电力系统概率调度

口风险量化的概率调度概念

- ◆ 概率预测适应可再生能源波动性



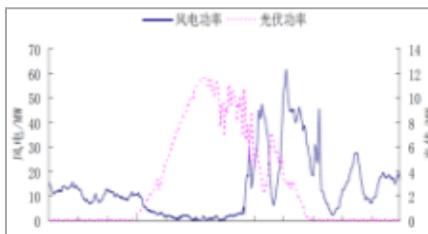
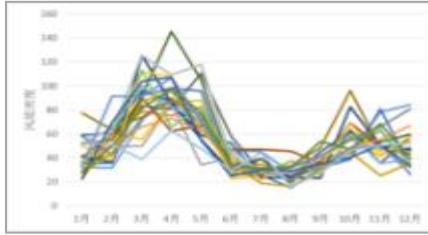
- ◆ 风险优化调度对可再生能源波动等随机性因素引发的安全风险进行量化建模，在**风险量化可控**前提下给出最优调度决策。





风险量化的新型电力系统概率调度

口 传统确定性调度：基于确定的负荷与新能源预测



求解确定性优化调度模型

$\min f(x)$ 调度成本函数

$g_i(x, y) \leq 0$ 系统安全约束

x : 决策变量 y : 系统参数



➤ 通过预留备用保证不确定性下的系统安全：

1. 备用人工指定，存在任意性和盲目性，保守与风险并存：

- 备用过多时系统运行过于保守
- 备用过少时系统运行风险过大

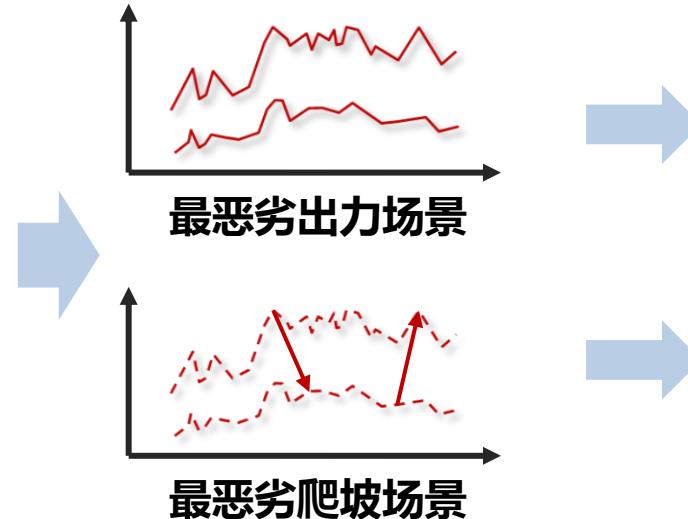
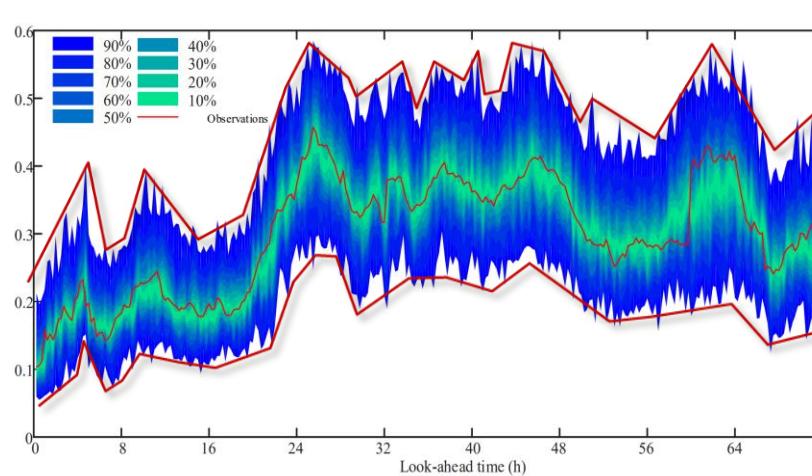
2. 不同运行场景对风险要求不同，所需备用随之变化，固定备用难以应对多样化场景的需求。





风险量化的新型电力系统概率调度

口 传统鲁棒调度：基于最恶劣场景的负荷与新能源预测



求解鲁棒优化调度模型

$$\begin{aligned} & \min f(x) \quad \text{调度成本函数} \\ & \max_y g_i(x, y) \leq 0 \quad \text{系统安全约束} \\ & x: \text{决策变量} \quad y: \text{系统参数} \end{aligned}$$

➤ 通过预留备用保证不确定性下的系统安全：

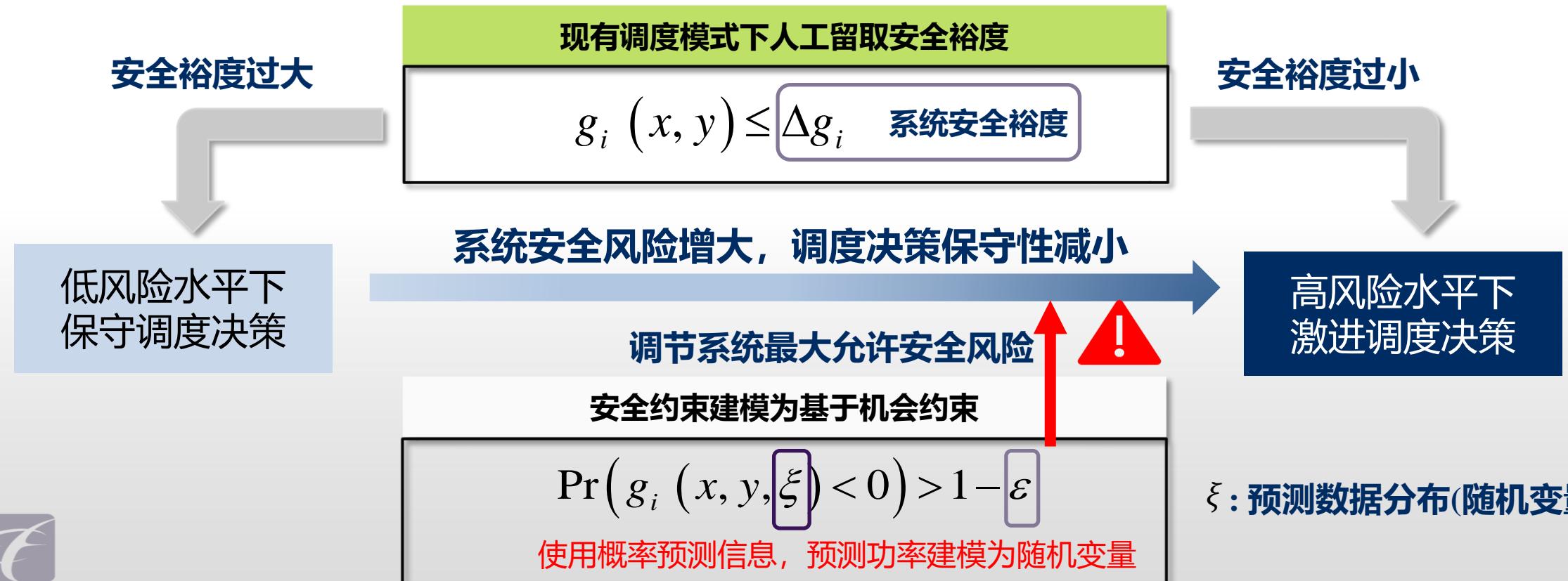
1. 备用的预留数量取决于不确定性的边界，主要受小概率极端场景影响
2. 鲁棒调度决策针对极端场景、未考虑分布，过于保守，增加不必要的开机，造成资源的浪费。



口风险量化的概率优化调度模式

- ◆ 对可再生能源波动等随机性因素引发的安全风险进行**量化建模**，实现**风险量化的最优调度**。

x : 决策变量 y : 系统参数

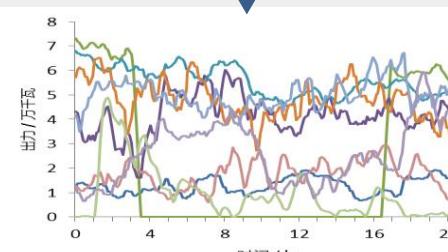
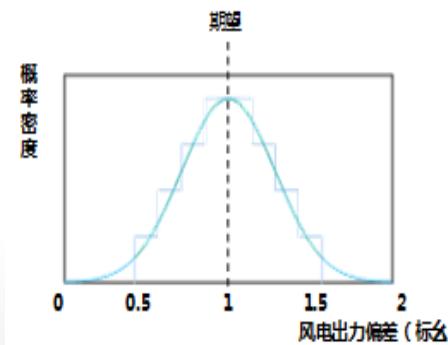


多时间尺度概率调度

口调度风险评估与防控

- ◆ 通过概率优化调度给出**常规电源、可再生能源发电和有序用电计划**，保证**大概率场景下系统安全**；对于**小概率极端场景**的运行风险，通过风险评估实现辨识并给出**应急控制策略**。

负荷新能源概率预测



小概率场景生成

风险优化调度模型

$$\begin{aligned} & \min E(f(x, y, \xi)) \\ & \Pr(g_i(x, y, \xi) < 0) > 1 - \varepsilon \\ & h(x, y, \xi) = 0 \end{aligned}$$

优化调度
结果

风险可控调度决策

常规电源机组组合
和发电计划



风/光发电计划
有序用电计划

辨识

风险量化评估

小概率极端场景紧急控
制策略

小概率
风险



多时间尺度概率调度

多时间尺度风险调度框架

- ◆ 保证了长时间尺度下的运行经济性与短时间尺度下的系统安全性。
- ◆ 实现不同时间尺度调度风险的量化，逐级减小风险水平，风险可控。





新能源出力概率建模

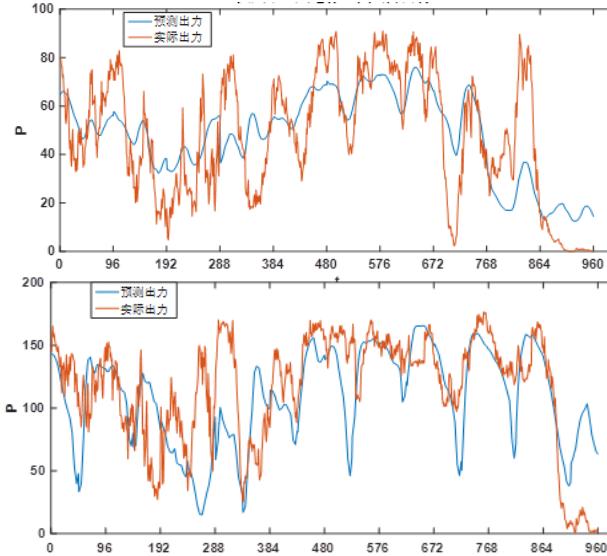


EMSO Smart Grid

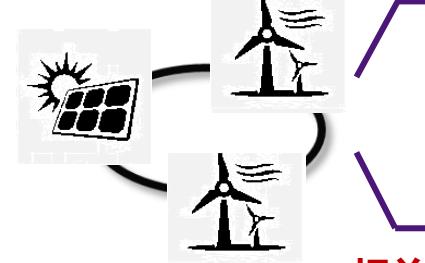
新能源出力概率建模



◆ 风/光功率随机性强，确定性预测准确性差，概率预测能够给出风/光发电的分布信息

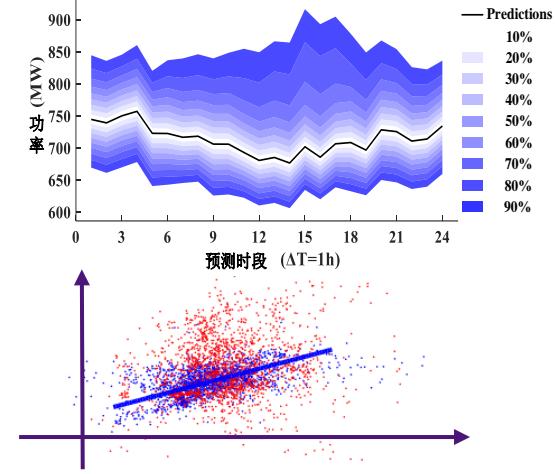


确定性预测被
概率预测所取代

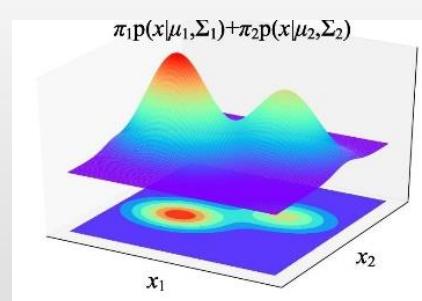
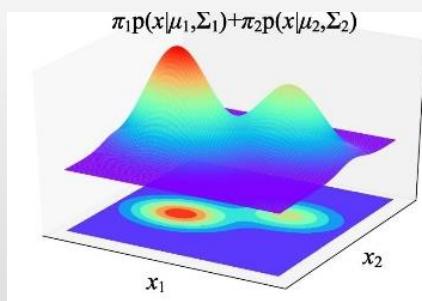


单场/群预测

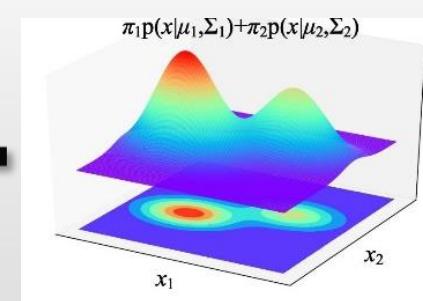
相关性预测



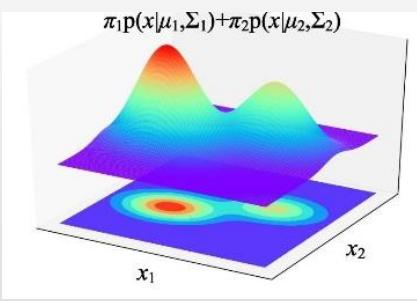
◆ 建立精准的、多维相关的、计算简便的可再生能源场站群的功率概率分布模型



+



=



能够描述非对称、多峰和相关性

卷积运算封闭性

◆ 基于高斯混合模型的可再生能源概率特性建模方法

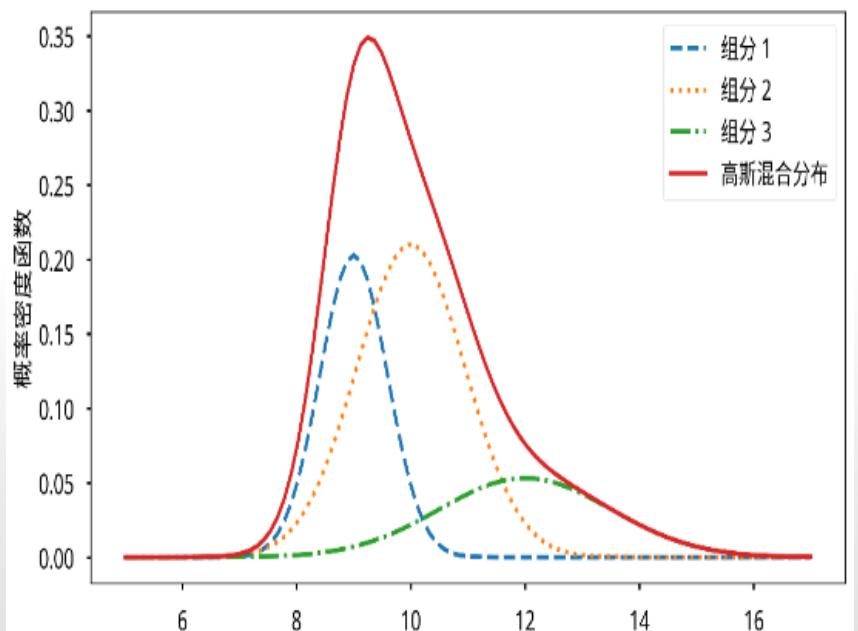
$$N(x | \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, x \in \mathbb{R}$$

✓ 高斯混合模型(Gaussian Mixture Model , GMM)

$$PDF_X(x) = \sum_{i=1}^n \omega_i N(x | \mu_i, \sigma_i)$$

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad \omega_i \geq 0, \forall i = 1 \dots m$$

均值: $\sum_{i=1}^n \omega_i \mu_i$ 方差: $\sum_{i=1}^n \omega_i (\mu_i^2 + \sigma_i^2) - \left(\sum_{i=1}^n \omega_i \mu_i \right)^2$

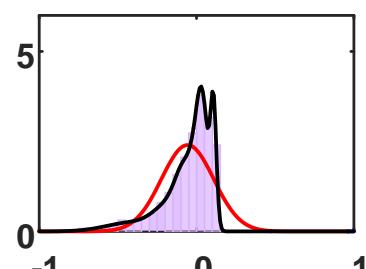
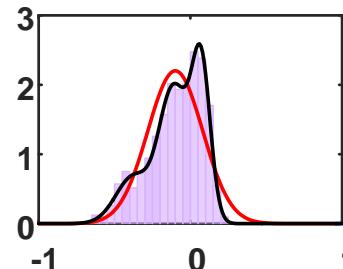


新能源出力概率建模

◆ 基于高斯混合模型的可再生能源概率特性建模方法

基于高斯混合模型的概率建模方法，对可再生能源的**概率特性与相关性**实现精确刻画。

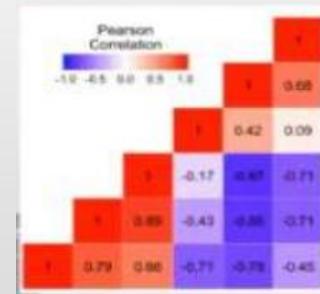
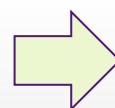
实际功率分布 —— 高斯分布 —— 高斯混合模型



边缘分布拟合

$$PDF_{\tilde{\mathbf{e}}^t}(\mathbf{e}) = \sum_{i=1}^n \alpha_i N(\mathbf{e}, \boldsymbol{\mu}_i, \boldsymbol{\Sigma}_i)$$

混合高斯拟合
原始数据分布



相关性

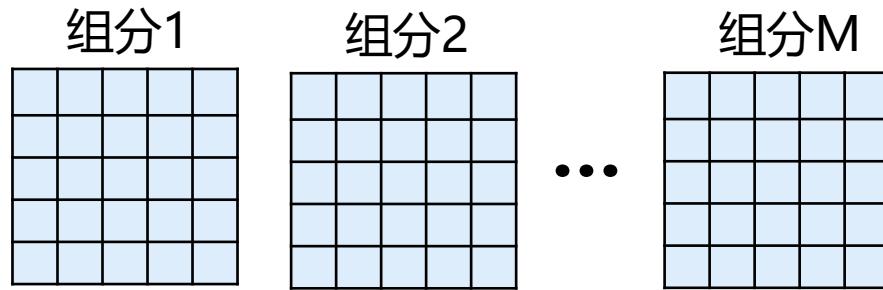




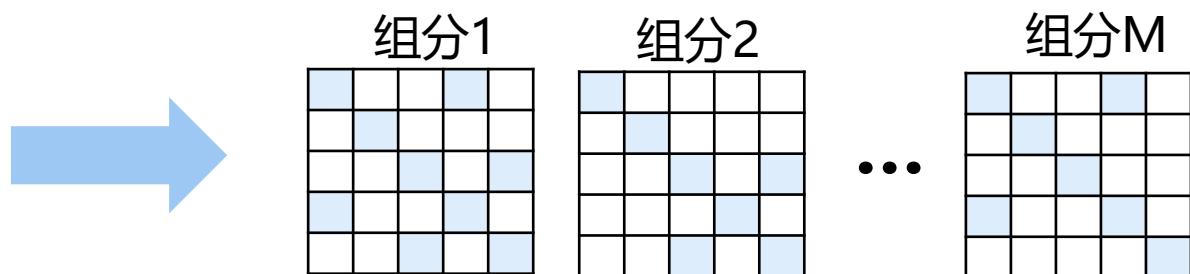
新能源出力概率建模

- ◆ 包含 M 个组分的 N 维高斯混合模型，其协方差矩阵共 MN^2 个参数，导致高斯混合模型过于复杂计算量大，提出稀疏化协方差矩阵结构的稀疏高斯混合模型。

稠密协方差矩阵, MN^2 个参数, 参数数目多



具有稀疏结构的协方差矩阵，减少参数，简化模型



- ◆ 在参数估计的目标函数中加入协方差逆矩阵的L1正则项，限制协方差矩阵的稀疏性

$$\min \left[-\sum_{i=1}^N \log \left(\sum_{k=1}^K \omega_k N(\mathbf{x} | \boldsymbol{\mu}^k, \boldsymbol{\Sigma}^k) \right) + \lambda \sum_{k=1}^K \|\boldsymbol{\Sigma}^k\|_1 \right]$$

最大化似然度对数和
提高拟合精度

L1正则项

$$\|A\|_1 = \sum_{i \neq j} |A_{ij}|$$

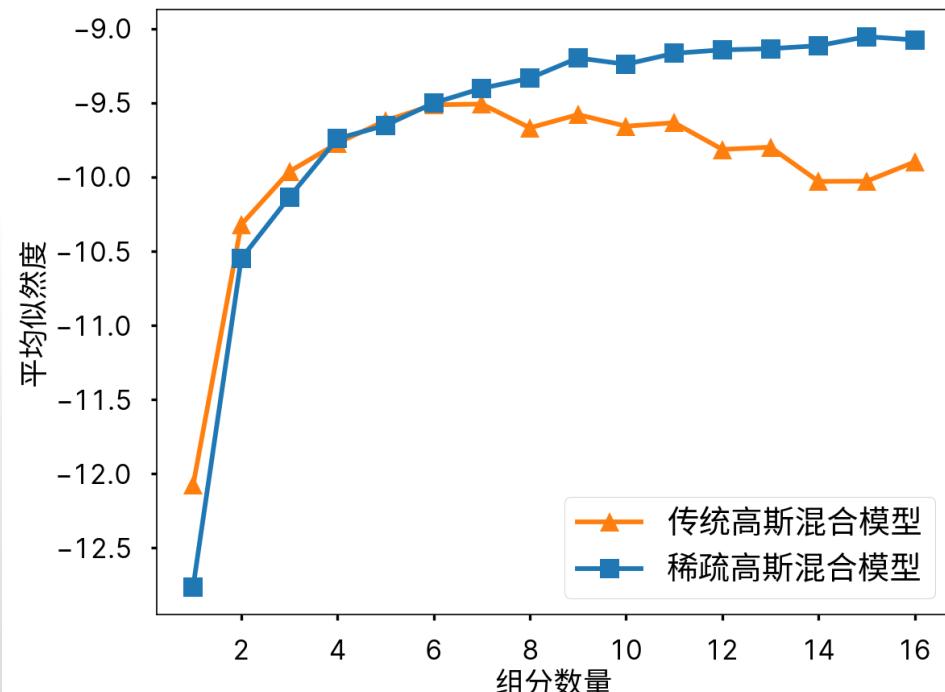
非对角元素绝对值之和
诱导矩阵稀疏化



口算例效果：9个风电场实际概率预测数据

组分 数目	传统高斯混合模型		稀疏高斯混合模型	
	平均似然度	参数数量	平均似然度	参数数量
1	-12.078	55	-12.765	19
2	-10.320	110	-10.550	38
3	-9.963	165	-10.135	57
4	-9.772	220	-9.741	76
5	-9.620	275	-9.651	95
6	-9.513	330	-9.501	114
7	-9.508	385	-9.402	148
8	-9.668	440	-9.333	152
9	-9.579	495	-9.197	171
10	-9.657	550	-9.239	190
11	-9.633	605	-9.166	209
12	-9.813	660	-9.142	229
13	-9.799	715	-9.134	249

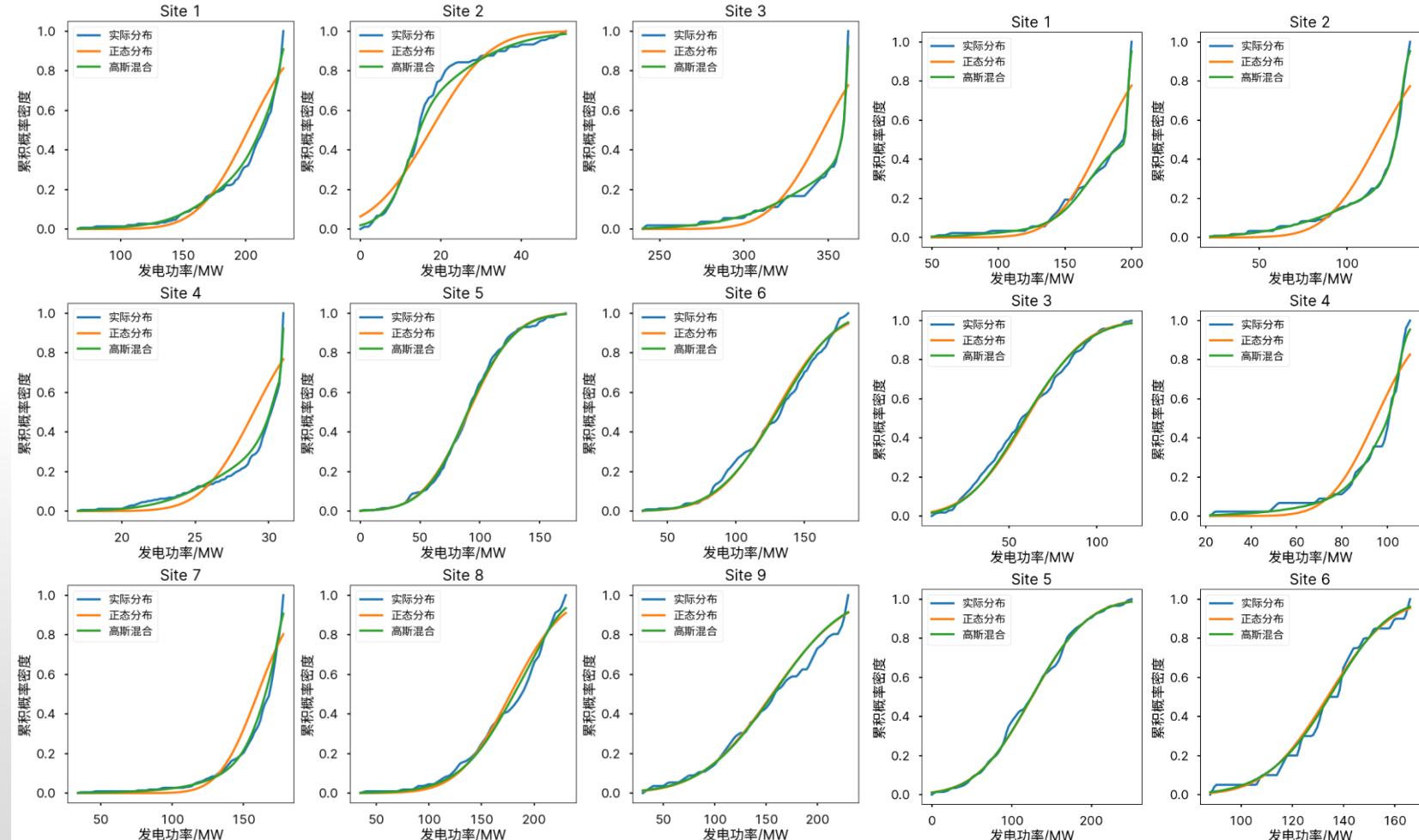
- 随着组分数目的增多，稀疏高斯混合模型使用约1/3的参数数目，实现了相近的拟合精度
- 当组分数目继续增大时，稀疏高斯混合模型有效避免了过拟合现象，能够继续提升拟合精度





口算例效果：15个风电场发电功率边缘分布的累积分布函数

稀疏高斯混合模型相比正态分布，对发电功率概率分布拟合效果更好





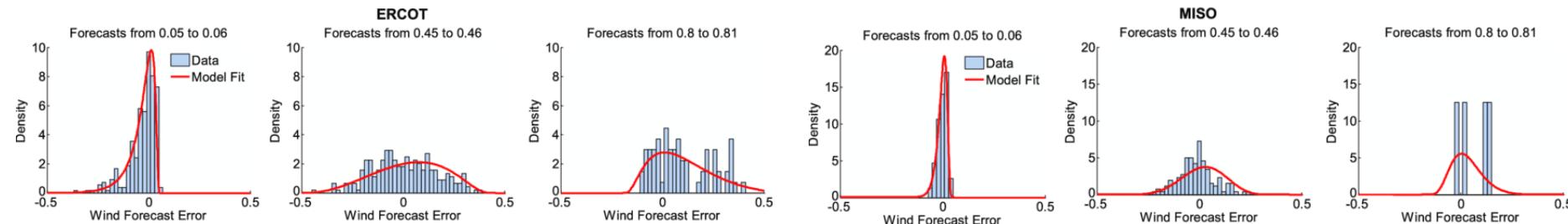
概率机组组合与备用决策





口 实际问题

- 机组组合计划时间尺度较长，可再生能源预测存在较大误差，预测误差分布复杂



- 传统机组组合方法没有科学刻画可再生能源不确定性带来的备用需求，导致开机计划不合理



开机容量过少，导致上调备用不足，可能切负荷



开机容量过多，导致运行成本高昂，影响可再生能源消纳



概率机组组合与备用决策

◆ 风险量化的概率机组组合模型

在概率机组组合中考虑两类机会约束形式的关键安全约束：备用容量约束和断面传输容量约束。

$$\begin{aligned}
 & \min \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{N_G} UC_{i,t} + FC_{i,t} + RC_{i,t} + \sum_{j=1}^{N_R} CP_{j,t} + C_{adj,t} \right) \\
 & \text{s.t. } \sum_{i=1}^{N_G} P_{i,t} + \sum_{j=1}^{N_R} R_{j,t,sche} = \sum_{k=1}^{N_D} D_{k,t} \\
 & P_{i,t} + UR_{i,t} \leq v_{i,t} P_{i,max}, P_{i,t} - DR_{i,t} \geq v_{i,t} P_{i,min} \\
 & 0 \leq UR_{i,t} \leq UR_{i,max}, 0 \leq DR_{i,t} \leq DR_{i,max} \\
 & 0 \leq R_{j,t,sche} \leq R_{j,t,fest}, 0 \leq R_{j,t,cur} \leq R_{j,t,fest} \\
 & -R_{down,i} \Delta t - (2 - v_{i,t-1} - v_{i,t}) M \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq R_{up,i} \Delta t + (2 - v_{i,t-1} - v_{i,t}) M \\
 & \sum_{k=t}^{t+UT_i-1} v_{i,k} \geq UT_i (v_{i,t} - v_{i,t-1}), \sum_{k=t}^{t+DT_i-1} (1 - v_{i,k}) \geq DT_i (v_{i,t-1} - v_{i,t}) \\
 & \Pr \left\{ \sum_{i=1}^{N_G} UR_{i,t} \geq \sum_{j=1}^{N_R} R_{j,t,sche} - \sum_{j=1}^{N_R} (\tilde{R}_{j,t} - R_{j,t,cur}) + UR_{t,extra} \right\} \geq 1 - \alpha_{UR} \\
 & \Pr \left\{ \sum_{i=1}^{N_G} DR_{i,t} \geq \sum_{j=1}^{N_R} (\tilde{R}_{j,t} - R_{j,t,cur}) - \sum_{j=1}^{N_R} R_{j,t,sche} + DR_{t,extra} \right\} \geq 1 - \alpha_{DR} \\
 & \Pr \left(\tilde{F}_{l,t} \leq C_{l,max} \right) \geq 1 - \alpha_l \\
 & \Pr \left(\tilde{F}_{l,t} \geq -C_{l,max} \right) \geq 1 - \alpha_l \\
 & \tilde{F}_{l,t} = \sum_{i=1}^{N_G} s_{l-GB_i} P_{i,t} + \sum_{j=1}^{N_R} s_{l-RB_j} (\tilde{R}_{j,t} - R_{j,t,cur}) - \sum_{k=1}^{N_D} s_{l-DB_k} D_{k,t}
 \end{aligned}$$

目标函数：发电成本+启停机成本+备用容量成本+弃电惩罚+备用调节成本

功率平衡约束

发电机出力，备用容量，爬坡约束

发电机启停机时间约束

系统备用容量约束

断面传输容量约束

确定性安全约束

风险量化的安全约束

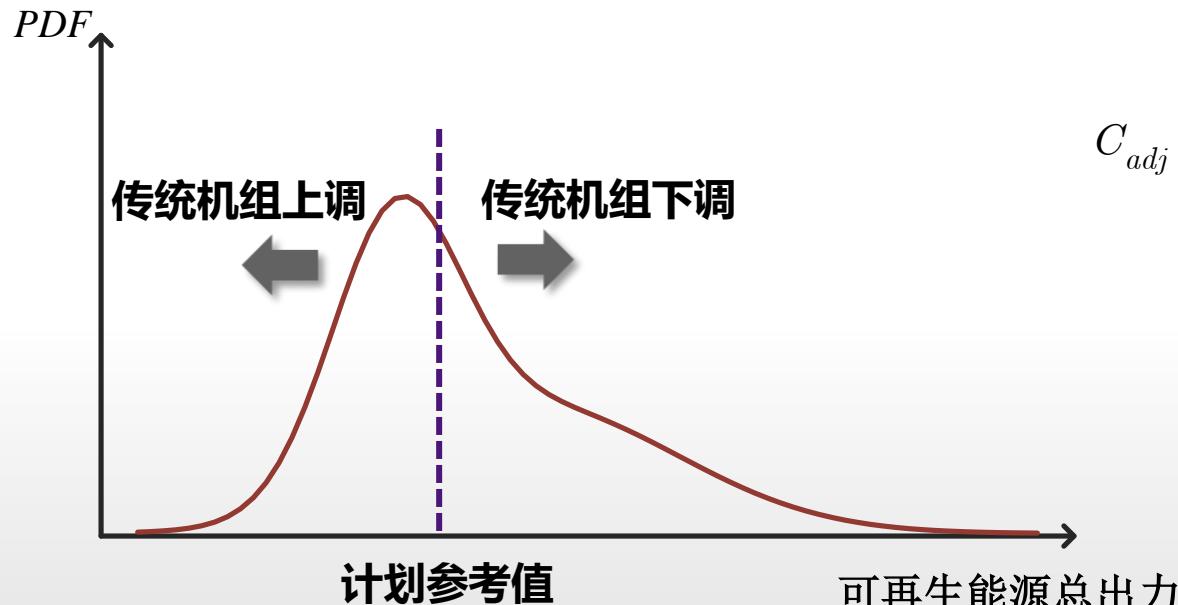




◆ 备用调节成本的解析化表达



在概率机组组合模型中考虑**备用调节成本**，同时采用**高精度的凸解析表达式**对其近似，实现概率优化模型的高效求解



$$\begin{aligned}
 C_{adj} &= E[\tilde{W}_t - W_t | W_t \leq \tilde{W}_t \leq \bar{W}_t] + E[W_t - \tilde{W}_t | \underline{W}_t \leq \tilde{W}_t \leq W_t] \\
 &= \int_{W_t}^{\bar{W}_t} \tilde{W}_t - W_t \varphi_t(\tilde{W}_t) d\tilde{W}_t + \int_{\underline{W}_t}^{W_t} \tilde{W}_t - W_t \varphi_t(\tilde{W}_t) d\tilde{W}_t
 \end{aligned}$$

↓ **凸函数**

$$\frac{dC_{adj}}{dW_t} = C_{DN} + C_{UP} \Phi(W_t) > 0$$

$$\frac{d^2C_{adj}}{dW_t^2} = C_{DN} + C_{UP} \varphi(W_t) > 0$$



◆ 备用调节成本的解析化表达

标准高斯分布

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{\xi^2}{2}} d\xi = 0.5 + 0.5 \tanh f(x)$$

展开成泰勒级数

$$f(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} x - \frac{2\pi - 4}{3 \cdot 2\pi} x^3 + O(x^5)$$

局部拟合

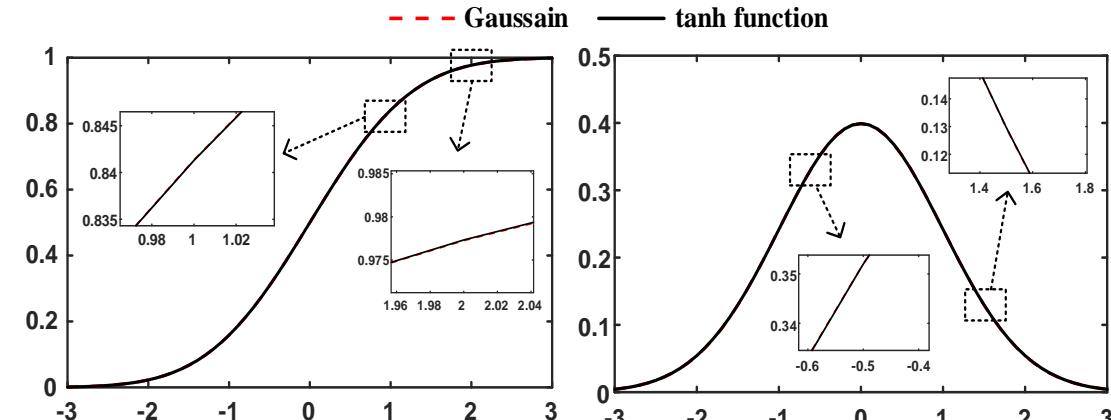
$$f(x) \approx 0.7983x + 0.03564x^3 + O(x^5)$$

高斯混合分布
累计分布函数
解析近似表达式

$$CDF_{\xi}(x) \approx \sum_{m=1}^M \frac{\omega_m}{2} \left[1 + \tanh \left(a \frac{x - \mu_m}{\sigma_m} + b \left(\frac{x - \mu_m}{\sigma_m} \right)^3 \right) \right]$$

$$a = 0.7983, b = 0.03564, \sum_{m=1}^M \omega_m = 1, \omega_m > 0$$

拟合精度：最大拟合误差 1.8×10^{-4}



»

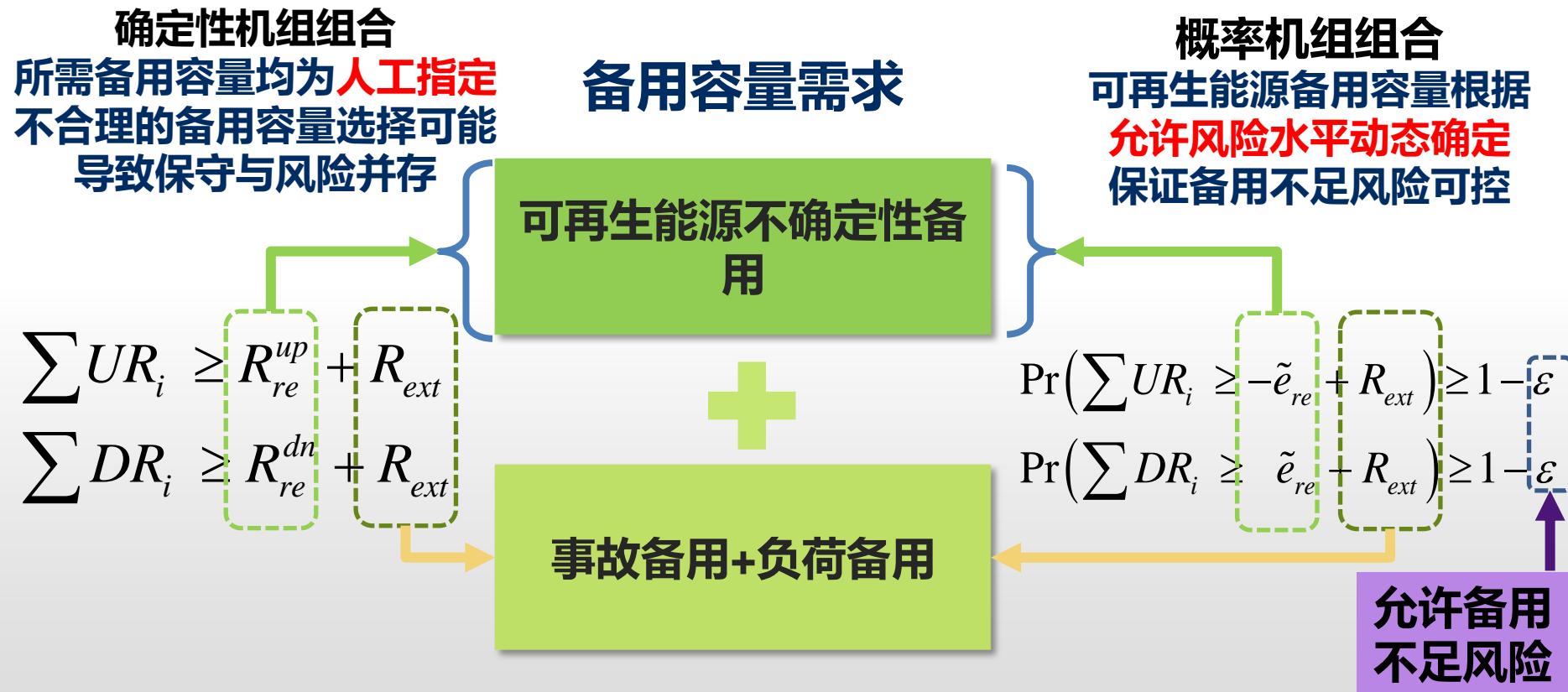
$$\begin{aligned} C_{adj} &= E[\tilde{W}_t - W_t | \underline{W}_t \leq \tilde{W}_t \leq \bar{W}_t] \\ &\quad + E[W_t - \tilde{W}_t | \underline{W}_t \leq \tilde{W}_t \leq \bar{W}_t] \\ &\approx C_{DN} \cdot \sum_{t=1}^T E_{ep}^* W_t | \bar{W}_t + C_{UP} \cdot \sum_{t=1}^T E_{ep}^* W_t | \underline{W}_t \\ E_{ep}^* x | \underline{x} &= \sum_{m=1}^M \omega_m \left[x - \mu_m \Phi_m^* x + \sigma_m^2 \varphi_m x \right] + C \end{aligned}$$

解析近似表达式



◆ 风险量化的安全约束

根据允许风险水平动态计算应对可再生能源波动所需的系统备用容量安全裕度，保证开机计划下备用不足风险可控。





◆ 风险量化的安全约束

根据允许风险水平动态计算应对可再生能源波动所需的传输容量安全裕度，保证开机计划下正向和反向的断面过载风险均可控。

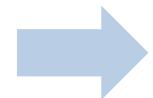
常规机组发电 对断面功率影响	可再生能源波动对 断面功率影响	负荷功率对断 面功率影响	断面传输 容量
$\Pr \left\{ \sum_{i=1}^{N_G} s_{l-GB_i} P_{i,t} + \sum_{j=1}^{N_R} s_{l-RB_j} \tilde{R}_{j,t} - R_{j,t,cur} \right\} \geq 1 - \alpha_l$	$\Pr \left\{ \sum_{i=1}^{N_G} s_{l-GB_i} P_{i,t} + \sum_{j=1}^{N_R} s_{l-RB_j} \tilde{R}_{j,t} - R_{j,t,cur} \right\} \geq 1 - \alpha_l$	$\Pr \left\{ \sum_{k=1}^{N_D} s_{l-DB_k} D_{k,t} - \sum_{k=1}^{N_D} s_{l-DB_k} D_{k,t} \geq -C_{l,max} \right\} \geq 1 - \alpha_l$	$\Pr \left\{ C_{l,max} \geq 1 - \alpha_l \right\} \geq 1 - \alpha_l$

允许断面
过载风险



◆ 基于牛顿法的机会约束解析转化方法

传统机会约束求解需要进行蒙特卡洛采样，求解效率低



提出了机会约束向确定性约束解析转化方法，无需耗时的采样步骤，实现机会约束问题高效求解

机会约束，求解困难

$$\Pr\left(r^T x + \boxed{s^T \xi} + u \leq K\right) \geq 1 - \varepsilon$$

分位数实现解析计算，转化为确定性约束

$$r^T x + \boxed{\text{Quantile}_{s^T \xi}(1 - \varepsilon)} + u \leq K$$

利用牛顿法求解非线性方程获得分位数

非线性函数及其导数可以解析计算

$$F(y) = CDF_{s^T \hat{e}^t}(y) - q = \sum_{i=1}^n \alpha_i \Phi\left(\frac{y - s^T \mu_i}{\sqrt{s^T \Sigma_i s}}\right) - q$$

$$F'(y) = PDF_{s^T \hat{e}^t}(y) = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\sqrt{2\pi} \sqrt{s^T \Sigma_i s}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{y - s^T \mu_i}{\sqrt{s^T \Sigma_i s}}\right)^2\right)$$



牛顿法迭代格式

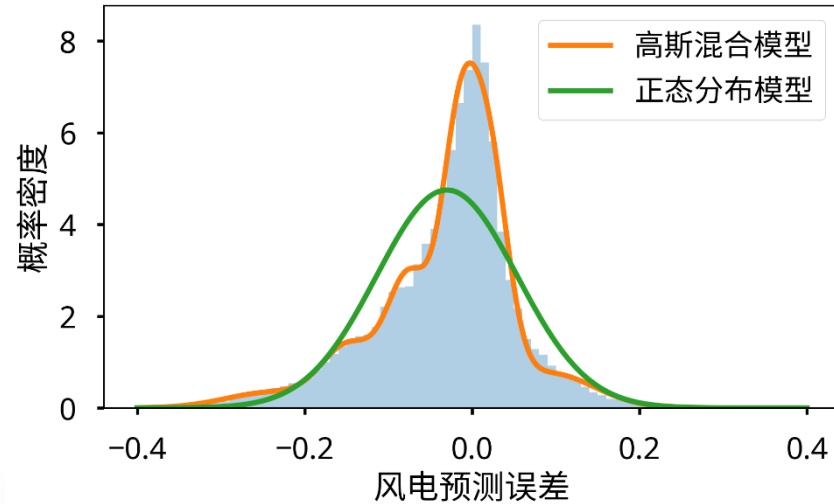
$$y_{k+1} = y_k - \frac{F(y_k)}{F'(y_k)}$$





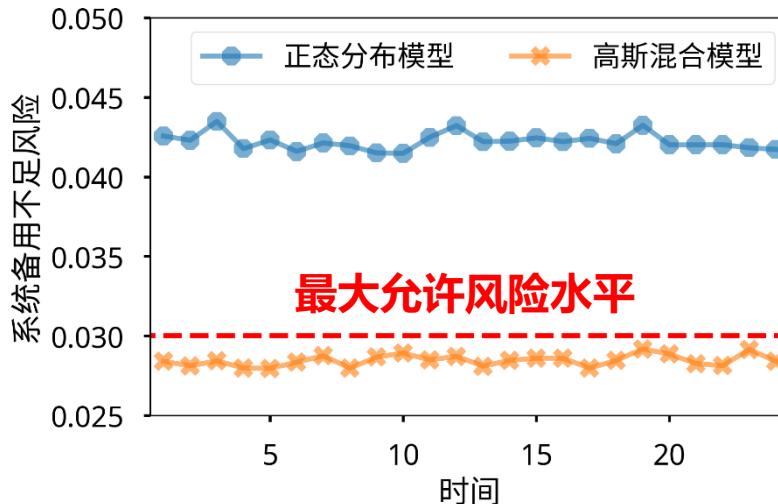
口 算例分析：IEEE标准算例验证

◆ 精确概率建模



◆ 相比传统确定性机组组合，求解时间无明显变化

◆ 系统安全风险精确可控

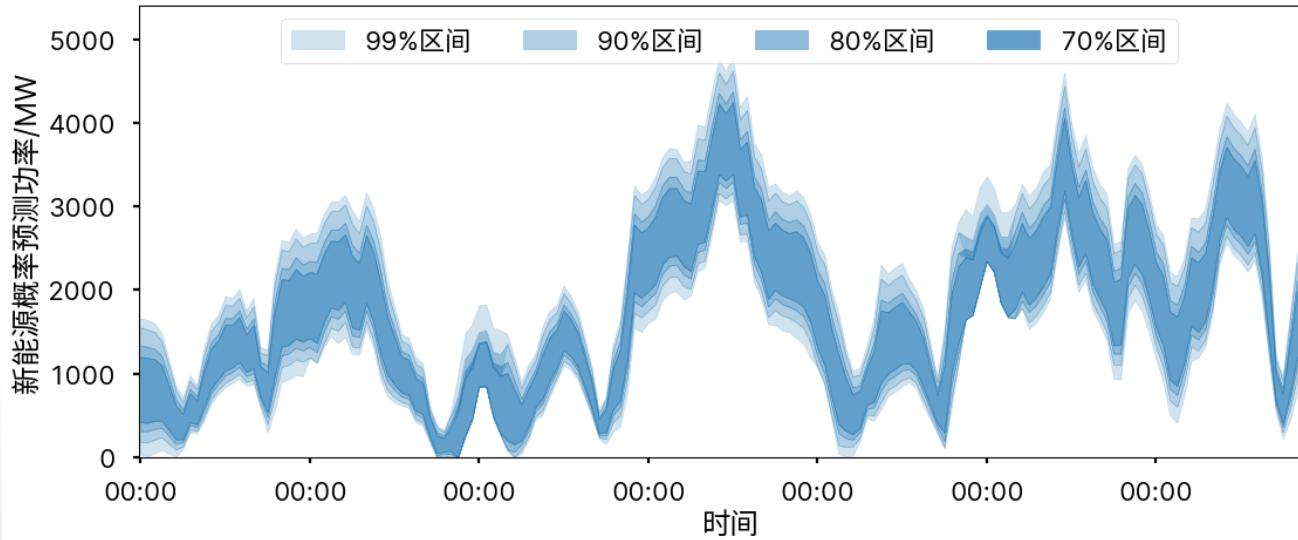


系统规模	传统确定性方法	提出的机会约束方法
IEEE 24节点系统 (24发电机 24时段)	10.63秒	10.82秒
IEEE 118节点系统 (54发电机 24时段)	14.58秒	14.22秒

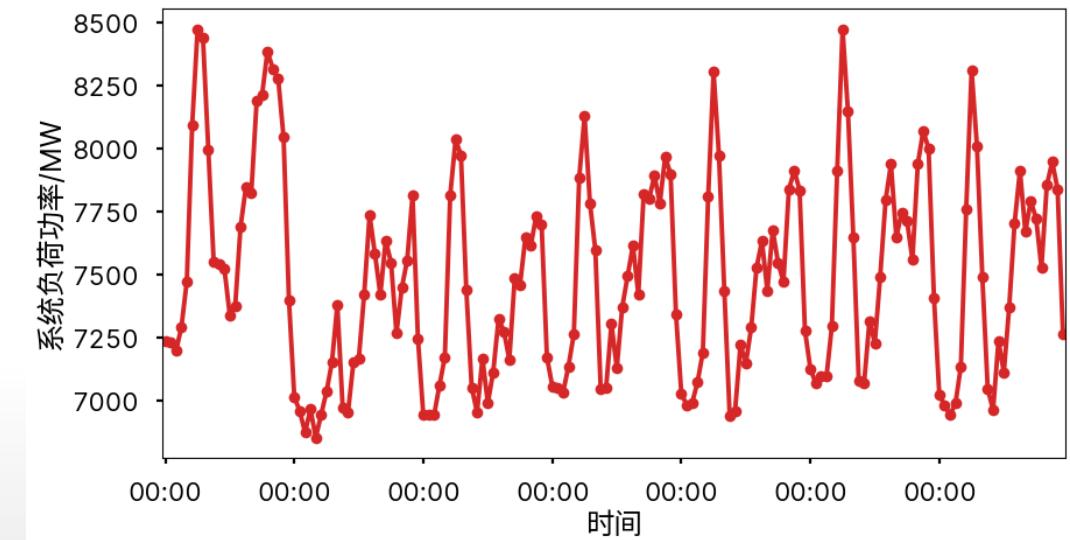


口 算例分析：某实际系统一周开机计划计算

- 常规机组装机容量16693MW
- 一周内可再生能源发电功率最大值超过4000MW，约占总负荷50%



新能源概率预测信息



负荷预测信息

- 分位数区间形式的概率预测包含丰富的概率信息
- 由于光伏发电影响，新能源发电呈现明显的周期性，日内功率峰谷差可达3000MW

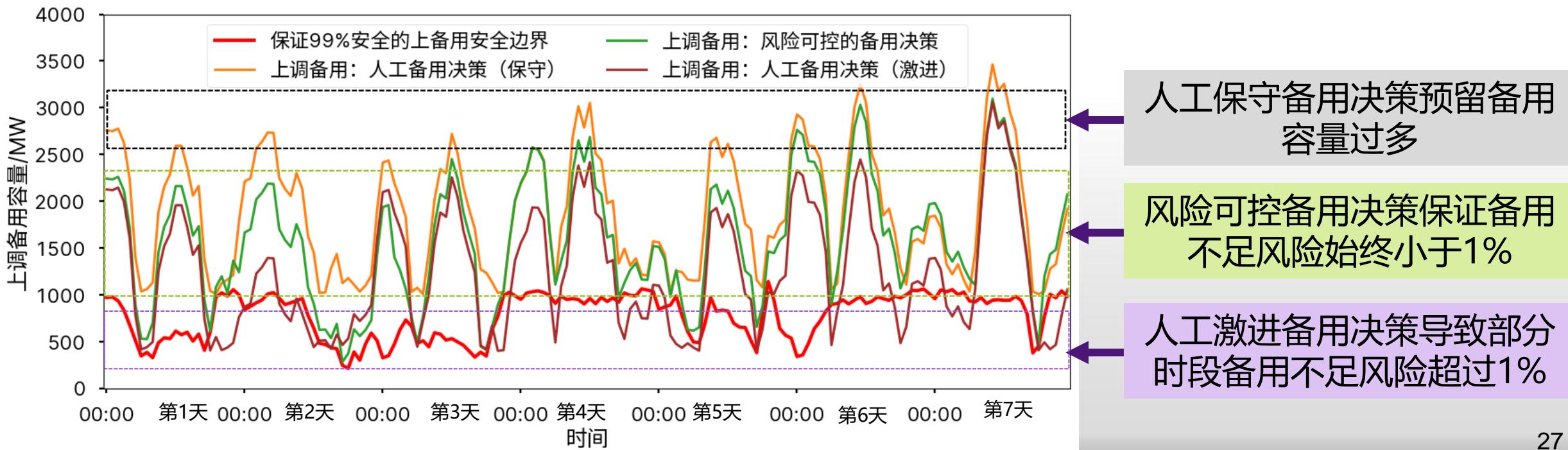
负荷凌晨与中午是低谷，上午与下午是用电高峰，日内功率峰谷差约1000MW。



口 算例分析：某实际系统一周开机计划计算

对比三种备用决策（设定事故备用与负荷备用为200MW，允许备用不足风险水平为1%）

- 人工备用决策（保守）：可再生能源不确定性备用始终设定为1000MW
- 人工备用决策（激进）：可再生能源不确定性备用始终设定为200MW
- 风险可控的备用决策：动态可再生能源不确定性备用，根据概率预测与允许备用不足风险水平(1%)灵活调整

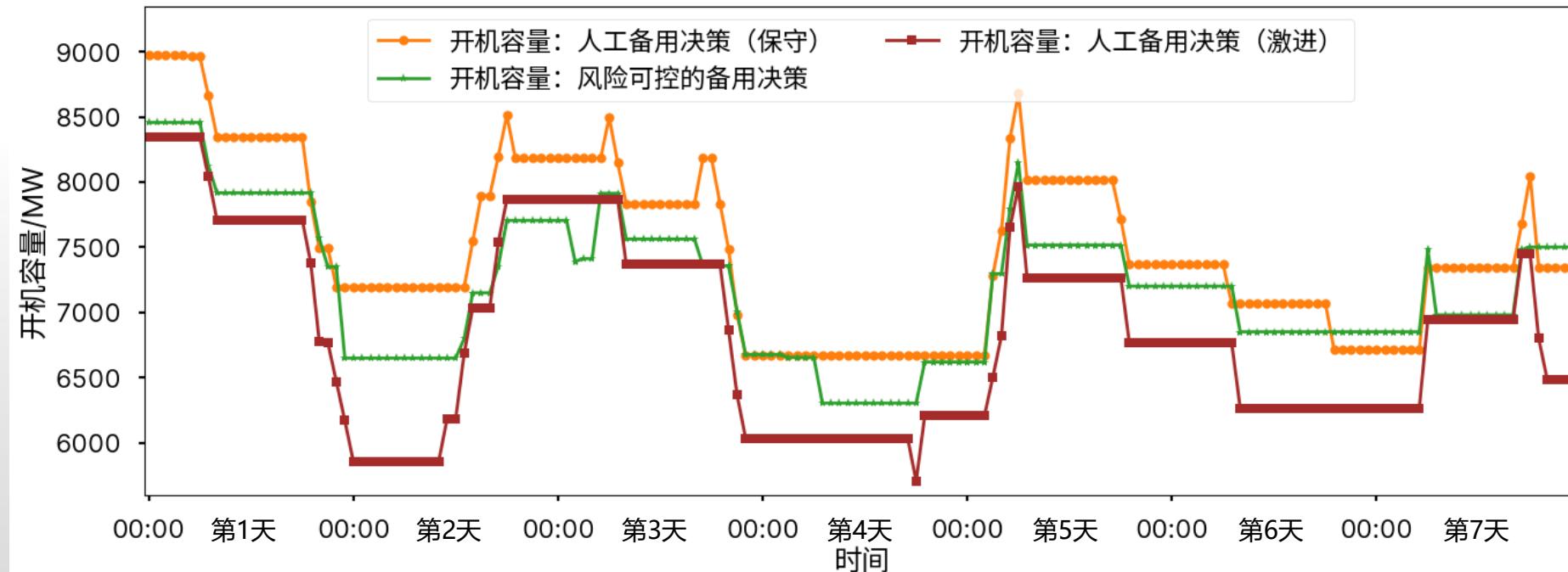




口 算例分析：某实际系统一周开机计划计算

对比三种备用决策的开机方式

- 人工备用决策（保守）：开机容量偏大，导致运行成本偏高
- 人工备用决策（激进）：开机容量偏小，导致部分时段存在备用不足风险
- 风险可控的备用决策：开机容量适中，在保证安全风险可控的前提下减少火电开机，相比保守决策备用决策，一周减少开机容量49774MWh，总运行成本减少4%





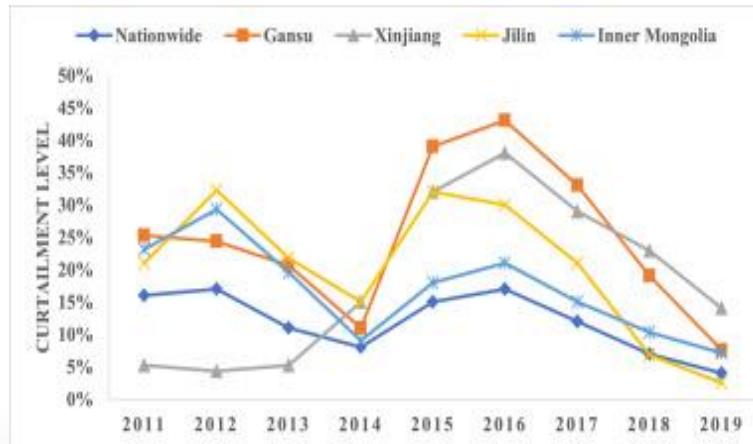
考虑弃电与有序用电的概率日前调度



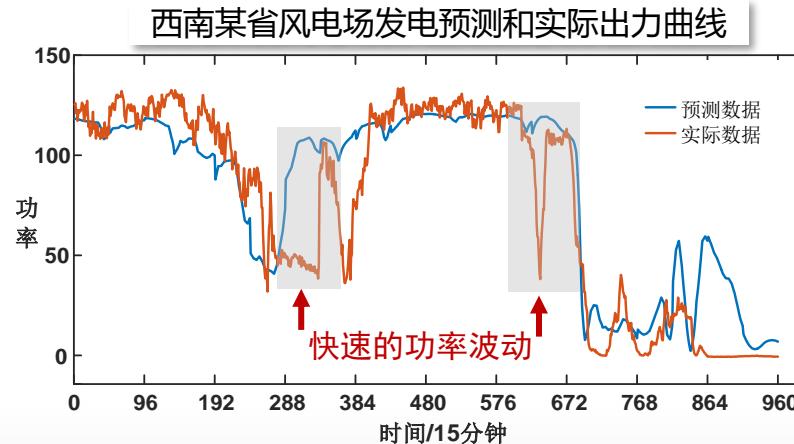
考虑弃电与有序用电的概率日前调度

口 实际问题

- 在发电的高峰时段新能源无法完全消纳，弃电现象难以避免；
- 风电快速向上/下爬坡时，短时间内备用调节能力不足，造成弃风和切负荷。



中国部分省份逐年风电弃电率



可再生能源爬坡事件

- 可再生能源弃电/负荷切电需要事先与用户确认或达成合约；
- 实时生成应急调控策略存在安全风险。

日前/日内调度



常规机组发电计划

可能弃电/切负荷容量

可再生能源发电不确定性实现

实时调控



弃电/切负荷指令

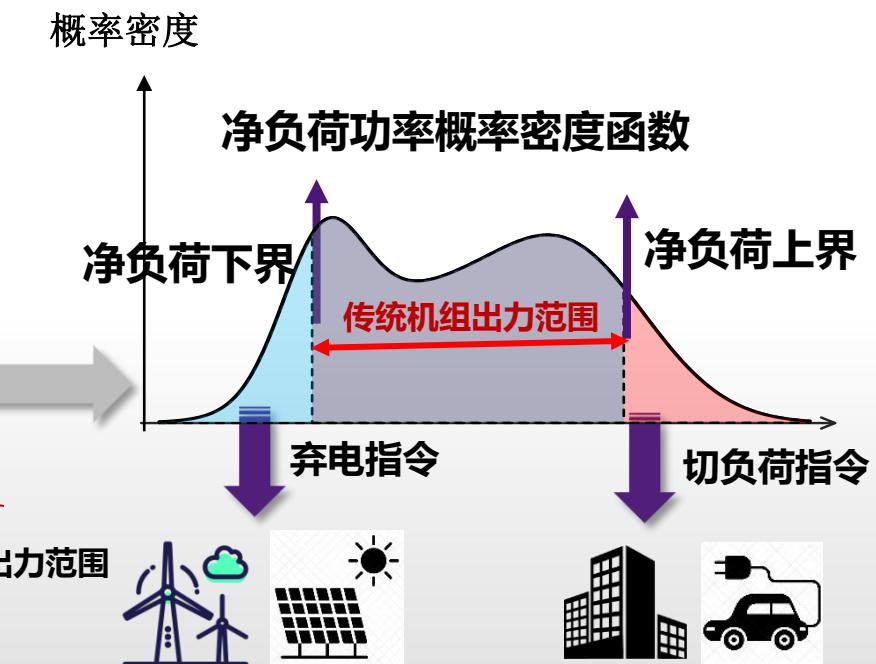
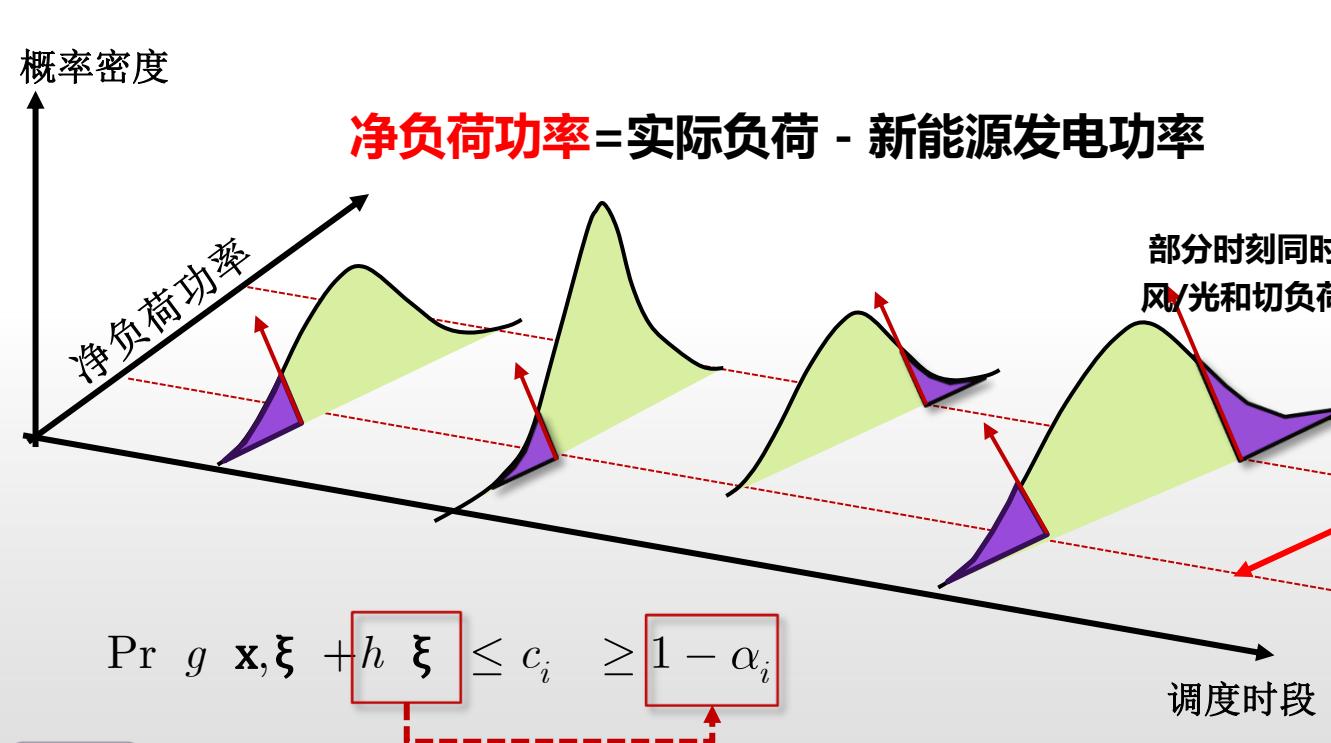


考虑弃电与有序用电的概率日前调度

◆ 概率调度与弃电/有序用电联合优化建模方法



将弃电与有序用电策略纳入概率调度模型，给出实际可执行的弃电与有序用电策略。



概率调度的安全最终通过弃风/有序切负荷保证

净负荷概率分布在上/下边界处因截断而不连续；
调度决策包含随机决策变量



考虑弃电与有序用电的概率日前调度

◆ 概率调度与弃电/有序用电联合优化建模方法

目标函数最小化常规机组发电成本、可再生能源弃电成本与有序用电的切负荷成本，调度结果同时给出**常规机组的发电计划、可再生能源弃电计划和负荷有序用电计划**。

传统概率调度优化模型

$$\begin{aligned} \text{发电成本} \quad & \min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.} \quad & \Pr_{\mathbf{x}, \xi} g_i(\mathbf{x}, \xi) \leq c_i \geq 1 - \alpha_i \quad \text{置信度} \\ & \forall i = 1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

已知的随机变量参数

考虑弃电/有序用电的优化模型

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}, h} & f(\mathbf{x}) + E[s(\xi, h, \xi)] \quad \text{弃电/有序用电成本} \\ \text{s.t.} \quad & \Pr_{\mathbf{x}, h, \xi} g_i(\mathbf{x}, h, \xi) \leq c_i \geq 1 - \alpha_i \\ & \forall i = 1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

弃电/有序用电带来随机决策变量

	传统模型	提出模型
控制对象	常规机组	常规机组+ 可再生能源+可调控负荷
决策变量	发电计划	发电计划+ 可再生能源弃电/切负荷下界
目标函数	常规机组发电成本	常规机组发电成本+ 弃电/切负荷期望成本

传统模型可视为该模型的一种退化形式



考慮弃电与有序用电的概率日前调度



◆ 概率调度与弃电/有序用电联合优化求解方法

提出机会约束的确定性转化方法和基于双层迭代的解析求解算法，高效求解可再生能源弃电/负荷有序用电计划和传统机组发电计划

$$\min F = \sum_{t \in T, i \in I} \boxed{CG_{i,t} \ p_{i,t}} + \sum_{t \in T, i \in I} \boxed{E[CR_{i,t} \ r_{i,t}^{up}, r_{i,t}^{dn}]} + \boxed{C_{cur} \cdot \sum_{t \in T, j \in J} E[\Delta \tilde{w}_{j,t}]} + \boxed{C_{lds} \cdot \sum_{t \in T, k \in K} E[\Delta \tilde{d}_{k,t}]} \\ \text{发电成本} \qquad \qquad \qquad \text{备用调节成本} \qquad \qquad \qquad \text{弃风成本} \qquad \qquad \qquad \text{切负荷成本}$$

s.t.

功率平衡等确定性约束

$$U^T \left[p_{i,t}, r_{i,t}^{up}, r_{i,t}^{dn}, w_{j,t} \right] \leq V$$

备用容量/联络线传输能力机会约束

$$\Pr \quad g_{m,t}^T \tilde{\mathbf{w}}_t + r_{m,t}^T \Delta \tilde{\mathbf{w}}_t + s_{m,t}^T \Delta \tilde{\mathbf{d}}_t \leq c_{m,t}^T \mathbf{X} + h_{m,t} \geq 1 - \alpha$$

风/光预测 弃风/光 切负荷 火电/备用计划

叠加后为随机决策变量

基于CVaR及其
扩展方法

基于CVaR及其 对偶表达式转化

$$E[\Delta \tilde{w}_{j,t}] = \sum_{n \in N_s} \frac{1}{N_s} \Delta \hat{w}_{j,t,n}$$

$$E\left[\Delta \tilde{d}_{k,t}\right] = \sum_{n \in N_s} \frac{1}{N_s} \Delta \hat{d}_{k,t,n}$$

$$c_{m,t}^T \mathbf{X} + h_{m,t} \geq Q, Q \geq z - \underline{\alpha}$$

随机决策变量的分位点

$$z + \frac{1}{N_s \frac{1-\rho}{1-\rho}} \sum_{n=1}^{N_s} \theta_n \leq \underline{\alpha} \sum_{n=1}^{N_s} u_n + \sum_{n=1}^{N_s} \xi_n u_n \quad \boxed{\text{CVaR与分位点}}$$

$$\theta_n > \xi_n - z + \alpha, \theta_n > 0, n = 1, 2, \dots, N, \quad \text{关系约束}$$

$$\sum_{n=1}^{N_s} u_n \leq 1, 0 \leq u_n \leq \frac{1}{N_s(1-\rho)}, n = 1, 2, \dots, N_s \quad \text{CVaR对偶约束}$$

$\xi_n = g_{m,t}^T \tilde{\mathbf{w}}_{n,t} + r_{m,t}^T \Delta \tilde{\mathbf{w}}_{n,t} + s_{m,t}^T \Delta \tilde{\mathbf{d}}_{n,t}$ 随机决策变量的样本点





考虑弃电与有序用电的概率日前调度

◆ 概率调度与弃电/有序用电联合优化求解方法



提出机会约束的确定性转化方法和基于双层迭代的解析求解算法，高效求解可再生能源弃电/负荷有序用电计划和传统机组发电计划

原问题被**解析化**表达

$$\min A^T \mathbf{X} A + B^T \mathbf{X} + C$$

$$s.t. \quad U^T \mathbf{X} \leq V$$

$$c_t^T \mathbf{X} + h_t \geq Q \quad \text{随机决策变量的分位点}$$

$$A^T \cdot [w_{t,n}, \Delta w_{t,n}, \Delta d_{t,n}, Q] \leq c^T \alpha + [\Delta w_{t,n}, \Delta d_{t,n}] u_{t,n}$$

$$\sum_{n=1}^{N_s} u_n \leq 1, 0 \leq u_n \leq \frac{1}{N_s 1 - \rho}, n = 1, 2, \dots, N_s$$

主问题

子问题

基于**本德斯分解**的高效的双层迭代求解方法

求解机会约束调度问题

弃电量/切电量

不可行割集

问题不可行割集

时刻1机会约束

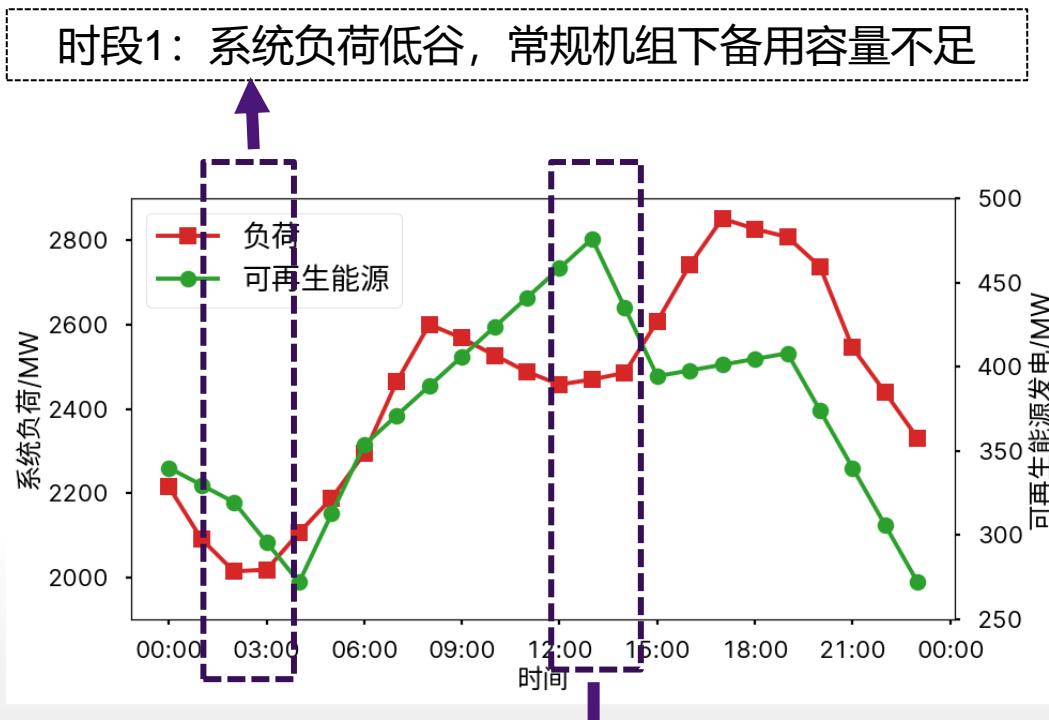
...

时刻T机会约束



考虑弃电与有序用电的概率日前调度

口 算例分析：IEEE标准算例系统

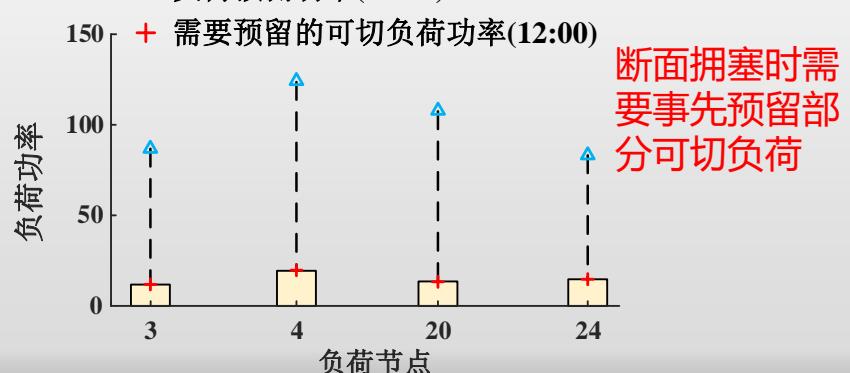
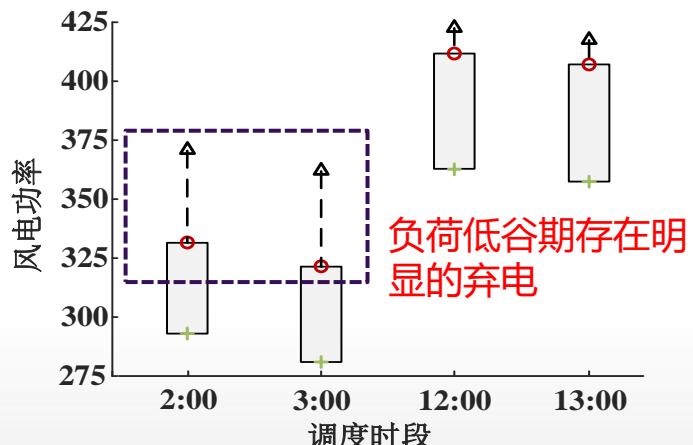


时段2：可再生能源发电高峰，局部断面拥塞



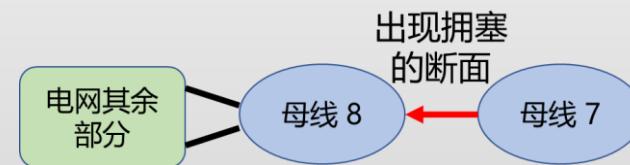
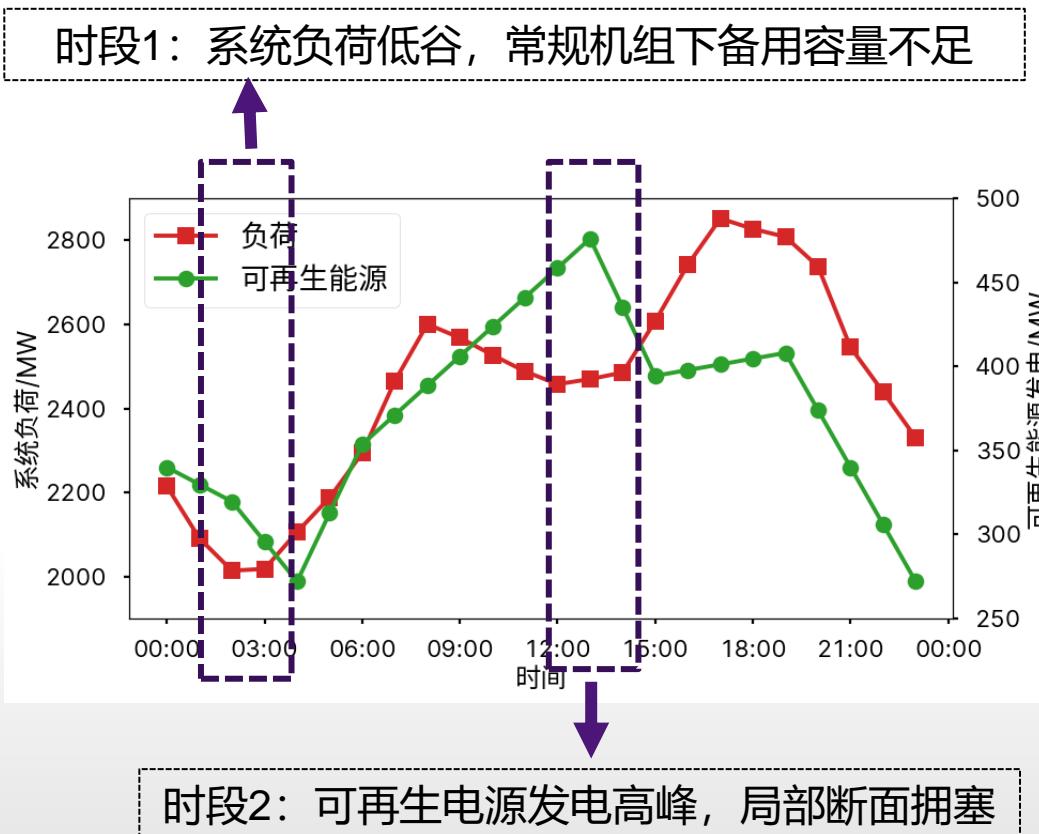
提出的方法可以在调度阶段给出可执行的弃电/切电策略

△ 预测上界(99.9%分位点) ○ 允许发电上界
+ 预测下界(0.1%分位点) □ 允许发电范围

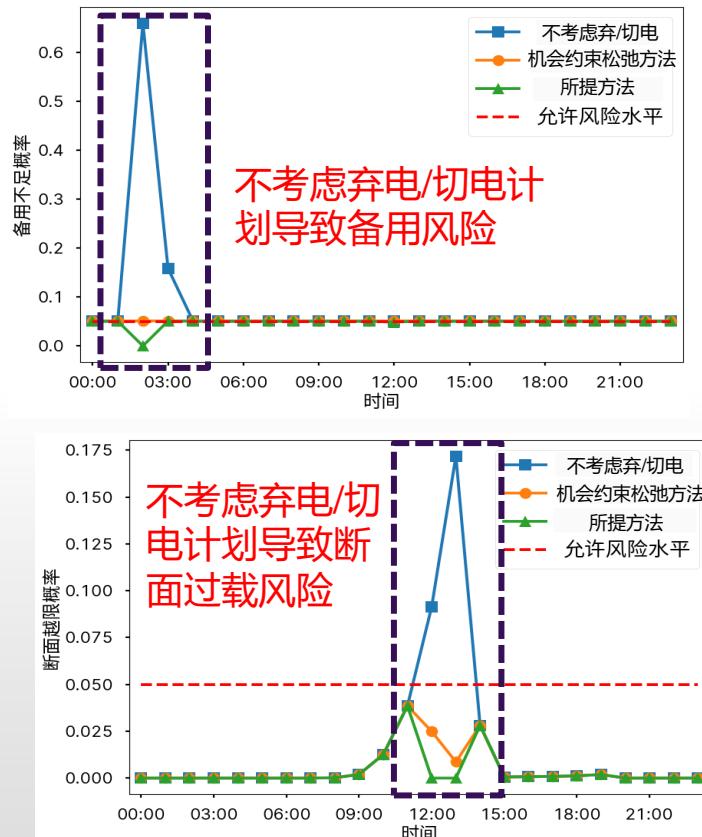


考虑弃电与有序用电的概率日前调度

口 算例分析：标准算例系统



提出方法严格保证弃电/切电计划和发电计划执行后系统安全风险可控



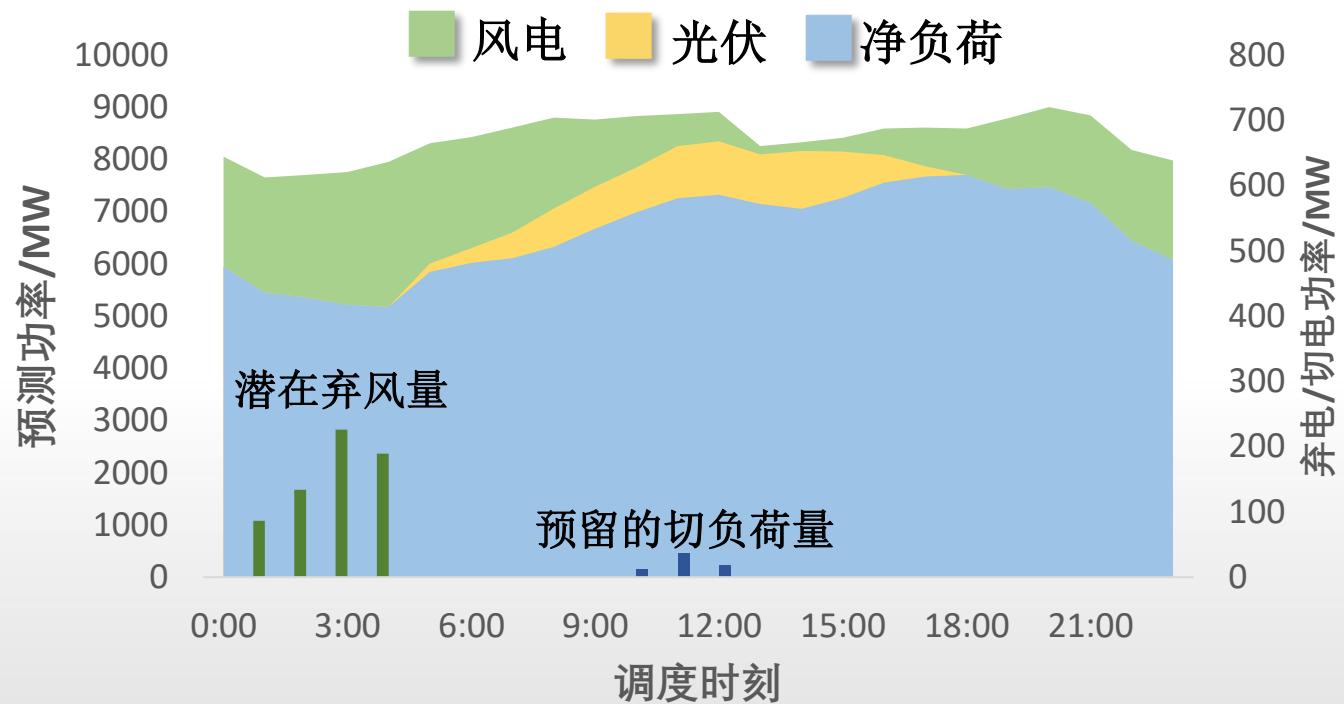
考虑弃电与有序用电的概率日前调度

口 算例分析：某实际系统

采用考虑弃电/有序用电的概率调度，可计算出由于**备用不足或输电断面阻塞**问题引发的**潜在弃风量**和**预留的切负荷量**。



常规机组：46 台
最大发电能力：10231.0MW
最小发电能力：4966.0MW



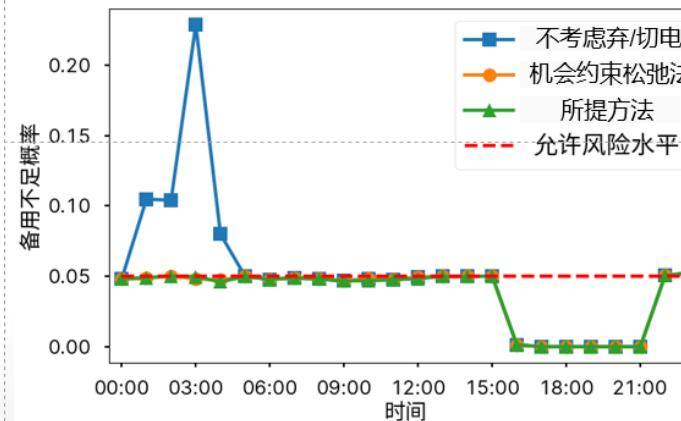
- 1:00-4:00风电大发，系统**负备用不足**，存在潜在弃风；
- 10:00-12:00光伏增长，传统机组减小出力，同时需预留正备用应对光伏快速波动，该调整造成**断面短时过载**，造成潜在切负荷

考虑弃电与有序用电的概率日前调度

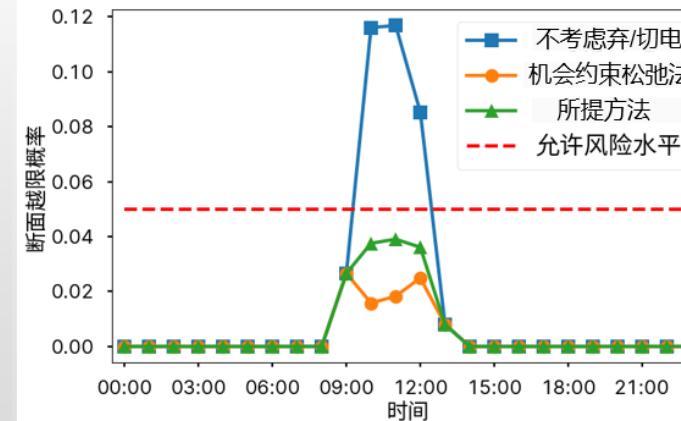
口 算例分析：某实际系统

- 1、不考虑弃电/切电计划会造成实时调度中**频繁启动弃电/切电控制**，从而**增大弃电/切电的成本**。
- 2、通过预先制定弃电/切电计划可保证**备用不足和断面过载的风险严格小于允许的风险水平**。

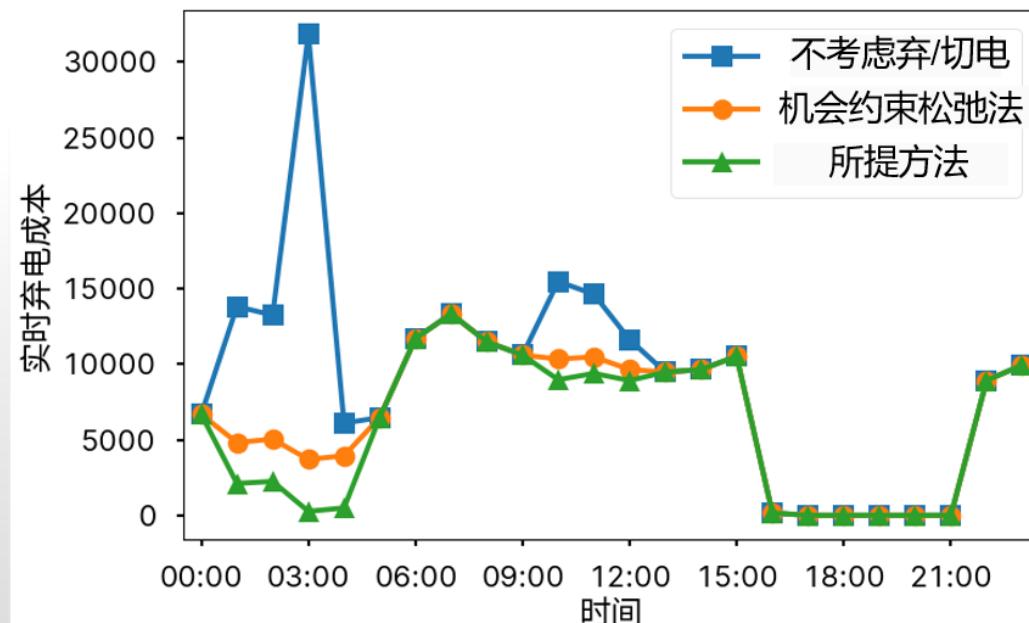
**备用不足
风险**



**断面过载
风险**



实时控制弃电/切电成本



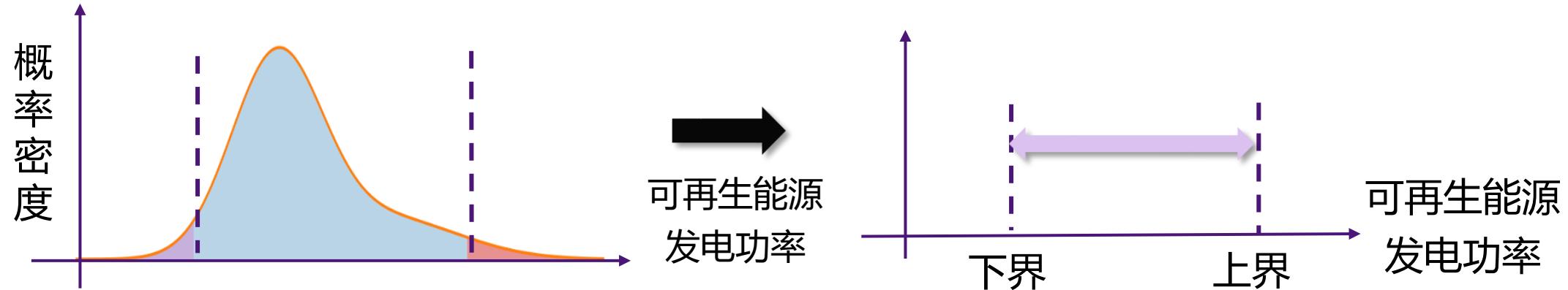


概率鲁棒实时调度

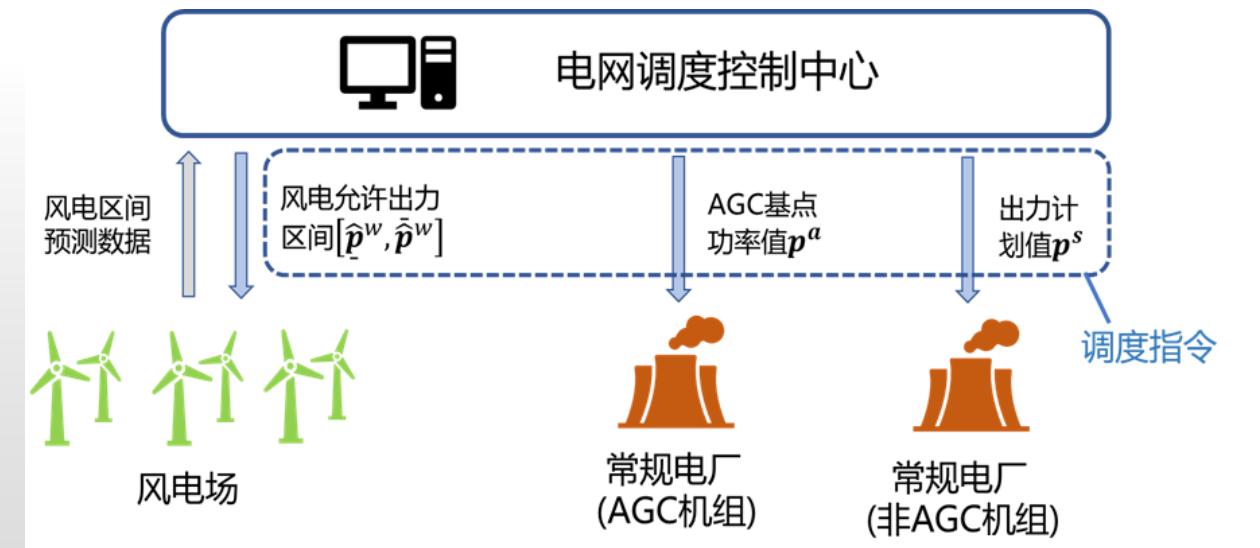




口 概率鲁棒实时调度



- 对可再生能源的不确定性使用区间方式建模，给出允许发电区间
- 严格保证可再生能源区间内波动的系统运行安全





口 概率鲁棒实时调度



采用概率鲁棒经济调度方法，同时利用概率分布与波动区间建模可再生能源不确定性，兼顾经济性与安全性

$$\begin{aligned}
 & \min_{x, \underline{\hat{p}}^w, \bar{\hat{p}}^w, y(\cdot)} \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i \in \mathcal{G}^s} CF_{i,t}(p_{i,t}^s) + \sum_{j \in \mathcal{G}^a} CF_{j,t}(p_{j,t}^a) + \right. \\
 & \quad \left. \sum_{k \in \mathcal{W}} E[CL_{k,t}(\tilde{w}_t)] + \sum_{j \in \mathcal{G}^a} E[CR_{j,t}^+(\tilde{w}_t)] + \sum_{j \in \mathcal{G}^a} E[CR_{j,t}^-(\tilde{w}_t)] \right\} \\
 & \quad \text{“随机”} \\
 & \left\{ \begin{array}{l} -RD_{j,t}^a \cdot \Delta T \leq \tilde{p}_{j,t}^a - \tilde{p}_{j,t-1}^a \leq RU_{j,t}^a \cdot \Delta T \\ r_{j,t}^{a+} \leq \bar{P}_{j,t}^a - \tilde{p}_{j,t}^a, \sum_{j \in \mathcal{G}^a} r_{j,t}^{a+} \geq R_t^+ \\ r_{j,t}^{a-} \leq \tilde{p}_{j,t}^a - \underline{P}_{j,t}^a, \sum_{j \in \mathcal{G}^a} r_{j,t}^{a-} \geq R_t^- \\ L_{l,t} \leq \sum_{i \in \mathcal{G}^s} G_{l,i} p_{i,t}^s + \sum_{j \in \mathcal{G}^a} G_{l,j} \tilde{p}_{j,t}^a, \forall \tilde{p}^w \in [\underline{\hat{p}}^w, \bar{\hat{p}}^w] \\ \quad + \sum_{k \in \mathcal{W}} G_{l,k} \tilde{p}_{k,t}^w \leq \bar{L}_{l,t} \\ \tilde{p}_{j,t}^a = p_{j,t}^a - \alpha_j \cdot (\tilde{w}_t - w_t) \\ 0 \leq \underline{\hat{p}}^w \leq \underline{P}^w, \bar{\hat{p}}^w \leq \bar{P}^w \end{array} \right. \\
 & \quad \text{“鲁棒”}
 \end{aligned}$$

优化目标 $E(f(\cdot))$

最小化运行总成本的期望值

决策变量

新能源允许出力区间

火电机组出力计划

约束条件(新能源波动时保证满足)

功率平衡约束
旋转备用约束
断面安全约束

常规机组爬坡速率约束
新能源允许出力区间约束





□ 概率鲁棒实时调度



目标函数考虑新能源等随机性的概率分布，使用数学期望描述随机性带来的实时调节和弃电成本，最小化运行成本数学期望

发电成本

$$\min \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i \in \mathcal{G}^s} CF_{i,t}(p_{i,t}^s) + \sum_{j \in \mathcal{G}^a} CF_{j,t}(p_{j,t}^a) + \right. \\ \left. \sum_{k \in \mathcal{W}} E[CL_{k,t}(\tilde{w}_t)] + \sum_{j \in \mathcal{G}^a} E[CR_{j,t}^+(\tilde{w}_t)] + \sum_{j \in \mathcal{G}^a} E[CR_{j,t}^-(\tilde{w}_t)] \right\}$$

弃风弃光成本期望

$$E[CL_t(\tilde{w}_t)] = \gamma_t^w \int_{\hat{w}_t}^{\bar{w}_t} (\tilde{\theta}_t - \bar{w}_t) \varphi_t(\tilde{\theta}_t) d\tilde{\theta}_t$$

实时调节成本期望

$$\begin{cases} E[CR_{j,t}^+(\tilde{w}_t)] = \gamma_{j,t}^+ \alpha_j \int_{\hat{w}_t}^{w_t} (w_t - \tilde{\theta}_t) \varphi_t(\tilde{\theta}_t) d\tilde{\theta}_t \\ E[CR_{j,t}^-(\tilde{w}_t)] = \gamma_{j,t}^- \alpha_j \int_{w_t}^{\bar{w}_t} (\tilde{\theta}_t - w_t) \varphi_t(\tilde{\theta}_t) d\tilde{\theta}_t + \gamma_{j,t}^- \alpha_j (\bar{w}_t - w_t) \cdot [\Phi_t(\bar{W}_t) - \Phi_t(\hat{w}_t)] \end{cases}$$

利用概率密度函数计算数学期望





口概率鲁棒实时调度



鲁棒形式约束条件保证源荷在区间波动下，实时控制有能力满足安全约束，保证了系统运行的安全性

爬坡约束 $-RD_{j,t}^a \cdot \Delta T \leq \tilde{p}_{j,t}^a - \tilde{p}_{j,t-1}^a \leq RU_{j,t}^a \cdot \Delta T$

最小备用约束 $\begin{cases} r_{j,t}^{a+} \leq \bar{P}_{j,t}^a - \tilde{p}_{j,t}^a, \sum_{j \in \mathcal{G}^a} r_{j,t}^{a+} \geq R_t^+ \\ r_{j,t}^{a-} \leq \tilde{p}_{j,t}^a - \underline{P}_{j,t}^a, \sum_{j \in \mathcal{G}^a} r_{j,t}^{a-} \geq R_t^- \end{cases}$

调节系数

考虑实时调节，代入 $\tilde{p}_{j,t}^a = p_{j,t}^a + \alpha_j \cdot (\tilde{w}_t - w_t)$
取风电上限或者下限

断面约束 $L_{l,t} \leq \sum_{i \in \mathcal{G}^s} G_{l,i} p_{i,t}^s + \sum_{j \in \mathcal{G}^a} G_{l,j} \tilde{p}_{j,t}^a + \sum_{k \in \mathcal{W}} G_{l,k} \tilde{p}_{k,t}^w \leq \bar{L}_{l,t}$

根据灵敏度的正负取变量的上、下边界

鲁棒约束的处理方法：

$$E\mathbf{u} + F\tilde{\mathbf{p}}^w \leq \mathbf{D}, \forall \tilde{\mathbf{p}}^w \in [\hat{\mathbf{p}}^w, \bar{\mathbf{p}}^w]$$

决策变量 不确定性变量

根据不确定变量系数考虑极端场景，转化为确定性约束：

$$E_i \mathbf{u} + \sum_{j, F_{i,j} \geq 0} F_{i,j} \bar{\hat{p}}_j^w + \sum_{j, F_{i,j} < 0} F_{i,j} \hat{\underline{p}}_j^w \leq D_i, \forall i$$

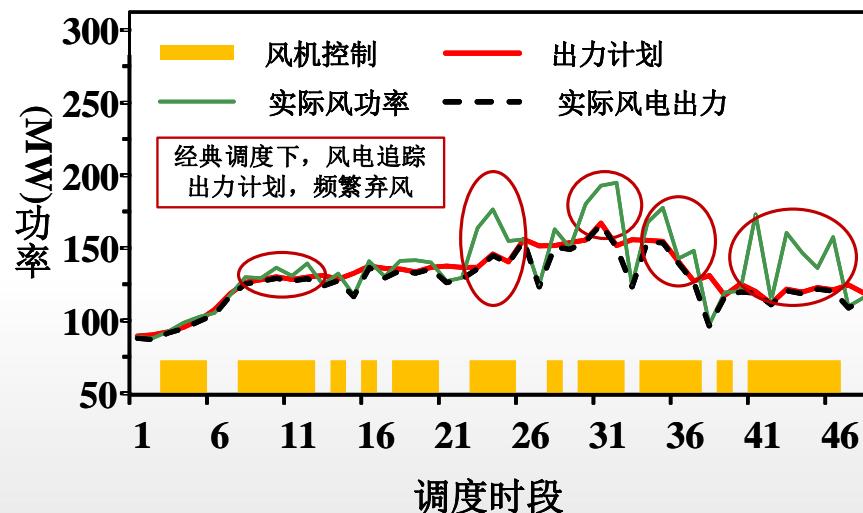




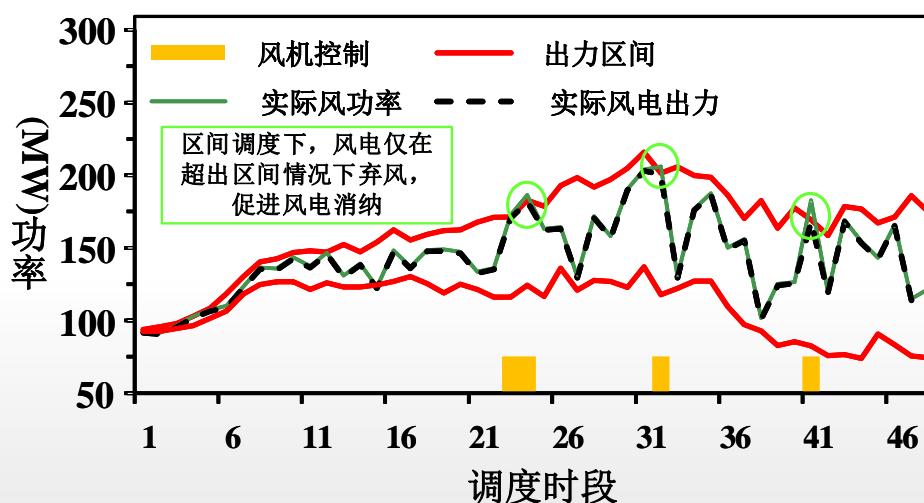
口概率鲁棒实时调度：某电网效果验证

大幅度降低风电场的跟踪控制频度，减少弃风

经典优化调度



鲁棒区间优化调度



乾安和水字风场1年弃风电量降低968万度（从1358万度减小到390万度）



EMSO Smart Grid



以新能源为主体的新型电力系统：

- ◆ **不确定性决策**：确定性决策发展到不确定性决策是应对新能源不确定性的必然选择。
- ◆ **概率调度**：传统调度本质上是鲁棒调度，过于保守，概率调度可以充分利用大数据的统计信息，实现风险与经济的协调。
- ◆ **风险防控**：调度基本目的是防范以未然，电力系统中新能源消纳能力和供电能力不足问题同时存在，需要预先制定预防策略（弃电计划和有序用电计划）。



1. Shuwei Xu, *Wenchuan Wu. Tractable Reformulation of Two-Side Chance-Constrained Economic Dispatch. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol.37, No.1, pp.796-799, Jan., 2022.
2. Yue Yang, *Wenchuan Wu, Bin Wang, Mingjie Li. Chance-constrained Economic Dispatch Considering Curtailment Strategy of Renewable Energy. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol.36, No.6, pp. 5792-5802, Nov., 2021.
3. Yue Yang, *Wenchuan Wu, Bin Wang, Mingjie Li. Optimal Decomposition of Stochastic Dispatch Schedule for Renewable Energy Cluster. *Journal of Modern Power and Clean Energy*. vol. 9, no. 4, pp. 711-719, July 2021.
4. Shuwei Xu, *Wenchuan Wu, et al.. Stochastic Real-Time Power Dispatch with Large-Scale Wind Power Integration and Its Analytical Solution. *IET Renewable Power Generation*. Vol.15, No.10, pp. 2286-2301, July 2021
5. Yue Yang, *Wenchuan Wu, Bin Wang, Mingjie Li. Analytical Reformulation for Stochastic Unit Commitment Considering Wind Power Uncertainty with Gaussian Mixture Model. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol.35, No.4, pp. 2769-2782, 2020
6. Zhigang Li, *Wenchuan Wu, et al. Decentralized Contingency-Constrained Tie-Line Scheduling for Multi-Area Power Grids. *IEEE Transactions on Power Systems*. vol.32,no.1,pp.354-367,Jan. 2017
7. Zhigang Li, Mohammad Shahidehpour, *Wenchuan Wu, et al.. Decentralized Multi-Area Robust Generation Unit and Tie-Line Scheduling Under Wind Power Uncertainty. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. Vol. 6, No. 4, pp. 1377-1388, October 2015.
8. Zhigang Li, *Wenchuan Wu, et al.. Robust Look-Ahead Power Dispatch with Adjustable Conservativeness Accommodating Significant Wind Power Integration. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. VOL. 6, NO. 3, pp.781-790, JULY 2015
9. Zhigang Li , *Wenchuan Wu, et al.. Adjustable Robust Real-Time Power Dispatch With Large-Scale Wind Power Integration. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. Vol. 6, No. 2, pp.357-368, April, 2015.
10. Wenchuan Wu, Jianhua Chen, et al.. A Robust Wind Power Optimization Method for Look-Ahead Dispatch. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 5, no. 2, pp.507-515, Apr. 2014





Thank you!

