



清华大学

复杂系统与控制学术研讨会
2016.5.7. 天津大学

风电入网调度问题初探

清华大学自动化系
赵千川



- 研究背景和课题综述
- 主要研究内容
 - 问题1：风电的随机特性及平滑效应分析
 - 问题2：含风电场的电力系统经济调度
 - 问题3：含风电的虚拟发电厂市场竞标
- 总结及展望



- 研究背景和课题综述
- 主要研究内容
 - 问题1: 风电的随机特性及平滑效应分析
 - 问题2: 含风电场的电力系统经济调度
 - 问题3: 含风电的虚拟发电厂市场竞标
- 总结及展望



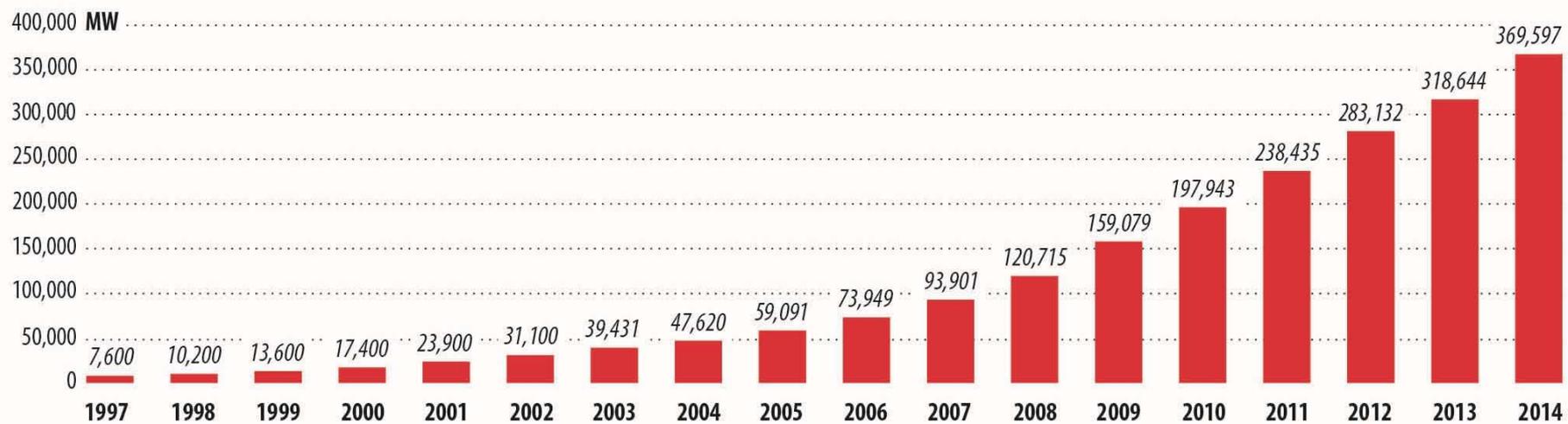
研究背景



研究背景

近10年内全球风机装机容量

GLOBAL CUMULATIVE INSTALLED WIND CAPACITY 1997-2014



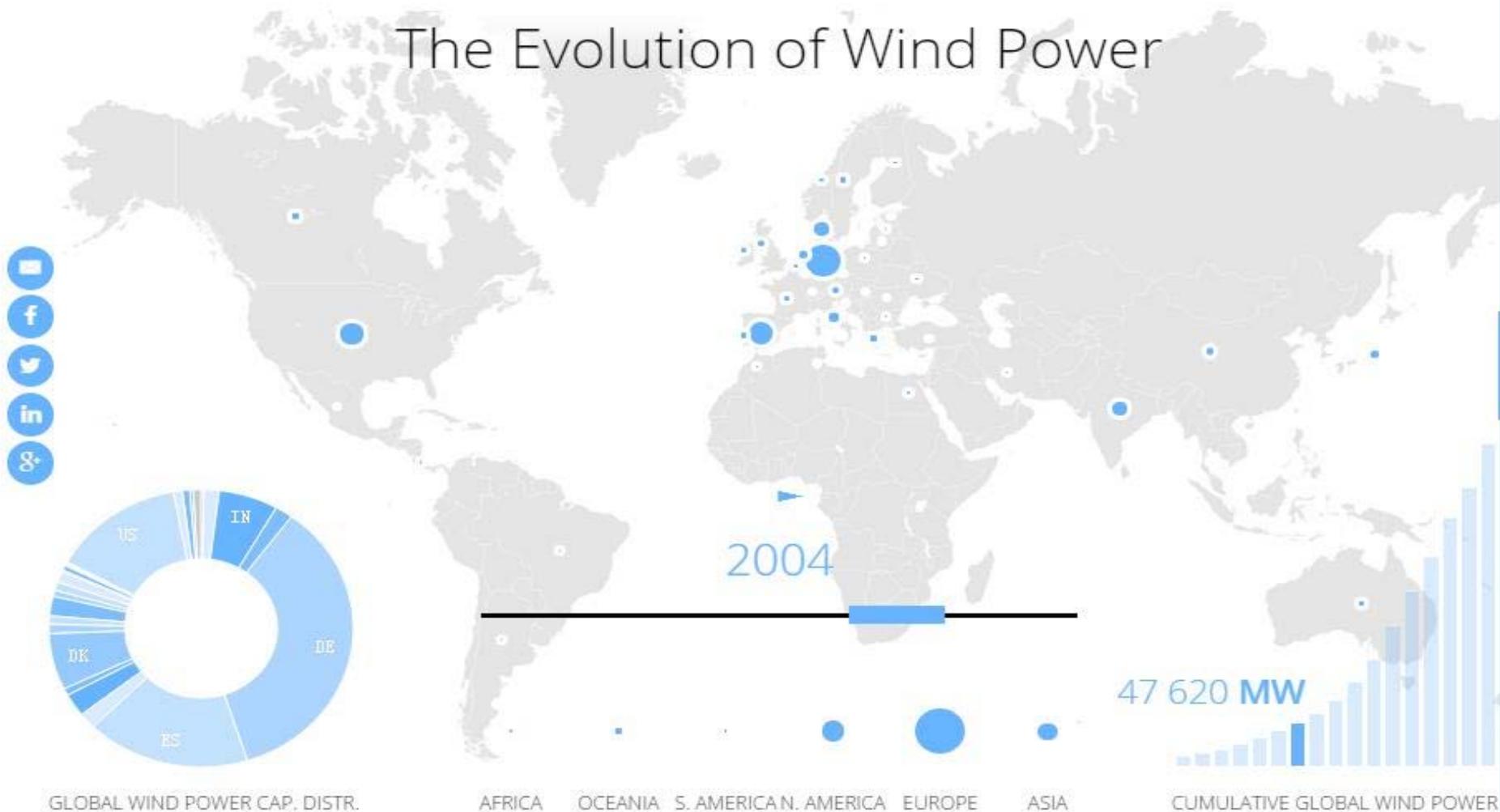
Source: GWEC

图片来源：GWEC (Global Wind Energy Council)



研究背景

The Evolution of Wind Power

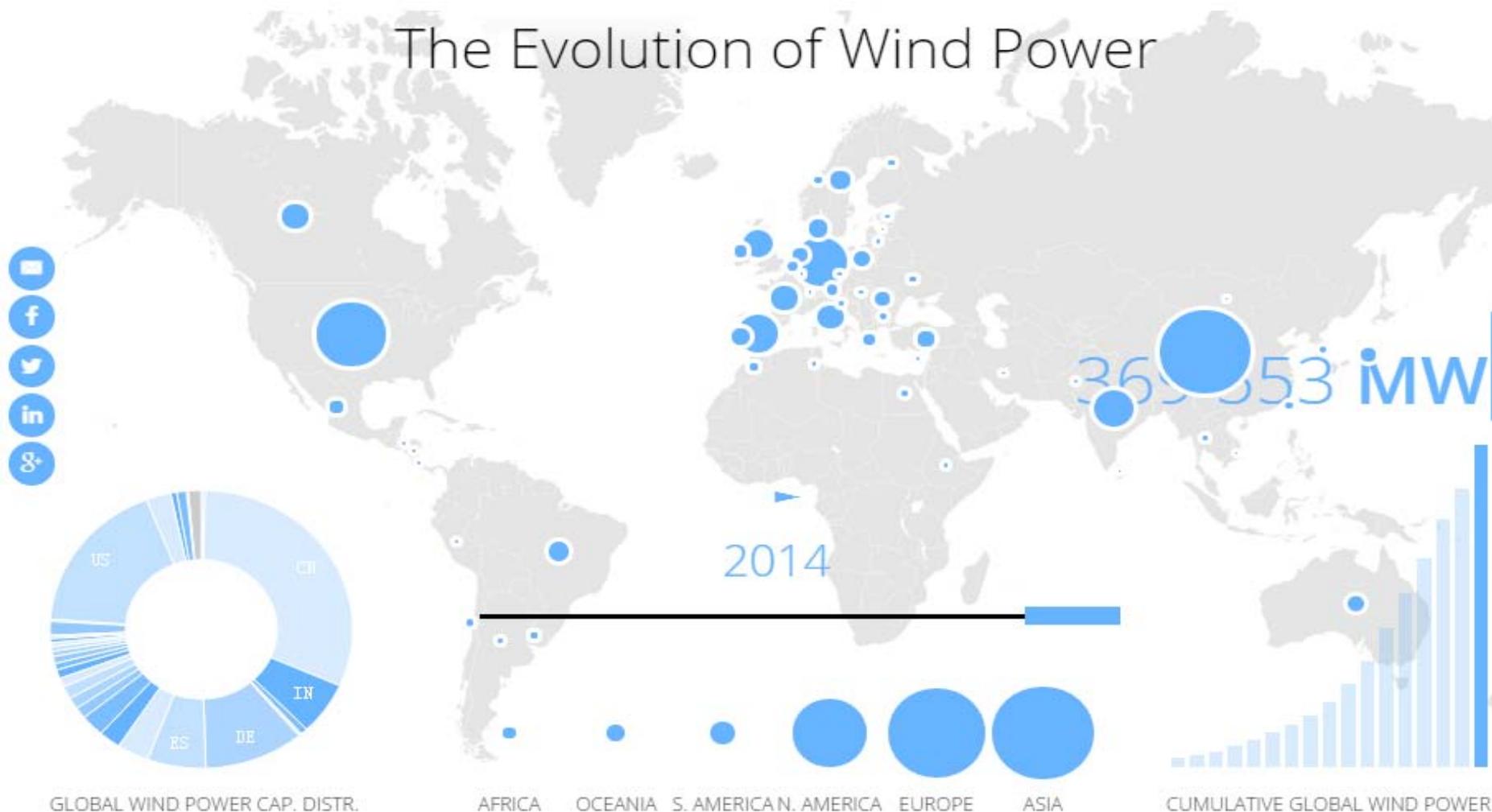


图片来源: GWEC (Global Wind Energy Council)



研究背景

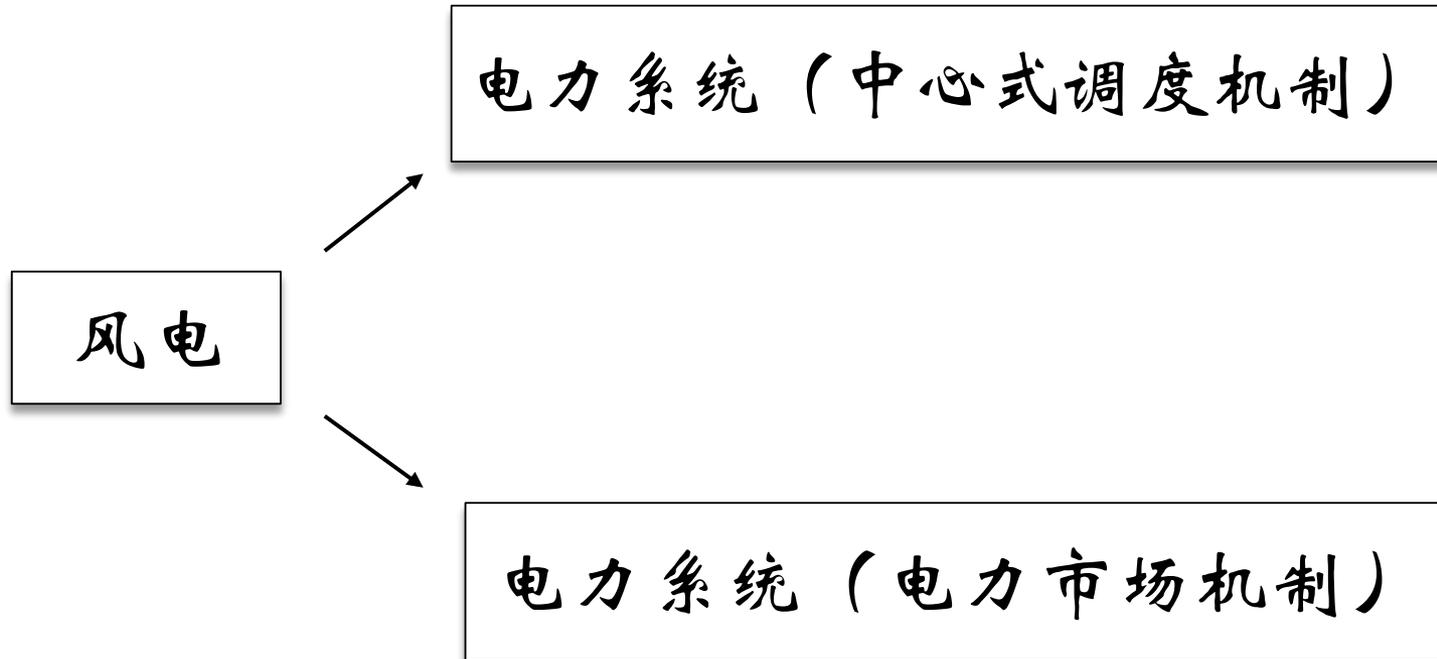
The Evolution of Wind Power



图片来源：GWEC (Global Wind Energy Council)



课题综述



研究问题及挑战

- 风电具有随机性和间歇性

➡ 问题1：如何掌握风电出力的一般规律？

- 风电接入中心式调度的系统

风电引入额外的不确定性，系统的备用需求增多，系统的经济性较差

➡ 问题2：如何进行经济调度？

- 风电进入电力市场

风电的随机性导致其市场参与风险高

➡ 问题3：如何降低风电的市场风险？



课题框架

电力系统（中心式调度机制）



含风电的电力系统经济调度问题
（问题2）

风电



风电出力波动规律
（问题1）

电力系统（电力市场机制）



含风电的虚拟发电厂市场竞标问题
（问题3）



- 研究背景和课题综述
- 主要研究内容
 - 问题1：风电的随机特性及平滑效应分析
 - 问题2：含风电场的电力系统功率分配
 - 问题3：含风电的虚拟发电厂市场竞标
- 总结及展望



问题1: 风电的随机特性及平滑效应分析

平滑效应: 风电出力波动性随风电集结规模的扩大而下降的趋势

风电集结的平滑效应强弱 → 风电场的出力波动性

现有研究的不足

(1) 理论方面

缺少对平滑效应、出力相关性、风机数量三者关系的理论性建模

(2) 数据分析方面

缺少对不同时空尺度、风速下的出力相关性和平滑效应的对比研究



我们的主要工作

1) 基于数理统计的分析方法建立了平滑效应 (s)、出力相关性 ($r_{i,j}$)、风机台数 (N) 三者的数学模型，分析得到平滑效应的理论上下极限。

$$\text{平滑系数} \quad s = \sqrt{N + \sum_{i,j=1(i \neq j)}^N r_{i,j}} / N$$

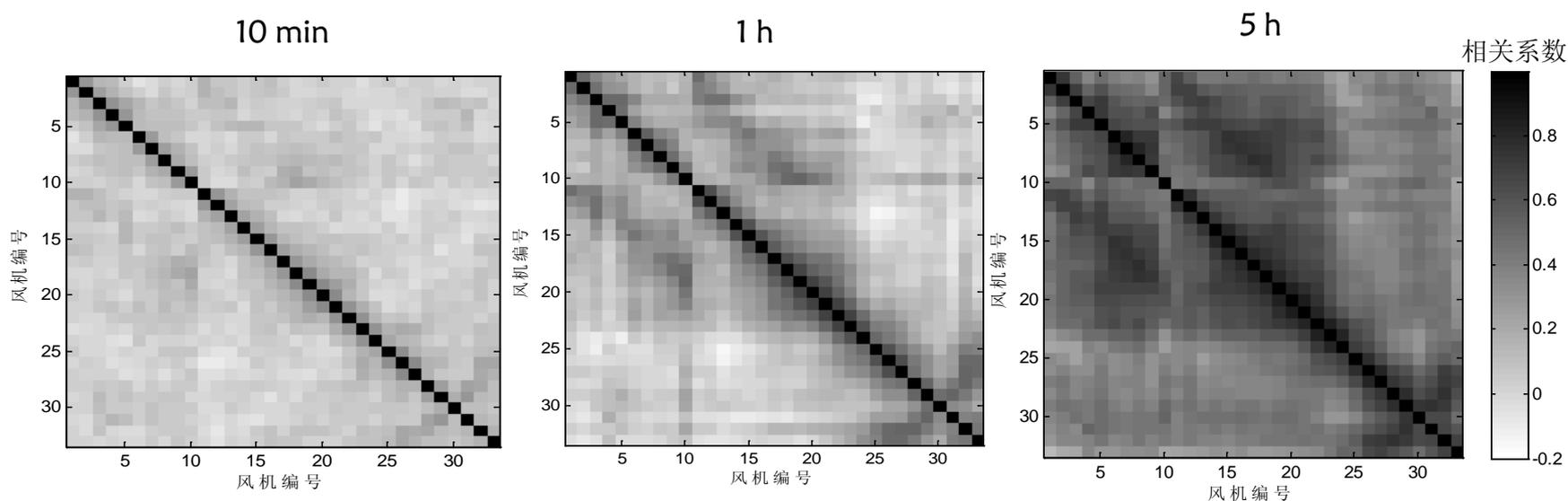
$$0 \leq \sum_{i,j=1(i \neq j)}^N r_{i,j} \leq N(N-1) \quad \rightarrow \quad N^{-1/2} \leq s \leq 1$$

结论：在两两风机出力均不相关或出力相关系数的正负项恰好抵消的情况下，平滑系数达到下极限，平滑效应最强；

在任意两台风机出力均完全正相关的情况下，平滑系数达到上极限，此时不存在平滑效应



2) 不同时间尺度、风机间距的输出相关性



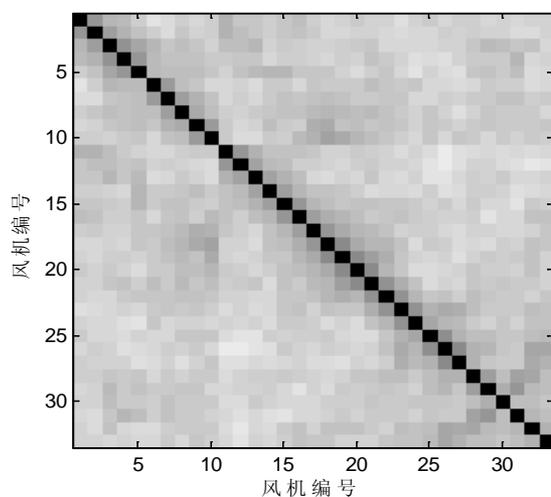
结论：在分钟级时间尺度下，相邻风机之间的出力正相关性较强；
在小时级及以上尺度，风机集群整体上呈现出出力正相关性

数据来源：张北风电场实测风电数据

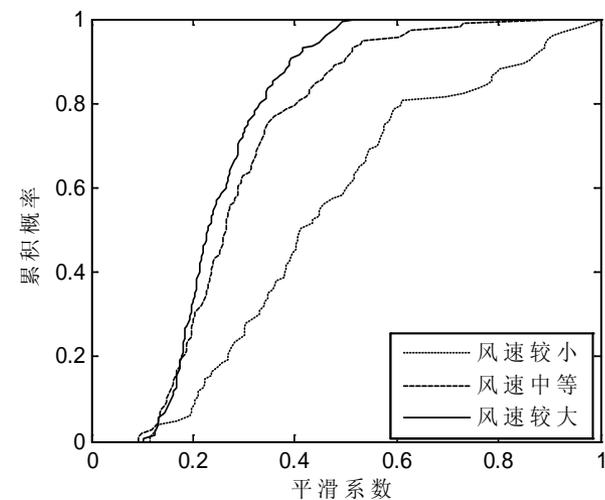
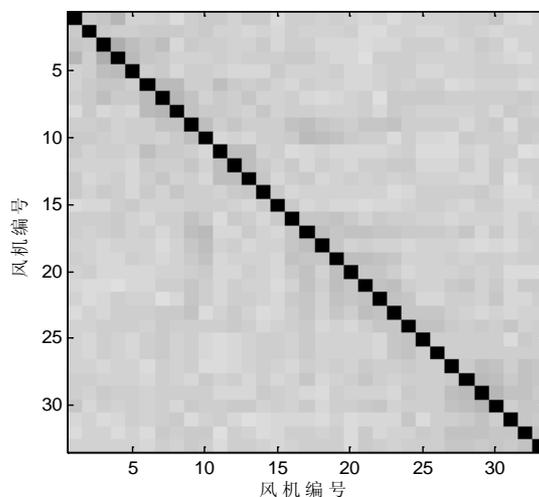


3) 不同风速下的出力相关性

中等风速 (10 min)



较大风速 (10 min)



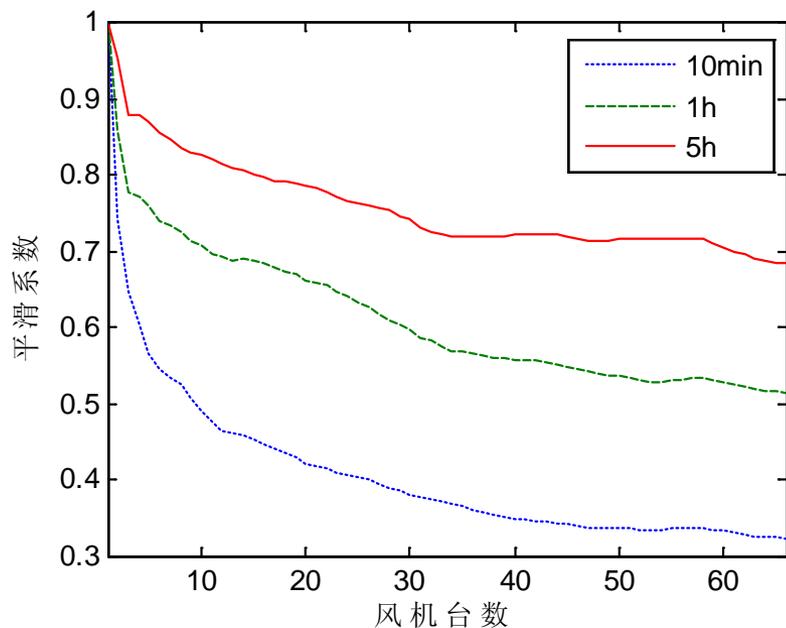
结论：风速大小是影响平滑效应的因素之一。

较强风速下，湍流扰动强，出力相关性较弱，故而平滑效应较强。

数据来源：张北风电场实测风电数据



4) 平滑效应的时空二维变化特性



结论:

- 在分钟级时间尺度下, 平滑效应显著, 平滑系数随风机台数的递增呈现近似 $N^{-1/2}$ 的下降趋势
- 在小时级及以上尺度, 平滑效应不明显
- 风的覆盖面积决定了平滑效应所能达到的极限水平

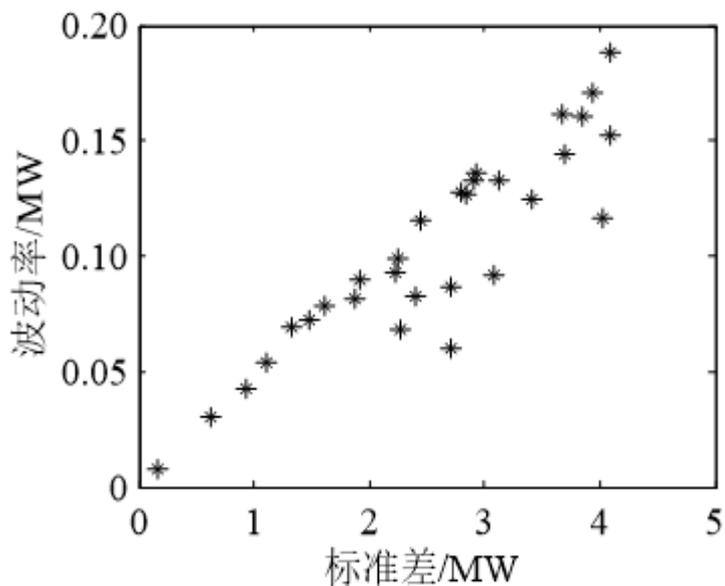
数据来源: 张北风电场实测风电数据



5) 功率序列标准差与功率波动率的关系

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_{\Sigma}(t) - \bar{P}_{\Sigma})^2}$$

$$\delta = \frac{|P_{\Sigma}(t+T) - P_{\Sigma}(t)|}{NP_R} \times 100\%$$



结论：经实测数据分析，验证了两个指标具有线性关系

数据来源：张北风电场实测风电数据



- 研究背景和课题综述
- 主要研究内容
 - 问题1: 风电的随机特性及平滑效应分析
 - 问题2: 含风电场的电力系统经济调度
 - 问题3: 含风电的虚拟发电厂市场竞标
- 总结及展望



问题2: 含风电的电力系统经济调度

研究对象: 含风电场的电力系统

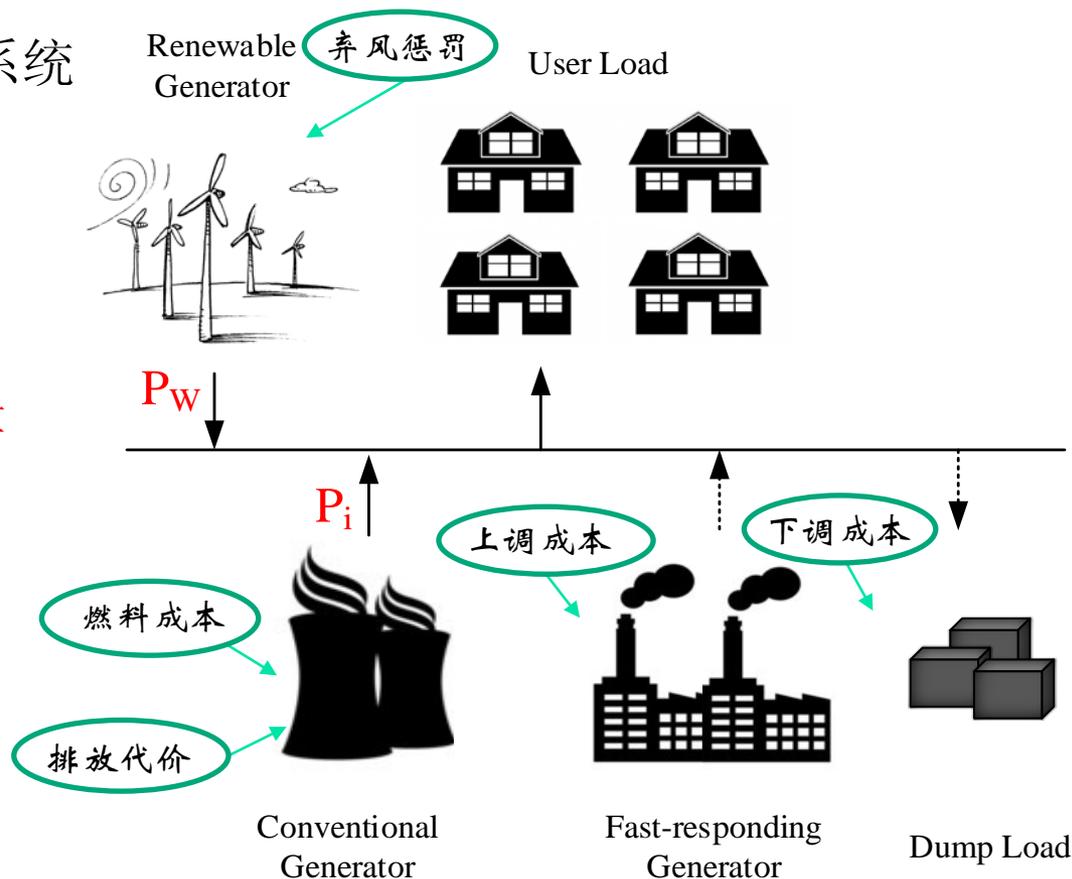
研究问题: 发电的功率分配

(Energy Dispatch Problem)

决策变量: 风电、传统发电的发电量

满足: 系统的供需平衡及网络约束

目标: 最小化系统的总运行成本



现有研究

第一类

负荷 (预测值)
 L

+ 风电 (预测值)
 W



确定性问题
可使用传统模型求解

$$L = W + \sum_i P_i$$

+ 风电 (随机变量)
 W



随机问题
决策变量增加调度风电量

$$L = P_w + \sum_i P_i$$

第二类

负荷 (随机变量)
 L

+ 风电 (随机变量)
 W



基于概率分布
风电全部接入

$$\sum_i P_i \longrightarrow N = L - W$$



基于 scenario
风电调度



我们的主要工作

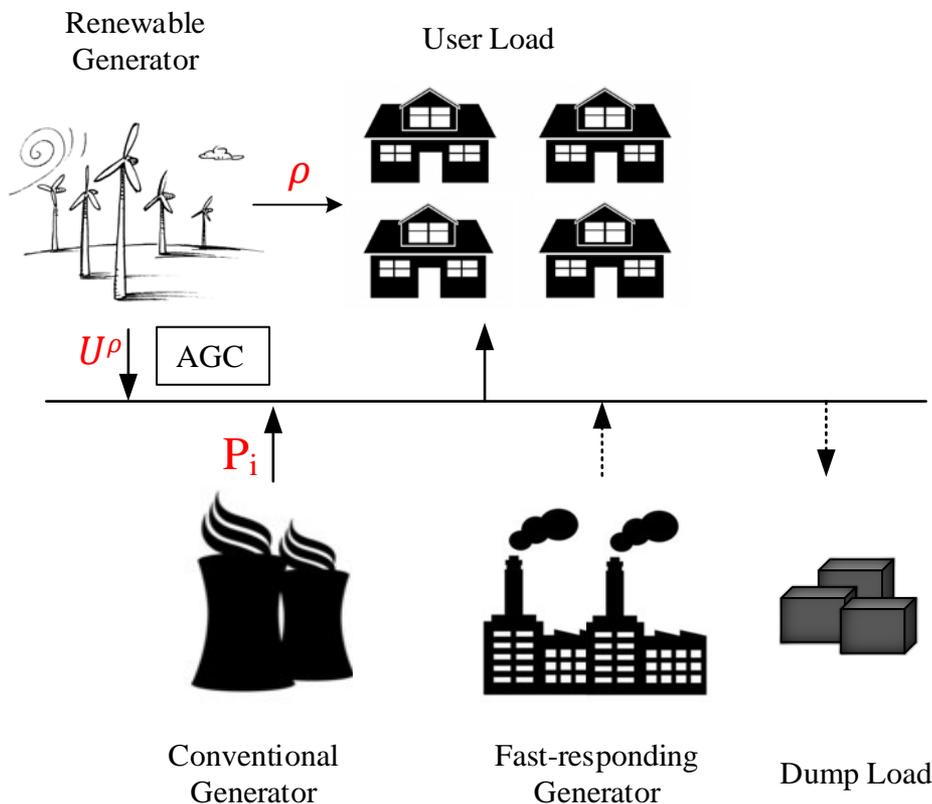
基于风电和负荷概率分布，研究风电的接入控制

提出了负荷-风电的配比控制方法，适用于一般分布

$$U^\rho = \min(\rho L, W) \quad 0 \leq \rho \leq 1$$

$$U^\rho = \begin{cases} W & \rho = 1 \\ \min(\rho L, W) & 0 < \rho < 1 \\ 0 & \rho = 0 \end{cases}$$

$$\sum_i P_i \rightarrow N^\rho = L - U^\rho$$



问题建模及求解

优化系统总运行成本

燃料成本 排放代价 上调成本 下调成本 弃风惩罚

$$\min_{P^C, \rho} G = F(P^C) + E(P^C) + U(P^C, \rho) + D(P^C, \rho) + C(\rho)$$

s.t.

$$P_{\min}^{C_i} \leq P^{C_i} \leq P_{\max}^{C_i} \quad \forall i$$
$$0 \leq \rho \leq 1$$

求解

给定 ρ 下 优化 P^{C_i} (凸问题)

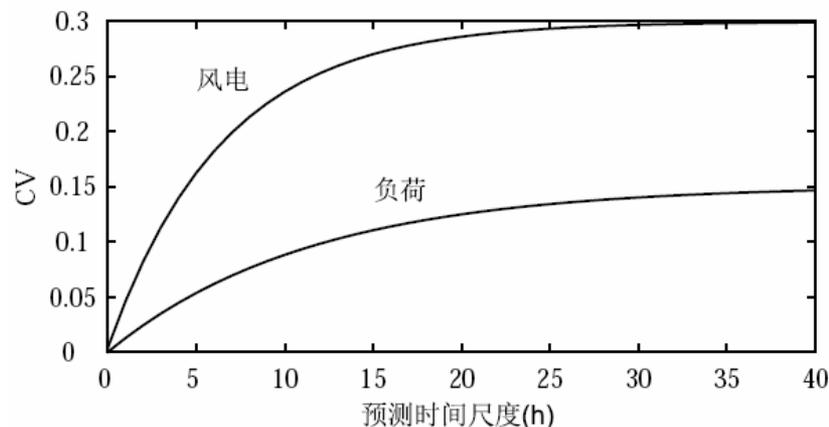
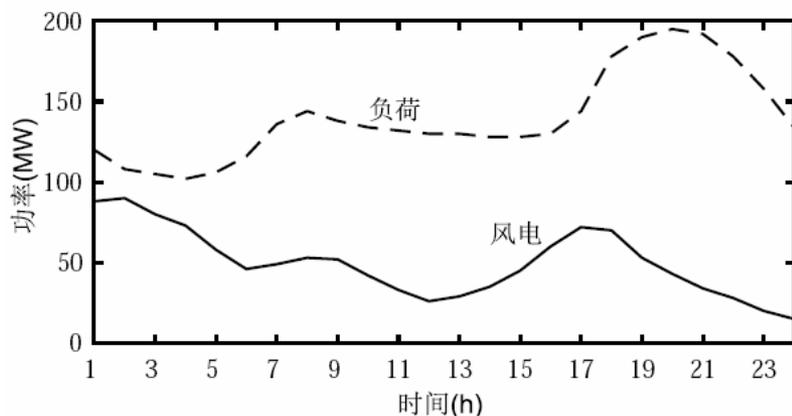
再优化 ρ (线性搜索)



仿真算例及结果

算例

系统组成： 传统发电厂（CG1、CG2），风力发电厂，天然气发电厂，负荷



对比方法

- 风电全部接入 (I)
- 给定值上限 (II)
- 风电-负荷配比方法 (M)

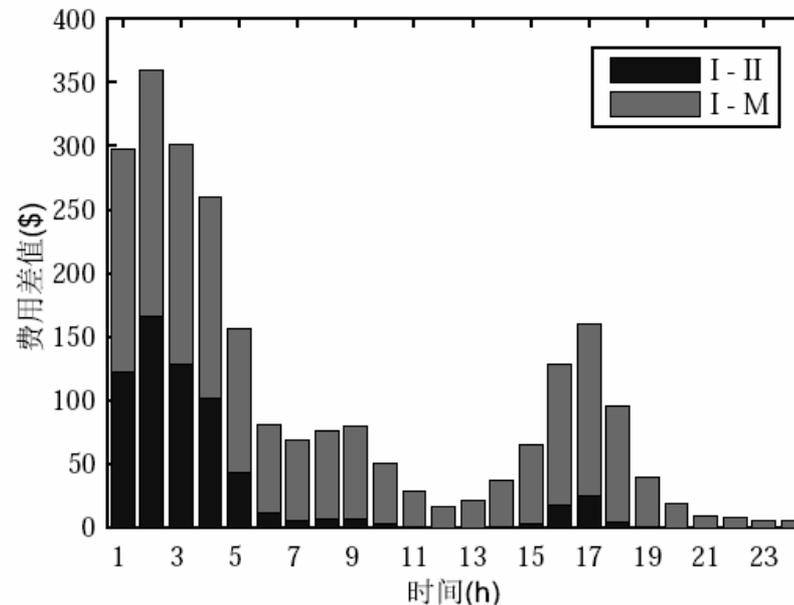


仿真算例及结果

仿真结果

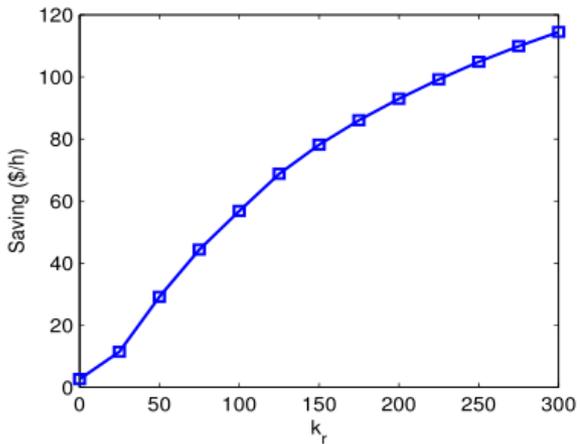
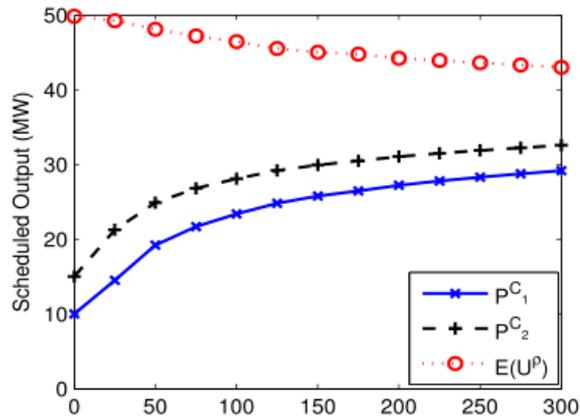
对比各部分费用 (\$)

方法	燃料成本 ($\times 10^4$)	污染代价 ($\times 10^4$)	上调成本 ($\times 10^4$)	下调成本 ($\times 10^4$)	弃风惩罚 ($\times 10^4$)	总费用 ($\times 10^4$)
I	80.58	55.86	35.20	15.52	0	187.16
II	80.91	55.84	34.74	13.52	1.51	186.51
M	81.26	56.05	33.86	9.38	4.24	184.79

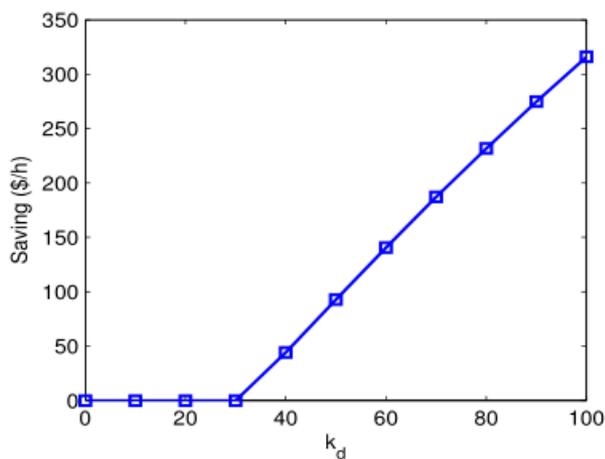
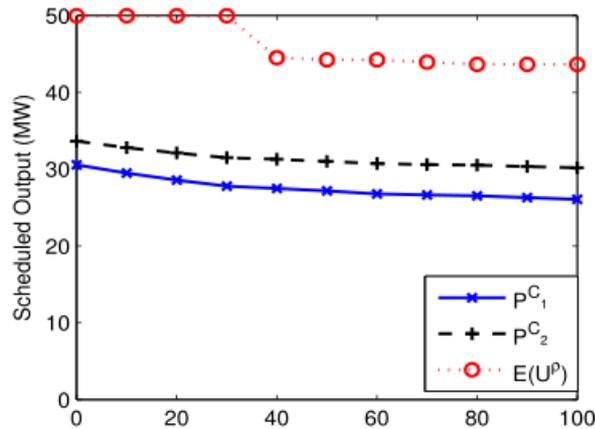


灵敏度分析

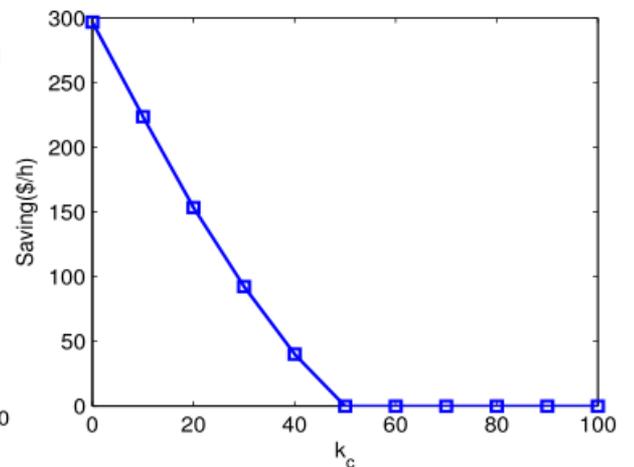
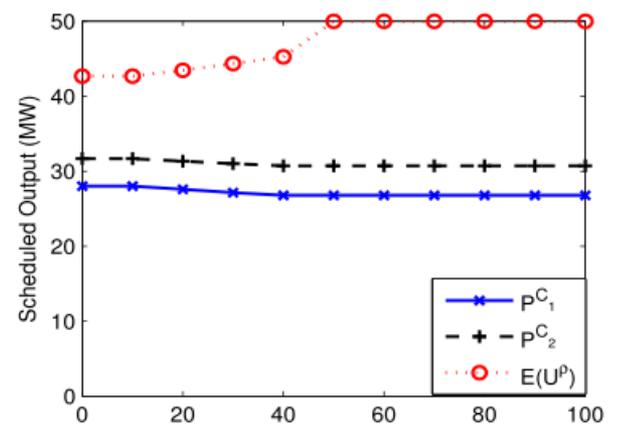
上调成本系数



下调成本系数



弃风惩罚系数



灵敏度分析

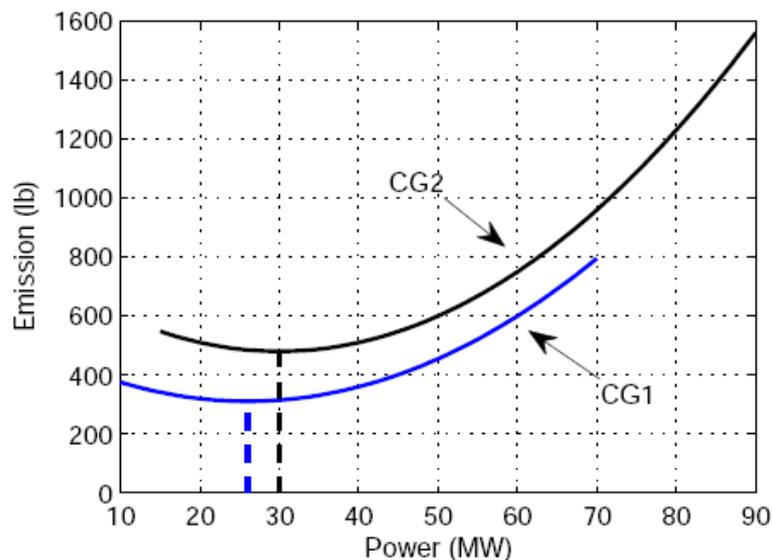
排放代价系数

情形1

λ (\$/lb)	P^{C_1} (MW)	P^{C_2} (MW)	ρ	$E(U^\rho)$ (MW)	Saving (\$/h)
2	37.72	39.15	0.418	45.62	67.63
4	36.54	38.49	0.430	46.29	58.51
6	35.72	37.93	0.438	46.68	52.15
8	35.05	37.42	0.445	47.00	47.12
10	34.50	36.99	0.450	47.21	43.11

情形2

λ (\$/lb)	P^{C_1} (MW)	P^{C_2} (MW)	ρ	$E(U^\rho)$ (MW)	费用节省 (\$/h)
2	18.39	24.25	0.620	59.20	188.69
4	19.23	24.65	0.610	58.39	204.32
6	19.96	25.14	0.600	57.67	217.78
8	20.56	25.59	0.591	57.00	229.72
10	21.04	25.96	0.584	56.47	240.26



传统发电厂排放曲线



- 研究背景和课题综述
- 主要研究内容
 - 问题1: 风电的随机特性及平滑效应分析
 - 问题2: 含风电场的电力系统经济调度
 - 问题3: 含风电的虚拟发电厂市场竞标
- 总结及展望



问题3: 含风电的虚拟发电厂市场竞标

研究背景: 电力市场 European electricity pools (e.g. Nord pool)

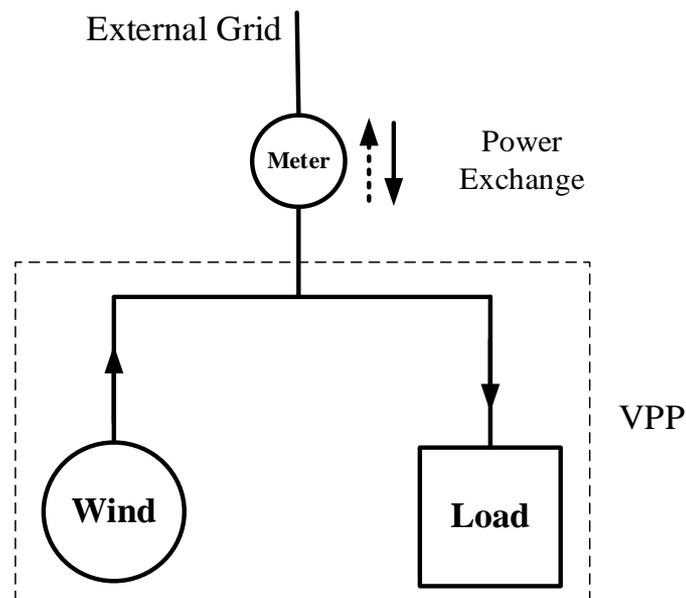
- Day-ahead Market (投标 获得收益)
 - Balancing Market (偏差 接受惩罚)
- } 市场风险

研究对象: 含风电和负荷的虚拟发电厂
VPP (Virtual Power Plant)

决策: 日前市场投标和调度的风电量

约束: 满足负荷用电需求

目标: 最大化市场收益



现有研究

确定性模型

- 使用负荷、风电、价格的预测值

随机模型

- 随机性考虑不全面（负荷、风电、市场价格）
- 未考虑风电的接入控制（依靠VPP自带的备用容量吸收随机性）
- 仅考虑单一市场
- 无解析解（基于scenario求解）



我们的主要工作

1) 拓展并运用了“风电-负荷配比”的风电接入控制方法

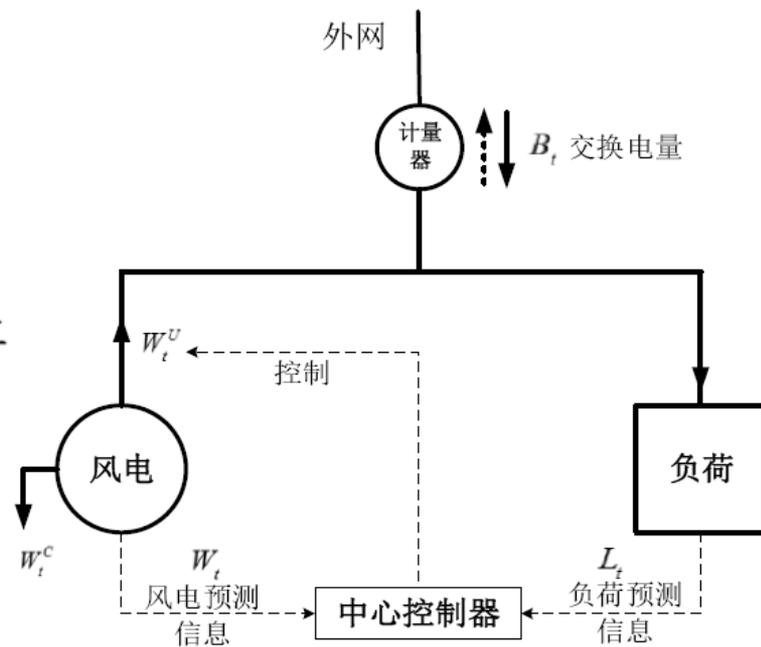
$$W^U = \min(\rho L, W) \quad 0 \leq \rho \leq A$$

2) 改进了现有模型

- 考虑负荷、风电、市场价格的随机性
- 考虑两个市场的总收益

3) 得到了竞标值的解析解

4) 解决了不含灵活性资源的虚拟发电厂市场投标问题



问题建模及求解

问题建模

$$\begin{aligned} \min_{\rho_t} \min_{B_t} \mathbb{E}_{\xi_t} Q(\rho_t, B_t, \xi_t) &\quad \rightarrow \quad Q(\rho_t, B_t, \xi_t) = \mathbb{E}(C_t) \\ \text{s.t.} \quad \rho_t &\in [0, A] \\ B_t &\geq -W_1 \end{aligned}$$
$$\begin{aligned} &= \lambda_t^s \mathbb{E}(N_t) + p_t \lambda_t^s \int_{B_t}^{\infty} (x - B_t) f_{N_t}(x) dx \\ &\quad + q_t \lambda_t^s \int_{-W_1}^{B_t} (B_t - x) f_{N_t}(x) dx \end{aligned}$$

求解

等价形式

$$\min_{\rho_t} \min_{B_t} Q'(\rho_t, B_t) = \mathbb{E}(N_t) + \bar{p}_t \int_{B_t}^{\infty} (x - B_t) f_{N_t}(x) dx + \bar{q}_t \int_{-W_1}^{B_t} (B_t - x) f_{N_t}(x) dx,$$

内层优化求解

$$B_t^*(\rho_t) = F_{N_t}^{-1}\left(\frac{\bar{p}_t}{\bar{p}_t + \bar{q}_t}\right)$$

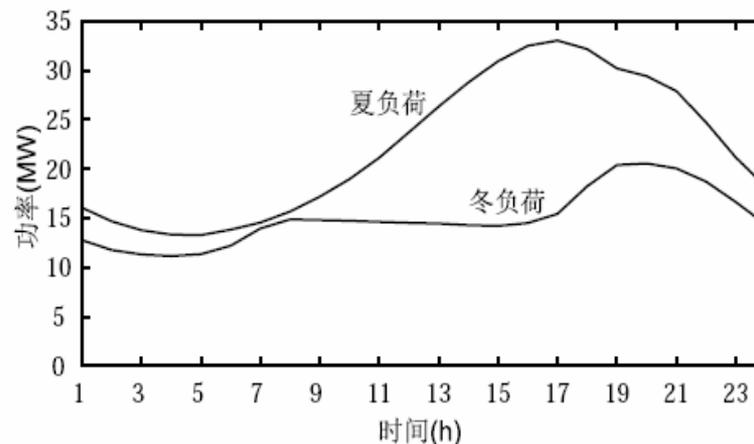
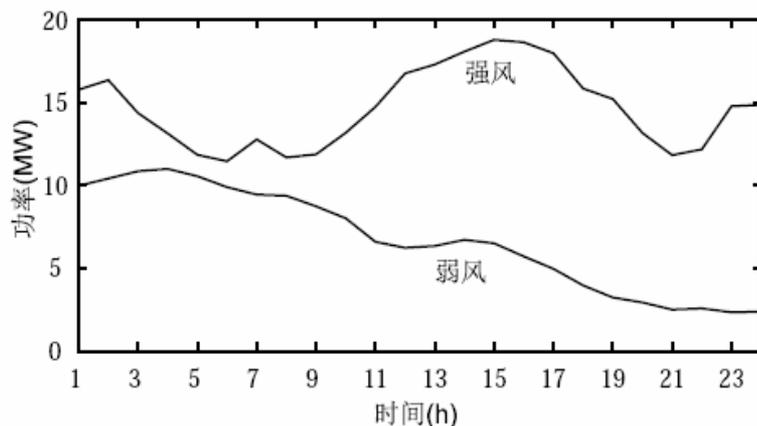
外层优化求解

$$\min_{\rho_t} Q'(\rho_t, B_t^*(\rho_t)) \quad (\text{先减后增的单峰函数})$$



仿真算例及结果

算例



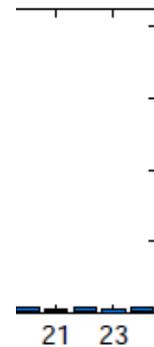
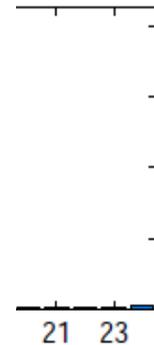
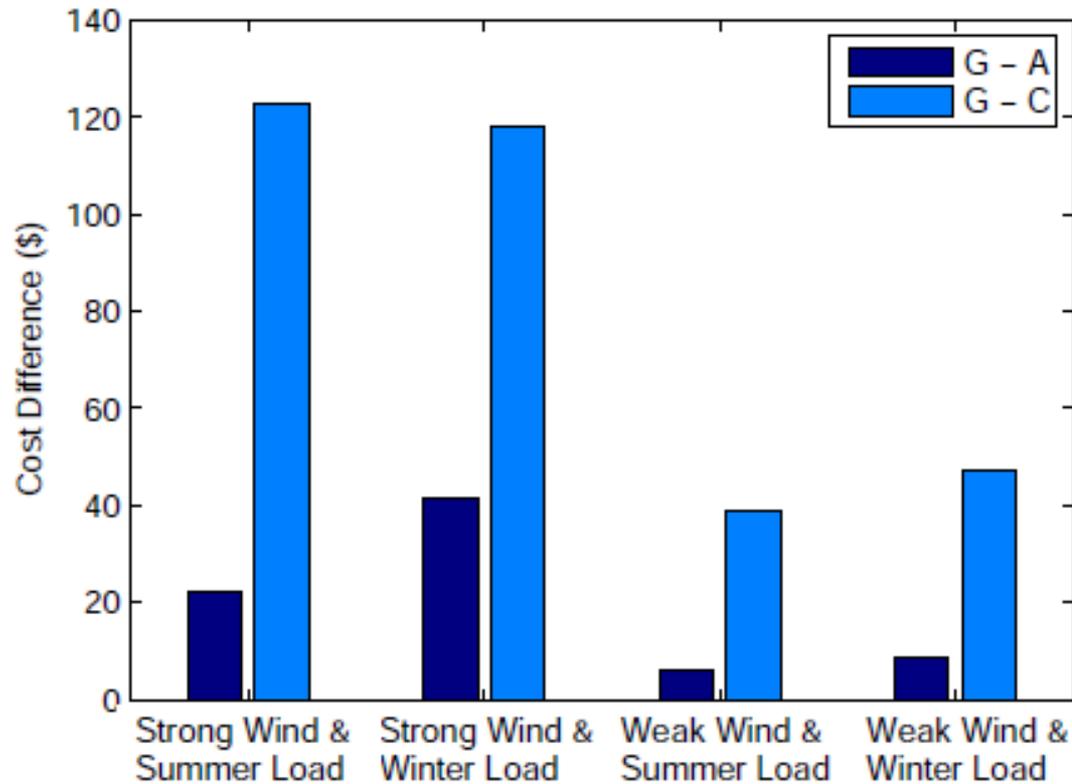
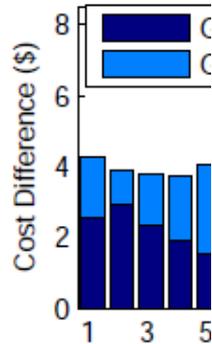
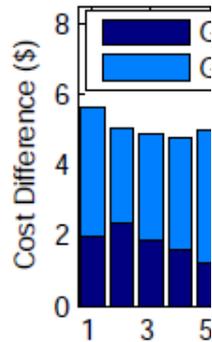
对比方法

- 贪婪方法(G): $W^U = W$
- 给定值方法(A): $W^U = \min(k, W)$ $k \leq W_I$
- 风电-负荷配比方法(C): $W^U = \min(\rho L, W)$ $0 \leq \rho \leq A$



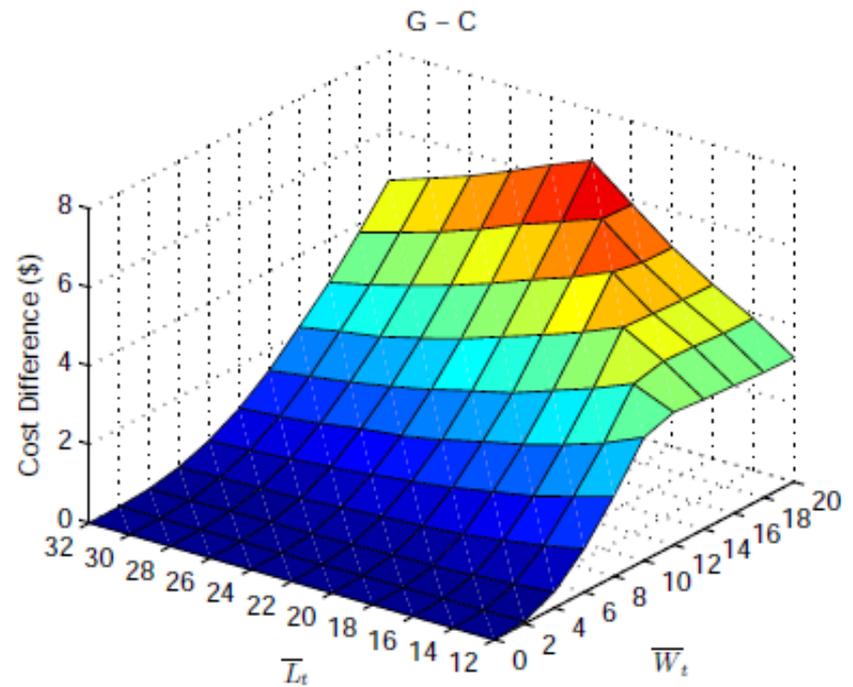
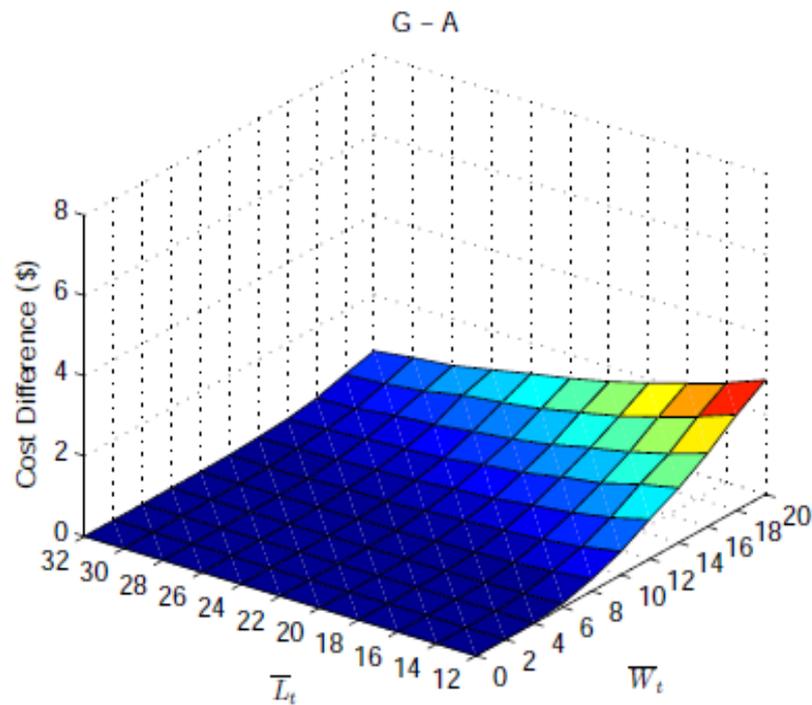
仿真算例及结果

仿真结果



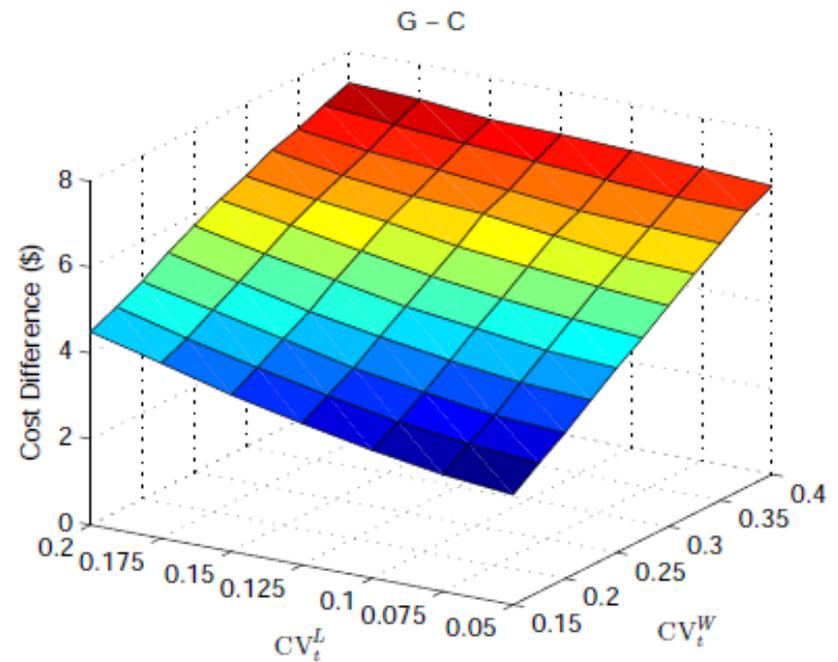
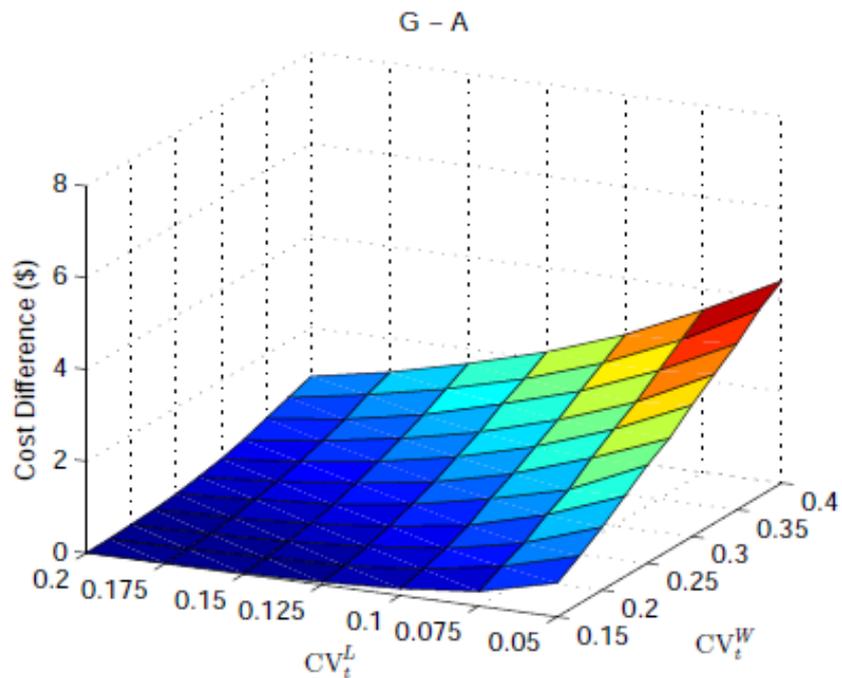
灵敏度分析

风电和负荷期望值大小的影响



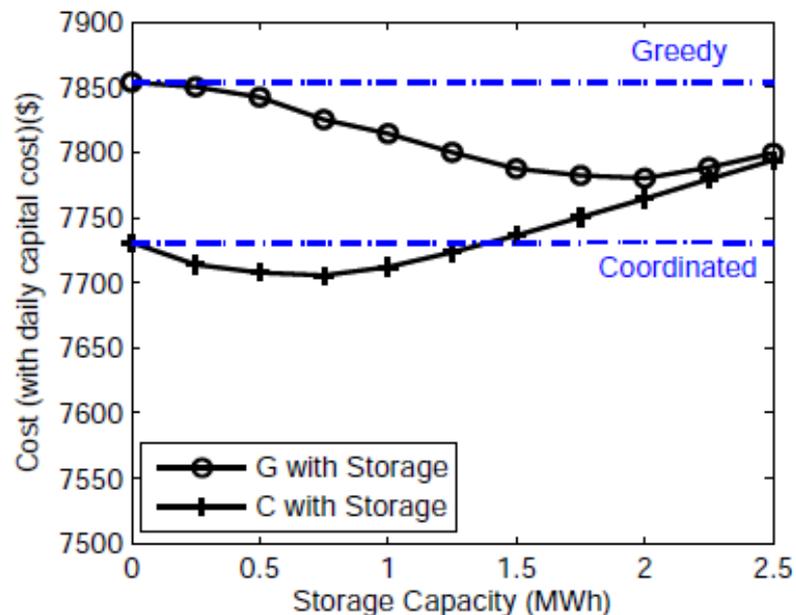
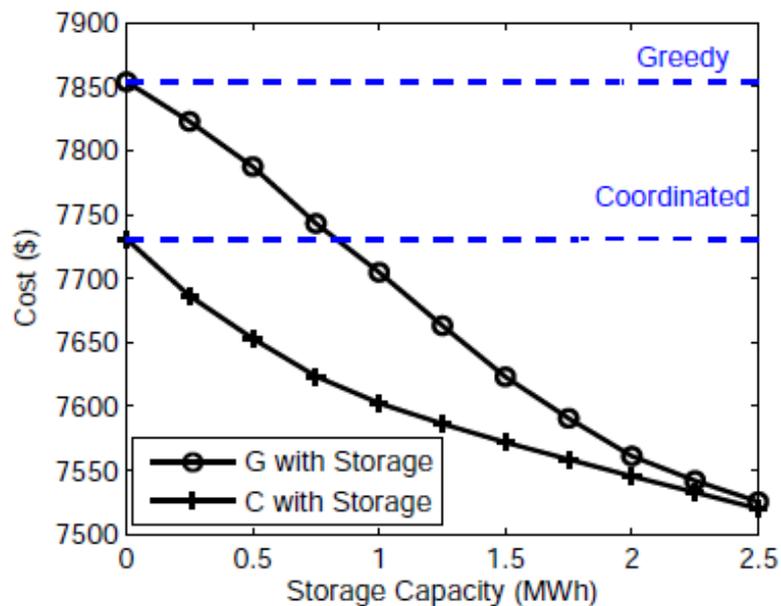
灵敏度分析

风电和负荷随机性大小的影响



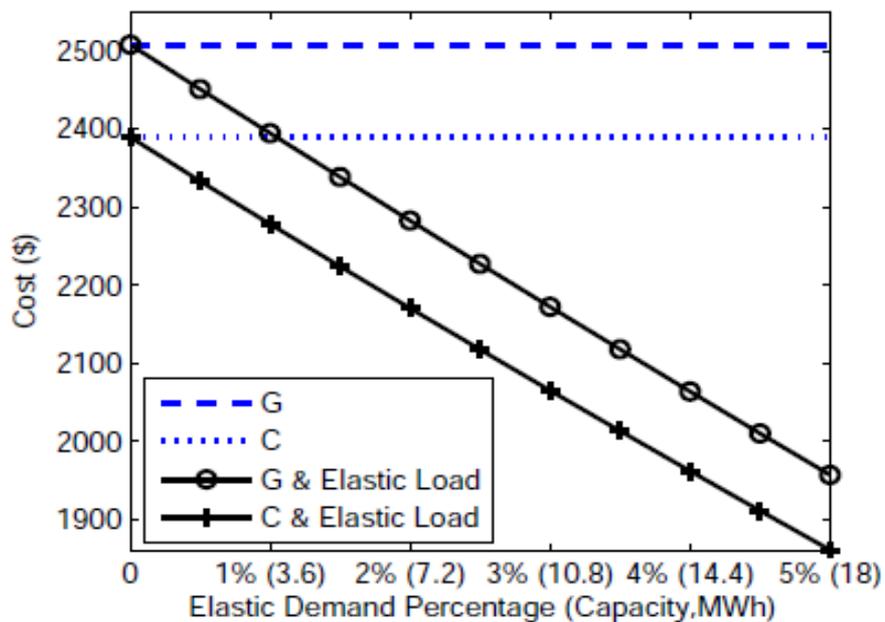
延伸讨论

与存储的对比及结合



延伸讨论

与弹性负荷的对比及结合



- 研究背景和课题综述
- 创新性总结及论文发表情况
- 主要研究内容
 - 问题1：风电的随机特性及平滑效应分析
 - 问题2：含风电场的电力系统经济调度
 - 问题3：含风电的虚拟发电厂市场竞标
- 总结及展望



总结及展望

总结

- 改进了“风电平滑效应”的理论模型，弥补了大规模实测数据分析方面的不足，给出了平滑效应的时空两维变化规律
- 提出了全新的“风电-负荷配比”的控制方法，运用于电力系统调度，降低了系统的运行成本
- 拓展了上述配比方法，运用于虚拟发电厂内部调度，改进了现有竞标模型，提高了市场收益

展望

- 改进经济调度模型（考虑机组约束、网络约束、配电网操作等）
- 拓展配比方法，与多种其他资源（存储、弹性负荷、热电联）联合优化
- 设计及完善虚拟发电厂内部市场定价机制



相关成果

- 问题1：风电出力波动规律的研究

改进了现有的“风电平滑效应”模型，给出了平滑效应的理论上下极限。通过对**大规模细颗粒度实测数据**的全面分析，给出平滑效应的时空两维变化规律。

[1] 申颖, 赵千川, 李明扬. 多时空尺度下风电平滑效应的分析[J]. 电网技术, 39(2): 400-405, 2015

- 问题2：含风电的电力系统经济调度问题

提出了一种**全新的“风电-负荷配比”**的风电接入控制方法，适用于**一般的**负荷和风电概率分布，可降低电力系统的运行成本。

[2] Zhao QC, Shen Y, Topology control of power systems with uncertainties, Journal of University of Science and Technology of China, 42(5):365-371, 2012

[3] Shen Y, Zhao QC, Li M, Renewable-load Matching Dispatch for Isolated Power Systems with Intermittent Renewable Sources, International Journal of Simulation and Process Modelling (已录用)



相关成果

- 问题3: 含风电的虚拟发电厂市场竞标问题

拓展了上述配比控制方法, 改进了现有模型, 解决了不含灵活性资源的虚拟发电厂市场投标问题, 得到了市场投标值的解析解, 降低了问题的复杂性, 提高了市场收益。

[4] Zhao QC, Shen Y, Li M, Control and Bidding Strategy for Virtual Power Plants with Renewable Generation and Inelastic Demand in Electricity Markets, IEEE transactions of Sustainable Energy, 7(2): 562-575, 2016



谢谢!

