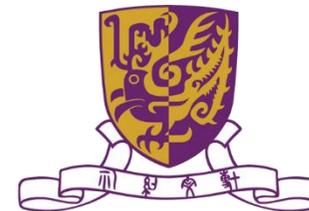




基于 Aumann-Shapley 价格的含储能 电力市场碳责任分配方法

谢睿, 博士后
香港中文大学





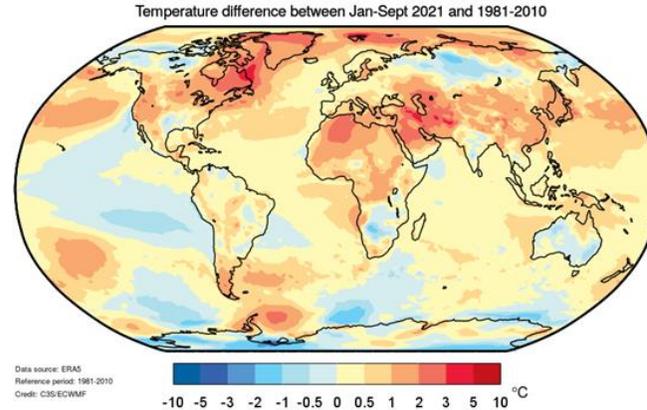
基于 Aumann-Shapley 价格的含储能 电力市场碳责任分配方法

- 1 引言
- 2 碳责任分配模型
- 3 快速计算方法
- 4 算例测试



研究背景

- 全球气候变暖与碳达峰、碳中和目标
- 电力行业是全球碳排放的主要来源之一
- 电力系统减排对实现双碳目标具有关键作用



全球气候变暖

研究思路

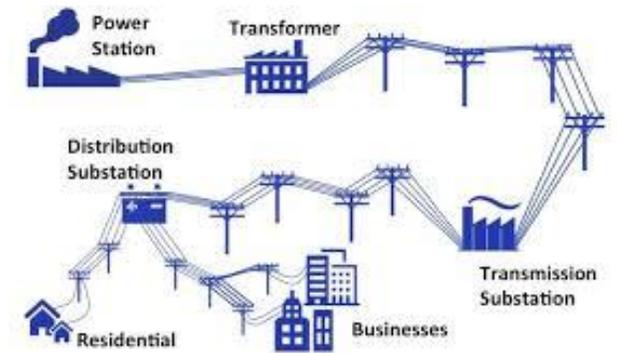
- 通过在电网各成员之间分配碳责任，促进电力系统低碳运行
- 负荷侧创造了电力需求，因此需要对部分碳排放负责
- 储能净能耗接近零，但可通过转移绿色电能帮助电力系统减碳

研究目标

- 提出适用于储能的电力系统碳责任分配方法，**激发储能减碳潜力**

碳中和目标

中国	2060
美国	2050
欧盟	2050
印度	2070
日本	2050
英国	2050
加拿大	2050





现有方法

碳排放流法^[1]

- 电力系统中分配碳责任最常用的方法之一
- 想象碳排放随着潮流在电网中流动

推导碳排放流法的两大假设

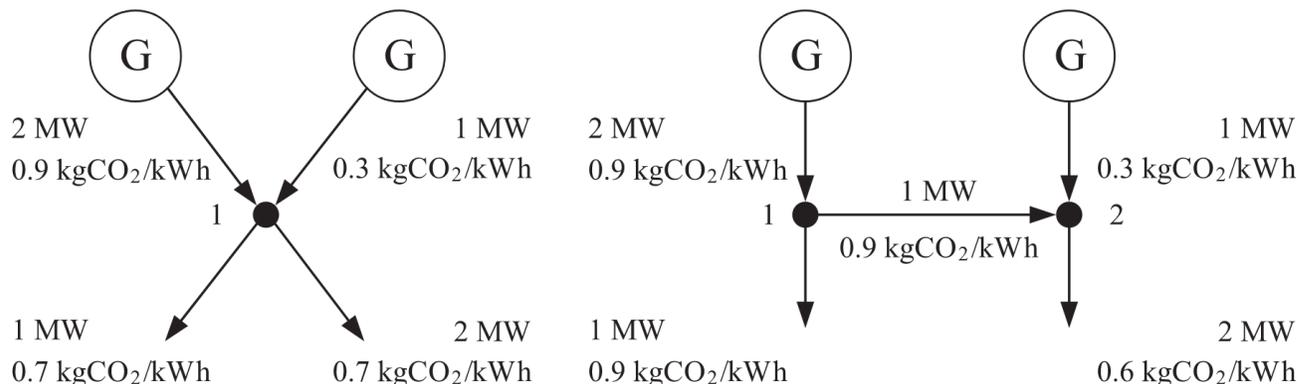
- 节点平衡 (流出碳排放流总和等于流入总和)
- 均匀流出 (同一节点流出的碳排放流具有相同的碳强度)

$$r_i^G + \sum_{(k,i) \in S_L} r_{ki} = r_i^D + \sum_{(i,k) \in S_L} r_{ik},$$

$$\rho_i^D = \rho_{ij} = \frac{r_i^D + \sum_{(i,k) \in S_L} r_{ik}}{D_i + \sum_{(i,k) \in S_L} p_{ik}} = \frac{r_i^G + \sum_{(k,i) \in S_L} r_{ki}}{P_i + \sum_{(k,i) \in S_L} p_{ki}},$$

存在的问题

- 添加**虚拟节点**可能改变碳责任分配结果

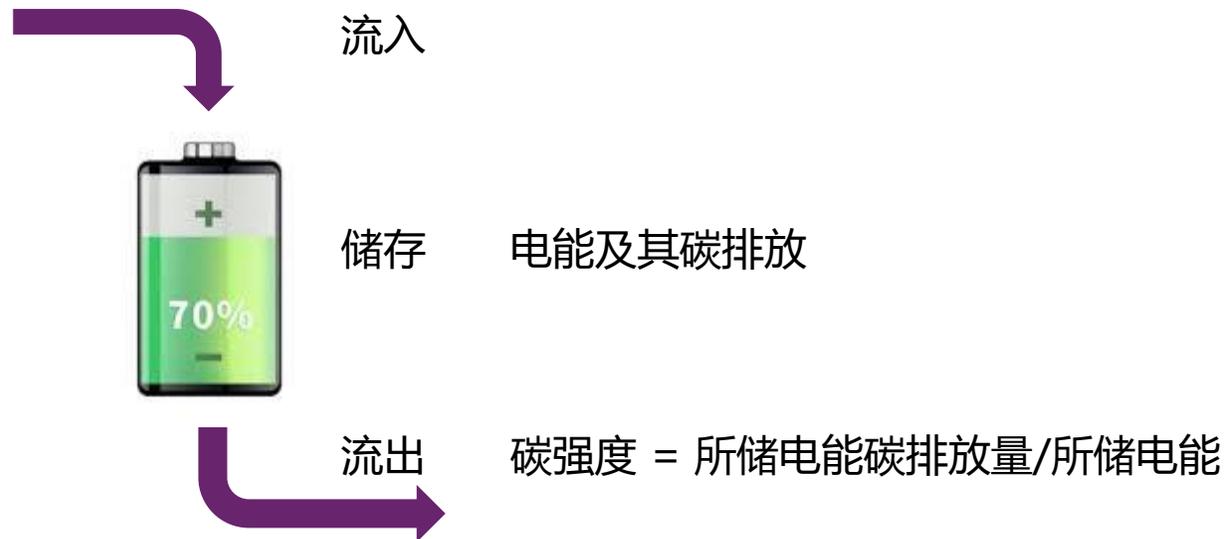


左：未加虚拟节点，两负荷碳强度相同
 右：增加节点 2，两负荷碳强度不同
 增加节点 2 后，**潮流未变，碳排放流改变**

[1] Chongqing Kang, Tianrui Zhou, Qixin Chen, Jianhui Wang, Yanlong Sun, Qing Xia, "Carbon Emission Flow From Generation to Demand: A Network-Based Model," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015.

碳排放流法存在的问题

- 添加**虚拟节点**可能改变碳责任分配结果
- 应用于**储能时**^[1]，储能碳强度只取决于充电过程，与放电时外部状态无关



问题：不能给出明确的信号以指明需要储能**放出**绿色电能的时段



成本分摊机制类方法

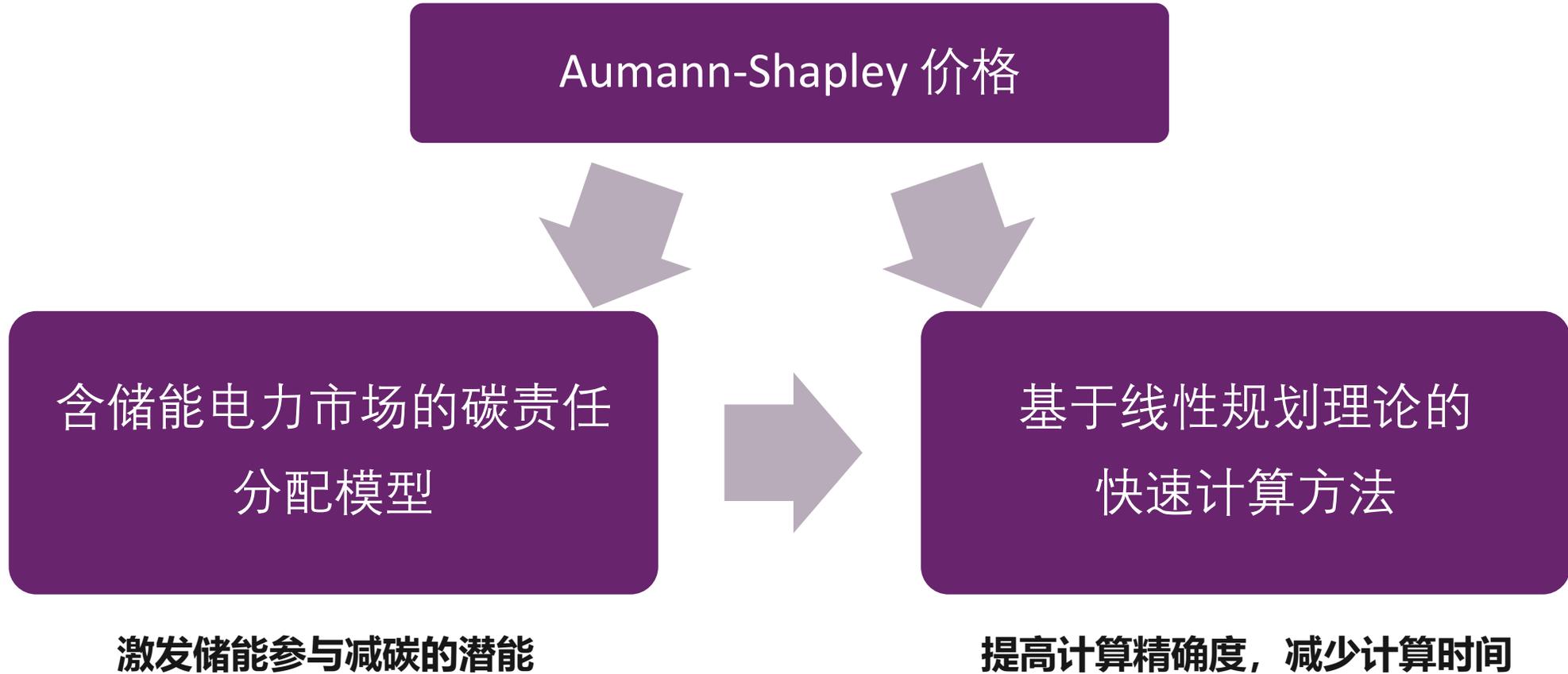
- 决定各个成员应承担多少费用

成本分摊机制	
按比例分摊	有解析表达式；不能区分各节点对总碳排放的影响强度
边际成本	计算简单；总费用不等于总成本，只能反映节点当前状态变化对总碳排放的影响
Shapley 值	从合作博弈角度看具有许多好的性质；成员数量多时难以计算
Aumann-Shapley 价格	Shapley 值的一种良好替代，成员数量多时仍可计算； 唯一同时满足成本分摊性、尺度不变性、一致性、可加性、正性公理的机制

基于 Aumann-Shapley 价格的电力系统碳责任分配方法^[1]

- 已应用于低碳经济调度、考虑碳交易的风-储规划等场景
- 研究空白
 - ✓ 计算中偏导数、积分采用数值方法估计，容易影响精确性，计算时间长
 - ✓ 尚未应用于含**储能**电力系统的碳责任分配，未研究如何激励储能参与减碳

[1]陈丽霞, 孙弢, 周云, Ella Zhou, 方陈, 冯冬涵, “电力系统发电侧和负荷侧共同碳责任分摊方法,” 电力系统自动化, 2018.





实时电力市场出清

- 最优潮流模型

- ✓ 基于字典优化的目标函数

$$\min_{p_i, \forall i} \left\{ \sum_{i \in S_G \cup S_S} f_i(p_i), \sum_{i \in S_G} \sigma_i(p_i) \right\}, \quad \begin{array}{l} \text{依次最小化总成本、} \\ \text{总碳排放} \end{array}$$

↑ 足够小的正数 ϵ

$$\min_{p_i, \forall i} \sum_{i \in S_G \cup S_S} f_i(p_i) + \epsilon \sum_{i \in S_G} \sigma_i(p_i), \quad (2a)$$

- ✓ 考虑损耗的直流潮流模型

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in S_G \cup S_S} p_i - \sum_{i \in S_B} D_i = \sum_{i \in S_G \cup S_S} L_i p_i - \sum_{i \in S_B} L_i D_i + L_0 : \bar{\lambda}, \quad (2b)$$

$$-F_l \leq \sum_{i \in S_G \cup S_S} T_{li} p_i - \sum_{i \in S_B} T_{li} D_i \leq F_l : \mu_l^-, \mu_l^+ \geq 0, \forall l \in S_L, \quad (2c)$$

$$P_i \leq p_i \leq \bar{P}_i, \forall i \in S_G \cup S_S, \quad (2d)$$

- ✓ 分段线性近似成本函数、碳排放函数

$$f_i(p_i) = \max_{1 \leq n \leq N_i} \{ \alpha_{in}^F p_i + \beta_{in}^F \}, \forall i \in S_G \cup S_S,$$

$$\sigma_i(p_i) = \max_{1 \leq n \leq N_i} \{ \alpha_{in}^E p_i + \beta_{in}^E \}, \forall i \in S_G,$$

- ✓ 等价线性规划

$$\min_{p_i, f_i, \sigma_i, \forall i} \sum_{i \in S_G \cup S_S} f_i + \epsilon \sum_{i \in S_G} \sigma_i, \quad (4a)$$

$$\text{s.t.} \quad (2b) - (2d), \quad (4b)$$

$$f_i \geq \alpha_{in}^F p_i + \beta_{in}^F, n = 1, \dots, N_i, \forall i \in S_G \cup S_S, \quad (4c)$$

$$\sigma_i \geq \alpha_{in}^E p_i + \beta_{in}^E, n = 1, \dots, N_i, \forall i \in S_G. \quad (4d)$$

- 节点边际电价

$$\lambda_i \triangleq \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial D_i} = \bar{\lambda}(1 - L_i) + \sum_{l \in S_L} T_{li} (\mu_l^- - \mu_l^+), \forall i \in S_B.$$



碳责任分配模型

发电侧和负荷侧碳责任分配

- 发电侧、负荷侧各承担**一半**碳责任
- 发电侧
 - ✓ 碳责任 = 发电碳排放量/2
 - ✓ 发电成本 = 燃料成本 + 碳排放成本

$$f_i(p_i) = g_i(p_i) + \frac{1}{2} \kappa \cdot \sigma_i(p_i), \underline{P}_i \leq p_i \leq \bar{P}_i, \forall i \in S_G,$$

- 负荷侧
 - ✓ 包括**负荷、储能**
 - ✓ 分摊总碳排放量一半的碳责任

负荷侧总碳排放函数 $\mathcal{E}(P, D)$

- 自变量：负荷、储能功率
- 因变量：负荷侧总碳排放
- 数学模型

$$\min_{p_i, f_i, \sigma_i, \forall i} \sum_{i \in S_G \cup S_S} f_i + \epsilon \sum_{i \in S_G} \sigma_i,$$

s.t. (4b) – (4d), $p_s = P_s, \forall s \in S_S$.

最优潮流模型

↓

$$\mathcal{E}(P, D) \triangleq \frac{1}{2} \sum_{i \in S_G} \kappa \cdot \sigma_i(p_i^*(P, D)) \cdot \tau.$$

最优潮流下碳排放量的一半



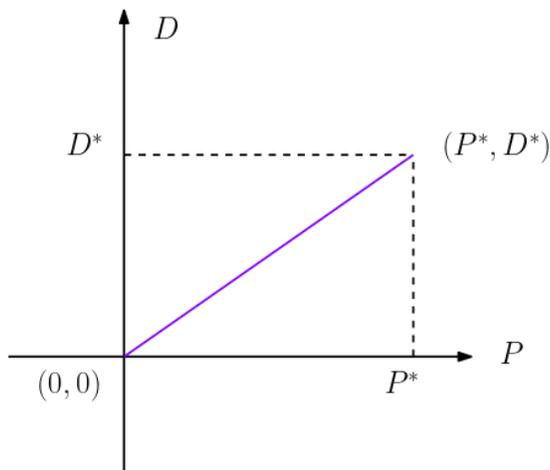
碳责任分配模型

基于 Aumann-Shapley 价格的碳责任分配

- 负荷侧总碳排放函数 $\mathcal{E}(P, D)$
- (P^*, D^*) 处储能 s 的碳责任

$$\mathcal{E}_s(P^*, D^*) \triangleq \int_0^{P_s^*} \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial P_s} \left(\frac{y}{P_s^*} P^*, \frac{y}{P_s^*} D^* \right) dy, \forall s \in S_S,$$

- ✓ 偏导数反映储能功率变化对总碳排放的影响速度
- ✓ 沿着 $(0,0)$ 到 (P^*, D^*) 对偏导数积分, 得到储能功率对总碳排放的累积影响



性质

- 命题 1 (成本分摊性): 设 $(0,0)$ 和 (P^*, D^*) 处最优潮流问题可行, 则其连线上点均可行, 并且 Aumann-Shapley 价格存在, 满足

$$\sum_{s \in S_S} \mathcal{E}_s(P^*, D^*) + \sum_{i \in S_B} \mathcal{E}_i(P^*, D^*) = \mathcal{E}(P^*, D^*) - \mathcal{E}(0, 0).$$
 - ✓ $(0,0)$ 点可换成其他可行点, 如日前市场出清点
 - ✓ 两个端点的可行性保证了连线上所有点的可行性
 - ✓ 总碳排放函数不连续可导, 但成本分摊性仍然成立
- 一致性: 每个节点有唯一的碳价 (碳责任/功率)
- 尺度不变性: 分配结果与单位无关
- 单调性: 偏导数始终更大则分配量更大
- 可加性: 总碳排放函数拆成两个函数之和, 分别分配再相加, 分配结果不变

Aumann-Shapley 价格是**唯一**满足以上全部性质的分摊机制



快速计算方法

碳价

- 碳价 = 碳责任/功率
- 每个节点有唯一的碳价

$$\psi_i(P^*, D^*) \triangleq \frac{1}{\tau} \int_0^1 \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial D_i}(yP^*, yD^*) dy = \frac{\mathcal{E}_i(P^*, D^*)}{D_i^* \tau}.$$

总碳排放函数的紧凑形式

- $\mathcal{E}(\tilde{D}) = K^\top x$ 其中 x 在以下问题中最优:

$$\begin{cases} \min_{x \geq 0} & C^\top x \\ \text{s.t.} & Ax = G\tilde{D} + H, \end{cases} \quad \text{线性规划}$$

- 可将负荷侧功率 \tilde{D} 看作线性规划参数, 用线性规划理论推导最优解和总碳排放函数的表达式

- ✓ 设 x^* 是一个最优解
- ✓ 根据线性规划理论, 可将其分解为基变量和非基变量, 满足

$$x_B^* \geq 0, x_N^* = 0, x_B^* = A_B^{-1}(G\tilde{D} + H),$$

- ✓ 使基变量不变的负荷侧功率范围

$$A_B^{-1}(G(\tilde{D} + \Delta\tilde{D}) + H) \geq 0,$$

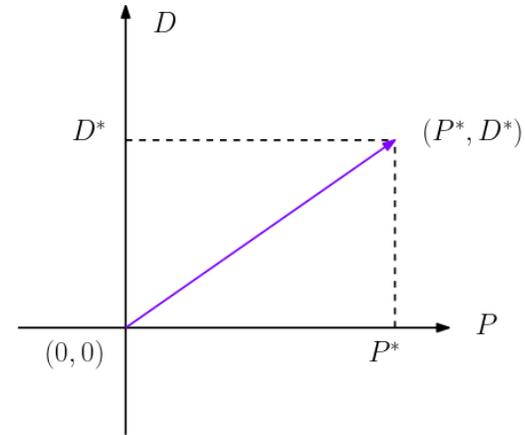
- ✓ 偏导数解析表达式

$$\frac{\partial \mathcal{E}(\tilde{D})}{\partial \tilde{D}_i} = \lim_{y \rightarrow 0} \frac{\mathcal{E}(\tilde{D} + y\omega_i) - \mathcal{E}(\tilde{D})}{y} = K_B^\top A_B^{-1} G \omega_i,$$



算法

- 思路
 - ✓ 设定步长 $\delta > 0$
 - ✓ 从 0 点开始向另一端移动 δ
 - ✓ 计算准确的偏导数和基变量不变的范围
 - ✓ 从基变量改变的临界点向另一端移动 δ
 - ✓ 重复直至到达另一端
- 性质
 - ✓ 各采样点的偏导数计算无误差
 - ✓ 有限步终止，且步数不大于 $1/\delta$ 和基变量区域数
 - ✓ 步长足够小时，分配结果无误差



Algorithm 1: Emission Price Calculation.

Input: Parameters in (6) and (7); a step parameter $\delta > 0$.

Output: Emission prices $\psi_i, i \in S_B$.

- 1: Initiation: Calculate A, C, G, H , and K in (12) and \tilde{D}^* by (10). Let $\psi_i \leftarrow 0, \forall i \in S_B, m \leftarrow 0, y_m \leftarrow 0$.
 - 2: Let $m \leftarrow m + 1$. Solve the linear program in (12) with $\tilde{D} = (y_{m-1} + \delta)\tilde{D}^*$ to obtain the optimal basis $A_{B_{m-1}}$ and the corresponding $K_{B_{m-1}}$. Solve $A_{B_{m-1}}^{-1}(G \cdot y\tilde{D}^* + H) \geq 0$ and obtain an interval $[y', y'']$. Let $y_m \leftarrow \min\{y'', 1\}$ and
$$\psi_i \leftarrow \psi_i + \frac{1}{\tau}(y_m - y_{m-1})K_{B_{m-1}}^\top A_{B_{m-1}}^{-1} G\omega_i, i \in S_B.$$
 - 3: If $y_m \geq 1$, terminate and output $\psi_i, i \in S_B$; otherwise, go to Step 2.
-

所提方法与碳排放流法对比



	Aumann-Shapley	碳排放流
成本分摊性	√	√
尺度不变性	√	√
单调性	√	-
可加性	√	-
一致性	√	-
加虚拟节点后不变	√	×
激励储能参与减碳	充电、放电时均提供有效信号	仅充电时提供有效信号
计算速度	快	非常快



测试算例

- IEEE 30-节点算例、IEEE 118-节点算例
- 碳排放价格 0.05 \$/kgCO₂
- 672 时段

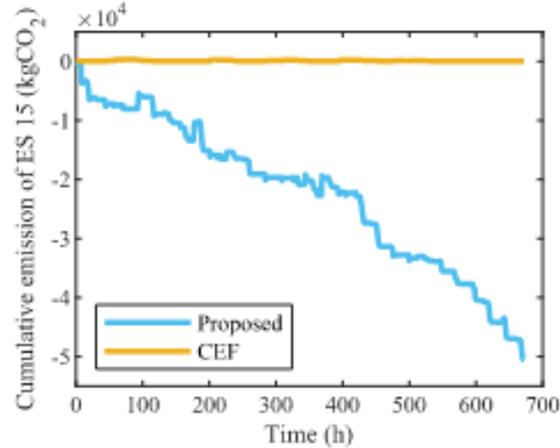
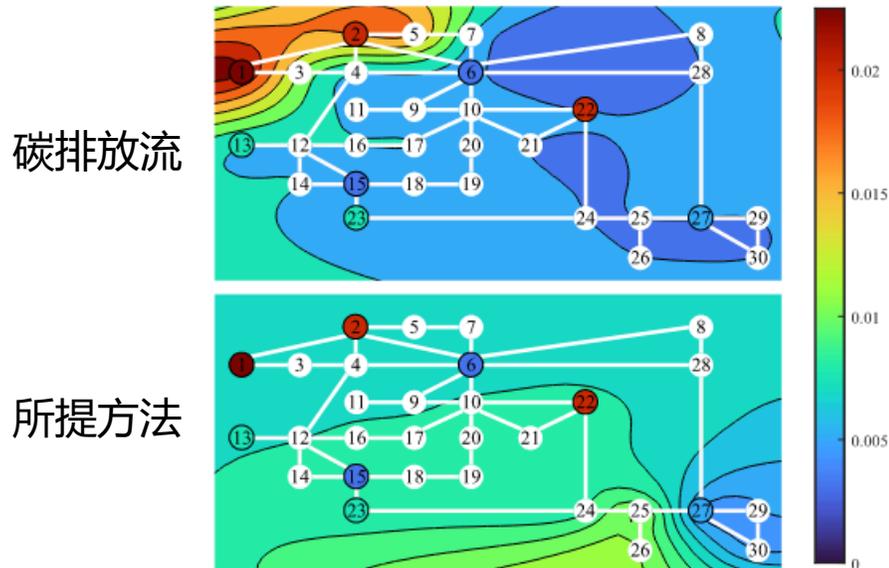
测试结果

	所提方法	对比方法 1	对比方法 2	对比方法 3
储能	√	√	×	×
碳责任分配	√	×	√	×
总发电成本 (\$/h)	3387	3121	3443	3173
总碳排放 (kgCO ₂ /h)	30546	53701	31063	54457
新能源弃电	1.84%	1.84%	3.25%	3.25%

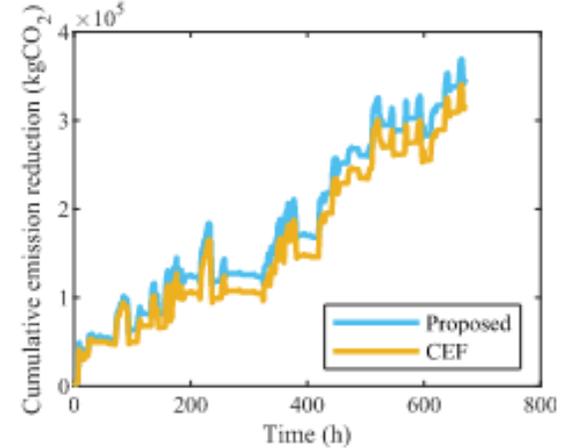
考虑碳责任分配使系统总碳排放下降了 43.1%

储能的参与使总发电成本下降 1.63%，总碳排放下降 1.66%，新能源弃电下降 43.4%

所提方法与碳排放流法对比



所提方法下储能的累积碳责任可以是负的，而碳排放流法下是接近 0 的正数



与碳排放流法相比，所提方法减碳效果提高了 9.3%



所提计算方法与数值估计方法对比

方法	采样数	成本分摊误差	计算时间 (s)
偏导数采用解析表达式、积分采用数值估计	100	4.64%	159
偏导数采用解析表达式、积分采用数值估计	1000	3.19%	1680
偏导数、积分均采用数值估计	100	2.74%	6.91
偏导数、积分均采用数值估计	1000	0.02%	107
所提方法	4	0.00%	0.37

所提方法显著减少了所需采样数、误差、计算时间

所提计算方法平均计算时间/平均采样数

储能数量	2	8	16
IEEE 30-节点算例	0.65 s/4.25	0.68 s/4.09	0.77 s/4.09
IEEE 118-节点算例	2.23 s/10.83	2.69 s/10.83	3.60 s/10.82

所提方法具有可扩展性



创新点

- 提出了基于 Aumann-Shapley 价格的含储能电力系统**碳责任分配模型**
- 基于线性规划理论，提出了碳责任分配**快速计算方法**

算例测试结论

- 碳责任分配和储能参与均可促进电力系统减碳
- 与碳排放流法相比，所提碳责任分配模型能更好地**激励储能参与系统减碳**
- 所提计算方法比现有基于数值估计的方法**误差更小，计算时间更短**



谢谢

Thank You