

王维军,陈冬玖,杨少梅,等.考虑风电不确定性的清洁采暖负荷优化调度[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2022,37(1):60-68. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.01.009

WANG W J, CHEN D J, YANG S M, et al. Optimized Scheduling of Clean Heating Load Considering Wind Power Uncertainty [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 37(1):60-68. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.01.009

# 考虑风电不确定性的清洁采暖负荷优化调度

王维军<sup>1\*</sup>,陈冬玖<sup>2</sup>,杨少梅<sup>1</sup>,张洪珊<sup>3</sup>,赵丹<sup>4</sup>

(1.华北电力大学(保定)经济管理系,河北保定 071000;2.中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司,江苏南京 210000;  
3.国网河北省电力有限公司经济技术研究院,河北石家庄 050000;4.国网江苏省电力有限公司镇江供电公司,江苏镇江 212000)

**摘要:**负荷聚合商对集中式电采暖负荷、分散式电采暖负荷进行聚合管理,参与风电日前电力辅助服务市场交易,能够进一步降低弃风率.考虑风电出力不确定性和电采暖负荷的柔性特性,采用拉丁超立方采样模拟生成多个可能的风电出力场景,并计算每个场景可能的概率.建立考虑最小化弃风量、最小化备用容量、最小化补偿额以及最小化增加的用电量在内的多目标调度模型,并计算得到 4 个情景下的最优调度结果.通过 4 个情景下结果的对比,表明提出的多目标优化调度模型可以进一步提高电采暖负荷对风电的消纳能力,电采暖用户也可从中得到一定的经济利益.此外,对集中式电采暖负荷和分散式电采暖负荷同时进行调度,可以产生协同优化效应,得到更低的弃风率和系统总成本.

**关键词:**清洁采暖负荷;优化调度;聚合管理;拉丁超立方采样

**中图分类号:**TM732 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2022)01-0060-09

## Optimized Scheduling of Clean Heating Load Considering Wind Power Uncertainty

WANG Weijun<sup>1</sup>, CHEN Dongjiu<sup>2</sup>, YANG Shaomei<sup>1</sup>, ZHANG Hongshan<sup>3</sup>, ZHAO Dan<sup>4</sup>

(1. Department of Economic Management, North China Electric Power University, Baoding 071000, China;

2. Jiangsu Electric Power Design Institute Co., Ltd., China Energy Construction Group, Nanjing 210000, China;

3. Economic and Technological Research Institute, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China;

4. Zhenjiang Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Zhenjiang 212000, China)

**Abstract:** The load aggregator aggregates the centralized electric heating load and the distributed electric heating load, and participates in the coordinated optimization scheduling of wind power before the day, which can further reduce the abandoned wind rate. Considering the uncertainty of wind power output and the flexible characteristics of electric heating load, the Latin hypercube sampling simulation is used to generate multiply possible wind power output scenarios, and the probability of each scenario is calculated. A multi-objective scheduling model considering the minimization of abandoned air volume, reserve capacity, compensation and increased power consumption is established. The optimal scheduling results under four scenarios are obtained. Through the comparison of the results under four scenarios, it shows that the proposed multi-objective optimal scheduling model can further improve the wind power consumption capacity of electric heating load, and electric heating users can also get certain economic benefits. In addition, simultaneously dispatching centralized electric heating

收稿日期:2020-02-08

基金项目:河北省社会科学基金资助项目(HB16GL063)

\*通信作者,E-mail:1151935527@qq.com

load, and distributed electric heating load can produce synergistic optimization effect, which can get lower abandonment rate and total system cost.

**Keywords:** clean heating load; optimal scheduling; aggregation management; Latin hypercube sampling

在供暖季,热电联产机组的电出力和热出力存在一定的耦合关系,且热电联产一般采用“以热定电”的方式运行,机组向下调峰能力不足,导致夜间低谷时段大规模“弃风”<sup>[1-2]</sup>.而电采暖负荷可以在一定程度上消纳风电,减少化石能源的使用<sup>[3-5]</sup>.

为了减少北方采暖季燃煤锅炉带来的污染,国家鼓励北方地区加快推进清洁供暖进程,多项示范工程已投入运行<sup>[6-7]</sup>.张家口市为了帮助电采暖用户购买廉价的风能,建立了四方协作机制.“四方协作”机制由“政府部门+电网企业+可再生能源发电企业+用户企业”为基础构建而成,由政府牵头,与电网公司合作建立可再生能源电力市场化交易平台,通过市场化交易,将清洁电力直接销售给电采暖用户<sup>[8]</sup>.

不断增加的电采暖面积将增加风电的上网电量,但是风电出力具有较大的波动性,影响电网的安全稳定运行<sup>[9-10]</sup>.电采暖负荷具有一定的可调节性,通过对电采暖负荷的聚合可以提供大量的可调节容量,可以进一步消纳风电,保证电网安全平稳运行<sup>[11]</sup>.

许多学者对电采暖负荷消纳风电进行了研究.文献[12]认为蓄热电采暖负荷可以作为可中断负荷参与辅助服务市场交易,并研究了蓄热电采暖与消纳风电的关系;文献[13]建立了电力市场环境下蓄热式电采暖消纳风电的经济性评估模型,并分析了影响蓄热式电采暖系统的关键因素;文献[14]分析了电采暖负荷参与辅助服务市场交易的经济效益,论证了电采暖负荷参与调峰的可行性;文献[15]提出在二级热网中增加电锅炉来改变热机组出力曲线,增加电网谷段负荷来消纳风电;文献[16]以电网波动最小为目标,对电采暖负荷进行调度,结果表明电采暖负荷可以很好地平滑风电出力;文献[17]对热负荷消纳夜间风电进行了评估,结果表明热负荷可以在一定程度上消纳风电,若要进一步消纳风电则需要采取其他措施.

在考虑风电出力不确定性的条件下,提出了集中式电采暖负荷、分散式电采暖负荷与风电日前调度的多目标决策模型,结果表明:多目标调度模型可以在降低系统整体成本的同时,进一步降低弃风率.

## 1 电采暖负荷聚合管理商业模式分析

电采暖负荷可分为集中式电采暖负荷和分散式电采暖负荷.对于集中式电采暖负荷来说,每一个集中式电采暖热源站是一个被聚合单位,并且每一个热源站都有储热设施,采暖负荷集中在低谷时段,可视为可平移负荷.对于集中式电采暖负荷来说,每一个采暖用户是一个聚合单位,并且没有储能设施,电采暖负荷随室外温度变化而变化,可视为可中断负荷.

单个热源站或者电采暖用户容量太小,无法参与到电力市场交易,可通过负荷聚合商将多个热源站和分散式电采暖用户的电负荷聚合起来,形成一定规模的可平移或者可中断负荷,并由聚合商代理参与电力辅助服务市场.

电采暖负荷的聚合商可以是风电场、电网公司或者第三方公司.风电场作为柔性负荷聚合商有一定优势,一方面电采暖热源站或者用户可以从风电场处通过协议购买到廉价的风电;另一方面通过对电采暖负荷的聚合管理,风电场可以向电力辅助服务市场提供调峰服务,以此来抵减其他调峰机组支付的调峰辅助服务费用.电采暖负荷参与辅助服务市场交易框架如图1所示.

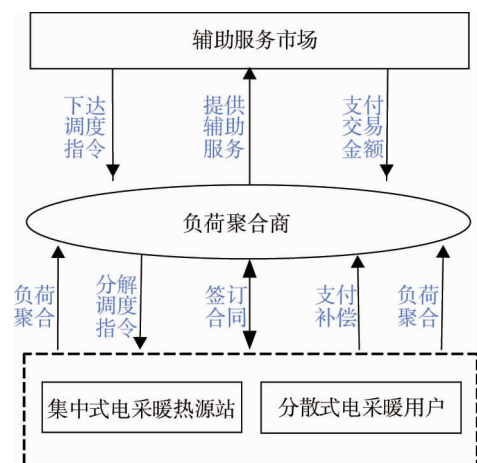


图1 电采暖负荷参与辅助服务市场交易框架

## 2 风电不确定性模拟

风电的实际出力可以用风电预测出力和预测偏差表示,具体如式(1)所示.

$$P_{\text{wind,real}}^t = P_{\text{wind,forecast}}^t + \Delta P_{\text{wind}}^t \quad (1)$$

式中:  $P_{\text{wind,real}}^t$  为  $t$  时刻风电实际出力, MW;  $P_{\text{wind,forecast}}^t$  为  $t$  时刻风电预测出力, MW;  $\Delta P_{\text{wind}}^t$  为  $t$  时刻风电预测偏差, MW.

风电出力预测误差近似服从期望为 0、方差为  $\sigma_t^2$  的正态分布,风电出力标准差可由式(2)计算.

$$\sigma_t = \frac{1}{5} P_{\text{wind,real}}^t + \frac{1}{50} C_{\text{wind}} \quad (2)$$

式中:  $C_{\text{wind}}$  为风电装机容量, MW.

常用的风电出力场景生成方法有蒙特卡罗法<sup>[18]</sup>和拉丁超立方采样法<sup>[19]</sup>.使用蒙特卡罗模拟场景生成会产生点聚集的情况,导致有些概率较小的点无法采集到.采用拉丁超立方采样法则可避免点聚集的现象,拉丁超立方采样法本质属于分层抽样,它先将累积概率分布曲线分解成若干间隔相等的曲线,然后在每一个区间中随机取样.该方法在给定样本数量的情况下,通过用样本数对概率区间分割来限制每次采样的范围,保证了样本与概率分布函数的契合度,同时可避免由场景削减引起不确定性模拟精度的降低.

采用拉丁超立方采样法模拟生成风电出力场景的步骤如下:

1) 采样:对风电出力的每个时段进行采样,保证不同概率的区间都能抽样,每个随机变量采样值之间的相关性是随机的.

2) 排列:一般来说不同时段采样组成的场景的相关性越小,准确度越高.因此需要改变各随机变量采样值的排列顺序,使不同的风电出力场景的相关性趋于最小.

每个风电出力场景的概率用式(3)求解.

$$\rho_s = \frac{\prod_{t=1}^T f_t(P_{\text{wind},s}^t)}{\sum_{s=1}^S \prod_{t=1}^T f_t(P_{\text{wind},s}^t)} \quad (3)$$

式中:  $\rho_s$  为场景  $s$  的概率;  $T$  为一天划分的时段数;  $S$  是风电出力的场景数量;  $P_{\text{wind},s}^t$  为场景  $s$  下  $t$  时刻的风电出力;  $f_t$  为  $t$  时刻下风电出力的概率密度函数.

## 3 清洁采暖负荷优化调度模型

经过聚合后的电采暖负荷可以作为可调度资源的一部分实现协调互动.本节主要考虑风电出力、火电出力、分散式电采暖负荷、集中式电采暖负荷以及其他负荷如何实现日前协调优化调度.

### 3.1 目标函数

在优化调度时,考虑最小化弃风量、最小化补偿额、最小化增加的用电量以及最小化备用容量为目标函数.

#### 3.1.1 最小化弃风量

在日前安排风电出力时,考虑每个场景下的风电出力和场景概率,计算出期望弃风量作为目标函数,如式(4)所示.

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \rho_s u_s^t (P_{\text{wind},s}^t - P_{\text{wind,plan}}^t);$$

$$u_s^t = \begin{cases} 1, & P_{\text{wind},s}^t > P_{\text{wind,plan}}^t; \\ 0, & P_{\text{wind},s}^t < P_{\text{wind,plan}}^t. \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $F_1$  为期望弃风量, MWh;  $u_s^t$  为  $t$  时刻场景  $s$  下的开关变量;  $P_{\text{wind,plan}}^t$  为第  $t$  个时段的风电消纳量, MW.

### 3.1.2 最小化备用容量

在日前安排风电出力时,由于风电出力具有较大的不确定性,因此需要安排一定的备用容量防止风电出力不足.考虑每个场景下的风电出力和场景概率,计算出期望备用容量作为目标函数,如式(5)所示.

$$\min F_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \rho_s v_s^t (P_{\text{wind,plan}}^t - P_{\text{wind},s}^t);$$

$$v_s^t = \begin{cases} 0, & P_{\text{wind},s}^t > P_{\text{wind,plan}}^t; \\ 1, & P_{\text{wind},s}^t < P_{\text{wind,plan}}^t. \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $F_2$  为期望备用容量, MWh;  $v_s^t$  为开关变量.

### 3.1.3 最小化补偿额

在调度时需要考虑对用户的补偿额最小,一般按照负荷调度量和辅助服务市场价格对用户进行补偿.对用户的补偿包括集中式电采暖热源站的补偿和分散式电采暖用户的补偿,由于集中式电采暖热源站在未参与调度时会将负荷集中在低谷时段,享受谷段输配电价,若要将其调配到高峰时段,则需要额外补偿热源站电费.另外由于在某个时刻降低热负荷,必然会在另一个时刻提高热负荷,因此计算用户参与聚合的电量应取用户负荷变化值的一半,具体如式(6)所示.

$$\min F_3 = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^T (C_{\text{heat}}^t |P_{\text{heat}}^t - P_{\text{heat},0}^t| + C_{\text{user}} |P_{\text{user}}^t - P_{\text{user},0}^t|) t_0. \quad (6)$$

式中:  $F_3$  为对用户的补偿额,元;  $P_{\text{heat}}^t$  为  $t$  时刻集中式供暖电负荷, MW;  $P_{\text{user}}^t$  为  $t$  时刻分散式供暖电负荷, MW;  $P_{\text{heat},0}^t$  为不进行优化调度下  $t$  时刻集中式供暖电负荷, MW;  $P_{\text{user},0}^t$  为不进行优化调度下  $t$  时刻分散式供暖电负荷, MW;  $C_{\text{heat}}^t$  为  $t$  时刻对集中式供暖电负荷参与聚合的补偿,元/MWh;  $C_{\text{user}}$  为对分散式供暖电负荷参与聚合的补偿,元/MWh;  $t_0$  为每个时段的持续时长, h.

### 3.1.4 最小化增加的用电量

对分散式采暖电负荷进行调度时,有可能会增加用户用电量,虽然这部分用电量可以帮助消纳风电,但仍然造成了不必要的浪费,所以应当使得用户增加的用电量最小,如式(7)所示.

$$\min F_4 = \left( \sum_{t=1}^T P_{\text{user}}^t t_0 - \sum_{t=1}^T P_{\text{user},0}^t t_0 \right). \quad (7)$$

式中:  $F_4$  为分散式电采暖用户增加的用电量, MWh.

分别对弃风量、增加的用电量和备用容量设置罚值,可以得到系统总成本,如式(8)所示.

$$\min F = C_1 F_1 + C_2 F_2 + F_3 + C_4 F_4. \quad (8)$$

式中:  $C_1$  为弃风罚值,元/MWh;  $C_2$  为备用罚值,元/MWh;  $C_4$  为增加用电量罚值,元/MWh;  $F$  为系统总成本,元.

## 3.2 约束条件

### 3.2.1 供需平衡约束

为简化计算,认为电网负荷供给侧主要由火电机组和风电机组组成;电网负荷需求侧由供暖电负荷和其他负荷组成(假设其他负荷不变).在任意时刻下,系统供需相等,如式(9)所示.

$$P_{\text{heat}}^t + P_{\text{user}}^t + P_{\text{other}}^t = \sum_j P_{\text{cond},j}^t + \sum_j P_{\text{wind},j}^t. \quad (9)$$

式中:  $P_{\text{other}}^t$  为  $t$  时刻其他固定负荷, MW;  $P_{\text{cond},j}^t$  为  $t$  时刻第  $j$  台火电机组计划负荷, MW;  $P_{\text{wind},j}^t$  为  $t$  时刻第  $j$  台风电机组计划负荷, MW.

### 3.2.2 火电机组运行过程中出力约束

火电机组启动时出力存在下限与上限,如式(10)所示.

$$P_{\text{cond},j,\min} \leq P_{\text{cond},j}^t \leq P_{\text{cond},j,\max}. \quad (10)$$

式中:  $P_{\text{cond},j,\min}$  为第  $j$  台火电机组最小出力, MW;  $P_{\text{cond},j,\max}$  为第  $j$  台火电机组最大出力, MW;  $P_{\text{cond},j}^t$  为  $t$  时刻第  $j$  台火电机组功率, MW.

### 3.2.3 火电机组爬坡约束

火电机组电功率变化需要在爬坡约束范围内,如式(11)所示.

$$-P_{\text{cond},j,\text{down}} \leq \frac{P_{\text{cond},j}^t - P_{\text{cond},j}^{t-1}}{t_0} \leq P_{\text{cond},j,\text{up}}. \quad (11)$$

式中:  $P_{\text{cond},j,\text{down}}$  为第  $j$  台火电机组向下爬坡最大速率, MW/min;  $P_{\text{cond},j,\text{up}}$  为第  $j$  台纯凝火电机组向上爬坡最大速率, MW/min.

### 3.2.4 火电机组最小启停时间约束

火电机组运行过程中存在最小运行时间和最小停机时间,如式(12)和式(13)所示.

$$\sum_{k=t}^{t+T_{\text{run},j}-1} |u_{j,k+1} - u_{j,k}| = 0; \quad (12)$$

$$\sum_{k=t}^{t+T_{\text{stop},j}-1} |u_{j,k+1} - u_{j,k}| = 0. \quad (13)$$

式中:  $T_{\text{run},j}$  为第  $j$  台火电机组最小运行时间, min;  $T_{\text{stop},j}$  为第  $j$  台火电机组最小停机时间, min;  $u_{j,k}$  为第  $j$  台火电机组的状态, 1 表示运行, 0 表示停机.

### 3.2.5 风电出力约束

风电出力具有间歇性和波动性,在运行时出力一般限制在预测最大出力范围之内,风电出力约束如式(14)所示.

$$0 \leq P_{\text{wind},j}^t \leq P_{\text{wind},j,\text{max}}^t. \quad (14)$$

式中:  $P_{\text{wind},j}^t$  为  $t$  时刻第  $j$  台风电机组功率, MW;  $P_{\text{wind},j,\text{max}}^t$  为  $t$  时刻第  $j$  台风电机组预测出力最大值, MW.

### 3.2.6 电锅炉功率约束

热源站和分散式用户电锅炉在任何时间的下功率不超过其最大功率,如式(15)和式(16)所示.

$$0 \leq P_{\text{heat},j}^t \leq P_{\text{heat},j,\text{max}}; \quad (15)$$

$$0 \leq P_{\text{user},j}^t \leq P_{\text{user},j,\text{max}}. \quad (16)$$

式中:  $P_{\text{heat},j}^t$  为  $t$  时刻第  $j$  个热源站电锅炉功率, MW;  $P_{\text{heat},j,\text{max}}$  为第  $j$  个热源站电锅炉最大功率, MW;  $P_{\text{user},j}^t$  为  $t$  时刻第  $j$  个用户电锅炉功率, MW;  $P_{\text{user},j,\text{max}}$  为  $t$  时刻第  $j$  个用户电锅炉最大功率, MW.

### 3.2.7 储热罐储热约束

热源站的蓄热量不大于储热罐最大储热量,如式(17)所示.

$$Q_{s,j}^t \leq Q_{s,j,\text{max}}. \quad (17)$$

式中:  $Q_{s,j}^t$  为  $t$  时刻第  $j$  台储热罐的储热量, MWh;  $Q_{s,j,\text{max}}$  为第  $j$  台储热罐最大储热量, MWh.

### 3.2.8 供热负荷约束

热源站一天的功率总和应当等于一天的热量需求,如式(18)所示.

$$\sum_{t=1}^T P_{\text{heat},j}^t t_0 = Q_{d,j}. \quad (18)$$

式中:  $Q_{d,j}$  为第  $j$  个热源站一天的热负荷需求总量, MWh.

### 3.2.9 分散式电采暖用户室内温度约束

由于分散式电采暖用户没有蓄热装置,通过减少或者增大电锅炉功率改变负荷曲线,因此用户室内温度会不断变化,室内温度应当在用户可接受范围内,分布式电采暖负荷离散的时序温度方程如式(19)所示,室温限制如式(20)所示.

$$T_{\text{in}}^t = \left[ T_{\text{in}}^{t-1} - \frac{P_{\text{user}}^t}{s_{\text{user}}} R - T_{\text{out}}^t \right] e^{-\frac{t_0}{CR}} + \frac{P_{\text{user}}^t}{s_{\text{user}}} R + T_{\text{out}}^t; \quad (19)$$

$$T_{\text{in},\text{min}} \leq T_{\text{in}}^t \leq T_{\text{in},\text{max}}. \quad (20)$$

式中:  $T_{\text{out}}^t$  为  $t$  时刻的室外温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $s_{\text{user}}$  为用户的采暖面积,  $\text{m}^2$ ;  $C$  为房间等效热容,  $\text{J}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2)$ ;  $R$  为等效

热阻,  $(\text{℃} \cdot \text{m}^2)/\text{W}$ ;  $T_{in}^t$  为  $t$  时刻用户室内温度,  $\text{℃}$ ;  $T_{in,\min}$  为用户接受的最小室内温度,  $\text{℃}$ ;  $T_{in,\max}$  为用户接受的最大室内温度,  $\text{℃}$ .

## 4 算例分析

### 4.1 基础数据

在调度过程中设定日前的分散式电采暖负荷、集中式电采暖负荷以及其他负荷都是相对确定的;并将集中式电采暖负荷和分散式电采暖负荷分别视为一个整体进行调度.

仿真算例中集中式电采暖面积 90 万  $\text{m}^2$ , 合计最大功率 96 MW, 储热罐最大储热量 540 MWh; 分散式电采暖用户 10 万  $\text{m}^2$ , 合计最大功率 10 MW, 用户的舒适温度范围为 18~24  $\text{℃}$ , 假设用户在未参与负荷聚合前室内温度恒定保持为 20  $\text{℃}$ . 负荷相关数据如图 2 和图 3 所示.

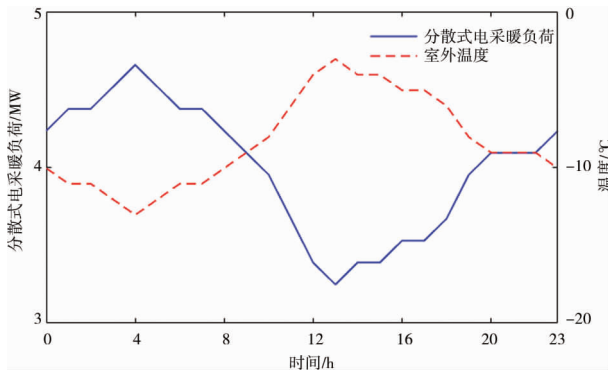


图 2 室外温度与分散式电采暖负荷曲线

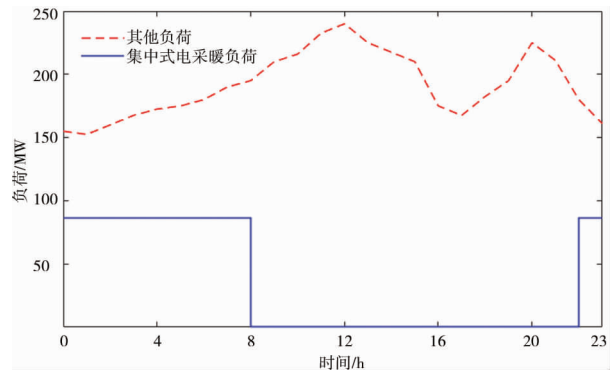


图 3 集中电采暖负荷与其他负荷曲线

仿真算例中风电装机容量 220 MW, 采用拉丁超立方采样法生成风电出力的 10 个场景及概率, 场景 1~10 的概率分别为 0.3%, 3.4%, 0.9%, 0.5%, 16.1%, 21.6%, 7.3%, 20.5%, 19.9%, 9.4%, 场景如图 4 所示.

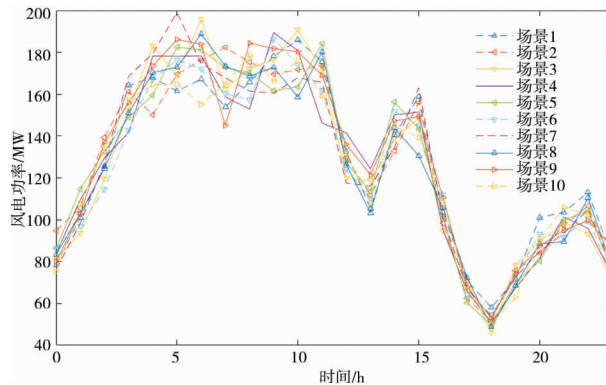


图 4 拉丁超立方采样模拟生成的风电出力

仿真算例中共有火电机组相关参数如表 1 所示.

表 1 火电机组参数

机组编号	$P_{\text{cond},j,\min} / \text{MW}$	$P_{\text{cond},j,\max} / \text{MW}$	$P_{\text{cond},j,\text{down}} / (\text{MW}/\text{min})$	$P_{\text{cond},j,\text{up}} / (\text{MW}/\text{min})$
1# 机组	100	300	5	6
2# 机组	100	300	5	6

其余参数:参考风电上网电价,弃风罚值  $C_1$  取 0.5 元/kWh;备用罚值  $C_2$  取 0.1 元/kWh;参考可中断负荷参与辅助服务市场的价格,电采暖的补偿  $C_{\text{heat}}^t$  和  $C_{\text{user}}$  取 0.15 元/kWh,若是将热源站的电采暖负荷从低谷时刻(22:00~8:00)调度到峰时(8:00~22:00),需要额外支付峰时输配电价,此时  $C_{\text{heat}}^t$  取 0.262 元/kWh;增加用电量的罚值  $C_4$  取 0.2 元/kWh.

## 4.2 结果分析

为了分析电采暖负荷参与聚合调度对消纳风电的影响,本文分析了4种情景下的风电消纳情况.

情景1:只考虑对风电和火电进行调度,不考虑对电采暖负荷的调度.目标函数如式(21)所示.

$$\min F = C_1 F_1 + C_2 F_2. \quad (21)$$

情景1涉及的约束条件包括3.2节中的供需平衡约束、火电机组运行过程中出力约束、火电机组爬坡约束、火电机组最小启停时间约束和风电出力约束.

情景2:除了考虑对风电和火电进行调度,还考虑对集中式电采暖热负荷进行调度.目标函数如式(22)所示.

$$\min F = C_1 F_1 + C_2 F_2 + F_3. \quad (22)$$

情景2涉及的约束条件包括3.2节中的供需平衡约束、火电机组运行过程中出力约束、火电机组爬坡约束、火电机组最小启停时间约束、风电出力约束、电锅炉功率约束、储热罐储热约束和供热负荷约束.

情景3:考虑对风电、火电和分散式电采暖热负荷进行调度.目标函数如式(23)所示.

$$\min F = C_1 F_1 + C_2 F_2 + F_3 + C_4 F_4. \quad (23)$$

情景3涉及的约束条件包括3.2节中的供需平衡约束、火电机组运行过程中出力约束、火电机组爬坡约束、火电机组最小启停时间约束、风电出力约束、电锅炉功率约束和分散式电采暖用户室内温度约束.

情景4:综合考虑对风电出力、火电出力、分散式电采暖负荷和集中式电采暖负荷进行调度.目标函数如式(24)所示.

$$\min F = C_1 F_1 + C_2 F_2 + F_3 + C_4 F_4. \quad (24)$$

情景4涉及的约束条件包括3.2节中的供需平衡约束、火电机组运行过程中出力约束、火电机组爬坡约束、火电机组最小启停时间约束、风电出力约束、电锅炉功率约束、储热罐储热约束、供热负荷约束和分散式电采暖用户室内温度约束.

对上述情景采用MATLAB中的寻优算法进行求解,4个情景的结果如表2所示.

表2 4个情景下的优化调度结果

情景	弃风率/%	期望弃风量/MWh	期望备用容量/MWh	补偿额/万元	增加用电量/MWh	系统总成本/万元
情景1	11.34	334.86	87.09	/	/	17.61
情景2	6.44	190.03	75.14	5.53	/	14.64
情景3	11.02	325.23	93.82	0.16	1.76	17.38
情景4	5.89	173.84	71.98	4.48	0.31	13.90

### 1) 情景1分析

该情景下弃风率为11.34%,期望弃风量为334.86 MWh,期望备用容量为87.09 MWh,考虑弃风损失的系统总成本为17.61万元.可以看出情景1的弃风率保持在较高水平,系统总成本也较高,这是由于在调度时只考虑电源供给侧,没有考虑到负荷侧的清洁采暖热负荷,单一的调度手段缺乏源荷互动,没有实现系统最优.

图5为不同备用罚值下期望弃风量和备用容量的变化情况,可以看出备用罚值越小,期望弃风量越小,期望备用容量越大.随着备用罚值的增大,期望弃风量不断地增大,期望备用容量不断地减少.期望弃风量和期望备用容量呈现相反的趋势,这是由于风电出力具有不确定性,计划安排越多的风电出力意味着需要更多的备用容量.

### 2) 情景2分析

图6为情景2和情景1集中电采暖负荷的对比.情景2下的弃风率为6.44%,期望弃风量为190.03 MWh,期望备用容量为75.14 MWh,对集中电采暖的补偿为5.53万元,考虑弃风损失的系统总成本为14.64万元.相比于情景1,情景2的弃风率、期望备用容量和系统总成本大幅度下降,这是因为情景2不仅考虑用风电、火电满足需求侧负荷,也考虑用需求侧的热负荷满足风电、火电的出力限制的约束.可以看出将集中式电采暖负



荷作为调度管理的一部分是有效的,有利于消纳风电这种出力难以调节的新能源,并且集中电采暖热源站也可获得一定的利益,可以实现各方共赢的效果.

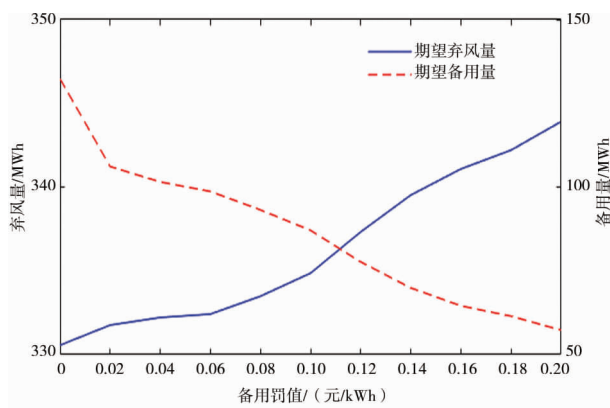


图 5 不同备用罚值下期望弃风量和备用容量

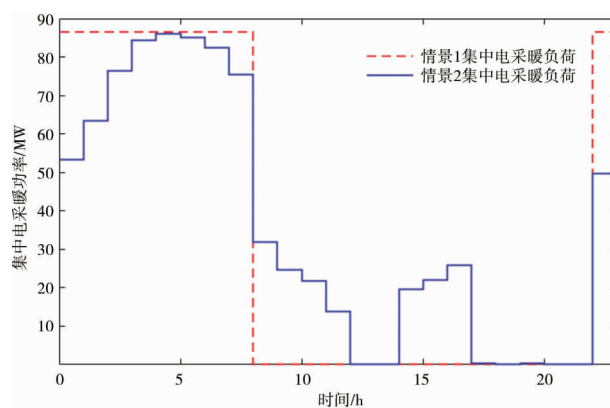


图 6 情景 1 和情景 2 下集中式电采暖负荷对比

### 3) 情景 3 分析

图 7 为情景 3 和情景 1 下的分散式电采暖负荷对比,部分热负荷转移到了风电出力高的时段.情景 3 下的弃风率为 11.02%,期望弃风量 325.23 MWh,期望备用容量为 93.82 MWh,对用户的补偿为 0.16 万元,增加用电量 1.76 MWh,考虑风电损失的系统总成本为 17.38 万元.可以看出通过对分散式电采暖负荷进行聚合调度也可以降低弃风率,但是相比于情景 2 的降低程度较低,这是由于分散式电采暖负荷远远低于集中式电采暖负荷.所以在对负荷侧资源进行调度时,应当优先考虑集中式电采暖负荷,并且集中式电采暖负荷更加集中,也更加容易控制.

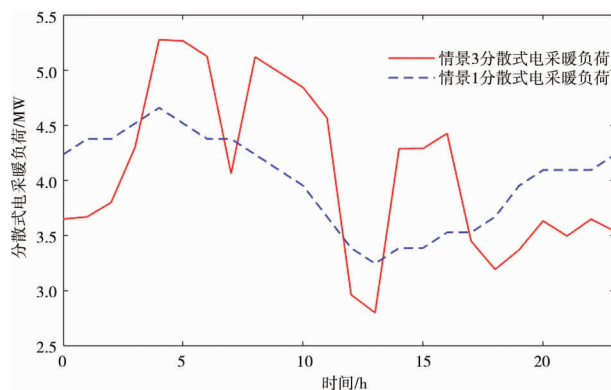


图 7 情景 1 和情景 3 下分散式电采暖负荷对比

### 4) 情景 4 分析

图 8 和图 9 为情景 4 和情景 1 下风电和火电计划出力,以及电采暖负荷的变化情况,可以看出相比情景 1,情景 4 安排的风电出力更多,火电出力更少.结果表明:通过对分散式电采暖负荷和集中电采暖负荷联合调度,可以进一步地降低弃风率,减少考虑弃风损失的系统总成本.在只对集中式电采暖负荷调度的情况下,弃风率降低 4.9%,系统总成本降低 2.97 万元.只对分散式电采暖负荷调度的情况下,弃风率降低 0.32%,系统总成本降低 0.23 万元.而在情景 4 下,弃风率降低了 5.45%,大于情景 2 和情景 3 降低弃风率总和,系统总成本降低 3.71 万元,大于情景 2 和情景 3 降低的系统总成本总和.这说明在保障电网安全稳定运行的情况下,可以调度的需求侧的资源种类和总量越多,越容易排风电机出力,降低系统成本.因此,面对不断增加风电装机容量以及电网峰谷差和负荷,不仅仅需要从电源供给侧进行调度管理,还需要考虑需求侧的清洁采暖电负荷等可调度资源.



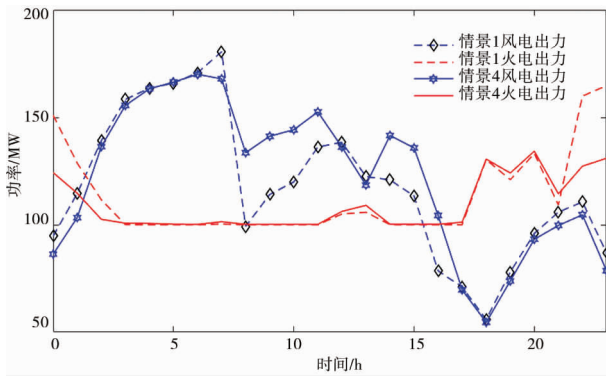


图8 情景1和情景4下风电和火电计划出力对比

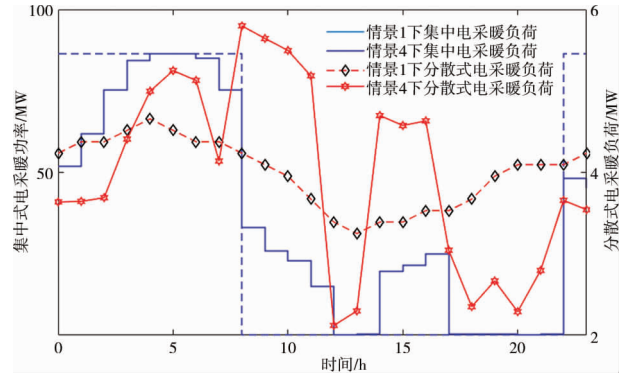


图9 情景1和情景4下电采暖负荷对比

## 5 结论

1) 无论将集中式电采暖负荷还是分散式电采暖负荷作为调度的一部分,都可以有效地实现源荷互动,促进风电消纳,降低系统总成本,并且采暖用户也可以获取一定的经济利益,能够有效实现多方共赢。

2) 集中式电采暖负荷更加容易聚合和控制,在对负荷侧资源进行调度时,应当优先考虑集中式电采暖负荷。

3) 综合调度集中式电采暖负荷和分散式电采暖负荷,可以产生协同优化效应,消纳的风电和减少的系统成本大于仅调度集中式和分散式电采暖负荷的情况。

## 参考文献:

- [1] 李正茂,张峰,梁军,等.含电热联合系统的微电网运行优化[J].中国电机工程学报,2015(14):105-112.
- [2] 黄大为,郭君宜.热电联产机组参与系统调峰的调度策略[J].电力系统及其自动化学报,2014(3):39-43.
- [3] 黄霞,刘学生,包先斌.电代煤清洁供暖技术经济性对比[J].制冷与空调,2018,18(8):43-46.
- [4] 武娟妮,程亮,逯元堂,等.散煤采暖清洁化替代方式的生命周期清单分析[J].中国环境科学,2018,38(4):1570-1578.
- [5] 戢伟.基于电力供暖的促进风电消纳建模与仿真研究[D].济南:山东大学,2014.
- [6] 中国电力投资集团公司.国内最大风电供热示范项目并网发电[J].电世界,2014(4):53-53.
- [7] 杨春伟,刘晓明.北方地区冬季利用风电供热的可行性[J].电工文摘,2012(3):52-53.
- [8] 孙志杰,谢枫,周辛南,等.清洁采暖背景下张家口电采暖竞争力及经济性分析[J].智慧电力,2018,46(5):40-45.
- [9] 杨玉龙,王彤,穆钢,等.基于实测数据的分布式电采暖负荷群调峰能力评估[J].电力建设,2018,39(12):95-101.
- [10] 张宁,周天睿,段长刚,等.大规模风电场接入对电力系统调峰的影响[J].电网技术,2010,34(1):152-158.
- [11] 龙虹毓,徐瑞林,何国军,等.基于热电风电协调调度的系统日调峰能力分析[J].电力自动化设备,2013,33(4):30-34.
- [12] 张新伟,耿万梅.利用蓄热式电采暖提高电网风电接纳能力的研究[J].四川电力技术,2014,37(4):36-39.
- [13] 孙勇,严干贵,郑太一,等.电力市场背景下蓄热式电采暖消纳弃风的经济性分析[J].储能科学与技术,2016,5(4):532-538.
- [14] 严干贵,杨玉龙.电力辅助服务市场下电采暖促进风电消纳的经济性分析[J].全球能源互联网,2019,2(3):309-316.
- [15] 李佳佳,胡林献.基于二级热网电锅炉调峰的消纳弃风方案研究[J].电网技术,2015,39(11):3286-3291.
- [16] 龙虹毓,徐瑞林,何建军,等.利用采暖负荷调度平滑风电出力[J].太阳能学报,2013,34(4):598-603.
- [17] 王彩霞,李琼慧,谢国辉.风电供热提高低谷风电消纳能力评估[J].中国电力,2013,46(12):100-106.
- [18] Sheikholeslami R, Razavi S. Progressive Latin Hypercube Sampling: An efficient approach for robust sampling-based analysis of environmental models[J]. Environmental Modelling & Software, 2017, 93:109-126.
- [19] Kumar R, Chinnappan A K, Akhil M V. Denoising of Direct Simulation Monte Carlo Data Using Proper Orthogonal Decomposition Technique[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2018:1-7.