

基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励方法

罗世刚¹, 窦常永¹, 张雨薇², 李 潇², 黎启明¹, 刘文颖²

¹国网甘肃省电力公司, 甘肃 兰州

²新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京

收稿日期: 2021年8月26日; 录用日期: 2021年9月11日; 发布日期: 2021年9月26日

摘 要

随着风电接入电网比例的不断提高, 冬季供暖期常规电源调峰能力不足造成的风电消纳受阻问题凸显。通过市场交易激励蓄热电锅炉企业挖掘调节潜力参与消纳风电是一种可行的新举措。基于此, 本文提出了基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励方法。首先, 提出基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电控制的市场激励机理及模式, 其次对风电场和蓄热电锅炉企业的收益进行了分析建模, 然后, 提出了基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励方法, 最后利用某区域电网运行数据进行仿真计算, 验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词

蓄热电锅炉负荷, 消纳风电, 市场激励

A Market Incentive Method Based on the Thermal Storage Electric Boiler Load Participating in Wind Power Consumption

Shigang Luo¹, Changyong Dou¹, Yuwei Zhang², Xiao Li², Qiming Li¹, Wenying Liu²

¹State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou Gansu

²State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing

Received: Aug. 26th, 2021; accepted: Sep. 11th, 2021; published: Sep. 26th, 2021

文章引用: 罗世刚, 窦常永, 张雨薇, 李潇, 黎启明, 刘文颖. 基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励方法[J]. 智能电网, 2021, 11(5): 323-333. DOI: 10.12677/sg.2021.115031

Abstract

With the continuous increase of the proportion of wind power connected to the grid, the problem of wind power consumption blocked due to insufficient peak shaving capacity of conventional power sources during the winter heating period has become prominent. It is a feasible new measure to encourage thermal storage electric boiler enterprises to tap the adjustment potential and participate in the consumption of wind power through market transactions. Based on this, this paper proposes a market incentive method based on the thermal storage electric boiler load participating in wind power consumption. First, the market incentive mechanism and mode based on the thermal storage electric boiler load participating in the wind power consumption control are proposed. Secondly, the income of wind farms and thermal storage electric boiler enterprises is analyzed and modeled. Then, a market incentive method based on the thermal storage electric boiler load participating in wind power consumption is proposed. Finally, the operation data of a certain regional power grid is used for simulation to verify the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Keywords

Thermal Storage Electric Boiler Load, Wind Power Consumption, Market Incentives

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大规模风电集中接入后, 常规电源发电占比减少, 系统调峰能力严重不足[1] [2] [3], 在负荷低谷时段, 只能采取弃风措施, 以保证电网的有功功率平衡, 严重制约了风电的消纳水平。

为了缓解大规模风电基地的弃风问题, 国内外学者对控制大规模风电基地附近的多类型可调节高载能负荷用电功率从而提高风电消纳水平进行了大量研究。文献[4] [5] [6]分析了电解铝负荷的调节特性, 建立了电解铝负荷参与消纳风电的源荷协调控制模型, 有效增加了风电消纳; 文献[7] [8] [9] [10]研究了高载能负荷与常规电源在调节能力方面的协调互补特性, 建立了以电源及负荷综合效益最大为目标的提高风电消纳的优化调度模型; 文献[11]在高载能负荷企业主动参与风电消纳的基础上, 提出综合考虑风电价格约束, 在企业内对负荷进行控制, 结果表明这种模式对提高风电外送消纳能力有较好的效果。

除了可调节的高载能负荷以外, 蓄热电锅炉负荷作为负荷侧的优质调节资源, 也可有效参与消纳风电[12] [13] [14]。不少学者研究了风电与蓄热电锅炉负荷协调控制的优化调度方法, 文献[15]考虑风电出力的不确定性, 建立了蓄热电锅炉用电功率和风电发电功率的联合优化调度模型; 文献[16] [17]考虑电极式蓄热电锅炉不能频繁调节的特点, 针对储能融合蓄热式电锅炉, 提出了一种优化控制方法, 使蓄热式电锅炉的用电功率调节能力有效匹配风电发电功率的变化。以上研究从技术角度挖掘了蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的潜力, 但蓄热电锅炉企业参与消纳风电还需要考虑企业本身的成本及收益才能使控制方案得以实施。

为有效激励蓄热电锅炉企业积极参与消纳风电, 本文提出一种基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励方法。首先提出了基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电控制的市场激励机理及模式, 其次对风电场和蓄热电锅炉企业的收益进行了分析建模, 然后, 提出了基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励方法, 最后利用某区域电网运行数据进行仿真计算, 验证了所提方法的可行性和有效性。

2. 基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励机理及模式

2.1. 基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励机理

2.1.1. 蓄热电锅炉负荷随电价的调节特性

蓄热电锅炉负荷一般为“电阻式锅炉 + 相变蓄热材料”的配置形式，用于满足采暖用户的热需求。由于蓄热电锅炉负荷的相变蓄热材料能够蓄热，蓄热电锅炉负荷可以依据热负荷的不同需求及分时电价，在储热约束条件下调节其用电功率。蓄热电锅炉负荷用电功率随电价的调节特性如图 1 所示。

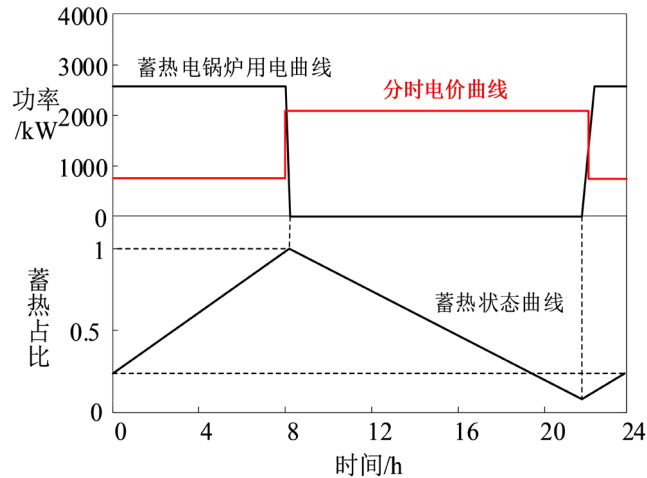


Figure 1. Regulating characteristics of thermal storage electric boiler load power with electricity price
图 1. 蓄热电锅炉负荷用电功率随电价的调节特性

如图 1 所示，在电价谷段 0:00~8:00 及 22:00~8:00，蓄热电锅炉负荷以最大功率运行，供热的同时蓄热；在电价峰段 8:00~22:00，用电功率减小，由蓄热供热。可见，蓄热电锅炉负荷能够利用蓄热材料，在保障供热负荷需求的同时，弹性地调节其用电功率，具有用电功率随电价弹性调节的特性。

2.1.2. 蓄热电锅炉负荷参与消纳风电市场激励机理

对于含大规模风电的系统，风电的发电功率可视为负的负荷，将其与系统负荷叠加后形成等效负荷，常规电源的发电功率应与等效负荷相平衡，如图 2 所示，图中 P_G^{\min} 分别为常规电源最小安全发电功率，当常规电源调节能力用尽，等效负荷仍小于常规电源最小安全发电功率时，造成风电消纳受阻，受阻风电如图中阴影部分所示。

在蓄热电锅炉负荷参与消纳风电前，受阻的风电电量如式(1)所示。

$$E_w = \sum_{t \in T_A} (P_G^{\min} - P_{EL}^t) \Delta t = \sum_{t \in T_A} [P_G^{\min} - (P_L^t - P_W^t)] \Delta t \quad (1)$$

其中， P_L^t 为系统负荷， P_W^t 为风电的发电功率， P_{EL}^t 为等效负荷； T_A 为风电受阻时段集合。

在分时电价的激励下，蓄热电锅炉负荷在电价谷段增加用电功率，增加风电受阻时段的等效负荷，蓄热电锅炉负荷参与消纳风电后风电场的受阻电量如式(2)所示。

$$E_w' = \sum_{t \in T_A} (P_G^{\min} - P_{EL}^{\prime t}) \Delta t = \sum_{t \in T_A} [P_G^{\min} - (P_L^t + \Delta P_H^t - P_W^t)] \Delta t \quad (2)$$

其中， ΔP_H^t 为蓄热电锅炉负荷增加的用电功率。

由式(1)及式(2)可知， $E_w' < E_w$ ，说明在分时电价的激励下，蓄热电锅炉负荷参与消纳风电后可有效减少受阻风电，由图 2 所示，风电受阻电量由区域 1 与区域 2 的叠加部分减小为区域 1。

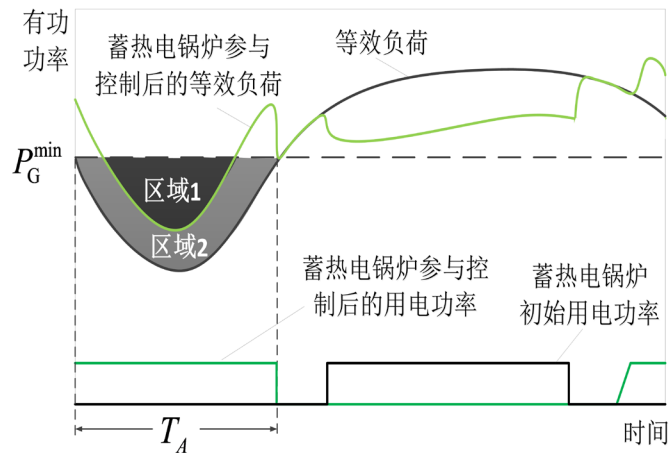


Figure 2. Wind power curtailment curve before and after thermal storage electric boiler load participates in wind power consumption

图 2. 蓄热电锅炉负荷参与消纳风电前后的风电受阻曲线

2.2. 基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励模式

基于前述蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励机理，提出蓄热电锅炉负荷参与消纳风电控制的市场激励模式如图 3 所示。

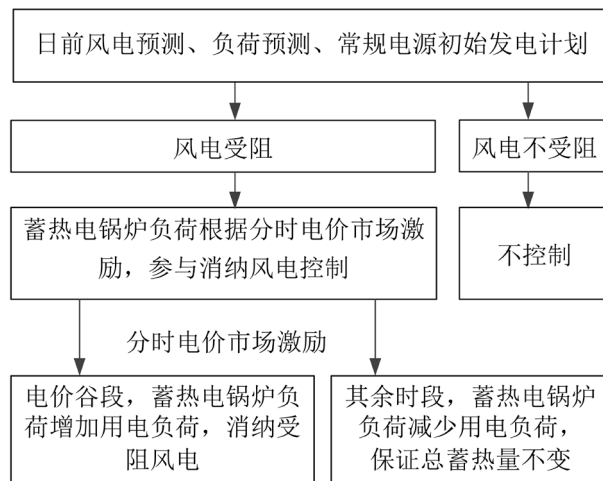


Figure 3. Market incentive mode of thermal storage electric boiler load participating in wind power consumption control

图 3. 蓄热电锅炉负荷参与消纳风电控制的市场激励模式

如图 3 所示，在初始发、用电计划基础上，若风电不受阻，则蓄热电锅炉负荷不参与消纳风电控制；若风电受阻，则蓄热电锅炉负荷根据分时电价的市场激励，参与消纳风电控制，在电价谷段(风电受阻时段)增加用电功率，从而提高风电消纳，在其余时段，蓄热电锅炉负荷减少用电功率，保证总蓄热量不变，实现风电场和蓄热电锅炉企业的成本收益最高。

3. 风电场及蓄热电锅炉企业收益模型

3.1. 风电场的收益模型

风电场的收益为蓄热电锅炉参与消纳风电控制后风电场减少的弃电成本，如式(3)所示。

$$f_1 = (E_w - E'_w) \times c_w = \sum_{t \in T} (P''_w - P'_w) \Delta t \times c_w \quad (3)$$

式中, c_w 为风电场单位弃电成本, E_w 、 E'_w 分别为蓄热电锅炉参与消纳风电控制前、后风电场的弃电量, P'_w 、 P''_w 分别为蓄热电锅炉参与消纳风电控制前、后风电场在 t 时刻的发电功率, T 为日前调度时段集合。

3.2. 蓄热电锅炉企业的收益模型

蓄热电锅炉负荷的收益可以表示为如式(4)所示。

$$f_2 = B_1 - C_1 - C_2 - C_3 \quad (4)$$

式中, $B_1 = \sum_{t \in T} b_f H'_f \cdot \Delta t$ 为蓄热电锅炉负荷的供热收入, b_h 表示单位热量价格, H'_f 为 t 时刻蓄热电锅炉对外供热功率; C_1 为初始投资年折算成本, C_2 为运行维护成本[18]; $C_3 = \sum_{t \in T} c'_H P'_H \cdot \Delta t$ 为蓄热电锅炉企业的计划电费支出, c'_H 、 P'_H 分别为 t 时刻的单位电价、蓄热电锅炉企业的计划用电功率。

4. 基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励方法

4.1. 基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励优化模型

考虑到在蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的场景下, 风电场和蓄热电锅炉企业这两个主体都应获得收益, 将蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励优化模型分为上、下层两个优化模型进行优化。

4.1.1. 上层优化模型

上层模型为在已知蓄热电锅炉负荷用电功率的前提下, 以风电场收益最大为目标的风电发电功率优化模型。

目标函数:

$$\max f_1 \quad (5)$$

约束条件:

1) 系统有功功率平衡约束

$$P'_w + P'_G = P'_L + P'_H \quad (6)$$

式中: P'_G 表示 t 时刻常规电源的发电功率; P'_L 表示 t 时刻系统负荷用电功率。

2) 风电场出力约束

$$0 \leq P'_w \leq P'_{w,f} \quad (7)$$

式中: $P'_{w,f}$ 表示 t 时刻风电场的预测发电功率。

3) 常规电源运行约束

$$\begin{cases} P_G^{\min} \leq P'_G \leq P_G^{\max} \\ -\Delta P_G^{\text{down}} \leq P'_G - P_G^{t-1} \leq \Delta P_G^{\text{up}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: P_G^{\max} 、 P_G^{\min} 分别为常规电源发电功率上、下限; ΔP_G^{up} 、 ΔP_G^{down} 为常规电源最大上、下爬坡率。

4.1.2. 下层优化模型

下层模型为在给定分时电价的前提下, 以蓄热电锅炉企业收益最大化为目标的蓄热电锅炉负荷用电功率优化模型。

目标函数:

$$\max f_2 \quad (9)$$

约束条件:

1) 电热转换约束

$$c_H P_H^t = H_c^t + H_f^t \quad (10)$$

式中: P_H^t 表示蓄热电锅炉的用电功率; c_H 表示蓄热电锅炉的电热转换系数; H_c^t 和 H_f^t 表示蓄热电锅炉的储、放热功率。

2) 用电功率约束

$$0 \leq P_H^t \leq P_{H,\max} \quad (11)$$

式中, $P_{H,\max}$ 表示蓄热电锅炉的最大用电功率。

3) 储、放热功率约束

$$\begin{cases} 0 \leq H_c^t \leq H_{c,\max} \\ 0 \leq H_f^t \leq H_{f,\max} \end{cases} \quad (12)$$

式中, $H_{c,\max}$ 和 $H_{f,\max}$ 分别表示蓄热电锅炉的最大储、放热功率。

4) 实际蓄热量约束

$$\begin{cases} Q_H^{t+1} = (1-\eta)Q_H^t + (H_c^t - H_f^t) \cdot \Delta t \\ H_f^t = qK(T_{set}^t - T_{so}^t) \\ Q_H^{t=0} = Q_H^{t=T} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $Q_H^{t=0}$ 和 $Q_H^{t=T}$ 分别表示调度周期起始时段 $t=0$ 、以及调度周期结束时段 $t=T$ 对应的蓄热电锅炉的蓄热量, η 表示蓄热电锅炉的热损失系数, q 为建筑的单位面积散热指标, 即单位面积在内外温差为 1°C 时的散热量, 单位为 kW/m^2 , 不考虑风速、太阳辐射等因素时可视作常数; K 为建筑供热面积, T_{set}^t 和 T_{so}^t 分别表示 t 时刻供热建筑物室内与室外的计算温度。

4.2. 模型求解

基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励优化模型包含上、下层优化模型以及多个等式与不等式约束, 属于多维非线性的单目标优化规划问题, 模型中求解变量数量较多而且各解之间存在一定的耦合关系, 因此, 选择收敛快、精度高的粒子群算法求解。

粒子群算法通过模拟群体动物合作觅食行为, 将粒子抽象成多维空间内一个有初始位置、速度的点, 位置代表待优化求解的变量, 每个位置对应的适应度值(即优化目标值)用以反映该解的优劣程度[19][20]。将每个粒子在自身迭代中的最优解作为个体的最优解 $pbest$, 迭代中粒子群体的最优解作为全局最优解 $gbest$, 分别表示为:

$$\begin{cases} pbest_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}] \\ gbest_i = [g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{iD}] \\ x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}], v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}] \end{cases} \quad (14)$$

式中: i 表示粒子群中粒子数目, D 是向量维度; x_i 、 v_i 分别为粒子 i 的位置和速度。

迭代到 $k+1$ 次时, 粒子的速度和位置向量中第 d 个元素可以写成:

$$\begin{cases} v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (g_{id}^k - x_{id}^k) \\ x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \end{cases} \quad (15)$$

其中：

$$v_{id}^{k+1} = \begin{cases} v_{id}^{k+1,max}, & v_{id}^{k+1} > v_{id}^{k+1,max} \\ v_{id}^{k+1,min}, & v_{id}^{k+1} < v_{id}^{k+1,min} \end{cases} \quad (16)$$

式中： ω 是惯性权重系数，其值大小影响搜寻能力； c_1 、 c_2 分别表示个体和全局学习因子； r_1 、 r_2 表示 [0, 1] 区间内的均匀随机数； $v_{id}^{k+1,max}$ 、 $v_{id}^{k+1,min}$ 分别为粒子速度上、下限。

利用粒子群优化算法求解基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励优化模型的流程为：

1) 输入各发电机组运行调节参数、风电场、系统负荷预测数据，以及蓄热电锅炉负荷参数等；设置群体大小、个体及全局学习因子、最大最小速度、惯性权重系数、总迭代次数等基本参数；以风电场的发电功率及蓄热电锅炉负荷的用电功率对粒子位置编码，设风电场数量和蓄热电锅炉企业数分别为 N_w 、 N_H ，则 $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}] = [P'_{w1}, \dots, P'_{wN_w}, P'_{H1}, \dots, P'_{HN_H}]$ 。以初始的发、用电计划作为粒子位置初始值，对粒子的位置及速度进行初始化；

2) 计算第 $k + 1$ 次迭代过程中，粒子的适应度(目标函数)值；

3) 将第 $k + 1$ 次迭代时粒子的适应度值与之前的个体最优解比较，如果该解较之前的好，则对粒子的个体最优解进行更新；

4) 将群体最优解与粒子个体最优解比较，并更新；

5) 根据式(15)、(16)更新之前粒子的速度和位置；

6) 判断是否达到迭代次数或适应度足够好的终止条件，若是，则输出群体最优适应度值(即优化得到的目标函数值)和粒子所在的位置(即解向量：风电场的发电功率及蓄热电锅炉负荷的用电功率)；否则，返回步骤 2 继续执行。

利用粒子群优化算法求解基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励优化模型的计算方法流程图如图 4 所示。

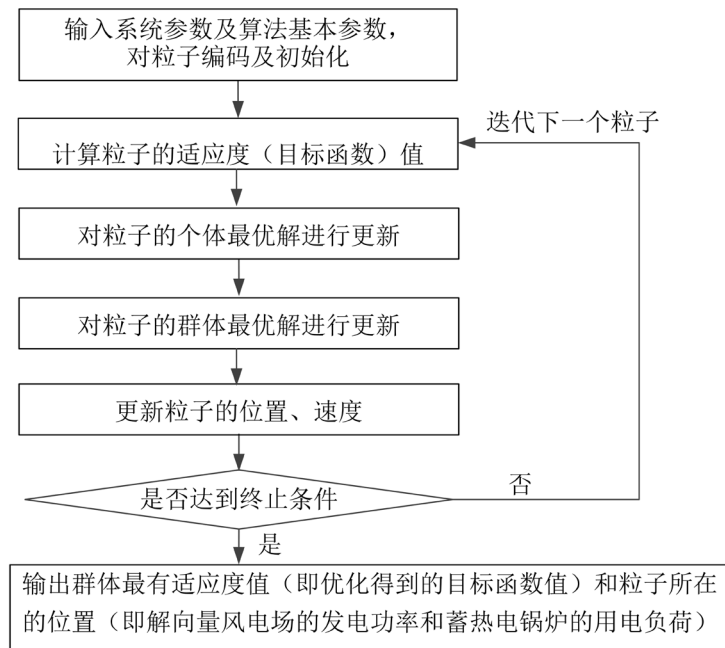


Figure 4. The flow chart of the calculation method of particle swarm optimization algorithm solving the market incentive optimization model

图 4. 粒子群优化算法求解市场激励优化模型的计算方法流程图

4.3. 基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励方法

综上所述，本文所提基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励方法如下，流程图如图 5 所示。

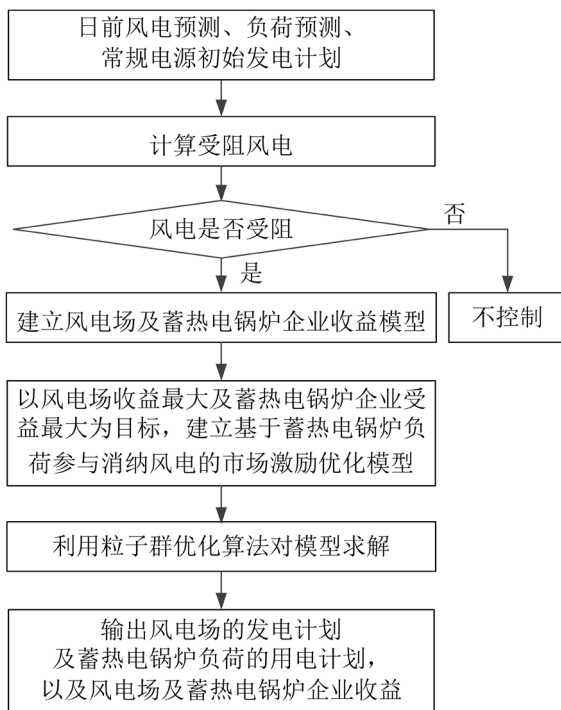


Figure 5. Market incentive method flow chart of thermal storage electric boiler load participating in wind power consumption control

图 5. 基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励方法流程图

5. 算例分析

5.1. 算例简介

本文以某省某地区电网实际运行数据为基础，该地区常规电源和风电的装机容量分别为 14,000 MW、10,000 MW，系统总负荷约为 14050 MW，其中蓄热电锅炉负荷额定用电功率为 560 MW，其供热及调节参数如表 1 所示。基于目前的电价政策，电价谷段的用电电价 0.258 元/kWh，其他时段荷侧蓄热电锅炉用电电价为 0.358 元/kWh，风电场的弃电成本为 0.12 元/kWh。

Table 1. Thermal storage electric boiler load parameters

表 1. 蓄热电锅炉调节参数

最大储热功率/MW	最大放热功率/MW	蓄热容量/MWh	电热转换效率	室内设定温度/°C
280	280	1680	1.0	24

如图 6 所示为一月某日结合当日风电发电功率和系统负荷的用电功率形成等效负荷曲线，等效负荷低于常规电源最小安全发电功率的部分对应受阻的风电，受阻时段为[00:30~08:30]以及[10:30~16:30]。

5.2. 结果分析

采用基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励优化方法，得最优蓄热电锅炉用电计划如图 7。

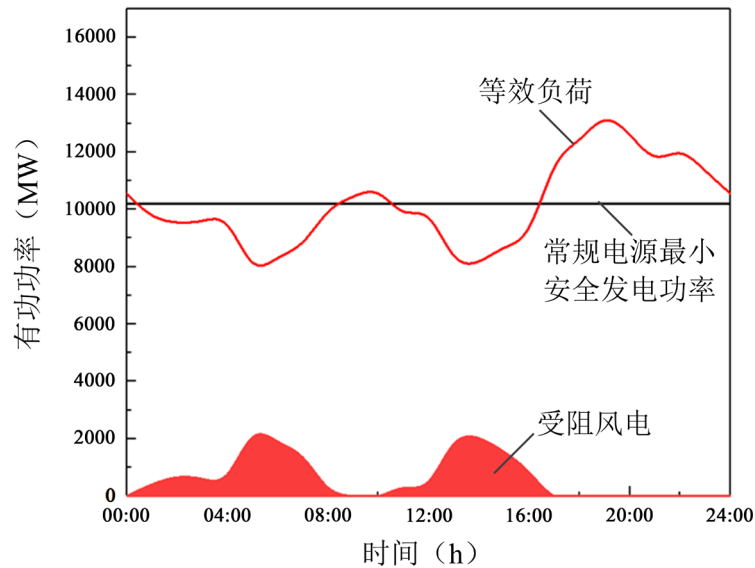


Figure 6. Day-ahead equivalent load curve and wind power curtailment
图 6. 日前等效负荷曲线及受阻风电

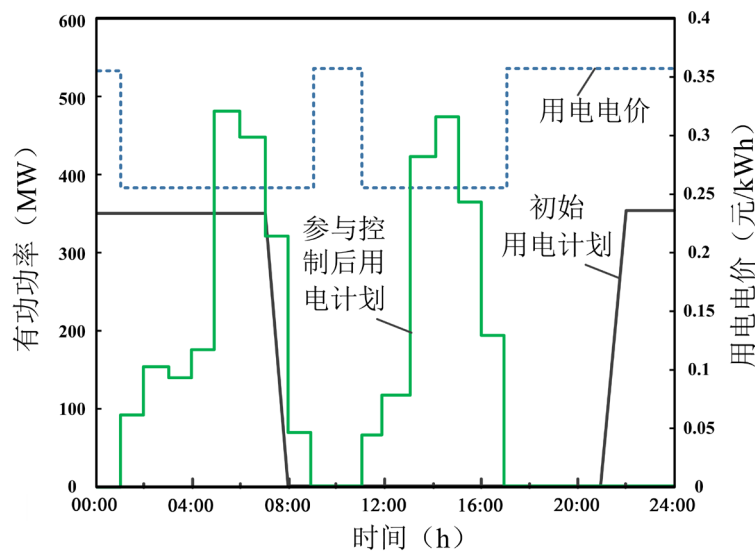


Figure 7. Thermal storage electric boiler load power before and after participating in wind power consumption control
图 7. 参与控制前后的蓄热电锅炉负荷用电功率

由图 7 可以看出, 蓄热电锅炉负荷在分时电价市场激励下, 调整了用电计划, 在电价低谷时段增加用电功率, 在电价高峰时段减少用电功率, 使蓄热电锅炉企业由于减少了用电成本而收益 18.03 万元。

蓄热电锅炉负荷参与消纳风电后, 各风电受阻时段增加消纳的受阻风电电量如表 2 所示。由表 2 可知, 经过蓄热电锅炉参与消纳风电后, 共增加消纳了受阻风电电量 5117.49 MWh, 风电场因减少弃电而收益 61.41 万元。

可见, 在采用了基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励方法后, 有效提升了风电的消纳量, 提升了蓄热电锅炉负荷与风电场的收益。

另外, 对于考虑多主体利益的优化模型, 通常采用分层优化模型及多目标优化模型, 为进一步说明本文基于二层优化模型构建的基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励优化模型的准确性, 下面将

式(5)与式(9)共同作为目标函数,构建基于多目标优化模型的基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励优化模型,仍采用粒子群算法求解,将其结果与本文构建的二层优化模型进行对比,如表3所示。

Table 2. Curtailed wind power energy consumption

表 2. 增加消纳的受阻风电电量

时段	消纳电量/MWh	时段	消纳电量/MWh
00:30~01:30	94.34	07:30~08:30	105.38
01:30~02:30	96.31	08:30~09:30	105.19
02:30~03:30	215.91	09:30~10:30	106.93
03:30~04:30	537.10	10:30~11:30	557.30
04:30~05:30	547.36	11:30~12:30	558.92
05:30~06:30	546.18	12:30~13:30	555.19
06:30~07:30	541.83	13:30~14:30	549.55

Table 3. Comparison of results between multi-objective and two-layer optimization models

表 3. 多目标优化模型与二层优化模型结果对比

	蓄热电锅炉企业受益	风电场收益	整体收益
多目标优化模型	14.17 万元	62.06 万元	76.23 万元
双层优化模型	18.03 万元	61.41 万元	79.44 万元

由表3可以看出,基于多目标优化模型构建的基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励优化模型蓄热电锅炉企业与风电场的整体收益较小,即最优结果准确性较低,是由于其求解结果为两个目标的折中最优解,容易得到局部最优解而非全局最优解,而基于二层优化模型构建的基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励优化模型蓄热电锅炉企业与风电场的整体收益较大,即最优结果准确性较高,是由于其求解结果为两个目标交替迭代求解,直至得到最终解,综上说明本文提出的基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励优化模型具有较高的准确性。

6. 结论

本文在研究基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励机理及模式基础上,提出了基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励方法,并以某省地区电网运行数据为基础进行了仿真分析,得以下结论:

- 1) 蓄热电锅炉负荷的用电功率可以随电价弹性调节,能够在风电受阻时段参与消纳受阻风电。
- 2) 通过基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的市场激励方法,有效提升了风电的消纳量,提升了蓄热电锅炉负荷与风电场的收益。

本文所提方法对提升大规模风电接入电网的消纳水平具有一定的指导意义,并且具有经济可行性。

基金项目

国网甘肃省电力公司科技项目(SGYXGSDJS2000012)。

参考文献

- [1] 张丽英,叶廷路,辛耀中,韩丰,范高锋.大规模风电接入电网的相关问题及措施[J].中国电机工程学报,2010,30(25): 1-9.

- [2] 张宁, 周天睿, 段长刚, 唐晓军, 黄建军, 卢湛, 康重庆. 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.
- [3] 孙荣富, 张涛, 梁吉. 电网接纳风电能力的评估及应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 70-76.
- [4] Liao, S., Xu, J., Sun, Y., *et al.* (2018) Control of Energy-Intensive Load for Power Smoothing in Wind Power Plants. *IEEE Transactions on Power Systems*, **33**, 6142-6154. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2834940>
- [5] Bao, Y., Xu, J., Sun, Y.Z., *et al.* (2016) An Industrial Verification of Frequency Regulation by Electrolytic Aluminum in an Isolated Power System. *IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, Boston, 17-21 July 2016, 1-5. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2016.7741632>
- [6] Xu, J., Liao, S.Y., Sun, Y.Z., *et al.* (2015) An Isolated Industrial Power System Driven by Wind-Coal Power for Aluminum Productions: A Case Study of Frequency Control. *IEEE Transactions on Power Systems*, **30**, 471-483. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2322080>
- [7] 刘文颖, 文晶, 谢昶, 等. 基于源荷互动的含风电场电力系统多目标模糊优化调度方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10): 56-63+68.
- [8] 文晶, 刘文颖, 谢昶, 等. 计及风电消纳效益的电力系统源荷协调二层优化模型[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 247-256.
- [9] 文晶. 风电集群接入电力系统的源荷协调优化调度模型研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [10] 刘文颖, 文晶, 谢昶, 等. 考虑风电消纳的电力系统源荷协调多目标优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1079-1088.
- [11] 马林东, 葛智平, 张世才, 等. 基于高耗能企业参与电网内风电消纳的主动调峰技术[J]. 电力建设, 2013, 34(10): 102-106.
- [12] 祁兵, 何承瑜, 李彬, 石坤, 陈宋宋, 薛溟枫. 蓄热电锅炉参与能源互联的应用模式探究及发展趋势分析[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(4): 61-69.
- [13] 崔杨, 庄妍, 陈志, 仲悟之, 崔成伟, 赵钰婷. 基于蓄热式电锅炉电-热时移特性的弃风消纳方案经济性分析[J]. 热力发电, 2019, 48(6): 9-17.
- [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] 陈守军, 辛禾, 王涛, 杨俊, 彭道鑫, 谭忠富. 风电、蓄热式电锅炉联合供暖调度鲁棒优化模型[J]. 电力建设, 2016, 37(1): 103-109.
- [16] 李国庆, 庄冠群, 田春光, 王鹤. 基于大规模储能融合蓄热式电锅炉的风电消纳多目标优化控制[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 46-52+59.
- [17] 张洋, 耿娜, 马雪, 谢志佳, 杨锡运. 基于赌轮盘思想的大规模储能协同蓄热式电锅炉的风电消纳优化运行研究[J]. 电器与能效管理技术, 2018(1): 44-50.
- [18] 程中林. 固体电储热系统提升风电消纳的可持续运行研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [19] Wang, J., Fang, K., Pang, W., *et al.* (2017) Wind Power Interval Prediction Based on Improved PSO and BP Neural Network. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, **12**, 989-995. <https://doi.org/10.5370/JEET.2017.12.3.989>
- [20] Man-Im, A., Ongsakul, W., Singh, J.G., *et al.* (2019) Multi-Objective Optimal Power Flow Considering Wind Power Cost Functions Using Enhanced PSO with Chaotic Mutation and Stochastic Weights. *Electrical Engineering*, **101**, 699-718. <https://doi.org/10.1007/s00202-019-00815-8>