

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201046

蓄热式电采暖负荷参与风电消纳运行策略研究

宋杰¹, 张卫国¹, 李树鹏², 于建成², 张伟², 李化¹

(1. 国网电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 211000; 2. 国网天津市电力公司, 天津 300010)

摘要: 为了就地消纳大规模风力发电功率和提升电网调峰能力, 将蓄热式电采暖与具有反调峰特性的风电进行结合, 提出了风电与蓄热电采暖联合运行模式。模式中考虑风电机组、火电机组以及电采暖的相关约束, 以系统总的发电成本最小为目标, 构建了蓄热式电采暖负荷参与风电消纳优化运行模型。通过运用适应模型求解的遗传算法求解该模型, 得到蓄热式电采暖负荷参与电网互动优化运行方案。仿真结果表明, 基于蓄热式电采暖负荷参与风电消纳的运行策略是有效和实用的。该策略从电源侧的角度提高了系统的风能消纳水平, 从电网侧的角度提升了系统的调峰能力, 缓解了风电并网对系统造成的调峰压力。

关键词: 蓄热式电采暖; 风电消纳; 系统调峰; 需求响应

Research on operational strategy for regenerative electric heating load participating in wind power consumption

SONG Jie¹, ZHANG Weiguo¹, LI Shupeng², YU Jiancheng², ZHANG Wei², LI Hua¹

(1. State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211000, China;

2. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China)

Abstract: In order to absorb large scale wind power generation and improve the peak shaving capacity of the grid, regenerative electric heating is combined with wind power possessing anti-peak regulation characteristics and a joint operation mode is established. In this mode, we consider the related constraints of wind turbines, thermal turbines, and regenerative electric heating. This has the goal of minimizing the total power generation cost of the system. An optimal operation model of regenerative electric heating load participating in wind power consumption is constructed. The adapting genetic algorithm is used to solve the model and the regenerative electric heating load participation in the grid interactive optimization operation strategy is obtained. The simulation results show that the operational strategy is effective and practical, and improves the wind power absorption level of the system from the perspective of the power source side, enhances the peak regulation ability of the system from the perspective of the grid side, and alleviates the peak shaving pressure caused by wind power connection to the power system.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China “Optimal Configuration and Interactive Key Technologies Research and Application of Regenerative Electric Heating” (No. SGTJDK00DWJS1900101).

Key words: regenerative electric heating; wind power consumption; system peak shaving; demand response

0 引言

我国“三北”地区风力资源丰富, 同时该地区冬季的生产和生活都需要供暖保证, 供暖具有普及程度高和规模较大的特点, 但是由于“以热定电”

政策的限制, 弃风现象较为严重^[1-2]。就其原因而言, 一方面, 这个地区的电源配置存在一定的不合理性, 柔性电源的比例比较低, 一定程度上影响了其灵活调节的能力。在冬季供暖期, 热电联产机组总量大、占比高, 调节能力受“以热定电”的影响而进一步减弱, 使得风电上网受到一定程度的限制。另一方面, 由于风力发电设备技术方面的不断革新, 提高了风力发电的效率, 导致这些地区的风电发电量持

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助“蓄热式电采暖优化配置及互动关键技术研究与应用”(SGTJDK00DWJS1900101)

续快速上升, 但是当地受到地理位置以及经济发展水平的约束, 用电需求量有限, 不能够接受储备量如此丰富的风电; 而且如果将风电进行远距离输送, 又受制于输电走廊的建设, 目前还达不到这样的要求, 这就造成了风能的浪费^[3-5]。

蓄热式电采暖利用晚上被浪费的风能将电能转换为热能储存起来, 在白天断电释放热量, 为用户供暖, 具备对负荷进行一定程度整形的作用^[6-7], 如果对蓄热式电采暖利用得当, 可以取得很好的“削谷填峰”和风电消纳的效果, 为系统的安全稳定运行创造了条件。目前, 国内外已有相关学者对风电消纳和蓄热式电采暖系统的运行进行了相关研究。文献[8]以大规模集群型风电为研究对象, 分析了多时空尺度下的大规模集群风电的出力特性, 为风电消纳研究提供了出力分析依据。文献[9]在分析源荷协调运行特性的基础上, 提出了面向风电就地消纳的电力系统源荷协调多目标优化运行调度方法。文献[10]提出引入储热系统, 通过对储热环节的控制, 达到提升风电的消纳率的目标, 与之类似, 文献[11]则提出使用具备负荷转移能力的冰蓄冷空调作为可调节负荷, 对风电进行消纳。

风电消纳能力方面, 文献[12]提出了考虑电力网络安全约束的风电就地消纳评估方法。文献[13]将调峰时段因素纳入风电模型中, 提出了考虑调峰时段限制的风电出力消纳方法, 算例表明该方法能够大幅提高风电的就地消纳水平。文献[14-15]提出了考虑采暖季的风电就地消纳评估方法, 分析了采暖系统对风电消纳的影响。文献[16]计及需求侧资源, 考虑电价激励, 提出了基于需求侧资源整合的大规模风电就地消纳机组调度模型, 以充分发挥需求侧资源效益, 提升风电的消纳能力。

考虑到风电的反调峰特性, 多位学者对该特性下的风电消纳和电网调峰定价做了研究。文献[17]以 2017 年东北电网的风电出力特性和电网及负荷特性为依据, 提出了考虑电网调峰约束的风电消纳措施。文献[18]考虑蓄热因素, 采用风险价值分析的方法量化了弃风的不确定性风险, 并探讨了发电厂调峰的定价机制。文献[19]分析了促进风电大规模消纳的两层调峰补偿机理, 引入分摊系数对调峰机组进行补偿, 促进风电消纳分配的公平性。

蓄热电采暖运行方面, 文献[20]提出了基于三联供的蓄热设备优化运行方法。文献[21]使用线性规划(LP)方法优化了部分储电空间下的蓄热电采暖供热运行情况, 将直接电加热和局部蓄热的需求响应控制相结合, 在不牺牲用户舒适度的情况下最大程度地降低客户的总能源成本。文献[22]就含风电、

储能和蓄热式电采暖的系统优化运行能量管理架构进行了研究, 提出了以每日运行费用最小为目标的优化运行模型。文献[23]通过需求响应技术(DR)改变用户用能消费方式, 基于博弈论优化了储热空间供暖客户的消费电价, 以使零售商的利润最大化, 同时通过为消费者提供进一步的能源运行费用折扣来改善每小时的负荷峰谷差。文献[24]对蓄热电采暖的蓄热罐加热过程进行了动态模拟, 指出了蓄热罐的有效利用率和热过程放热的关系, 为蓄热地采暖的数学模型搭建提供了依据。

电采暖和风电协调运行方面, 目前已有学者对运行策略和运行模式等方面进行了研究^[25-27]。文献[28]提出将蓄热电锅炉纳入电网的调峰手段, 将其采用虚拟电厂的方式进行管理以承担部分调峰功率。文献[29]提出了一种蓄热电采暖与水电和风电一起运行的评估方法, 以满足电网中负荷的增长。通过对地区电网的案例研究, 指出碳排放交易体系和风能可以满足其未来的能源平衡需求, 发挥各种能源的互补作用。通过对蓄热电采暖系统进行动态控制可以消纳风能, 在减少柴油消耗, 从而减少温室气体排放方面特别有效。文献[30]考虑热网约束, 进行了蓄热电采暖系统接入电力系统的运行优化建模, 并分析了其与风电协同运行对电网的影响。

综上所述, 我国“三北”地区风能储备量充足, 而且有利于大规模开发和利用, 但在风电快速发展的同时, 风电的消纳问题日益严重。目前对于风电消纳, 已有学者考虑通过需求侧资源来协助风电的就地消纳, 而蓄热电采暖正是一种非常有效的需求侧可调节资源, 通过蓄热和储能这一关键环节, 能够提高电网对于风电的接受程度, 减少能源浪费现象, 同时对负荷进行整形, 提高了低谷发电量, 缓解了负荷高峰的发电压力, 起到了“削谷填峰”的作用, 并为系统的安全稳定运行创造了条件。

本文从蓄热式电采暖负荷参与电网运行优化切入, 将蓄热式电采暖作为一种可调节的负荷, 与具有反调峰特性的风电结合起来, 利用它们的互补特性满足用户供暖和风能的高效利用, 提升电网的风电消纳率。在发电侧接入了风电机组的情况下, 本文在负荷侧增加蓄热式电采暖负荷, 形成了联合运行模式, 然后以系统总的发电成本最小为优化目标, 结合风电机组、火电机组以及电采暖的相关约束, 构建了优化模型, 运用适应模型求解的遗传算法求解该模型, 得到蓄热式电采暖负荷参与电网互动优化运行方案, 从电源侧的角度提高了系统的风能消纳水平, 从电网侧的角度提升了系统的调峰能力,

缓解了风电并网对于系统造成的调峰压力。

1 风电与蓄热电采暖联合运行模式

由于中国内陆各个地区在不同时间段的光照、温度不一，各地风速的变化也不同，风力发电存在相对的变化规律。根据风力发电在最大负荷与最小负荷时发电的变化规律，风电的调峰特性分为正调峰、过调峰与反调峰三种。在中国内陆，自然风高度超过 30 m 的地区，就风速而言，通常夜间的风速快，白天的风速慢；就风力大小而言，中午温度最高，自然风最小，处于风力发电的低谷期，夜晚温度最低，自然风最大，处于风力发电的高峰期。所以，内陆风力发电的调峰特性大多为反调峰^[31-34]。

蓄热电采暖是一种高效环保的供暖方式，它通常在夜间利用比较便宜的电力将蓄热体加热到比较高的温度，然后在峰电时将蓄热体中的热能释放出来。根据蓄热体的不同，蓄能热电采暖主要有显热式和相变式两种类型。显热蓄热式电采暖通常通过吸热能力比较强的物质、密度与比热的乘积比较大的物质，例如水与油来存储热量；相变蓄热式电采暖在发生相变时，从周围的物体吸收并存储热量的能力来存储热量，例如在发生一级相变时，1 kg 的冰变为水会存储 79.6 KCAL 的热量。蓄热装置的电采暖具有可调节负荷的特性，因此，在一定的单位时间内，城市集中供热系统的用户在所需的热量条件一定的情况下，可以根据需要调节电加热系统在不同时段的功耗。供热和热负荷之间的平衡由储热装置完成，可以改变高峰时的负荷和低谷时的负荷差，达到一定程度的负荷整形^[35-37]。

由于风力发电往往呈现与电力调峰相反的特性，即在夜晚负荷低谷时期，风力和风速都很强劲，风力发电量上升，拉大了电网负荷的峰谷差值，给系统的调峰制造了极大的压力，所以电网接纳风力发电功率的能力不足，而蓄热电采暖的性质则与可调节负荷类似，它消耗的负荷功率可以依据电网的需要进行调节，以此起到调峰调频的作用，由此可见，两者具备较好的互补特性。本文在电源侧设置了风电、火电以及电网三个来源，在负荷侧增加了蓄热式电采暖负荷，通过它们的联合运行优化来提高电网对风电的消纳能力，风电与蓄热电采暖联合运行模式示意如图 1 所示。

2 蓄热式电采暖负荷参与风电消纳优化运行模型

风电与蓄热电采暖联合运行模式下，为充分发

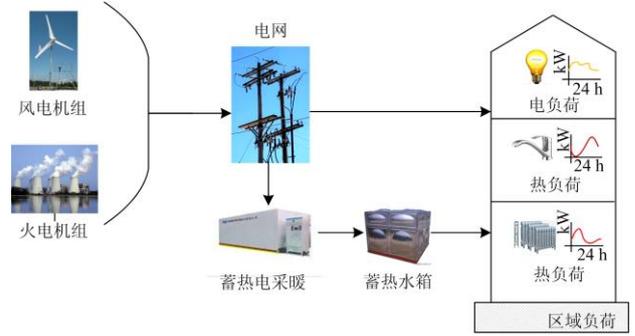


图 1 风电与蓄热式电采暖联合运行模式

Fig. 1 Combined operation mode of wind power and regenerative electric heating

挥蓄热电采暖的移峰填谷特性，制定以全系统总煤耗最低为优化目标的联合优化运行模型，考虑了源荷侧的功率平衡约束、火力发电机组出力约束、风电实时出力约束和蓄热电采暖运行约束等各种约束条件，其中，优化目标函数如式(1)所示。

$$\min F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I u_{i,t} (a_i p_{i,t}^2 + b_i p_{i,t} + c_i) \quad (1)$$

式中： T 为时段数； I 为机组数； $u_{i,t}$ 为机组 i 在 t 时段的状态变量，1 表示运行状态，0 表示停机状态； $p_{i,t}$ 为机组 i 在 t 时段的出力； a_i 、 b_i 、 c_i 为机组 i 的煤耗函数的系数。

约束条件如下。

1) 源荷侧的功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^I u_{i,t} p_{i,t} (1 - \xi_f) + p_{w,t} (1 - \xi_w) = p_{load,t} + p_{h,t} \quad (2)$$

式中： $p_{w,t}$ 为 t 时段风电场实时出力； ξ_f 为火电机组的厂用电率； ξ_w 为风电场的厂用电率； $p_{load,t}$ 为 t 时段的非电采暖负荷； $p_{h,t}$ 为 t 时段的蓄热电采暖负荷。

2) 火力发电机组出力约束

$$p_{i,\min} \leq p_{i,t} \leq p_{i,\max} \quad (3)$$

式中： $p_{i,t}$ 为机组 i 在 t 时段的出力； $p_{i,\min}$ 为机组 i 的出力下限； $p_{i,\max}$ 为机组 i 的出力上限。

3) 风电实时出力约束

$$p_{w,t} \leq p_{w,t} \quad (4)$$

式中： $p_{w,t}$ 为 t 时段风电场实时出力； $p_{w,t}$ 为 t 时段风电场预测功率出力上限。

(4) 蓄热电采暖实时运行约束

蓄热电采暖在某时段的耗电功率不大于其额定功率，即

$$0 < p_{h,t} \leq P_h \quad (5)$$

式中: $p_{h,t}$ 为 t 时段的蓄热电采暖运行功率; P_h 为蓄热电采暖的额定功率。

5) 蓄热电采暖日运行能量平衡约束

蓄热电采暖的日耗电量等于总用热需求量, 即

$$\sum_{t=1}^T p_{h,t} = Q_h \quad (6)$$

式中: $p_{h,t}$ 为 t 时段的蓄热电采暖负荷; Q_h 为用户总用热需求量转换而来的蓄热电采暖日电功率总量。

目标函数式(1)和约束条件式(2)一式(6)构成了风电与蓄热电采暖联合运行模式下的优化模型。

3 蓄热式电采暖负荷参与风电消纳运行模型优化算法

蓄热式电采暖负荷参与风电消纳运行模型在火电机组和电网的基础上考虑了风电机组, 将普通电负荷以及电采暖负荷作为统一负荷, 电网接纳分别来自火电机组和风电机组两者的功率, 并且向所有的负荷供电, 而风电机组的一部分电力被系统所接纳, 另一部分则直接用来供应蓄热式电采暖负荷所需要的电量。该模型以系统总成本最小为目标, 综合考虑了火电机组的功率约束、风电机组的功率约束以及电采暖负荷的功率约束, 模型特点为优化变量较多, 过程较为复杂, 因此本文选择优化模型求解方法中的智能优化算法——遗传算法对模型进行求解。本文在 Matlab 中编写了模型的求解程序, 根据模型特点对传统遗传算法进行了一些修改以适应模型求解特点, 选择最适宜本模型的最佳最小保留代数以及最大遗传代数来明确进化标准, 在获得收敛解的同时缩短求解时间, 通过求解模型得到了电采暖的实时功率、风电机组的实时功率以及系统总的发电成本, 模型的求解过程如图 2 所示。

4 算例研究

为了详细分析本文所提蓄热式电采暖参与风电消纳的运行情况, 采用天津市某含蓄热式电采暖和风电的典型综合能源系统作为实例场景, 一天当中风电实时功率与负荷预测功率曲线如图 3 所示, 火电机组参数如表 1 所示。蓄热式电采暖的功率上限 $P_h = 300 \text{ MW}$; 日耗电需求 $Q_h = 1500 \text{ MWh}$; 厂用电率 $\xi_f = 5\%$, $\xi_w = 5\%$, 机组数 $I = 10$, $T = 24$ 。算法采用精英选择法, 保留每一代中优秀的个体, 交叉算子采用两点交叉, 相邻的两个个体交叉, 交叉率选择 0.8, 变异概率取 0.04, 种群中个体的数量为 40, 带大遗传截止代数为 100, 收敛判据为相邻

两代的最优个体的适应度函数值差异小于 1%。

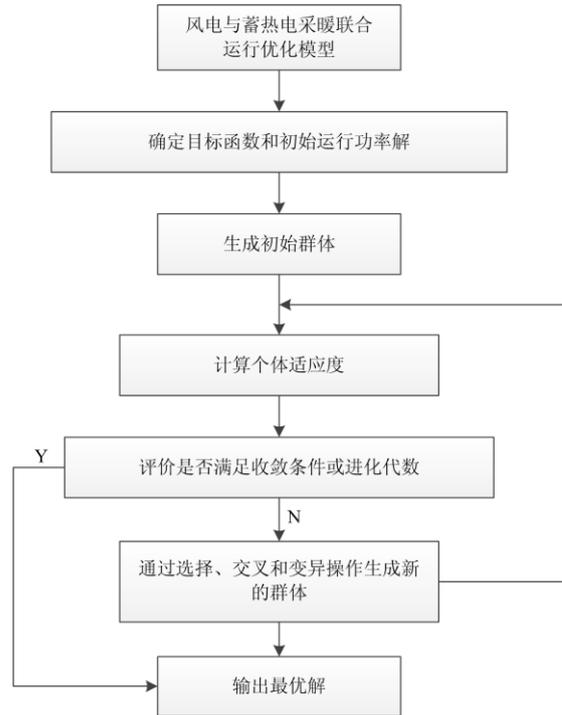


图 2 基于遗传算法的优化运行模型求解流程

Fig. 2 Optimization operation model solving process based on genetic algorithm

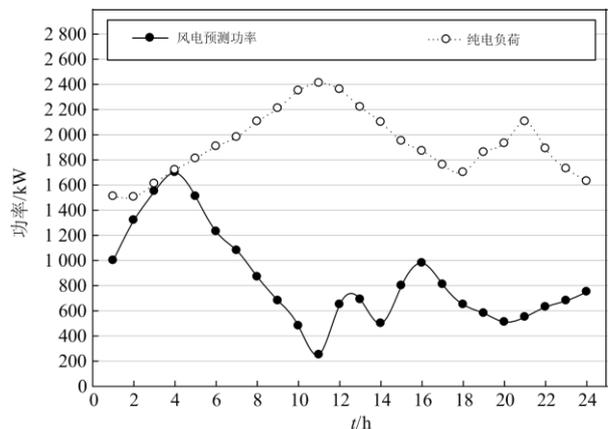


图 3 某典型综合能源系统日风电及电负荷预测曲线

Fig. 3 Daily wind power and electricity load forecast curve of a typical integrated energy system

表 1 火电机组参数

Table 1 Thermal power unit parameters

P_{\max}/MW	P_{\min}/MW	$a/10^{-5}$	b	c
180	70	4.150	0.332	3.54

通过求解该优化模型, 可以得到经优化后的一天 24 个时段蓄热电采暖的耗电功率、蓄热式电采暖

优化前后的风电接纳水平、蓄热电采暖优化后的负荷曲线变化情况和系统总煤耗及煤耗率等。本文的优化结果为优化模型的收敛解，即达到了优化收敛条件后的最优解，其中，蓄热式电采暖优化前后的风电接纳水平如图 4 所示，系统总煤耗及煤耗率如表 2 所示。

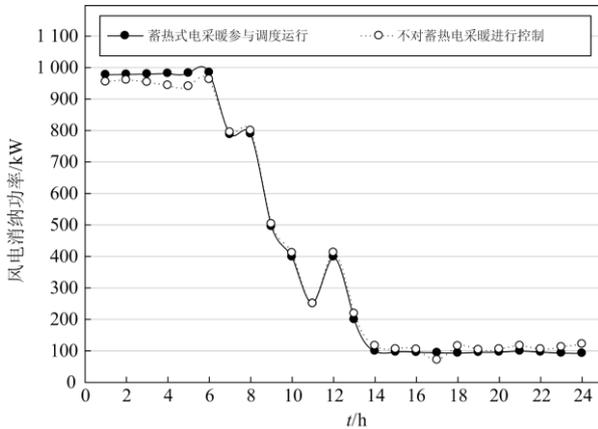


图 4 蓄热式电采暖优化前后的风电接纳水平对比

Fig. 4 Comparison of wind power acceptance levels before and after the optimization of regenerative electric heating

图 4 给出了蓄热式电采暖优化前后电网对风电的消纳水平对比，可以直观地看到蓄热式电采暖参与系统运行优化之后，系统对于风电的消纳水平有了一定的提高，尤其在夜间风力充裕的时候，这种变化更加明显。因此，蓄热式电采暖的应用可以有效地提高电网对于风电的接受水平，提高风电的上网电量，节省了系统应对风电不稳定性的备用容量，间接提升了电网的调峰能力，对于电力系统的高效、可靠运行产生了积极的影响。

表 2 优化前后的系统总煤耗及煤耗率

Table 2 System total coal consumption and coal consumption rate before and after optimization

采暖方式	系统总煤耗/t	火电发电煤耗率/(g/kWh)
蓄热式电采暖参与优化运行	13 026	150
蓄热式电采暖不参与优化运行	13 934	161

表 2 给出了系统优化运行后总的发电成本，对比蓄热式电采暖是否参与优化运行这两种情况，可以看出电采暖负荷参与优化调度后，火电的发电煤耗率有所下降，从整体来看，系统的总煤耗也有明显的下降，提高了系统运行的经济性，达到了预期的优化结果。

表 3 给出了本文所提算法和传统遗传算法对本模型求解的性能对比，可以看出本文根据模型特点对传统遗传算法进行了一些改进，获得了较快的收敛速度，不管是在单次最快收敛代数或是平均收敛代数方面算法性能均有所提高。

表 3 算法性能对比

Table 3 Algorithm performance comparison

算法	最快收敛代数	平均收敛代数
本文所提算法	26	32
传统遗传算法	48	57

对蓄热式电采暖系统进行优化调度后，系统负荷曲线如图 5 所示。

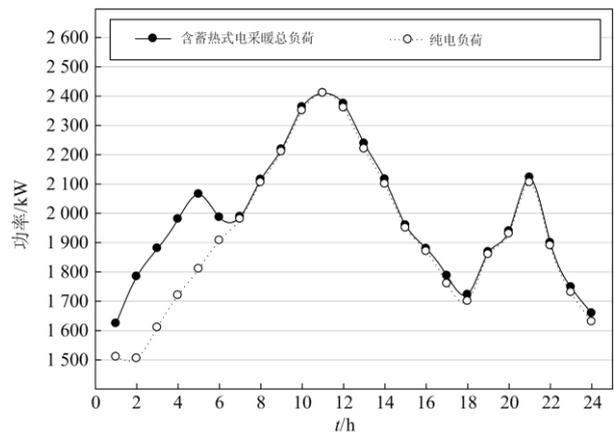


图 5 蓄热电采暖优化后的负荷曲线变化情况

Fig. 5 Change of load curve after optimization of regenerative electric heating

由图 5 可知，运行优化后的蓄热式电采暖耗电功率中，在夜间时段 23—24 以及凌晨时段 1—6 期间，蓄热电采暖的功率较高，用电需求量较大；而在白天的其他时间段蓄热电采暖的耗电功率较低，符合蓄热式电采暖利用夜间低谷电价储热，在白天释放热量以供热的“移谷填峰”的特性。

总负荷方面，在蓄热式电采暖参与优化运行后总负荷在一天 24 个时段内的用电量发生了变化。在凌晨 1—6 时段内电采暖运行后的曲线比运行前的曲线明显上升了一定高度；而在白天的大多数时间段内，电采暖负荷运行前后两条总的负荷曲线基本重合，电采暖负荷参与运行后的总负荷曲线在负荷峰值时段略有下降，蓄热式电采暖参与优化运行后系统的峰谷差小于其运行前系统的峰谷差，即蓄热式电采暖的应用在负荷高峰期和低谷期发挥了一定的作用，抑制了负荷的波动，使用户的负荷曲线趋于平缓，降低了系统的调峰压力，增加了电网的

调峰裕度,同时降低了系统的调峰备用,为电力系统的安全稳定运行和风电消纳创造了有利条件。

5 结论

本文从风电与蓄热电采暖联合运行模式分析、风电与蓄热电采暖联合运行模式下的优化建模与求解等方面开展研究,将蓄热式电采暖作为一种可调节的负荷与具有反调峰特性的风电结合起来,利用它们的互补特性实现风能的利用,满足供暖需要,解决电网内存在的调峰问题。在发电侧接入风电机组的情况下,在负荷侧调度蓄热式电采暖,形成了联合运行模式。然后以系统总的发电成本最小为目标,结合风电机组,火电机组以及电采暖的一些相关约束,构建了优化模型,运用适应模型求解的遗传算法求解该模型。算例表明,通过对蓄热式电采暖进行调度,系统的总煤耗降低了6.5%,负荷低谷期的用电量增加了16.6%,减小了电力峰谷差,使负荷曲线趋向于电网期望的形状,在低谷时刻系统的风电就地消纳水平提升了4.6%,证明了所提模型和算法的有效性。

本文主要研究了风电与蓄热式电采暖联合运行模型对系统调峰和经济效益提升方面的影响,对该运行模型产生的环境效益和其他社会效益等均未涉及,未来作者将考虑多个方面的效益,对联合运行模型进行完善以开展后续的相关研究。

参考文献

- [1] 徐昊亮, 靳攀润, 姜继恒, 等. 促进风电消纳的发电权交易优化方法[J]. 中国电力, 2020, 53(3): 167-176.
XU Haoliang, JIN Panrun, JIANG Jiheng, et al. Optimization method of generation rights transaction mechanism for power system accommodation improvement[J]. Electric Power, 2020, 53(3): 167-176.
- [2] 池喜洋, 竺炜, 刘长富, 等. 含大型风电场的电网安全经济优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1): 125-131.
CHI Xiyang, ZHU Wei, LIU Changfu, et al. Security and economic optimization dispatch for power grid integrating large-scale wind farm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 125-131.
- [3] HUANG H, DU Y, SONG S, et al. Key technologies and economic analysis of decentralized wind power consumption: a case study in B city, China[J]. Energies, 2020, 13.
- [4] 李明扬, 蒋媛媛. 考虑煤耗率的火电机组灵活调峰对风电消纳的影响效果研究[J]. 热力发电, 2020, 49(2): 45-51.
LI Mingyang, JIANG Yuanyuan. Effect of flexible load regulation of thermal power units considering coal consumption rate on wind power utilization[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(2): 45-51.
- [5] 李晖, 马瑞, 曾婷, 等. 含风电与碳捕集电厂的电力系统多目标动态最优潮流[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1): 30-37.
LI Xuan, MA Rui, ZENG Ting, et al. Multi-objective dynamic optimal power flow for power system considering wind farm and carbon capture power plant[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 30-37.
- [6] SHAH J J, NIELSEN M C, SHAFFER T S, et al. Cost-optimal consumption-aware electric water heating via thermal storage under time-of-use pricing[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 592-599.
- [7] PATTEEUW D, BRUNINX K, ARTECONI A, et al. Integrated modeling of active demand response with electric heating systems coupled to thermal energy storage systems[J]. Applied Energy, 2015, 151: 306-319.
- [8] 叶林, 张慈杭, 汤涌, 等. 多时空尺度协调的风电集群有功分层预测控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(13): 3767-3780.
YE Lin, ZHANG Cihang, TANG Yong, et al. Active power stratification predictive control approach for wind power cluster with multiple temporal and spatial scales coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3767-3780.
- [9] 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.
LIU Wenyong, WEN Jing, XIE Chang, et al. Multi-objective optimal method considering wind power accommodation based on source-load coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1079-1088.
- [10] 陈磊, 徐飞, 王晓, 等. 储热提升风电消纳能力的实施方式及效果分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4283-4290.
CHEN Lei, XU Fei, WANG Xiao, et al. Implementation and effect of thermal storage in improving wind power accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4283-4290.
- [11] 何后裕, 郭健翔, 王永利. 面向配电网风电消纳的冰蓄冷空调系统多目标优化策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 181-188.
HE Houyu, GUO Jianxiang, WANG Yongli. Research on multi-objective optimization strategy for ice storage air conditioning system for distribution network wind power consumption[J]. Power System Protection and Control,

- 2019, 47(23): 181-188.
- [12] 王靖飞. 基于复杂网络的风电消纳能力评估模型改进[J]. 中国电力, 2017, 50(1): 136-139,145.
WANG Jingfei. Wind power accommodation capacity evaluation model based on complex network[J]. Electric Power, 2017, 50(1): 136-139,145.
- [13] 刘畅, 吴浩, 高长征, 等. 风电消纳能力分析方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 61-66.
LIU Chang, WU Hao, GAO Changzheng, et al. Study on analysis method of accommodated capacity for wind power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 61-66.
- [14] 王晓海, 乔颖, 鲁宗相, 等. 供暖季风电电量消纳能力的评估新方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2112-2119.
WANG Xiaohai, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. A novel method to assess wind energy usage in the heat-supplied season[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2112-2119.
- [15] 钱峰, 陈艺, 刘俊磊, 等. 大规模风电接入的电力系统协调控制策略[J]. 广东电力, 2019, 32(11): 12-18.
QIAN Feng, CHEN Yi, LIU Junlei, et al. Coordinated control strategy for power systems with large-scale wind power integration[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(11): 12-18.
- [16] 刘小聪, 王蓓蓓, 李扬, 等. 计及需求侧资源的大规模风电消纳随机机组组合模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3714-3723.
LIU Xiaocong, WANG Beibei, LI Yang, et al. Stochastic unit commitment model for high wind power integration considering demand side resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3714-3723.
- [17] 孙勇, 魏敏, 王磊, 等. 基于系统调峰约束的电网风电消纳水平研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 107-112.
SUN Yong, WEI Min, WANG Lei, et al. Study on wind power consumption based on system peak regulation capability constrain[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 107-112.
- [18] 吕泉, 李玲, 王海霞, 等. 配置储热的热电厂与风电场的调峰定价机制[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 118-124.
LÜ Quan, LI Ling, WANG Haixia, et al. Peak regulation pricing mechanism between CHP-plant with heat accumulator and wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 118-124.
- [19] 付亦殊, 陈红坤, 姜欣, 等. 促进大规模风电消纳的双层调峰补偿机制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 51-57.
FU Yishu, CHEN Hongkun, JIANG Xin, et al. A bi-layer peak-regulation compensation mechanism for large-scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 51-57.
- [20] 胡荣, 马杰, 李振坤, 等. 分布式冷热电联供系统优化配置与适用性分析[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 418-425.
HU Rong, MA Jie, LI Zhenkun, et al. Optimal allocation and applicability analysis of distributed combined cooling-heating-power system[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 418-425.
- [21] ALI M, JOKISALO J, SIREN K, et al. Combining the Demand Response of direct electric space heating and partial thermal storage using LP optimization[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 106: 160-167.
- [22] 王振浩, 杨璐, 田春光, 等. 考虑风电消纳的风电-电储能-蓄热式电锅炉联合系统能量优化[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(增刊1): 137-143.
WANG Zhenhao, YANG Lu, TIAN Chunguang, et al. Energy optimization for combined system of wind-electric energy storage-regenerative electric boiler considering wind consumption[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(S1): 137-143.
- [23] KILKKI O, ALAHAIVALA A, SEILONEN I. Optimized control of price-based demand response with electric storage space heating[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(1): 281-288.
- [24] 王小惠, 何兆禹, 徐超, 等. 斜温层单罐储热同时蓄放热过程动态特性模拟[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 5989-5998.
WANG Xiaohui, HE Zhaoyu, XU Chao, et al. Dynamic simulations on simultaneous charging/discharging process of water thermocline storage tank[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 5989-5998.
- [25] 崔杨, 庄妍, 陈志, 等. 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.
CUI Yang, ZHUANG Yan, CHEN Zhi, et al. Economic analysis of abandoned wind power consumption schemes based on electric-thermal time shift characteristics of regenerative electric boiler[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(6): 9-17.
- [26] 孟冰冰, 胡林献, 白雪峰, 等. 具有电转气功能的多能源系统消纳弃风效果分析[J]. 热力发电, 2019, 48(6): 18-23.
MENG Bingbing, HU Linxian, BAI Xuefeng, et al. Analysis on wind power accommodation effect of multi-energy system with P2G function[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(6): 18-23.

- [27] 李建林, 谢志佳, 李雅欣, 等. 蓄热式电锅炉在能源互联网中的应用综述[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 1-6.
LI Jianlin, XIE Zhijia, LI Yaxin, et al. Overview of application of heat storage electric boiler in energy internet[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 1-6.
- [28] 周升彧, 戴赛, 许丹, 等. 考虑源侧灵活性改造及可调节电热负荷的电热联合调度模型[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2254-2261.
ZHOU Shengyu, DAI Sai, XU Dan, et al. Optimal dispatching model of combined heat and power system considering source-side flexibility improvement and controllable heat-power load[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2254-2261.
- [29] WONG S, PINARD J. Opportunities for smart electric thermal storage on electric grids with renewable energy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 1014-1022.
- [30] 顾泽鹏, 康重庆, 陈新宇, 等. 考虑热网约束的电热能源集成系统运行优化及其风电消纳效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3596-3604.
GU Zepeng, KANG Chongqing, CHEN Xinyu, et al. Operation optimization of integrated power and heat energy systems and the benefit on wind power accommodation considering heating network constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3596-3604.
- [31] 孟冰冰, 郭丰慧, 胡林献, 等. 考虑天然气-电力耦合的多能源系统风电消纳分析[J]. 电力工程技术, 2019, 38(6): 1-8.
MENG Bingbing, GUO Fenghui, HU Linxian, et al. Wind abandonment analysis of multi-energy systems considering gas-electricity coupling[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(6): 1-8.
- [32] 郭潇潇, 李岚, 程之隆, 等. 风电孤岛模式下混合储能装置调频调压策略[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(10): 96-102.
GUO Xiaoxiao, LI Lan, CHENG Zhilong, et al. Frequency and voltage modulation control strategy for hybrid energy storage device in wind power island mode[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(10): 96-102.
- [33] 郭树锋, 李威, 胡珊珊, 等. 考虑风机一次调频的风电高占比电网机组组合[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 61-67.
GUO Shufeng, LI Wei, HU Shanshan, et al. Unit commitment considering the primary frequency regulation of wind turbine in grids with a high proportion of wind power[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 61-67.
- [34] 林俐, 肖舒, 费宏运, 等. 基于曲线形态特征的地区规模化风电出力场景划分[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(3): 74-81, 88.
LIN Li, XIAO Shu, FEI Hongyun, et al. Regional scaled wind power output scene segmentation based on curve morphological features[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(3): 74-81, 88.
- [35] ZENG Aidong, HAO Sipeng, XU Qingshan, et al. A day-ahead optimal economic dispatch schedule for building CCHP system based on centralized energy storage infrastructure[J]. Elektronika Ir Elektrotehnika, 2018, 24(4).
- [36] ZENG A, HAO S, NING J, et al. Multiobjective optimized dispatching for integrated energy system based on hierarchical progressive parallel NSGA-II algorithm[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020.
- [37] 徐青山, 曾艾东, 王凯, 等. 基于 Hessian 内点法的微型能源网日前冷热电联供经济优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1657-1665.
XU Qingshan, ZENG Aidong, WANG Kai, et al. Day-ahead optimized economic dispatching for combined cooling, heating and power in micro energy-grid based on Hessian interior point method[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1657-1665.

收稿日期: 2020-08-26; 修回日期: 2020-09-28

作者简介:

宋杰(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向智能用电、需求响应技术;

张卫国(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电动汽车、需求响应与虚拟电厂、综合能源服务;

李树鹏(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向电能替代技术、自动需求响应技术。

(编辑 张爱琴)