

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201903046



煤改电背景下空气源热泵系统对 电网负荷影响的模拟分析

霍宇露¹, 程远达¹, 李彦君², 贾捷¹, 杜震宇¹

(1. 太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 晋中 030600;
2. 山西林业职业技术学院 经济贸易系, 山西 太原 030009)

摘要: 在煤改电进程中,为减缓因规模化应用空气源热泵供暖对电网负荷造成的负面影响,模拟研究空气源热泵供暖系统对电网负荷的影响情况.以京郊地区 400 万用户的采暖用电为例,采用 EnergyPlus 能耗模拟软件分析供暖期不同阶段用户侧优化调控,以满足电网需求响应的可能及优势.研究表明:与空气源热泵直接供暖(ASHP)系统相比,空气源热泵蓄热(ASHP-HS)系统可大幅降低电网峰谷差,提高电网负载率,更有利于电网的稳定安全运行;尽管 ASHP-HS 系统的初投资较高,但其增加的成本部分的回收年限仅为 3.5 a,具有更好的全生命周期经济性.

关键词: 空气源热泵系统; 电网负荷; 煤改电; 清洁供暖

中图分类号: TU 832.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2019)06-0756-07

Simulation Analysis of Influence of Air Source Heat Pump System on Power Grid Load in Background of Coal-to-Electricity Reform

HUO Yulu¹, CHENG Yuanda¹, LI Yanjun²,
JIA Jie¹, DU Zhenyu¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China;
2. Department of Economics and Trade, Shanxi Forestry Vocational Technical College, Taiyuan 030009, China)

Abstract: With the continuous advancement of coal-to-electricity engineering, the influence of air source heat pump heating system on grid load is simulated in order to reduce the negative impact of large-scale application of air source heat pump heating on grid load. Taking the heating power of 4 million users in the suburbs of Beijing as an example, the EnergyPlus energy simulation software is used to analyze the possibility and advantages of optimizing the user side to meet the grid demand response in different stages of the heating period. The results show that compared with the air source heat pump direct heating (ASHP) system, air source heat pump thermal storage (ASHP-HS) system can greatly reduce the peak-to-valley difference of the grid and increase the grid load rate, which is more conducive to the stability and security of the grid. Although the initial investment of ASHP-HS system is higher, the recovery period is only 3.5 a, which has better life cycle economy.

Keywords: air source heat pump system; grid load; coal-to-electricity; clean heating

收稿日期: 2019-03-18

通信作者: 程远达(1985-),副教授,博士,主要从事建筑节能及可再生能源利用的研究. E-mail: chengyuanda@tyut.edu.cn.

基金项目: 国家重点研发计划项目子课题(2018YFD1100701); 山西省重点研发计划项目(201803D121105)

冬季供暖燃煤排放污染物被认为是造成我国北方地区雾霾天气的重要因素之一^[1]. 为改善人居环境质量, 减轻冬季雾霾现象, 北方许多城市开始规模化地实施煤改电工程, 以空气源热泵等清洁供暖取代传统的燃煤锅炉采暖^[2]. 随着煤改电工程的不断推进, 空气源热泵供暖系统的应用不断扩大, 成为电网安全稳定运行的重要荷载部分^[3-4]. 电网负荷不平衡不仅对公共用电设施造成不利影响, 还会严重威胁电网的安全运行和荷载效率^[5]. 因此, 在规模化推广空气源热泵清洁供暖系统时, 如何避免对电网运行造成不良影响, 并对电网的应急需求作出积极响应, 以保障电网正常、高效地运行, 成为当前研究的热点之一. 近年来, 在电力需求响应方面, 国内外学者展开了广泛的研究^[6-14]. 乐慧等^[15]对空气源热泵供暖系统进行研究, 得出将空气源热泵供暖系统作为冬季供热时的虚拟调峰电厂, 通过合理的控制可以有效地平衡电网负荷. 但是该研究仅限空气源热泵直接供暖系统, 在调控过程中, 需要较为严格的执行间歇运行调控, 存在一定的难度. 而蓄能技术可以作为电网电力负荷平衡的一种有效调节手段, 在建筑制冷及供热负荷调节响应电网需求的工程中应用广泛^[16-17]. Zhao 等^[18]提出一种基于模型预测控制的非线性规划算法来优化当前电价能量系统的调度, 通过对夏季空调蓄冷调节电网负荷. Yan 等^[19]提出一种由冷冻水储存系统和温、湿度独立控制系统组成的新型空调系统, 实现智能电网的日常负荷转移, 使建筑物具有更灵活的电力使用模式. 在冬季蓄热采暖方面, 李勇等^[20]对蓄热电锅炉采暖与天然气采暖方式进行对比分析, 结果表明, 采用电锅炉蓄热供暖不仅可以解决环境污染问题, 还可以实现电网“移峰填谷”的效果, 提高其运行效率. 黄永红等^[21]提出临界峰谷电价比的概念, 对一个工业园区写字楼和商场的供暖方案进行分析, 得出当峰谷电价比大于临界峰谷电价比时, 采用电锅炉蓄热供热更加经济. 李国庆等^[22]研究蓄热式电锅炉融入储能系统, 以消纳弃风的优化控制问题, 得出利用基于储能融合蓄热式电锅炉的风电消纳多目标优化控制方法, 可以有效地提高蓄热电锅炉消纳弃风的利用率和系统的经济性. 此外, 许多学者还对空气源热泵蓄热系统的性能进行了研究^[23-26]. 将蓄能技术与规模化推广应用的空气源热泵供暖系统相结合, 是一个非常具有研究价值的课题. 目前, 对蓄热式空气源热泵的研究多侧重于性能方面, 而针对空气源热泵蓄热系统对电网负荷造成影响的量化研究则相对较少. 因此, 本文以京郊地区 400 万用户的采暖用电为例, 研究空气源热泵系统对电网负荷的影响.

1 模拟工况设置

以京津冀电网为例, 研究不同类型的空气源热泵供暖系统对电网负荷的影响. 京津冀电网典型日用电负荷一天内的变化情况^[15], 如图 1 所示. 图 1 中: Q 为电网负荷. 由图 1 可知: 电网负荷峰值比谷值高 25.55%, 电网荷载不平衡率较大.

假定京郊地区 400 万住宅建筑用户户型一致, 且均以空气源热泵作为供暖热源, 每户的供暖面积均为 60 m^2 , 供暖时间为每年 11 月 15 日至次年 3 月 15 日. 采用 Open Studio 软件建立单户建筑模型, 如图 2 所示. 图 2 中: 外墙材料为普通砖墙, 传热系数为 $1.23\text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$; 坡屋顶材料为砖瓦和秸秆, 传热系数为 $1.18\text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$; 外窗材料为单层玻璃窗, 传热系数为 $5.70\text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$.

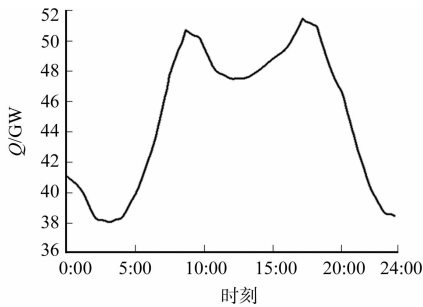


图 1 京津冀电网典型日用电负荷一天内的变化情况

Fig. 1 Changes in typical daily electricity load of Beijing-Tianjin-Hebei power grid within one day

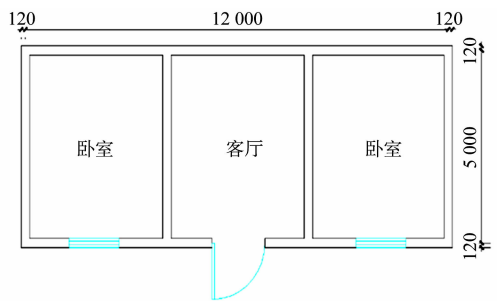


图 2 典型用户建筑平面示意图(单位:mm)

Fig. 2 Typical user building plan (unit: mm)

采用 EnergyPlus 软件对北京地区的气象数据进行模拟, 假设室内的供暖设计温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冬季供暖热负荷为 $7\,659.02\text{ W}$, 则选取的空气源热泵的制热量为 10.00 kW , 其额定功率为 2.50 kW . 为满足

室内供暖热舒适要求,建筑供暖系统采用连续供暖模式运行.

模拟比较 2 种不同空气源热泵供暖方案,分别为常见的空气源热泵直接供暖(ASHP)系统和空气源热泵蓄热(ASHP-HS)系统. ASHP 系统由空气源热泵直接为供暖末端提供热量,供暖末端可采用风机盘管、地板辐射等形式;ASHP-HS 系统利用空气源热泵和蓄热水箱为建筑复合供热.

ASHP,ASHP-HS 的系统原理图,如图 3 所示. 图 3(b)中:在蓄热阶段,阀门 F3 关闭,水泵 B 停开,阀门 F1,F2 开启,水泵 A 运行,来自空气源热泵的热水通过阀门 F2 进入蓄热水箱,水箱中的冷水从底部流出,通过水泵 A 进入空气源热泵制备热水,直至水箱中的水全部为热水;在释热阶段,阀门 F1 关闭,水泵 A 停开,阀门 F2,F3 开启,水泵 B 运行,蓄热水箱中的热水通过阀门 F3 和水泵 B 送入用户末端,与空气进行热湿交换,水温降低,再进入蓄热水箱,直至水箱中的水都为冷水.

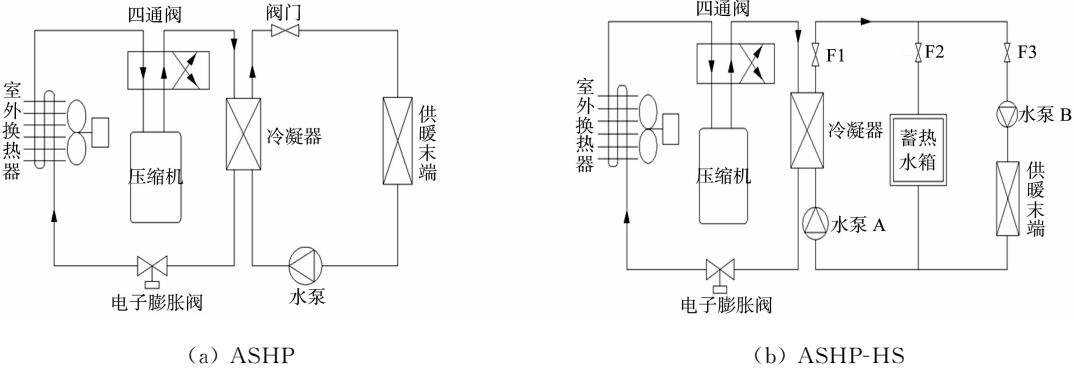


图 3 系统原理图
Fig. 3 System schematic diagram

为了更好地利用 ASHP-HS 系统实现电网负荷的“移峰填谷”,在电网负荷谷段时,需要尽可能地增加用电量;而在电网负荷峰段时,需要尽可能地减少用电量,即在电网负荷谷段时,进行蓄热;在电网负荷峰段时,使用水箱的释热为用户供暖.

为研究空气源热泵供暖系统在供暖期不同阶段对电网负荷的影响,将整个供暖期分为 3 个阶段:11 月 15 日—12 月 9 日为初寒期;12 月 10 日—2 月 24 日为严寒期;2 月 25 日—3 月 15 日为末寒期. 根据相关文件规定,北京市实施峰谷电价,即 6:00—21:00 时间段为峰段电价,其余时间段为谷段电价.

初寒期、严寒期和末寒期典型日的室外逐时热负荷,如图 4 所示. 图 4 中: H_L 为热负荷. 由图 4 可知:初寒期、严寒期和末寒期典型日的建筑热负荷最大值出现在 5:00 左右,主要原因是此时室外温度较低、太阳辐射照度为 0,导致室内热负荷较大;随着室外气温的上升及太阳辐射照度的增加,建筑热负荷逐渐降低,并在 14:00 左右,热负荷出现最小值;在 14:00 之后,由于室外气温逐渐降低,太阳辐射照度不断减小,热负荷又重新开始回升.

由图 4 还可知:严寒期的热负荷值明显大于初寒期和末寒期的热负荷值.

结合该地区电网负荷曲线及建筑的典型日逐时热负荷,确定蓄热水箱供暖的时间段,并计算该时间段内供暖系统所需的热量,以确定谷段电价时段的蓄热量及蓄热时间,从而保证蓄热后供暖设备的用电量能够充分平衡电力负荷.

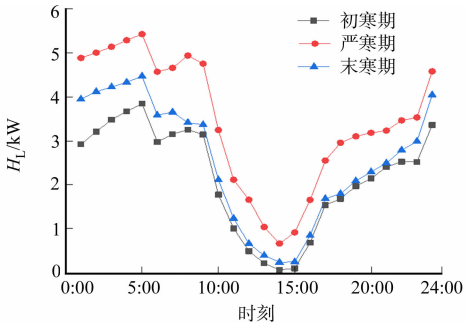


图 4 不同时期典型日室外逐时热负荷
Fig. 4 Daily and hourly heat load on typical day in different periods

2 模拟结果分析

空气源热泵耗电量的计算式^[27]为

$$q = \frac{Mc(\theta_1 - \theta_2)}{COP} \tag{1}$$

式(1)中: q 为空气源热泵耗电量; M 为空气源热泵冷凝器进出口处水的质量流量; c 为水的比热容; θ_1 ,

θ_2 分别为空气源热泵冷凝器出口、进口的水温;COP 为空气源热泵性能系数.

ASHP, ASHP-HS 系统选用的热泵为同一型号的热泵机组, 其性能曲线, 如图 5 所示. 图 5 中: θ_e 为环境温度. 由图 5 可知: 室外温度越低, 空气源热泵的 COP 越小.

采用最大负荷峰谷差率 δ , 评价电网负荷的不平衡程度^[3], 即

$$\delta = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{\max}} \times 100\%.$$

(2)

式(2)中: Q_{\max} 为电网日最大负荷; Q_{\min} 为电网日最小负荷. 最大负荷峰谷差率越大, 意味着电力负荷波动越大, 越不利于电网的安全稳定运行.

电网负荷率是描述电力负荷特性的重要指标, 对发电厂的经济运行有重要意义. 负荷率越高, 意味着发电设备的利用率越高, 电厂的经济效益越高^[28]. 负荷率的计算公式^[3]为

$$\lambda = \frac{\bar{Q}}{Q_{\max}} \times 100\%.$$

(3)

式(3)中: λ 为负荷率; \bar{Q} 为电网日平均负荷.

分别从初寒期、严寒期与末寒期中各选取 1 个典型日, 研究不同空气源热泵系统的运行情况, 并将 ASHP 系统和 ASHP-HS 系统供暖的电网负荷进行对比, 结果如图 6 所示. 图 6 中: 初寒期以 11 月 25 日为例, 8:00—10:00 和 17:00—18:00 为电力负荷尖峰时段, 且热负荷较大, 该时段用蓄热水箱直接为用户供暖, 其余时间段直接用热泵给用户供暖; 严寒期以 1 月 4 日为例, 8:00—10:00 和 17:00—18:00 为电力负荷尖峰时段, 热负荷也较大, 该时段用蓄热水箱直接为用户供暖, 其余时间段用热泵直接给用户供暖; 末寒期以 2 月 20 日为例, 空气源热泵蓄热系统的具体供暖方式与初寒期一致.

由图 6(a)可知: 采用 ASHP 供暖后, 电网负荷的最大负荷峰谷差率从 25.55% 减小至 22.98%, 这是因为在初寒期时, 建筑供热负荷相对较小, 且在一定程度上与电网负荷呈反向变化趋势, 表明在初寒期时, ASHP 供暖对电力负荷的峰谷平衡有一定的缓减作用; 采用 ASHP 供暖后, 电网的负荷率由原来的 88.04% 下降到 86.89%, 其主要原因在于 ASHP 供暖对电网负荷峰值负荷的增加幅度比日周期内平均负荷的增量更大, 虽然采用 ASHP 供暖后的电力负荷平衡性稍有改善, 但是电厂的发电设备利用率下降, 经济效益下降.

由图 6(a)还可知: 采用 ASHP-HS 供暖后, 由于蓄热装置

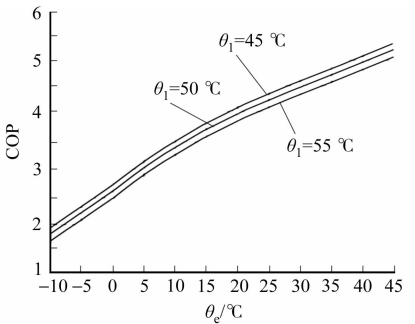
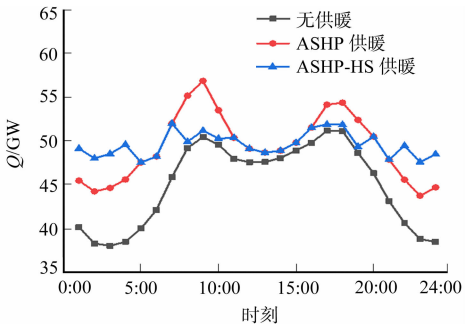
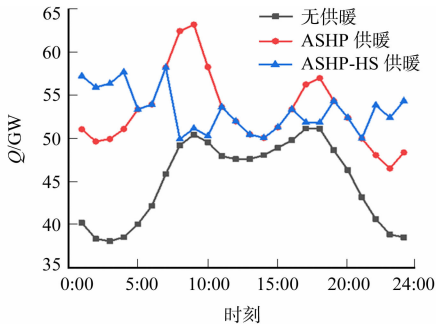


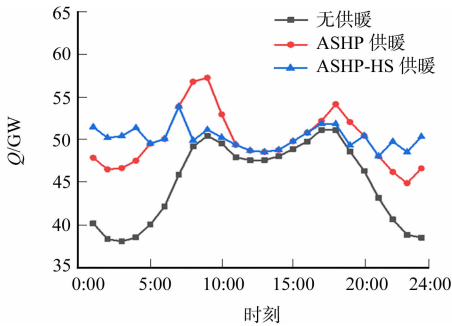
图 5 空气源热泵机组的性能曲线
Fig. 5 Air source heat pump performance curve



(a) 初寒期



(b) 严寒期



(c) 末寒期

图 6 不同时期典型日 ASHP-HS 供暖与 ASHP 供暖的电网负荷曲线对比图

Fig. 6 Comparison of load curves between ASHP-HS heating and ASHP heating on typical days in early cold period

具有调节作用,电网负荷的最大负荷峰谷差率由采用 ASHP 供暖时的 22.98%降低至采用 ASHP-HS 供暖时的 8.49%;与此同时,电网的负荷率由采用 ASHP 供暖时的 86.89%提高至采用 ASHP-HS 供暖时的 95.38%,这大幅提高了电厂的运行效率和经济效益.

由图 6(b)可知:严寒期与初寒期不同,当规模化应用 ASHP 供暖后,电网负荷的最大负荷峰谷差率由 25.55%增加至 26.43%,负荷率由 88.04%下降至 84.03%,这意味着采用 ASHP 供暖后,加剧了电力负荷的不平衡性,电厂发电设备的利用率和经济效益降低,究其原因是严寒期较初寒期室外温度更低,热负荷较大,空气源热泵运行时的 COP 较低;根据气象数据,8:00—10:00 为室外温度在一天内的最低时段,而该时段也是电力负荷尖峰时段,因此,在严寒期采用 ASHP 供暖后,电力负荷峰值大幅度上升,导致峰谷差增大,此时,增加蓄热装置可以显著地调节平衡电网负荷.

由图 6(b)还可知:采用 ASHP-HS 供暖后,电网负荷的最大负荷峰谷差率为 14.26%,电网负荷率为 91.32%,与 ASHP 系统相比,电网负荷的最大负荷峰谷差率降低了 12.17%,而电网负荷率提高了 7.29%.因此,在严寒期采用 ASHP-HS 供暖可以大幅降低电网负荷的不平衡性,提高发电厂负荷率,从而增加发电设备的利用率,提高电厂的经济效益.

由图 6(c)可知:末寒期与初寒期的变化相似,采用 ASHP 供暖后,电网负荷的最大负荷峰谷差率由 25.55%减小至 21.56%,电网负荷率由 88.04%下降至 87.33%.因此,采用 ASHP 供暖后的电网负荷的不平衡性虽然稍有改善,但电厂发电设备的利用率却略有降低,电厂的经济效益有所降低.

由图 6(c)还可知:采用 ASHP-HS 供暖后,电网负荷的最大负荷峰谷差率由采用 ASHP 供暖时的 21.56%降低至 10.76%,这大幅降低了电网的不平衡性;同时,电网负荷率由 87.33%提高至 93.17%,这显著提高了电厂的经济效益.

3 经济性分析

为进一步研究 ASHP-HS 系统应用的可行性,对不同热泵采暖系统的用户经济性进行对比分析,其计算式为

n = (I - W) / (Z - N) (4)

式(4)中: n 为相对静态投资回收年限; I 为 ASHP-HS 系统的初投资; W 为 ASHP 系统的初投资; N 为 ASHP-HS 系统供暖的运行费用; Z 为 ASHP 系统供暖的运行费用.

京津冀地区农村采暖期间峰段(6:00—21:00)、谷段(21:00—6:00)电价分别为 0.488 3、0.300 0 元·(kW·h)⁻¹.在低谷时段,市、区两级政府各补贴 0.100 0 元·(kW·h)⁻¹,即低谷时段实际单价为 0.100 0 元·(kW·h)⁻¹.

在供暖期内,空气源热泵每日运行电费的计算式为

F = P₁F₁ + P₂F₂. (5)

式(5)中: F 为供暖期每户空气源热泵的用电费; P_1 为供暖期内(6:00—21:00)每户空气源热泵的耗电量; F_1 为供暖期内(6:00—21:00)的电价,取 0.488 3 元·(kW·h)⁻¹; P_2 为供暖期内(21:00—6:00)每户空气源热泵的耗电量; F_2 为供暖期内(21:00—6:00)的电价,取 0.100 0 元·(kW·h)⁻¹.

根据模拟结果中的热泵耗电量,计算得到的热泵运行电费,如表 1 所示.表 1 中: F_{ASHP} , $F_{ASHP-HS}$ 分别为供暖期 ASHP 与 ASHP-HS 的运行电费.由表 1 可知:与 ASHP 供暖相比,ASHP-HS 供暖每年可以减少 27.65%的运行费用,可节约 392.76 元.这是因为采用 ASHP-HS 供暖可以使热泵更多地 在电网负荷低谷期运行,即供暖费用更多地以电网谷段计价,从而减少供暖系统运行所需的电费.

表 1 供暖季 ASHP 与 ASHP-HS 的运行电费

Tab. 1 Operation electricity charge of ASHP and ASHP-HS in heating season				元·户 ⁻¹
项目	初寒期	严寒期	末寒期	总数
F_{ASHP}	185.21	1 089.13	146.21	1 420.56
$F_{ASHP-HS}$	135.27	782.80	109.72	1 027.80

此外,与 ASHP 供暖系统相比,ASHP-HS 供暖系统由于需要增设水泵(200.00 元·户⁻¹)、蓄热水

箱(1 000.00 元·户⁻¹)、管材及其附件(200.00 元·户⁻¹)等设备,合计为 1 400.00 元·户⁻¹,增加了 ASHP-HS 供暖系统的初投资.该工程为大面积改造工程,设备及管材费用的数据由厂家提供.

将 ASHP-HS 供暖系统运行费用的减少部分及初投资的增加部分代入式(4)后,可以得到 ASHP-HS 供暖系统的相对静态投资回收年限仅为 3.5 a,回收年限较短.而空气源热泵供暖系统的生命周期约为 20 a^[29].综上所述,与 ASHP 供暖系统相比,ASHP-HS 供暖系统在全生命周期内的经济效益将更为显著.

4 结论

在煤改电背景下,以京郊地区 400 万农户住宅建筑为例,研究采用空气源热泵供暖系统对电网负荷的影响.通过比较 ASHP-HS 系统和 ASHP 系统在供暖不同阶段对电网负荷的最大负荷峰谷差率及电网负荷率的影响,并分析采用不同供暖系统时的用户侧经济性,可以得出以下 3 点结论.

1) 与未进行供暖相比,采用 ASHP 供暖后的初寒期、末寒期的电网最大负荷峰谷差率分别降低了 2.57%,3.99%,电力负荷不平衡性得到一定的改善,但严寒期的电力不平衡性不仅没有降低,反而增加了 0.88%;而采用 ASHP 供暖后,初寒期、严寒期和末寒期的电网负荷率分别降低了 1.15%,4.01%,0.71%,在供暖期内,电厂的经济效益下降.

2) 与 ASHP 供暖相比,采用 ASHP-HS 供暖后的初寒期、严寒期与末寒期的电网最大负荷峰谷差率分别减小了 14.49%,12.17%,10.80%,而电网负荷率分别增大了 8.49%,7.29%,5.84%.因此,使用 ASHP-HS 供暖不仅可以有效地减小电网峰谷差,实现电网需求响应,还可以提高电网负荷率,使发电厂更接近满负荷运行,提高发电设备的利用率,从而使电厂能够更加安全、经济地运行.

3) 受益于峰谷分段时的电价,ASHP-HS 供暖系统中的热泵可以更多地在电网负荷低谷时段中运行.因此,与 ASHP 供暖相比,ASHP-HS 供暖每年可以节约 27.65%的供暖运行电费,且相对静态投资回收年限仅为 3.5 a,所以,采用 ASHP-HS 供暖更加经济.

参考文献:

[1] 周延丽,张天维.煤改电取:暖减霾尚需大力推进[J].侨园,2017(5):5.

[2] 吴迪,胡斌,王如竹,等.我国空气源热泵供热现状、技术及政策[J].制冷技术,2017,37(5):1-7. DOI:10.3969/j.issn.2095-4468.2017.05.001.

[3] 刘艳茹,杨卫红,王基,等.“煤改电”工程实施前后农网负荷特性分析[J].电气技术,2017,18(4):110-115. DOI:10.3969/j.issn.1673-3800.2017.04.021.

[4] 高泽,陈登明,杨建华,等.计及“煤改电”的农村低压配电网规划研究[J].电工电气,2015(5):1-5. DOI:10.3969/j.issn.1007-3175.2015.05.001.

[5] 姚轲,李绍源,李晓豫.电力负荷因素对电网安全的影响及防治[J].河南电力技术,2014(2):31-33.

[6] ZAREEN N,MUSTAFA M W,SULTANAN U,*et al*. Optimal real time cost-benefit based demand response with intermittent resources[J]. Energy,2015(90):1695-1706. DOI:10.1016/j.energy.2015.06.126.

[7] GHZAVINI F,SOARES J,ABRISHAMBAF O,*et al*. Demand response implementation in smart households[J]. Energy and Buildings,2017,143:129-148. DOI:10.1016/j.enbuild.2017.03.020.

[8] 潘敬东,谢开,华科.计及用户响应的实时电价模型及其内点法实现[J].电力系统自动化,2005,29(23):8-14. DOI:10.3321/j.issn:1000-1026.2005.23.002.

[9] 黄逊青.家用制冷器具需求响应技术的发展[J].制冷与空调,2010,10(5):6-11. DOI:10.3969/j.issn.1009-8402.2010.05.002.

[10] JOUNG M,KIM J. Assessing demand response and smart metering impacts on long-term electricity market prices and system reliability[J]. Applied Energy,2013,101:441-448. DOI:10.1016/j.apenergy.2012.05.009.

[11] 李俊,刘俊勇,张力,等.激励性监管下的电力市场需求侧分时电价机制研究[J].四川电力技术,2011,34(3):5-8. DOI:10.3969/j.issn.1003-6954.2011.03.002.

[12] 曾勇.基于智能电网的实时电价研究[D].重庆:重庆大学,2011.

[13] 董萌萌.基于峰谷电价的需求响应效果评价[D].北京:华北电力大学,2014.

- [14] ZHANG Guoxin, WANG Beibei. Study of power market operation with demand response and consideration of China's power market reform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(10): 28-33. DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-6047. 2008. 10. 006.
- [15] 乐慧, 李好玥, 江亿. 用空气源热泵实现农村采暖的“煤改电”同时为电力削峰填谷[J]. 中国能源, 2016, 38(11): 9-15. DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-2355. 2016. 11. 002.
- [16] AYDIN D, CASEY S P, RIFFAT S. The latest advancements on thermochemical heat storage systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 41: 356-367. DOI: 10. 1016/j. rser. 2014. 08. 054.
- [17] 倪龙, 周超辉, 姚杨, 等. 空气源热泵蓄热系统形式及研究进展[J]. 制冷学报, 2017, 38(4): 23-30. DOI: 10. 3969/j. issn. 0253-4339. 2017. 04. 023.
- [18] ZHAO Yang, LU Yuehong, YAN Chengchu, *et al.* MPC-based optimal scheduling of grid-connected low energy buildings with thermal energy storages[J]. Energy and Buildings, 2015, 86: 415-426. DOI: 10. 1016/j. enbuild. 2014. 10. 019.
- [19] YAN Chengchu, XUE Xue, WANG Shengwei, *et al.* A novel air-conditioning system for proactive power demand response to smart grid[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 102: 239-246. DOI: 10. 1016/j. egyptro. 2014. 11. 897.
- [20] 李勇, 解凯. 蓄热电锅炉技术应用分析[J]. 河北电力技术, 2009, 28(2): 41-45. DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-9898. 2009. 02. 018.
- [21] 黄永红, 王成, 兰新如, 等. 临界峰谷电价比在电锅炉蓄热技术中的应用[J]. 长沙理工大学学报, 2014(2): 81-85. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-9331. 2014. 02. 014.
- [22] 李国庆, 庄冠群, 田春光, 等. 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. DOI: 10. 16081/j. issn. 1006-6047. 2018. 10. 008.
- [23] 孙平, 林小苗, 江辉民. 新型大型蓄能式空气源热泵热水机组的探讨[J]. 制冷与空调, 2009, 9(4): 26-29. DOI: 10. 3969/j. issn. 1009-8402. 2009. 04. 007.
- [24] 曹琳, 倪龙, 李炳熙, 等. 蓄能型空气源热泵热水机组性能实验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(10): 71-75. DOI: 10. 11918/j. issn. 0367-6234. 2011. 10. 015.
- [25] LONG Jianyou, ZHU Dongsheng. Numerical and experimental study on heat pump water heater with PCM for thermal storage[J]. Energy and Buildings, 2008, 40: 666-672. DOI: 10. 1016/j. enbuild. 2007. 05. 001.
- [26] UPSHAW C R, RHODES J D, WEBBER M E. Modeling peak load reduction and energy consumption enabled by an integrated thermal energy and water storage system for residential air conditioning systems in Austin, Texas [J]. Energy and Buildings, 2015, 97: 21-32. DOI: 10. 1016/j. enbuild. 2015. 03. 050.
- [27] 张维亚, 魏璠. 冷热源工程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009.
- [28] 钟泽权. 浅析电力负荷构成及对负荷率的影响[J]. 广东电力, 2007, 20(3): 27-30. DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-290X. 2007. 03. 007.
- [29] 姚文涛. 供水大厦空调冷热源方案比较[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 刘源岗)