

引文格式:任千悦,王霞,贾捷,等.参与风电消纳的空气源热泵和储热集成供热系统优化与运行策略研究[J].太原理工大学学报,2026,57(3):633-639.

REN Qian Yue, WANG Xia, JIA Jie, et al. Optimization and operation strategy of air source heat pump and heat storage integrated heat supply system participating in wind power consumption[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(3): 633-639.

参与风电消纳的空气源热泵和储热集成供热系统优化与运行策略研究

任千悦¹, 王霞², 贾捷¹, 田琦¹, 尹丽媛³

(1. 太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原; 2. 赛鼎工程有限公司, 山西 太原;

3. 中核第七研究设计院有限公司, 山西 太原)

摘要:【目的】以风能为代表的新能源具有随机波动性强的特点,因此,高比例新能源接入对电力系统的供能安全提出了严峻挑战。本文提出了单级空气源热泵与储热集成的建筑供热系统,可在用电高峰期减少设备的电力消耗,并将部分用电需求转移至风电充沛时段,以同时达到电力调峰和新能源消纳的目的。【方法】基于真实的电价结构、风电数据、室外气象数据,对该系统在典型建筑中的运用进行了TRNSYS动态模拟。在实现系统优化设计的基础上,从能耗、运行成本、消纳潜力等多个角度出发,确定了系统的运行策略。【结果】研究发现,对于特定的应用场景,存在水箱容积与储热温度的最优组合,采用辅助电加热提升储热温度是单级空气源热泵参与风电消纳的必要条件。对于示例建筑,采用优化的运行策略可在满足用户用热需求的前提下,节省供暖季运行成本13%,减少非可再生电力消耗11%,并实现风电消纳3 348 kWh。研究结果可助力建筑行业的绿色低碳发展,并进一步提升电网对新能源的消纳能力。

关键词:风力发电;新能源消纳;供热系统;运行策略;TRNSYS模拟

中图分类号:TU832 **文献标识码:**A

DOI: 10.16355/j.tyut.1007-9432.20240219

文章编号:1007-9432(2026)03-0633-07

Optimization and Operation Strategy of Air Source Heat Pump and Heat Storage Integrated Heat Supply System Participating in Wind Power Consumption

REN Qian Yue¹, WANG Xia², JIA Jie¹, TIAN Qi¹, YIN Liyuan³

(1. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China;

2. SEDIN Engineering Co., Ltd, Taiyuan, Shanxi, China; 3. Nucleus Industry No. 7

Research Design Institute, Taiyuan, Shanxi, China)

Abstract:【Purposes】New energy represented by wind energy has characteristic of high random volatility. Therefore, a high proportion of new energy access poses a serious challenge to the security of energy supply of power system. In this paper, a single-stage air source heat pump integrated with thermal storage is proposed for building heating system. The system can reduce the power consump-

收稿日期:2024-03-29;修回日期:2024-06-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51808372)

第一作者:任千悦,硕士研究生,(E-mail)renqianyue0509@163.com

通信作者:贾捷,博士,副教授,主要从事建筑节能技术研究,(E-mail)jjajie@tyut.edu.cn

tion of equipment during the peak period and transfer part of power demand to the wind power abundant period in order to simultaneously achieve the purpose of power peaking and new energy consumption. **【Methods】**On the basis of the real electricity tariff structure, wind power data, and outdoor meteorological data, TRNSYS dynamic simulation was carried out to simulate the use of this system in a typical building. On the basis of realizing the optimal design of the system, the operation strategy of the system was further determined from various perspectives, such as energy consumption, operation cost, and consumption potential. **【Results】**It is found that for specific application scenarios, there exists an optimal combination of tank volume and heat storage temperature. In addition, the use of auxiliary electric heating to enhance the heat storage temperature is a necessary condition for single-stage air source heat pumps in participating in wind power consumption. For the example building, the optimized operation strategy can save 13% of the heating season operation cost, reduce the non-renewable power consumption by 11%, and achieve wind power consumption of 3,348 kWh while meeting the heat demands of the users. The results of the study can contribute to the green and low-carbon development of the building industry and further enhance the grids' ability to consume new energy.

Keywords: wind power generation; new energy consumption; heat supply system; operation strategy; TRNSYS simulation

近年来,我国风电、光伏发电等新能源装机规模迅速扩大,由于风能和太阳能具有随机波动性强的特点,因此高比例新能源接入对电力系统的供能安全提出了严峻挑战。建筑作为重要的电力消费终端,对其采用智能化控制技术、储能技术、需求响应等手段,能够为电网提供“柔性”用电负荷。通过充分挖掘用户侧的可调度资源,有望提升电网对新能源的消纳能力,并助力新型电力系统建设。

我国北方地区冬季供热需求巨大。空气源热泵契合建筑电气化的发展需求,是清洁供热的理想设备。采用热泵与储热集成供热系统可在用电高峰期减少设备的电力消耗,并将部分用电需求转移至新能源电力充沛时段,以同时达到电力调峰和新能源消纳的目的。此外,还可利用电网的“峰谷电价”鼓励政策,获取经济效益。

已有研究表明^[1-3],热泵技术与储热技术的结合是促进可再生能源利用、转移电网负荷、降低电力行业碳排放的有效手段。Khoa等人^[4]提出了一种复叠式空气源热泵与储热集成供热系统,并基于分时电价得到了系统的最佳运行策略。HAO等人^[5]基于热电流法,以最小化弃风为目标,对整个系统进行了调度优化。文献[6-8]评估了不同因素如天气条件、用户行为、电价结构等对系统运行成本的影响。

在前期研究中,为了达到较高的储热温度,通常采用复叠式热泵或二氧化碳热泵作为热源设备,然而,在建筑供热领域,常规单级空气源热泵的应

用更为普遍。针对这一现状,本文提出了基于单级空气源热泵的集成系统。在原有系统的基础上,增加一台储热水箱作为储热设备,并设置电加热器作为辅助加热手段以提升储热温度。以上方案具有投资低、易实施的优势,更有利于对既有系统进行低成本的灵活性改造。为了评估和量化上述技术路径的可行性,本文基于真实的电价结构、风电数据、室外气象数据,对该系统在典型建筑中的运用进行了动态模拟。在实现系统优化设计的基础上,从能耗、运行成本、消纳潜力等多个角度出发,确定了系统的运行策略。研究结果可助力建筑行业的绿色低碳发展,并进一步提升电网对新能源的消纳能力。

1 基础数据

京津冀地区北部是我国重要的陆上风电场。该地区典型日内的风力发电曲线如图1所示,可以看到,风力发电具有明显的波动性和峰谷性。风电高峰期为凌晨2:00至早晨8:00,这一时段是电网用电需求的低谷期;而在傍晚时段,风电达到低谷,却恰逢电网用电高峰。这种“逆调峰”特性增加了电网的调度难度,从而导致了“弃风”现象的出现。本文提出的集成供热系统可在保证用户需求的前提下,将部分高峰用电需求转移至风电充沛时段,从而保障了电网的平稳运行和风电的大规模友好接入。

空气源热泵的运行性能受到室外气温的影响。京津冀地区供暖季内典型日的逐时室外气温如图1

所示,可以看到,室外气温在早晨 8:00 左右降至最低,随后开始回升,并在下午达到峰值后逐渐下降。

集成供热系统的运行成本与采用的电价结构密切相关。目前,我国多省均制定了分时电价,以鼓励用户优化用电行为。本文采用的电价结构包括四个时段,分别为低谷、平段、高峰和尖峰。各时段的实时电价参照河北省最新发布的电价数据。

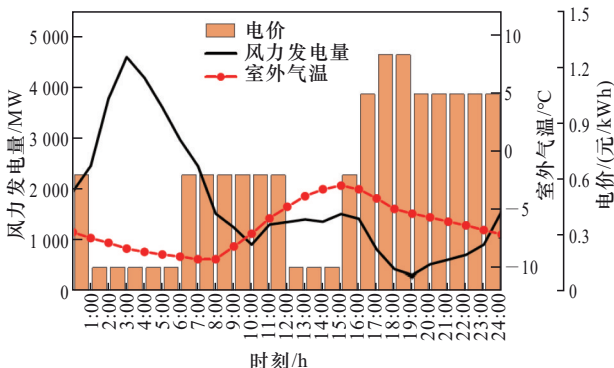


图 1 典型日风力发电量^[9]、室外气温及分时电价^[10]
Fig.1 Typical intraday wind generation^[9], outdoor temperature, and time-of-use tariffs^[10]

2 集成供热系统

2.1 系统形式

本文提出的集成供热系统如图 2 所示。该系统采用单级空气源热泵作为热源设备,水箱作为储热装置,储热水箱内设置电加热器作为辅助加热手段,供热末端为风机盘管。在储热时段,首先开启空气源热泵,将水箱内的水加热至 50℃,随后开启电加热器将水进一步加热至所需的储热温度;在放热时段,将储存的高温水输送至风机盘管直接供热,此时,不需开启热泵,从而大幅减少了系统在用电高峰期的电力消耗。

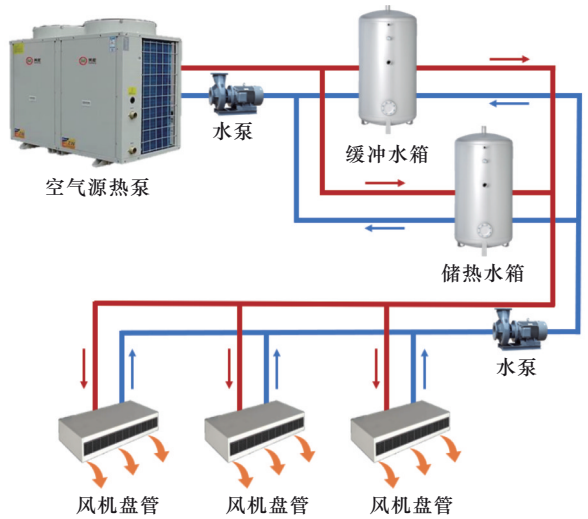


图 2 单级热泵与储热集成供热系统
Fig.2 Single-stage heat pump with heat storage integrated heating system

2.2 运行策略

为了同时达到电力调峰和风电消纳的目的,需要合理确定系统的运行策略。本文以办公建筑为例,对系统的运行策略进行分析。根据人员的作息规律,将办公建筑的供热时间选定为 9:00—19:00。其中,9:00—17:00 采用热泵直接供热,而在 17:00—19:00 关闭热泵,利用储热水箱供热。17:00—19:00 为用电高峰期,且该时间段对应尖峰电价,此时使用水箱供热可降低电网峰值负荷,并降低用户的用电成本。为了不影响日间正常供热,储热需在 9:00 前结束。本文分别以最大化风电消纳和最小化水箱热损为目标,制定了系统的储热时段,形成的运行策略如图 3 所示。由于系统的运行目标为满足 17:00—19:00 的室内热负荷,因此在考虑一定水箱热损的基础上,本文将储热时长设定为 2.5 h。

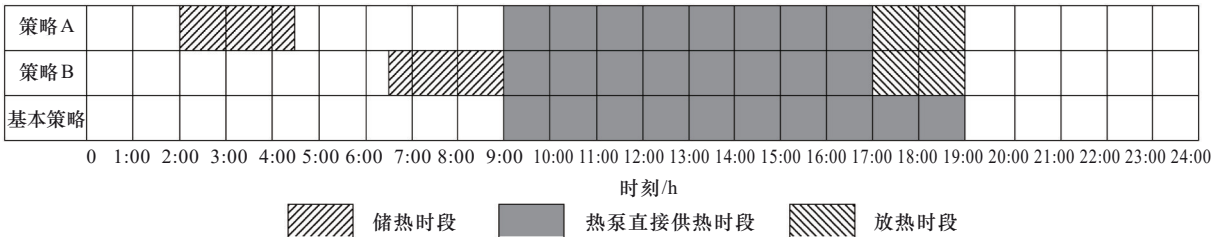


图 3 各策略的系统运行时刻表
Fig.3 System operating schedules for each strategy

在策略 A 中,储热时段为每日 2:00—4:30。由图 1 可知,在凌晨进行储热可最大化利用风电,并最小化降低用电成本。然而,在策略 A 中,系统在 4:30 即完成储热,在开始放热前,水箱需静置 12.5 h,从而引起较大的静置热损,因此,从减小水箱热损的角度考虑,应尽量延迟储热完成时间。在此基础

上,本文设置策略 B,其储热时段为每日 6:30—9:00,以最小化水箱的静置热损。

3 TRNSYS 建模

为了实现系统的优化设计,并确定水箱容积、储热温度、电加热功率等关键设计参数,进而对两

种运行策略进行量化比较,本文基于 TRNSYS 平台对集成供热系统进行了供暖季动态模拟。TRNSYS 作为一种动态仿真软件,现有研究表明其模拟

结果与实验数据的误差仅为 5%,故具有较高的可靠性和准确性^[11]。仿真模型如图 4 所示。

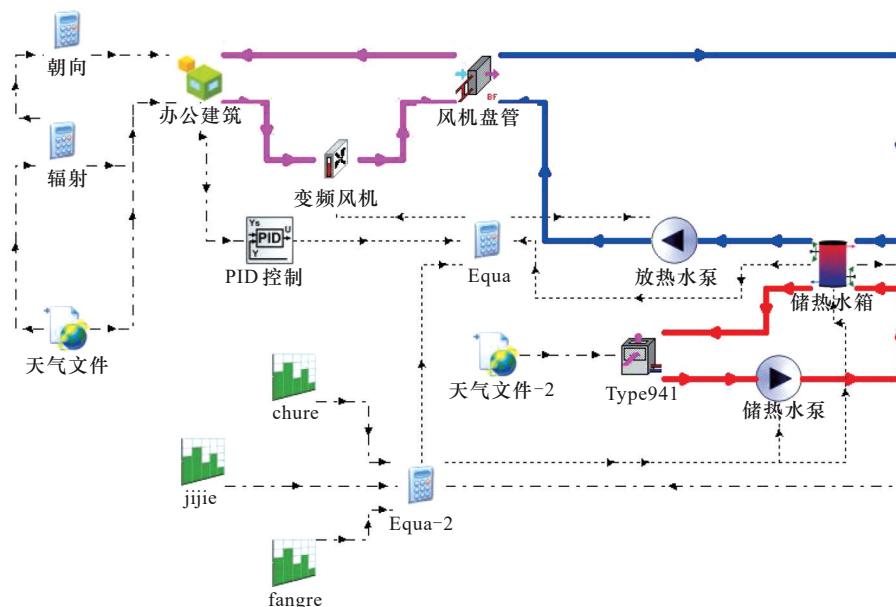


图 4 集成供热系统仿真模型

Fig.4 Integrated heating system simulation model

3.1 示例建筑

本文以寒冷地区某大型开放式办公室为研究对象。该办公室的东、西、北向均为外墙,南向为内走廊,层高为 4.2 m,总建筑面积为 486 m²。北外墙有 12 扇宽 2.5 m、高 1.6 m 的外窗,外墙和外窗的传热系数分别为 0.661 W/(m²·K)和 2.36 W/(m²·K);人员密度为 6 m²/人;照明功率密度 9 W/m²;设备功率密度 20 W/m²;冷风渗透系数为 0.65 次/h;供热的室内设计温度为 20 °C。

3.2 设备选型

使用 TRNBUILD 预测了该办公室的供暖季逐时热负荷。最大负荷出现在 1 月 15 日 9:00,为 41.5 kW。以最大负荷为依据进行热泵选型,所选热泵机组为单级定频空气源热泵,型号为 MAC-D Plus R22。采用 TRNSYS 中的 Type941 模拟热泵的实时性能。该模块可基于热泵的真实运行数据,根据实时室外气温和回水温度进行插值计算,进而得到不同工况下热泵的制热量、耗功量和 COP 等参数。

采用 TRNSYS 中的 Type4c 对储热水箱进行建模。该模块充分考虑了由温度差异引起的密度差异,对水箱内的水进行了分层处理,在综合考虑各层水体与相邻层及环境间热量交换的基础上,建立了分层的能量守恒方程。通过离散化求解,可得到不同时间步长内水温的分布情况。为了准确反映

水箱内的温度场,本文设置了 10 个热分层。另外,参考市场现状,将水箱的单位面积总热损系数设置为 2.3 W/(m²·K)。水箱热损计算如式(1)。

$$Q_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^N U_i C_i H_i (T_i - T_{\text{env}}) + \frac{V_t}{H_t} (U_{\text{top}} (T_1 - T_{\text{env}}) + U_{\text{bot}} (T_N - T_{\text{env}})) \quad (1)$$

式中: Q_{loss} 表示水箱总热损失, W; N 表示水箱分层个数; U_i 表示单位面积分层节点热损系数, W/(m²·K); U_{top} 表示单位面积水箱顶部热损系数, W/(m²·K); U_{bot} 表示单位面积水箱底部热损系数, W/(m²·K); C_i 为水箱周长, m; H_i 为水箱第 i 个分层高度, m; V_t 为水箱容积, m³; H_t 为水箱高度, m; T_i 为第 i 层水温, °C; T_1 为水箱顶部分层节点水温, °C; T_N 为水箱底部分层节点水温, °C; T_{env} 为所处环境温度, °C。

由于水箱容积与其储热量密切相关,因此水箱容积将通过下文的优化方法确定。系统内其他设备的参数如表 1 所示。

4 结果与讨论

4.1 水箱容积与储热温度

水箱容积与储热温度共同决定了系统在储热时段的储热量。若储热量设置过大,将导致储热能耗增加;若储热量设置过小,则会出现放热时段

表 1 其他设备参数
Table 1 Other equipment parameters

部件	参数	TRNSYS Type
储热水泵	额定功率=0.75 kW; 额定流量=10 980 kg/h	Type114
放热水泵	额定功率=0.55 kW; 额定流量=3 760 kg/h	Type114
PID 控制器	比例系数=4 积分系数=1.7	Type23
风机盘管	出风温度=30 ℃ 额定风量=10 200 m³/h	Type753e

水温过低,无法满足用热需求的情况。为了确定水箱容积与储热温度的最优组合,本文针对上述两种运行策略分别进行了18组模拟。储热温度考虑了三个取值:50、55和60℃。同时,在Wu等人研究的基础上^[3],考虑了6种不同尺寸的储热水箱,其容积范围为2.0到3.0 m³,增量为0.2 m³。

在此基础上,针对不同参数组合,模拟了系统在整个供暖季(11月15日至次年3月15日)中的运行情况,并得到了室内温度逐时值。模拟的时间步长设置为0.01 h。

表2汇总了在不同参数组合下,储热能耗和水箱放热时段室内热不舒适小时数的累计值。本文认为当室内实际温度低于设计温度(20℃)时,室内人员感觉不舒适。可以看到,随着储热温度的升高和水箱容积的增加,热不舒适小时数逐渐减少,而储热能耗则不断增加。这是由于水箱温度越高、容积越大,其储热量越大,满足用热需求的能力随之提升,但同时储热时段内系统的运行能耗也越高。

对于策略A,最优的参数组合为储热温度55℃,水箱容积3 m³;对于策略B,储热温度55℃,水箱容积2.8 m³。以上参数组合可在满足水箱放热时段用热需求的前提下,最小化储热能耗。

4.2 辅助电加热功率

在确定水箱容积与储热温度后,仍需对系统内辅助电加热的功率进行优化。过低的加热功率会使水箱在储热时段结束时无法达到储热温度;过高的加热功率则会使水箱快速完成储热,从而增加静置热损。因此,为了优化加热功率,本文分别针对两种运行策略进行了大规模模拟,以寻求能满足放热时段用热需求的电加热功率最小值。在模拟中,假设加热功率为0~13 kW,增量为1 kW。

图5展示了在不同加热功率下,两种策略对应的供暖季内热舒适天数累计值。当未设置辅助电加热时,仅依靠热泵进行储热难以满足用热需求。这是由于单级空气源热泵的出水温度有限,且其运

表 2 不同参数组合下的模拟结果
Table 2 Simulation results with different parameter combinations

储热温度/℃	水箱容积/m³	策略 A		策略 B	
		热不舒适小时数	储热能耗/kWh	热不舒适小时数	储热能耗/kWh
50	2.00	113	1 108.73	91	1 178.53
50	2.20	98	1 238.94	78	1 304.27
50	2.40	90	1 366.97	68	1 425.43
50	2.60	72	1 523.29	54	1 533.11
50	2.80	58	1 630.47	42	1 634.19
50	3.00	49	1 724.90	33	1 722.13
55	2.00	44	2 330.70	32	2 435.88
55	2.20	30	2 546.44	18	2 639.00
55	2.40	19	2 789.02	7	2 841.17
55	2.60	7	2 986.21	2	3 023.50
55	2.80	5	3 167.49	0	3 206.68
55	3.00	0	3 352.91	0	3 243.54
60	2.00	5	3 453.57	2	3 486.88
60	2.20	2	3 735.23	0	3 740.52
60	2.40	0	3 995.01	0	3 988.44
60	2.60	0	4 233.84	0	4 215.70
60	2.80	0	4 424.49	0	4 416.32
60	3.00	0	5 013.63	0	5 020.79

行性能受到室外气温的影响。随着加热功率的增加,热舒适天数的增长趋于平缓。这是由于在整个供暖季中,极寒天气出现的频率相对较低,设置辅助电加热后,很容易满足一些较为温暖日期的用热需求。然而,若要满足最冷日的用热需求,则需要更大的加热功率。综合以上分析,对于策略A和策略B,13 kW和11.5 kW的加热功率能够满足整个供暖季的用热需求。

4.3 运行策略比较

在实现系统优化设计的基础上,本文从能耗、运行成本、消纳潜力等多个角度出发,对两种运行策略进行了比较。在模拟中,策略A、B的水箱容积、储热温度及辅助电加热功率根据前述优化结果确定。除两种运行策略外,还模拟了不设置储热水箱,以及全天由热泵直接供热的基本策略。

图6展示了策略A、B,以及基本策略的供暖季能耗和运行成本累计值。可以看到,基本策略的供暖季能耗最小,为8 012 kWh。由于水箱静置热损的存在,策略A、B都需储存超过实际热负荷的热量,以确保放热时段的用热需求,因此其能耗均高于基本策略。具体来看,策略A的能耗略高于策略B。这是由于策略A在4:30结束储热,在开始放热前,水箱需静置12.5 h,从而引起较大的静置热损。模拟结果显示,采用策略A时,水箱静置热损的累

计值为 1 406 kWh,而策略 B 为 887 kWh。

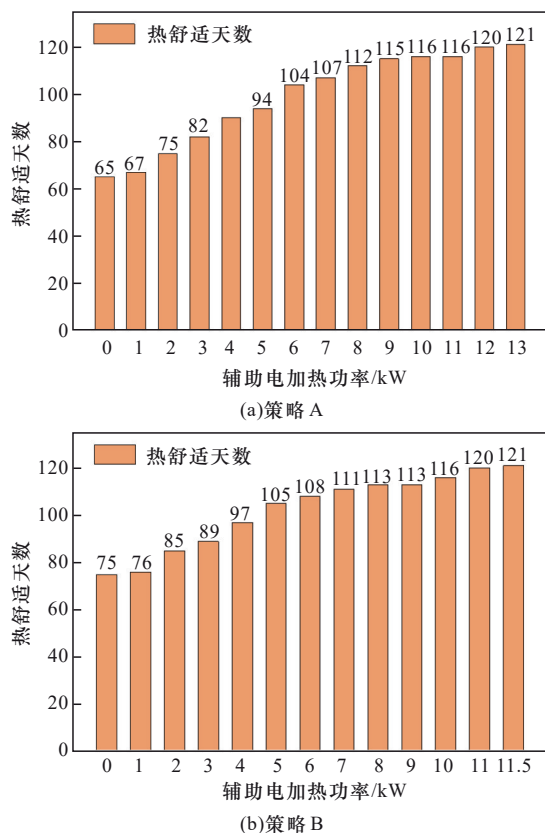


图 5 不同加热功率下供暖季内热舒适天数

Fig. 5 Number of thermal comfort days during the heating season with different heating powers

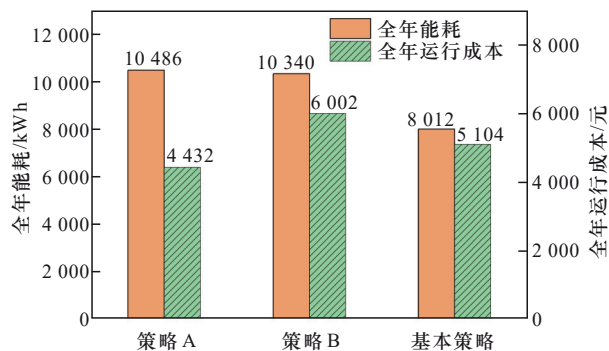


图 6 各策略的供暖季能耗及运行成本累计值

Fig. 6 Cumulative heating season energy consumption and operating cost for each strategy

需要注意的是,尽管策略 B 的储热时段更晚,但此时室外气温却更低。较低的气温使热泵效率降低,导致策略 B 的热泵能耗较高(见表 3)。综合以上因素,虽然策略 A 的能耗高于策略 B,但两者间的差异并不显著。

在成本方面,策略 A 的运行成本最低,为 4 432 元,与基本策略相比,减少了 13%。这是由于策略 A 充分利用了低谷电价。策略 B 的储热时段对应平段电价,虽低于尖峰电价,但由于静置热损的存在,

表 3 策略 A、B 储热时段能耗和热泵 COP

Table 3 Energy consumptions and heat pump COP values for strategy A and B heat storage periods

策略	热泵能耗/kWh	电加热能耗/kWh	储热时段热泵/COP
策略 A	956	2 349	2.71
策略 B	968	2 190	2.64

其运行成本高于基本策略。

凌晨是电网用电需求的低谷期,电网对风电的接纳能力也处于最低水平,因此大规模“弃风”主要发生在 2:00 至 8:00 间(见图 1)。为评估两种策略对风电消纳的影响,本文假设上述时段内产生的系统能耗完全使用风电。需要注意的是,热泵与储热集成供热系统并不直接减少电能的绝对消耗,而是通过储热的方式,将高峰期的电力需求转移到凌晨,从而使原本在大规模弃风时段内可能被弃用的风电得以有效纳入电网。在此基础上,分别计算了两种运行策略的风电消纳潜力,结果如图 7 所示。策略 A 的消纳量为 3 348 kWh;而策略 B 的消纳量较少,为 2 366 kWh。因此,尽管策略 A、B 的能耗均高于基本策略,但两者消耗的非可再生电力均较低。对于策略 A,非可再生电力的消耗减少了 11%。

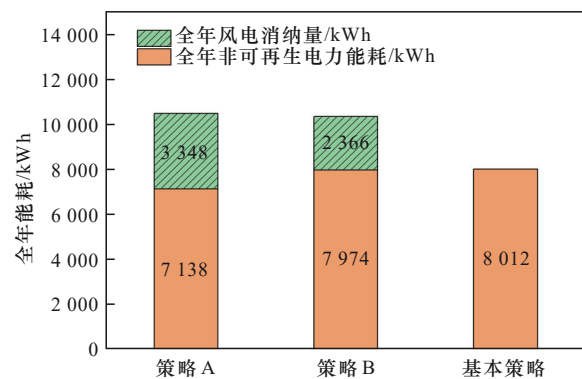


图 7 各运行策略的风电消纳潜力

Fig. 7 Wind power consumption potential for each operating strategy

综上所述,策略 A 可在满足用户用热需求的前提下,节省运行成本 13%,减少非可再生电力消耗 11%,并实现风电消纳 3 348 kWh,是较好的系统运行策略。以上结果证实了单级空气源热泵与储热技术结合为电网提供柔性负荷的可行性。然而,值得注意的是,该技术的能源与经济收益受电价结构、风电数据、室外气象数据等条件的影响。

5 结语

本文提出了单级空气源热泵与储热集成的建筑供热系统,并基于真实的电价结构、风电数据、室

外气象数据,对该系统在典型建筑中的运用进行了 TRNSYS 动态模拟。在实现系统优化设计的基础上,从能耗、运行成本、消纳潜力等多个角度出发,确定了该系统的运行策略。通过研究,得出以下结论。

1)水箱容积与储热温度共同决定了该系统满足高峰期用热需求的能力。对于特定的应用场景,存在上述参数的最优组合,可以同时满足用热需求

和最小化储热能耗。

2)采用辅助电加热提升储热温度是常规单级空气源热泵参与风电消纳的必要条件。对于不同的系统运行策略,所需的加热功率不同。

3)对于示例建筑,采用优化的运行策略可在满足用户用热需求的前提下,节省供暖季运行成本 13%,减少非可再生能源消耗 11%,并实现风电消纳 3 348 kWh。

参考文献:

- [1] BLOESS A, SCHILL W, ZERRAHN A. Power-to-heat for renewable energy integration: A review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials[J]. *Applied Energy*, 2018, 212: 1611-1626.
- [2] HEWITT J N. Heat pumps and energy storage—The challenges of implementation[J]. *Applied Energy*, 2012, 89(1): 37-44.
- [3] WU P, WANG Z, LI X, et al. Energy-saving analysis of air source heat pump integrated with a water storage tank for heating applications[J]. *Building and Environment*, 2020, 33: 180.
- [4] LE X K, HUANG J M, WILSON C, et al. Tariff-based load shifting for domestic cascade heat pump with enhanced system energy efficiency and reduced wind power curtailment[J]. *Applied Energy*, 2020, 257(C): 113976-113976.
- [5] JUNHONG H, XING G, SHUNJIANG W, et al. Dynamic modeling and flexibility analysis of an integrated electrical and thermal energy system with the heat pump-thermal storage[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, 10: 815703.
- [6] VIVIAN J, PRATAVIERA E, CUNSOLO F, et al. Demand side management of a pool of air source heat pumps for space heating and domestic hot water production in a residential district[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 225: 113457.
- [7] FITZPATRICK P, D'ETTORRE F, ROSA D M, et al. Influence of electricity prices on energy flexibility of integrated hybrid heat pump and thermal storage systems in a residential building[J]. *Energy Buildings*, 2020, 223: 110142.
- [8] MAARTEN E, ALICE M, ALESSIA A. Design energy flexibility characterisation of a heat pump and thermal energy storage in a comfort and climate box[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 216: 119154.
- [9] 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.
LE H, LI H Y, JIANG Y. Realization of substituting coal with electricity and enhancing the efficiency of electricity allocation by using air source heat pump[J]. *Energy of China*, 2016, 38(11): 9-15.
- [10] 河北省发展和改革委员会. 关于进一步完善河北南网工商业及其他用户分时电价政策的通知[EB/OL]. (2022-11-03) [2024-03-18]. <https://fgw.cangzhou.gov.cn/fgw/c101713/202403/f236865498a447aabe5b3f38f66e85db.shtml>.
- [11] 张超, 宰相, 鲁梦龙, 等. 基于 TRNSYS 的区域供热系统仿真与模型验证[J]. *建筑科学*, 2021, 37(12): 103-110.
ZHAO C, ZAI X, LU M L, et al. Simulation and model validation of regional heating system based on TRNSYS[J]. *Building Science*, 2021, 37(12): 103-110.

(编辑:赵树庆)