

热泵谷电蓄热供暖系统设计匹配模式的研究

冯国会,李艾浓,常莎莎,黄凯良,张磊

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 对热泵谷电蓄热供暖系统中蓄热水箱放置于热泵机组的源侧和负荷侧的设计形式、夜间谷电向水箱蓄热时为用户末端供暖的热量来源的不同匹配模式进行研究。方法 利用模拟软件 TRNSYS 对热泵谷电蓄热供暖系统的不同设计形式和匹配模式建立仿真模型,在供暖季进行模拟分析,得到系统的性能与经济参数。通过 Origin 对建筑热负荷与不同设计形式之间的关系建立非线性曲线,进行拟合分析。结果 源侧水箱的设计形式系统 COP 为 2.36,耗电量为 4 578.10 kW·h、年电费 2 179.46 元、初投资 18 080 元;负荷侧水箱的 3 种匹配模式系统 COP 在 3.08 ~ 3.29,耗电量在 6 438.12 ~ 7 936.12 kW·h,年电费在 2 638.69 ~ 3 229.88 元,初投资在 33 580 ~ 38 180 元。建立的建筑热负荷与源侧水箱的设计形式之间关系的曲线表达式为 $y = 2\,076.71x^2 + 0.96$;与负荷侧水箱的设计形式的曲线表达式为 $y = 2\,442.54x^2 + 1$ 。结论 设计形式为源侧水箱的经济性更佳,负荷侧水箱系统性能更佳;匹配模式热泵放热的经济性更佳,水箱放热的系统性能更佳。

关键词 谷电蓄热;运行匹配;TRNSYS;供暖系统;热泵系统

中图分类号 TU832

文献标志码 A

Design and Matching Mode of Heat Pump Valley Electric Storage Heating System

FENG Guohui, LI Ainong, CHANG Shasha, HUANG Kailiang, ZHANG Lei
(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The design form of heat storage tank placed on the source side and load side of heat pump unit in heating system of heat pump valley electric heat storage and the different matching modes of heat source for user end heating when valley electric heating tank accumulates heat at night are studied. Simulation models of different design forms and matching modes for heat pump valley electric regenerative heating system were established by the TRNSYS software, and the performance and economic parameters of the system were obtained by simulation in the heating season. And through Origin, the relationship between building thermal load and different design

收稿日期:2021-07-06

基金项目:国家重点研发计划政府间国际科技创新合作项目(2019YFE0100300);国家自然科学基金项目(51778376)

作者简介:冯国会(1964—),男,教授,博士研究生导师,主要从事建筑节能技术方面研究。

forms is analyzed by establishing nonlinear curve fitting. The *COP* of the design form system for the source side water tank is 2.36, and the power consumption, annual electricity charge and initial investment are 4 578.10 kW·h, 2 179.46 yuan and 18,080 yuan respectively. The *COP* of the three matching mode system for the load side water tank is 3.08 – 3.29, power consumption 6 438.12 kW·h – 7 936.12 kW·h, annual electricity fee 2 638.69 yuan – 3 229.88 yuan, and initial investment 33,580 yuan – 38 180 yuan. The established curve expression of the relationship between the building heat load and the design form of the source side water tank is $y = 2\,076.71x^2 + 0.96$. The curve expression for the design form of the load side water tank is: $y = 2\,442.54x^2 + 1$. From the design form, the economy of the source side water tank is better, and the performance of the load side water tank system is better. From the point of view of matching mode, heat pump heat release economy is better, water tank heat release system performance is better.

Key words: valley electric heat storage; match patterns; TRNSYS; heating system; heat pump system

热泵技术实现了能量从不同品位上的转移,谷电蓄热技术实现能量从时间上的转移。因此将热泵与谷电蓄热技术结合起来,可以平衡建筑用能和有效地利用低品位能源。然而,蓄热技术结合峰谷电价虽然能够节省一定比例的电费,但需要根据建筑负荷运行特点,合理选择其设计匹配模式,才能充分发挥热泵与谷电蓄热技术的优势^[1]。黄鑫等^[2]确定电蓄热供暖用蓄热水箱的有效体积的计算公式,给出了电蓄热供暖蓄热水箱有效体积对应建筑面积的估算指标。郭铁明等^[3]根据供冷期负荷出现比例的累计分布,选择适合的蓄冷方式和运行策略。郭啸峰等^[4]认为,水作为地热公共建筑供暖储热材料的技术经济性最好,以陕西为例,当采用水作为储热材料时最佳储热比例为42.2%。尹建杰等^[5]根据负荷分布以系统日运行费用最低为目标函数,对地源热泵机组和蓄热装置进行合理的优化控制,降低了系统运行费用。李倩如^[6]针对地理管地源热泵水蓄热系统提出了一种3阶段决策过程的运行策略优化方法,并结合实际工程得到不同负荷条件下系统的运行策略。石玉香等^[7]介绍了某地源热泵水蓄冷空调系统各种负荷时段的运行策略。王宏伟等^[8]从太阳能与地源热泵联合和交替供暖两方面比较,各有其优点。陈

进等^[9]从能效和经济两个方面提出了蓄热空调系统的主要技术评价指标、计算方法和测试方法。王含等^[10]对比了多能互补式和水罐储能式两种地热能利用系统,选取初投资、运行成本、能源节约、费用年值等评价指标进行对比,表明水罐储能式方案更具经济性。

热泵与谷电蓄热系统结合的方式虽然已有研究,但系统的设计形式与运行匹配模式较单一,通常为谷电时热泵制热储存于蓄热水箱中,峰电时根据负荷需要提取蓄热水箱中的热来为末端供热;蓄热水箱与热泵系统结合的运行模式通常为把蓄热水箱布置在热泵机组的负荷侧。供热形式多偏向于若是谷电蓄热不满足蓄热水箱放热期间的负荷时,一般采用电加热进行补热,电加热的效率要远低于热泵,采用电加热进行补热的方式反而会降低系统的综合性能,在热泵谷电蓄热供暖系统中蓄热水箱的匹配模式还需要进行研究^[11]。

笔者基于 TRNSYS 模拟对蓄热水箱放置于热泵源侧和负荷侧的设计模式与谷电时为末端用户供热的不同匹配模式进行研究,同时对承载系统的超低能耗建筑不同使用建筑面积下的设计模式进行分析。通过对模拟结果进行分析,得到在满足不同使用需求下

蓄热水箱在热泵谷电蓄热供暖系统中的运行方案。

1 热泵谷电蓄热供暖系统模型

1.1 建筑概况与建筑负荷

供暖系统搭载建筑为辽宁省沈阳市某一超低能耗建筑,总占地面积为 167.95 m^2 。该项目为示范建筑,根据 DEST 负荷计算,得到极端负荷日为1月13日,建筑最大热负荷为 9.93 kW ,日间用电峰电 16 h ,建筑总热负荷为 101.5 kW 。

1.2 热泵谷电蓄热供暖系统

1.2.1 系统设计形式

搭建热泵与蓄热水箱相结合的热泵谷电蓄热供暖系统,按照蓄热水箱布置在热泵机组的源侧或负荷侧,将系统的设计形式分为:源侧水箱和负荷侧水箱。

(1)源侧水箱。源侧水箱的设计形式为蓄热水箱布置在热泵机组源侧(如图1所示)。在夜间谷电时,热源向水箱中蓄存热量,日间峰电时放出水箱中的热量到热泵机组中制热,为用户末端供暖。源侧水箱的设计形式,不同匹配模式对系统性能和经济性影响不大。

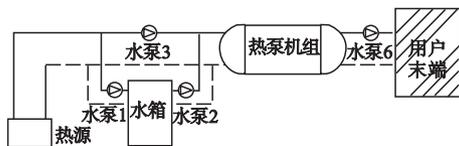


图1 源侧水箱设计形式

Fig. 1 Sourceside water tank design

(2)负荷侧水箱。负荷侧水箱的设计形式为蓄热水箱布置在热泵机组的负荷侧(如图2所示)。在夜间谷电时,热泵机组制热向水箱中蓄存热量,日间峰电时放出水箱中

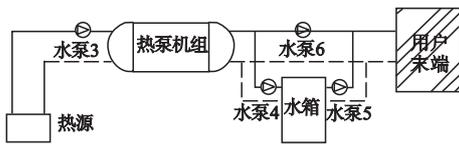


图2 负荷侧水箱设计形式

Fig. 2 Loadside water tank design

的热量,为用户末端供暖。

1.2.2 系统匹配模式

笔者基于负荷侧水箱的设计形式(见图2),根据系统在夜间谷电热泵机组制热向水箱蓄热时为用户末端供暖的热量来源的不同,将负荷侧水箱设计形式的系统进一步分为3种匹配模式。

(1)负荷侧水箱,热泵放热

在夜间谷电时水泵3开启,为热泵机组制热,水泵4开启,向蓄热水箱蓄热时,水泵6同时开启,由热泵机组制热为用户末端供暖;日间峰电水泵5开启,释放水箱中热量为用户末端供暖。热泵放热的匹配模式概述为夜间谷电水箱蓄热时由热泵制取热量直接供给用户。

(2)负荷侧水箱,水箱放热

在夜间谷电时水泵3开启,为热泵机组制热,水泵4开启,向蓄热水箱蓄热时,水泵5同时开启,放出水箱中热量为用户末端供暖;日间峰电水泵5开启,释放水箱中热量为用户末端供暖。水箱放热的匹配模式概述为夜间谷电水箱蓄热时释放水箱中热量间接供给用户。

(3)负荷侧水箱,判断放热

在夜间谷电时水泵3开启,为热泵机组制热,水泵4开启,向蓄热水箱蓄热时,水泵5和水泵6根据温差控制在夜间谷电交替开启,为用户末端供暖;日间峰电水泵5开启,释放水箱中热量为用户末端供暖。判断放热概述为根据温差控制由热泵机组或是蓄热水箱为用户末端供暖。具体温差判断的控制条件为:热泵与蓄热水箱出口水温度之间的温差是否低于 $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。若温差小于 $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$,则优先选取水箱放热;反之,选取热泵放热。

1.2.3 系统模式

根据系统的设计形式和匹配模式,笔者建立4种设系统模式。系统设计形式中源侧水箱为模式一,系统匹配模式确立为模式二、三、四。

模式一:源侧水箱。在夜间谷电时,水泵1和水泵3开启,由热源向水箱中蓄存热量的同时为热泵机组制热提供热源;日间峰电时,水泵2开启,释放水箱中的热量到热泵机组制热为用户末端供暖。模式二:负荷侧水箱,热泵放热。模式三:负荷侧水箱,水箱放热。模式四:负荷侧水箱,判断放热。

1.3 选型

1.3.1 蓄热水箱容积计算

蓄热水箱容积 V_x 的计算式为

$$V_x = \frac{Q_p}{c\Delta t \times 1000} \times \Delta T. \quad (1)$$

式中: Q_p 为蓄热水箱承担负荷时间段内总负荷, kJ/h; c 为水比热容, 4.19 kJ/(kg·K); Δt 为热泵源侧进出口水温差, °C; ΔT 为运行时间, h。

(1) 负荷侧水箱蓄热率 100% 容积计算

不同的设计形式下, Q_p 的值不同。负荷侧水箱蓄热率 100%, 蓄热水箱需要承担的是极端负荷日的日间峰电 16 h 负荷段负荷, 此时总负荷为 101.5 kW, $Q_p = 101.5$ kW。蓄热水箱容积按照供回水温差、流量与时间来计算, 代入式(1)得:

$$V_x = \frac{Q_E}{c\Delta t} \times \Delta T = 0.86 \times \frac{101.5}{5} = 17.5 \text{ m}^3$$

(2) 源侧水箱蓄热率 100% 容积计算

蓄热水箱的容积选取应按照承担最极端负荷日时间段内的源侧负荷。

$$Q_p = Q_s. \quad (2)$$

式中: Q_s 为源侧负荷, kW。

热泵供热模式下源侧负荷与负荷侧负荷转换为

$$Q_s = Q_E \times \left(1 - \frac{1}{COP}\right). \quad (3)$$

式中: COP 为热泵机组的制热性能系数, 取 4.5。

源侧水箱蓄热水箱容积确定代入式

(1)、式(2)、式(3)得:

$$V_x = \frac{Q_s}{c\Delta t} \times \Delta T = 0.86 \times \frac{101.5}{5} \times \left(1 - \frac{1}{4.5}\right) = 13.6 \text{ m}^3$$

1.3.2 热泵机组额定制热量计算

(1) 源侧水箱热泵机组承担负荷

热泵机组全天制热, 所需的制热量应能满足最不利日 1 月 13 日最大热负荷 9.93 kW。

(2) 负荷侧水箱热泵机组承担负荷

热泵机组需要在夜间 8 h 向水箱中蓄存日间 16 h 热负荷, 同时还要满足夜间 8 h 的最大热负荷。选取最不利日进行计算, 最终热泵机组所需承担的热负荷为 31.01 kW。

根据对系统的模拟结果, 并确保热泵机组供暖热水出口温度达到 45 °C, 最终得到的源侧热泵机组额定制热量为 11 kW, 负荷侧热泵机组额定制热量为 40 kW。

1.3.3 水泵流量计算

水泵所需流量计算式为

$$G = \frac{Q_p}{c\Delta t}. \quad (5)$$

式中: G 为水泵流量, m³/h。

1.3.4 水泵功率计算

$$P = \frac{G \times H}{360 \times \eta}. \quad (6)$$

式中: P 为水泵功率, W; H 为扬程, m; η 为水泵效率。

1.4 系统模型的建立

对 4 种系统模式在 TRNSYS 中建立仿真模型, TRNSYS 模拟系统如图 3 所示。

2 结果与分析

2.1 系统性能分析

(1) 系统设计形式的 COP 与负荷率

COP 与负荷率对比如图 4 所示, 模式一为源侧水箱, 模式二、三、四为负荷侧水箱。

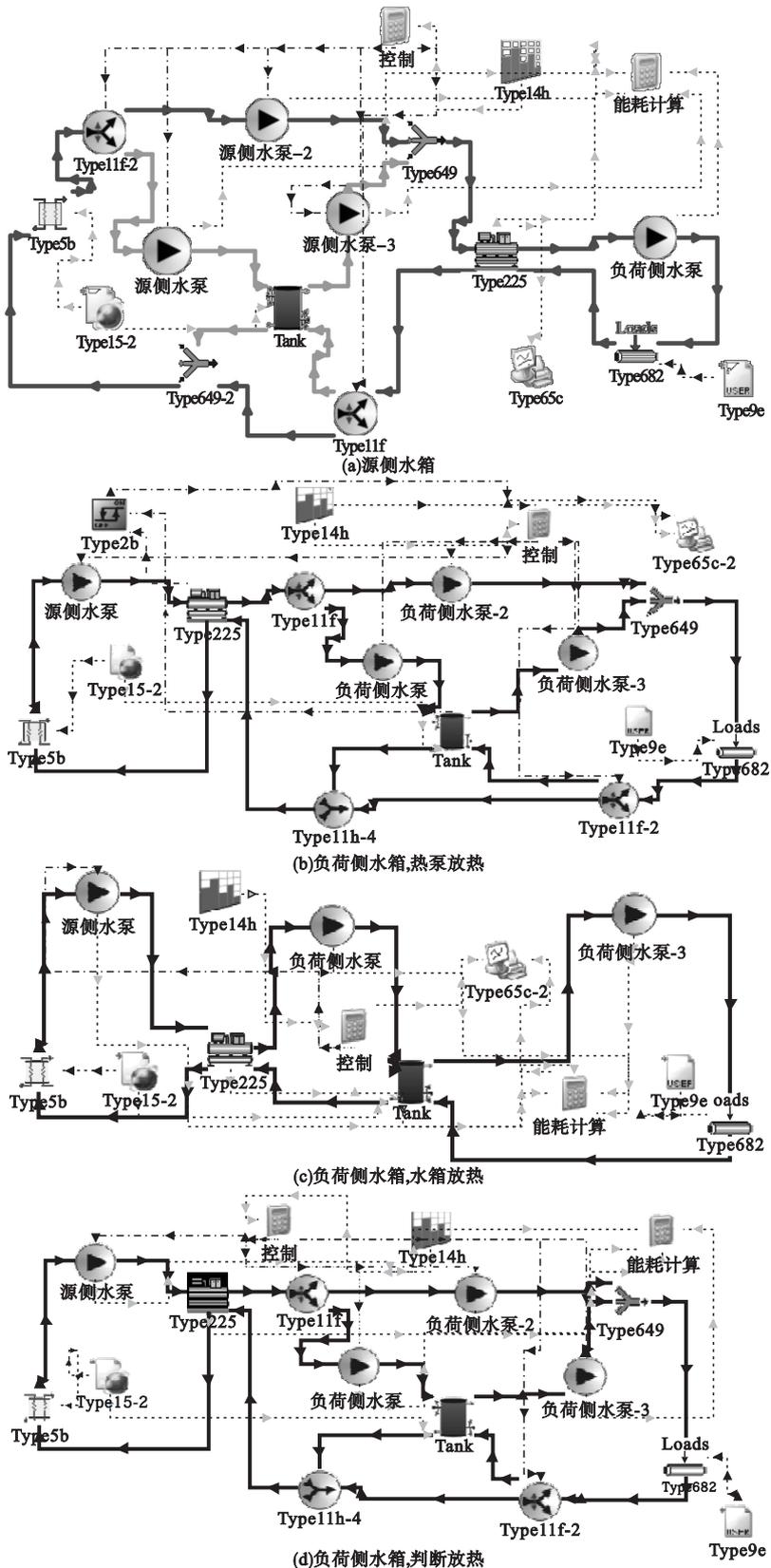


图3 TRNSYS 系统模拟图

Fig. 3 System simulation diagram

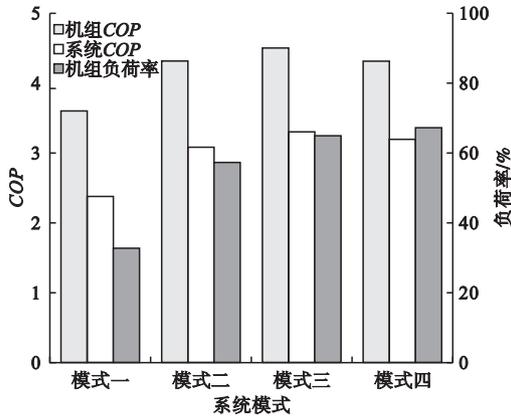


图4 COP与负荷率对比

Fig. 4 Comparison of COP and load rate

负荷侧水箱模式二、三、四的系统COP在3.08~3.29,要比源侧水箱模式一的系统COP的2.36高出31%、39%、35%。从负荷率的变化来看,负荷侧水箱热泵机组只在夜间运行,在夜间谷电时需要向蓄热水箱中蓄存峰电时所需的热量,同时要制取出能供给建筑实时负荷的热量,热泵机组在夜间8h集中制取全天24h的热量,热泵机组的负荷率也就较大。而源侧水箱在全天运行,热泵机组根据负荷的实时变化制取热量来满足建筑负荷,实时负荷不定,且波动较大,相较负荷侧水箱负荷率较小。而机组的负荷率和机组的制热能效相关,当机组的负荷率在50%~100%,机组的COP维持在比较高的范围内,不会有太大的变化;当负荷率在50%以下时,机组的COP会出现较大的下降^[12]。由图4可以看出,蓄热水箱位于源侧时机组的负荷率在50%以下。蓄热水箱位于负荷侧位置时机组的负荷率在70%~80%。负荷侧水箱的负荷率高于源侧水箱,机组的COP也较源侧水箱的机组COP高于20%,相应系统的COP高于源侧水箱30%以上。

(2) 系统匹配模式的COP与负荷率

从系统设计形式可以看出,负荷侧水箱的形式系统性能更佳。基于负荷侧水箱的设计形式下,热泵机组在谷电蓄热时为用户末

端供暖的热量来源可分为热泵放热、水箱放热、热泵与水箱切换放热这样3种匹配模式,分别对应模式二、模式三、模式四。通过对图4中这3种匹配对整个系统的影响进行分析,从而选出最佳的匹配模式。

负荷侧水箱的设计形式下,3种模式的负荷率均在50%~100%,模式二热泵放热的负荷率最低。蓄热水箱在蓄热的同时放热,蓄热水箱中蓄存的水为高温水,蓄热水箱的热损失量也相应增大,热泵机组在日间谷电时间内时制取的热量相应较其他模式增多,从而导致机组的负荷率增大,机组和系统的COP增加。模式三水箱放热的系统COP最高为3.29,相对于模式二的3.08和模式四的3.18,分别高出7%和3%。模式四判断放热的模式,是水箱放热和热泵放热两种模式的综合,从负荷率上看,判断放热的负荷率要高于水箱放热,但机组COP和系统COP上没有水箱放热的模式高,且在系统设计上,多增加了一条环路,并且判断放热的模式控制较复杂,不予推荐。

2.2 经济性分析

2.2.1 耗电量与电费

(1) 系统设计形式的耗电量与电费

从对源侧水箱和负荷侧水箱的机组制热量选型参数可以看出,对于热泵谷电蓄热供

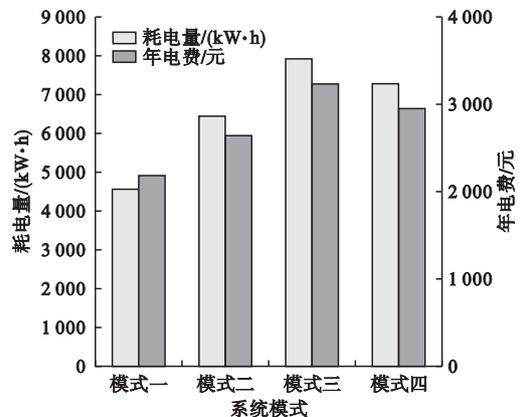


图5 耗电量与年电费对比

Fig. 5 Comparison of electricity consumption and annual electricity charges

暖系统,负荷侧水箱的设计形式由于热泵机组在夜间谷电电费较低时需要制热承担全天负荷的高温水。源侧水箱的设计形式中,谷电节能的核心则是在夜间利用大流量蓄热泵把来自源侧的水蓄存在蓄热水箱中,峰电时只需要用小流量泵将蓄热水箱中的水源供给热泵机组,只需要按照最大负荷来对热泵机组选型。相对比可以看出,源侧水箱的热泵机组选型要远小于负荷侧水箱热泵机组选型。

如图5所示,在热泵供暖系统中,热泵机组的耗电量要远大于水泵的耗电量,所以模式一源侧水箱的耗电量和电费要远低于模式二、

三、四对应的负荷侧水箱。源侧水箱的电费相对比负荷侧水箱分别降低17%、33%、26%。

为了进一步验证建筑面积大小对热泵谷电蓄热供暖系统中源侧水箱和负荷侧水箱的耗电量和电费的影响,改变系统搭载建筑面积,对热负荷进行缩小与放大,分别选取热负荷与原建筑负荷比值为0.2、0.5、2、3倍,对两种设计形式进行对比分析。由于蓄热水箱位于负荷侧的设计形式中模式二热泵放热最为节能,选取热泵放热的匹配模式与源侧水箱进行对比。

模拟结果如图6所示。

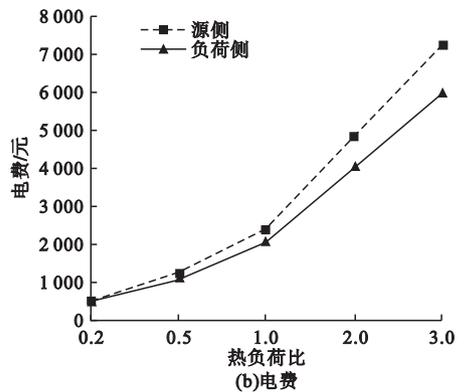
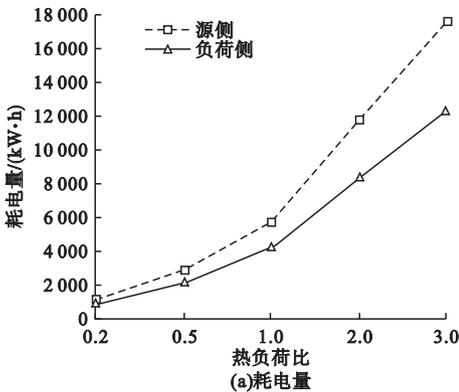


图6 耗电量和电费与系统设计形式拟合曲线

Fig.6 Fitting curve of power consumption and electricity charge

从图6中可以看出,随着建筑面积的增长,在建筑热负荷增大下,负荷侧水箱的耗电量持续增加,但峰谷电费的增加趋势变缓,说明峰谷电价在负荷侧水箱的运行模式,减少的电费幅度更大。但峰谷电费减少的电费不足以抵消耗电量增大而导致的电费增加量,随着建筑面积的增大,负荷侧水箱的电费超出源侧水箱电费的比例逐渐增大。

利用origin将源侧水箱和负荷侧水箱和年电费之间的数据拟合成曲线,结果如下:源侧水箱设计形式时,建筑热负荷与年电费的曲线表达式为: $y = 2076.71x^2 + 0.96$;负荷侧水箱设计形式时,建筑热负荷与年电费的曲线表达式为: $y = 2442.54x^2 + 1$ 。经过拟合结果分析,在建筑热负荷与该超低能耗建筑热负荷的比值为0.015时,源侧水箱电费才

会低于负荷侧水箱的电费。在蓄热水箱的蓄热率为100%的情况下,源侧水箱的设计形式更为节能。

从利用峰谷电降低电费的角度分析,负荷侧水箱电费的价格降低幅度比源侧水箱的设计形式更大。但由于影响耗电量的关键部件仍然为热泵机组,负荷侧水箱的热泵机组选型远大于源侧水箱的热泵机组选型,仍然是源侧水箱的年电费要低于负荷侧水箱的年电费。相对比可知,峰谷电价的政策更适用于负荷侧水箱的设计形式,这时降低的电费更多。

(2) 系统匹配模式的耗电量和电费

从耗电量和电费上来分析,如图5所示,最节能经济的模式为模式二热泵放热,模式四判断放热和模式三水箱放热较其分别节省

电耗 13% 和 23%; 节省电费 12% 和 22%。这是由于热泵放热在水箱中蓄存的热量和水箱的容积相较于另两种匹配模式要少, 由此热泵放热的匹配模式热损失最少, 耗电量和电费最低。

2.2.2 初投资计算

(1) 热泵机组初投资计算

负荷侧水箱的热泵机组按照所需负荷选型要比源侧水箱热泵机组选型要大, 热泵机组的价格 F 按照额定制热量 0.38 元/W 来进行计算^[13]。

源侧水箱, 对应于模式一热泵机组的价格为

$$F_{\text{源}} = 0.38 \times \frac{40\,000}{3.6} = 4\,222 (\text{元})$$

负荷侧水箱, 对应于模式二、三、四热泵机组的价格为

$$F_{\text{负荷}} = 0.38 \times \frac{144\,000}{3.6} = 15\,200 (\text{元})$$

(2) 蓄热水箱容积价钱按 500 元/m³ 的价格计算^[14]。

(3) 水泵的价格选择按照 1 000 元/台来计算^[14]。

(4) 安装调试费。安装调试费按照设备材料费 15% 计算^[15]。

初投资费用最低为模式一, 最高为模式三。初投资计算如表 1 所示。

表 1 初投资计算表

Table 1 Preliminary investment calculation table

系统模式	热泵机组 价格/元	蓄热水箱 容积/m ³	蓄热水箱 价格/元	水泵数 量/个	水泵价 格/元	设备材料费 合计/元	安装 调试费/元	初投资 合计/元
模式一	4 222	15	7 500	4	4 000	15 722	2 358	18 080
模式二	15 200	20	10 000	4	4 000	29 200	4 380	33 580
模式三	15 200	30	15 000	3	3 000	33 200	4 980	38 180
模式四	15 200	25	12 500	4	4 000	31 700	4 755	36 455

从表 1 可以看出, 源侧水箱模式一的初投资最低为 18 080 元, 负荷侧水箱的 3 种匹配模式中热泵放热模式二的初投资最低为 33 580 元。

系统的设计形式蓄热水箱位于热泵机组源侧的设计形式模式一, 系统初投资和运行费用上都更加节能, 相较于蓄热水箱位于热泵机组负荷侧的设计形式模式二、三、四, 运行费用分别节省 26%, 53%, 41%。蓄热水箱位于热泵机组负荷侧的设计形式系统的性能最佳, 机组 COP 和系统 COP 分别高于源侧水箱的 20% 和 30%。

系统的不同匹配模式中, 热泵放热模式二的最为节能经济, 至少节约电量和电费 13% 和 12%。水箱放热模式三的模式系统性能最佳, 机组的 COP 提高 4%, 系统的 COP 至少增大 3%。

3 结 论

(1) 峰谷电政策在系统中的运用可以降低系统的运行费用, 从设计形式上看, 蓄热水箱位于热泵机组的负荷侧降低费用的比例更大, 但若蓄热水箱位于热泵机组的负荷侧时热泵机组选型过大, 仍然为蓄热水箱位于热泵机组源侧的设计形式更为经济。

(2) 在蓄热水箱蓄热率为 100% 的情况下, 源侧水箱与负荷侧水箱的对比中, 源侧水箱利用谷电蓄热仍然比负荷侧水箱更为节能。且通过对系统搭载的超低能耗建筑热负荷进行缩放下, 只有在与原热负荷比值为 0.015 以下时, 负荷侧水箱的电费才比源侧水箱更低, 而负荷侧水箱的系统性能要比源侧水箱更佳。

(3) 基于负荷侧水箱的设计形式下, 系

统在夜间谷电向水箱中蓄热不同热量来源的匹配模式中,热泵放热的匹配模式最为节能经济,水箱放热的模式系统性能最佳。

参考文献

- [1] 肖安汝. 谷电驱动 GSHP 耦合太阳能蓄热供暖系统模拟研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020.
(XIAO Anru. Simulation study on GSHP coupled solar thermal storage and heating system driven by valley electricity [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2020.)
- [2] 黄鑫. 如何合理确定电蓄热供暖蓄热水箱的容积[J]. 建筑科学, 2000, 16(6): 57-60.
(HUANG Xin. How to determine the volume of heat-storage water tank used in electric heat-storage heating [J]. Building science, 2000, 16(6): 57-60.)
- [3] 郭铁明. 不同建筑类型负荷组成及蓄冷方案研究[J]. 低温建筑技术, 2015, 37(6): 14-16.
(GUO Tieming. Study on load composition and cold storage scheme of different building types [J]. Low temperature architecture technology, 2015, 37(6): 14-16.)
- [4] 郭啸峰, 李瑞霞. 储热技术在地热公建供暖中的优化应用与运行策略研究[J]. 建筑科学, 2020, 36(8): 152-159.
(GUO Xiaofeng, LI Ruixia. Optimal application and operation strategy of heat storage technology in geothermal heating of public buildings [J]. Building science, 2020, 36(8): 152-159.)
- [5] 尹建杰, 吕建. 地源热泵-水蓄能系统的优化运行探讨[J]. 天津城建大学学报, 2014, 20(5): 346-350.
(YIN Jianjie, Lü Jian. Research on the optimal operation of ground source heat pump-water storage system [J]. Journal of Tianjin chengjian university, 2014, 20(5): 346-350.)
- [6] 李倩如. 基于 TRNSYS 的复合能源系统运行策略寻优模块的构建[D]. 天津: 天津大学, 2014.
(LI Qianru. Optimization module construction of the complex energy system based on TRNSYS [D]. Tianjin: Tianjin university, 2014.)
- [7] 石玉香, 尚海亮. 某药厂地源热泵水蓄冷(热)空调系统设计[J]. 制冷, 2011, 30(3): 59-63.
(SHI Yuxiang, SHANG Hailiang. Ground-source heat pump combined with thermal storage air conditioning system for a pharmaceutical firm [J]. Refrigeration, 2011, 30(3): 59-63.)
- [8] 王宏伟, 于鑫. 太阳能-地源热泵系统供暖模式[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(3): 519-524.
(WANG Hongwei, YU Xin. Research on heating conditions of the solar energy-ground source heat pump system [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29(3): 519-524.)
- [9] 陈进, 成建宏, 胡明霞. 《蓄能空调系统绩效评价与计算测试方法》制定思路分析[J]. 制冷与空调, 2018, 18(11): 83-86.
(CHEN Jin, CHENG Jianhong, HU Mingxia. Brief analysis on evaluation and testing method for energy performance of energy-storage air conditioning systems [J]. Refrigeration and air-conditioning, 2018, 18(11): 83-86.)
- [10] 王含, 郑新, 张金龙. 储能式地热能综合能源系统效益分析[J]. 建筑节能, 2019, 47(3): 60-64.
(WANG Han, ZHENG Xin, ZHANG Jinlong. Benefit analysis of integrated energy systems using geothermal energy-stored in buildings [J]. Building energy efficiency, 2019, 47(3): 60-64.)
- [11] 李树一. 近零能耗建筑热泵与蓄能耦合供能系统技术经济分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
(LI Shuyi. Technical and economic analysis of heat pump coupled with energy storage system in near-zero energy building [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.)
- [12] 李蒙蒙, 任绳凤, 吕建, 等. 负荷率及进户侧水温对水源热泵机组性能的实验研究[J]. 天津城建大学学报, 2018, 24(5): 355-358.
(LI Mengmeng, REN Yingfeng, Lü Jian, et al. Experimental study of the performance of water source heat pump system in winter with load rate and inlet side water temperature [J]. Journal of Tianjin chengjian university, 2018, 24(5): 355-358.)
- [13] 朱天利. 地源热泵系统结合峰谷电蓄能集成技术的节能应用[J]. 资源节约与环保, 2013(12): 26-27.
(ZHU Tianli. Energy saving application of ground source heat pump system combined with peak-valley electric energy storage integration technology [J]. Resources economization & environmental protection, 2013(12): 26-27.)
- [14] 邓星勇. 长沙地区太阳能-土壤源热泵热水系统运行模拟研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
(DENG Xingyong. Running simulation and research of solar-soil source heat pump hot water systems in Changsha [D]. Changsha: Hunan University, 2014.)
- [15] 谢铭. 地源热泵系统的节能性经济性分析-以大同中院项目为例[D]. 北京: 清华大学, 2016.
(XIE Ming. Economical efficiency and energy conservation research on the ground-source heat pump application of Datong court [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.)

(责任编辑: 王国业 英文审校: 唐玉兰)