

蓄热式中深层地热供暖系统运行策略分析

朱超, 师鹏, 张拓, 李壮, 权琛, 李峰

(国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 西安 710100)

摘要: 蓄热式中深层地热供暖系统提取地下 2 000~3 000 m 的中深层地热作为热源, 并耦合蓄热装置, 实现建筑物的清洁供能, 平衡电网负荷。系统的运行控制策略对系统性能的影响较大。为了研究蓄热式中深层地热供暖系统的运行控制策略, 基于 TRNSYS 软件建立了西安地区三种典型公共建筑的热负荷模型和蓄热式中深层地热供暖系统仿真流程。根据三种典型公共建筑的热负荷特性, 探究蓄热式中深层地热供暖系统的运行控制策略对电网的“移峰填谷”效果和运行经济性分析。结果表明: 对于办公建筑, 释能优先运行模式和定比例控制运行模式具有较好的移峰填谷作用, 其中, 释能优先运行模式的日运行费用最低, 为 132.35 元; 对于酒店建筑, 由于全天 24 h 均有热负荷, 因此供暖系统运行策略为在谷电时间段内, 热泵机组满负荷运行, 首先满足建筑热负荷, 剩余部分进行蓄热, 在峰电时间段内, 采用机组优先运行模式, 日运行费用为 326.83 元; 对于商场建筑, 定比例控制运行模式的移峰填谷作用最佳, 日运行费用最低, 为 120.49 元。

关键词: 中深层地热; 蓄热; 典型建筑; 运行控制策略; 移峰填谷

中图分类号: TK521; TB657.5

文献标志码: A

文章编号: 1006-7086(2024)02-0196-10

DOI: 10.12446/j.issn.1006-7086.2024.02.013

Analysis of the Operation Strategy for Heat Storage Middle-deep Geothermal Heating System

ZHU Chao, SHI Peng, ZHANG Tuo, LI Zhuang, QUAN Chen, LI Feng

(State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The heat storage middle-deep geothermal heating system extracts geothermal energy from the underground at depths of 2 000-3 000 meters as a heat source, and is coupled with a thermal storage system to provide clean energy to buildings and balance the electrical grid load. The operation control strategy of the system has a significant impact on its performance. In order to study the operation control strategy of the heat storage middle-deep geothermal heating system, the thermal load models of three typical public buildings in Xi'an were established using TRNSYS software, along with a simulation process for the heat storage middle-deep geothermal heating system. Based on the thermal load characteristics of the three building types, the effects of different operation control strategies on peak shaving and load shifting of the electrical grid were explored, as well as the analysis of operational economics. The results show that for office buildings, release energy priority mode and determine proportions control mode have a good peak load shifting effect. The daily operating cost of the release energy priority mode is the lowest ¥132.35. For hotel buildings, there is a heat load demand within 24 hours of hotel building, so the control strategy is during the valley power time period and the flat power time period, the heat pump unit runs at full load. After the thermal load of the heat pump unit meets the heat load of the building, the remaining part of the thermal load of the heat pump unit is used for heat storage. During the peak power time period, the middle-deep ground source heat pump coupled heat storage system of the hotel building adopts unit priority operation mode. Using the above operation control strategy, the daily operation cost is ¥326.83. For the mall buildings, determine proportions control mode have the best peak load

收稿日期: 2023-11-27

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(5400-202132162A-0-0-00)

作者简介: 朱超, 博士, 高级工程师, 主要从事中深层地热技术、火电机组深度调峰技术、光伏光热技术研究。

E-mail: zhuchao_xjtu@163.com

引文信息: 朱超, 师鹏, 张拓, 等. 蓄热式中深层地热供暖系统运行策略分析[J]. 真空与低温, 2024, 30(2): 196-205.

ZHU C, SHI P, ZHANG T, et al. Analysis of the operation strategy for heat storage middle-deep geothermal heating system[J]. Vacuum and Cryogenics, 2024, 30(2): 196-205.

shifting effect, and the daily operating cost of the release energy priority mode is the lowest ¥120.49.

Key words: middle-deep layer geothermal; heat storage; typical building; operation control strategy; peak load shifting

0 引言

近年来,我国城镇化进程不断推进,建筑的面积和能耗也日益增加。根据统计计算,2019年全年建筑运行阶段能耗为10.3亿吨标准煤,占全国能源消费总量的比重为21.2%^[1]。而公共建筑由于其自身体量大、结构复杂、功能多样的特点,其单位建筑能耗是普通住宅的3~5倍,大型公共建筑甚至可以达到5~10倍^[2]。

中深层地热供暖系统利用布置在地下2 000~3 000 m的地理管换热器提取地热,再进一步通过热泵机组提升地热的品位从而实现对建筑物供热。该系统利用可再生的地热资源对建筑物进行供热,且在其工作过程中避免了对地下水环境造成的污染,具有不易受地面气候条件影响等优点^[3-6],受到了国内外学者的广泛关注。学者们针对地热供暖系统中的地理管换热器的传热性能进行了大量数值模拟研究,探究了岩土导热系数、进水温度与流速、地温梯度等关键因素对地理管换热器传热性能的影响,并对地理管换热器的结构和运行参数进行了优化设计^[7-12]。此外,景登岩等^[13]基于TRNSYS软件,对中深层地热供暖系统的运行特性进行了仿真研究。

在上述研究中,大多数将研究重点聚焦在地热供暖系统的传热性能和运行特性上,而在实际运行过程中,受气候条件的影响,用户的供热需求相对集中,在同一时间段内大量使用供热设施造成电网负荷过重,电网调峰运行能力降低^[14]。蓄热式地热供暖系统将热泵系统与蓄热系统进行耦合,可以在电力负荷低谷时间段内,通过热泵系统将低品位热能转换为高品位热能,并通过蓄热系统将产生的高品位热能储存起来,在电力负荷高峰时间段对建筑物供热^[15],以达到对电力需求“削峰填谷”,平衡电网负荷的目的。国内外的众多学者也分别从系统和部件等多个角度,结合实际工程应用和仿真模拟等手段,对蓄热式供暖系统的经济性、节能特性和环保性等多方面进行了优化与评估^[16-22]。

根据上述研究,可以发现对于蓄热式中深层地热供暖系统,其系统运行控制策略将直接决定系统的经济性和对电网的“移峰填谷”效果。因此,为了进一步探讨蓄热式中深层地热供暖系统的运行

控制策略,本文建立了西安地区的办公、商业以及酒店三种典型公共建筑的热负荷模型,并根据不同典型建筑物的用能特点,结合西安地区的峰谷电价,对不同典型公共建筑的蓄热式中深层地热供暖系统的运行控制策略进行讨论。

1 系统组成与工作原理

蓄热式中深层地热供暖系统流程如图1所示。该系统由中深层地理管子系统、热泵机组子系统、蓄热子系统以及供热末端组成。

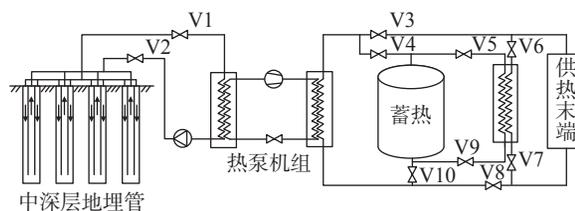


图1 蓄热式中深层地热供暖系统流程图

Fig. 1 The flowchart of the thermal storage middle-deep geothermal heating system

该系统的工作原理为:当阀门V1、V2、V4、V10开启,阀门V3、V5、V6、V7、V8、V9关闭时,中深层地理管从地下岩土中提取的热量经热泵机组提升品位后,进入蓄热罐内,并在蓄热罐内与蓄热介质进行换热,将热量储存在蓄热罐内;当阀门V1、V2、V3、V8开启,阀门V4、V5、V6、V7、V9、V10关闭时,中深层地理管从地下岩土中提取的热量经热泵机组提升品位后,直接对供热末端进行供热;当阀门V5、V6、V7、V9开启,阀门V1、V2、V3、V4、V8、V10关闭时,蓄热罐释放储存的热量,对供热末端进行供热。该系统可以根据电网的负荷变化情况,通过对供热、蓄热运行参数的调节,实现系统在蓄热供热、蓄热或地热供热状态间的切换。

2 系统模拟及评价模型

2.1 典型公共建筑逐时热负荷模型构建

陕西省西安市位于渭河流域中部关中盆地,属于暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明、气候温和、雨量适中。根据GB 50189—2015《公共建筑节能设计标准》^[23]中的规定,西安地区属于寒冷地区,每年供暖期为11月15日至次年3月15日。本文基

于 TRNSYS 软件建立了典型公共建筑的逐时热负荷仿真模型, 仿真所用的气象数据调用 TRNSYS 软件中的附带的西安地区典型年(Typical Meteorologic Year)气象数据, 其中建筑物供暖面积约 3 650 m², 供暖温度 20 ℃, 建筑围护结构热工性能限值和典型公共建筑作息表分别如 GB 50189—2015 中规定, 得到典型公共建筑全年逐时热负荷如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 办公建筑全年累计热负荷为 103 040.63 kW·h, 其中, 最大逐时热负荷为 183.75 kW, 出现在 1 月 14 日; 酒店建筑全年累计热负荷为 271 129.78 kW·h, 其中, 最大逐时热负荷为 170.30 kW, 出现在 1 月 2 日; 商场建筑全年累计热负荷为 79 900.24 kW·h, 其中, 最大逐时热负荷为 144.91 kW, 出现在 1 月 14 日。

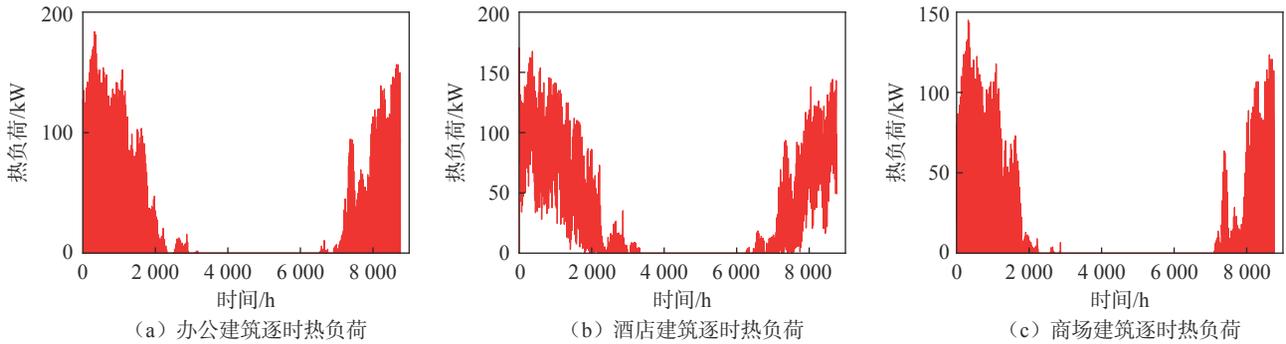


图 2 典型公共建筑逐时热负荷结果

Fig. 2 Heating load simulation results of typical public building

2.2 蓄热式中深层地热供暖系统模型构建及验证

本文基于 TRNSYS 软件建立了蓄热式中深层地热供暖系统仿真模型, 如图 3 所示。该仿真模型中的主要模块包括地理管换热器(Type 557 d)、热泵机组(Type 927)、分层蓄热水箱(Type 153)、数据输出模块、数据读取模块和控制模块。其中, 地理管

换热器采用套管式换热器, 套管式换热器中的外管用特种钢管, 导热系数为 16.3 W/(m·K), 内管用高密度聚乙烯塑料管(PERT), 导热系数为 0.4 W/(m·K), 地理管埋深为 2 000 m。土壤的热物性参数根据文献 [24] 中数据, 数据读取模块通过 Type 9e 读取不同类型公共建筑的热负荷数据。

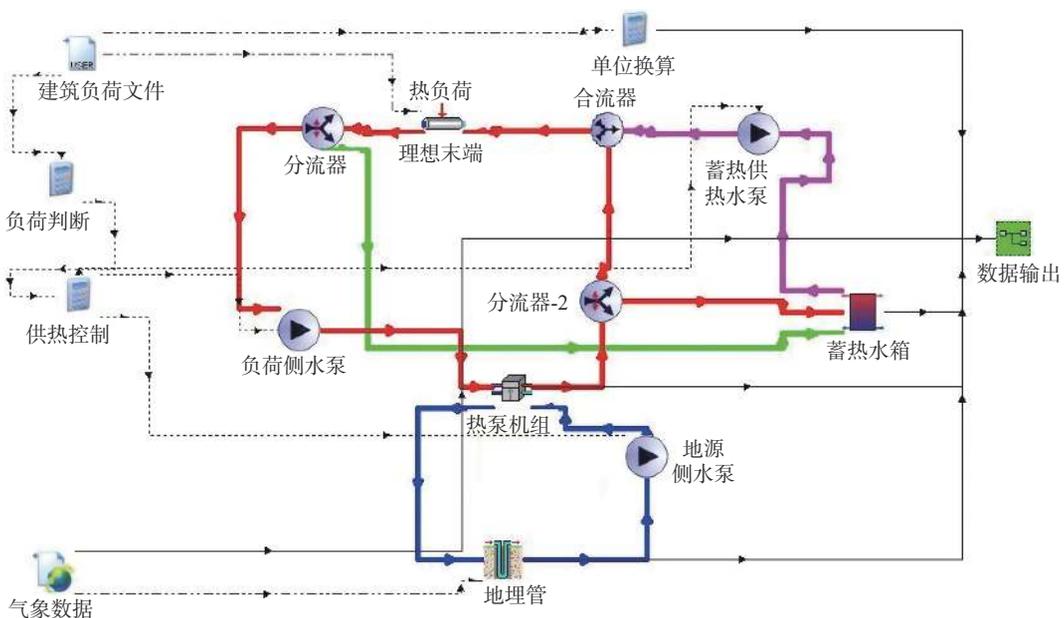


图 3 蓄热式中深层地热供暖系统仿真流程

Fig. 3 Simulation process of middle-deep ground source heat pump coupled heat storage system

为了保证流程仿真的准确性,需开展相关模型验证工作,本文选取文献[13]中的实验工况,时间选取12月4日,将蓄热式中深层地热供暖系统仿真流程的仿真值与文献中的实验值进行对比,对比结果如图4所示。从图4可以看出,仿真值与实验值较为接近,其中实验进口温度和仿真进口温度最大相对误差为1.24%,实验出口温度和仿真出口温度最大相对误差为2.25%,因此,仿真模型准确性较高。

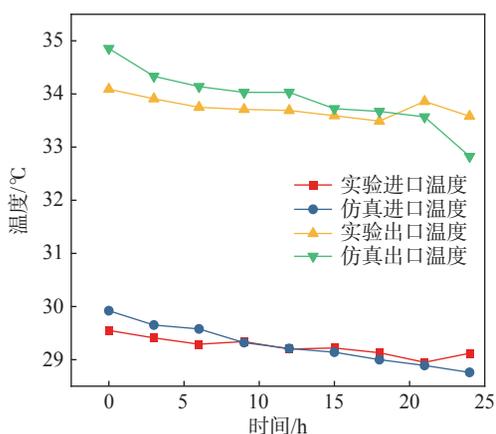


图4 蓄热式中深层地热供暖系统模型验证

Fig. 4 Model validation of thermal storage type deep geothermal heating system

2.3 蓄热式中深层地热供暖系统评价指标

对于蓄热式中深层地热供暖系统,假设 i 时刻建筑的逐时热负荷为 Q_i ,根据能量守恒定律则有:

$$Q_i = Q_{h,i} + Q_{T,i} \quad (1)$$

式中: Q_i 为 i 时刻建筑逐时热负荷,kW; $Q_{h,i}$ 为 i 时刻热泵机组承担的热负荷,kW; $Q_{T,i}$ 为 i 时刻蓄热设备承担的热负荷,kW。

i 时刻热泵机组耗电量为:

$$P_i = \frac{Q_{h,i}}{COP_i} + \frac{Q_{T,i}}{COP} \quad (2)$$

式中: P_i 为 i 时刻热泵机组耗电量,kW; COP_i 为 i 时刻热泵机组的性能系数; COP 为蓄热工况下热泵机组的平均性能系数。

i 时刻系统耗电量为:

$$W_i = P_i + \sum_n P_p \quad (3)$$

式中: W_i 为 i 时刻系统耗电量,kW; P_p 为系统内水泵功率,kW; n 为系统内水泵个数。

设计日系统运行费用为:

$$TAC = \sum_i^{24} W_i t S_i \quad (4)$$

式中: TAC 为设计日系统运行费用,元; t 为系统运行时间, $t=1$ h; S_i 为 i 时刻实时电价,元/(kW·h),西安地区一般工商业及其他用电峰谷平电价为:峰段(8:00~11:30、18:30~23:00)价格为0.8179元/(kW·h);平段(7:00~8:00、11:30~18:30)价格为0.5607元/(kW·h);谷段(23:00~7:00)价格为0.3035元/(kW·h)。

3 结果与讨论

对于蓄热式中深层地热供暖系统,其运行控制策略直接影响了系统的运行费用和“移峰填谷”能力,其中,最主要的影响因素就是系统的蓄热模式。蓄热模式可以分为全负荷蓄热和部分负荷蓄热。部分蓄热模式又可以分为机组优先运行模式、释能优先运行模式以及定比例控制运行模式^[14]。

3.1 典型办公建筑热负荷特性及控制策略分析

选取该办公建筑全年逐时热负荷中的最大热负荷所在日(1月14日)作为典型日,该办公建筑典型日热负荷曲线和室外温度变化曲线如图5所示。

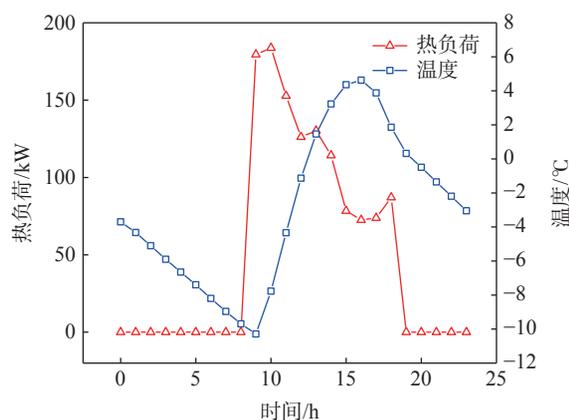


图5 办公建筑典型日热负荷和室外温度变化曲线

Fig. 5 The thermal load of the office building in the typical day and outdoor temperature

从图5可以看出,每天19:00至次日8:00为下班时间,办公建筑的供暖系统停止运行,办公建筑热负荷为0。9:00至18:00为上班时间,办公建筑的供暖系统开始运行。当日最低气温出现在9:00,由于室内温度变化相对延后于室外温度变化,在10:00,办公建筑达到了这一天的峰值热负荷。之后,随着太阳辐射逐渐变强,室外温度不断升高,办公建筑热负荷逐渐降低,且降低的速率逐渐

减小。在 16:00 之后,随着太阳辐射的逐渐变弱,室外温度下降,建筑热负荷缓慢升高,并在 18:00 达到另一个峰值。

对于办公建筑,系统采用低谷电时间段(23:00~7:00)对蓄热水箱进行蓄热,共蓄热 8 h。办公建筑机组优先运行模式配置参数如表 1 所列。

表 1 办公建筑机组优先模式运行配置参数

Tab. 1 Parameter configuration with unit propriety mode for the office building

时间	逐时热负荷/kW	机组负荷/kW	水箱负荷/kW
7:00~9:00	0.00	0.00	0.00
9:00~10:00	179.52	137.00	42.52
10:00~11:00	183.78	137.00	46.78
11:00~12:00	152.81	137.00	15.81
12:00~13:00	152.81	137.00	15.81
13:00~14:00	130.26	0.00	130.26
14:00~15:00	114.27	0.00	114.27
15:00~16:00	78.41	0.00	78.41
16:00~17:00	72.54	0.00	72.54
17:00~18:00	73.83	0.00	73.83
18:00~19:00	87.11	0.00	87.11
19:00~23:00	0.00	0.00	0.00

办公建筑机组释能优先运行模式配置参数如表 2 所列。

表 2 办公建筑释能优先模式运行配置参数

Tab. 2 Parameter configuration with release energy priority mode for the office building

时间	逐时热负荷/kW	机组负荷/kW	水箱负荷/kW
7:00~9:00	0.00	0.00	0.00
9:00~10:00	179.52	0.00	179.52
10:00~11:00	183.78	0.00	183.78
11:00~12:00	152.81	0.00	152.81
12:00~13:00	126.15	0.00	126.15
13:00~14:00	130.26	0.00	130.26
14:00~15:00	114.27	99.1	15.17
15:00~16:00	78.41	78.41	0.00
16:00~17:00	72.54	72.54	0.00
17:00~18:00	73.83	73.83	0.00
18:00~19:00	87.11	87.11	0.00
19:00~23:00	0.00	0.00	0.00

办公建筑机组定比例控制运行模式配置参数如表 3 所列。

表 3 办公建筑定比例控制模式运行配置参数

Tab. 3 Parameter configuration with determine proportions control mode for the office building

时间	逐时热负荷/kW	机组负荷/kW	水箱负荷/kW
7:00~9:00	0.00	0.00	0.00
9:00~10:00	179.52	35.90	143.61
10:00~11:00	183.78	36.76	147.03
11:00~12:00	152.81	30.56	122.25
12:00~13:00	126.15	25.23	100.92
13:00~14:00	130.26	26.05	104.21
14:00~15:00	114.27	22.85	91.42
15:00~16:00	78.41	62.73	15.68
16:00~17:00	72.54	58.03	14.51
17:00~18:00	73.83	59.07	14.77
18:00~19:00	87.11	69.69	17.42
19:00~23:00	0.00	0.00	0.00

根据办公建筑热负荷计算结果,该办公建筑蓄热式中深层地热供暖系统在三种运行模式下的逐时耗电量与非蓄热式中深层地热供暖系统典型日逐时耗电量对比如图 6 所示。

从图 6(a)中可以看出,办公建筑蓄热式中深层地热供暖系统在机组优先运行模式下,蓄热式中深层地热供暖系统的耗电量峰值小于非蓄热式中深层地热供暖系统的耗电量峰值,具有一定的节能效果。在该模式下,可以充分发挥热泵机组的能力。但是,耗电量峰值出现在了白天的峰电时间段(9:00~11:00)。因此,对于办公建筑来说,机组优先运行模式并不能将办公建筑的用电高峰转移至夜间的谷电时间段,该模式的“移峰填谷”效果较差。

从图 6(b)中可以看出,办公建筑蓄热式中深层地热供暖系统在释能优先运行模式下,蓄热式中深层地热供暖系统的耗电量峰值出现在了 14:00~18:00,处于平电时间段内。因此,对于办公建筑来说,释能优先运行模式可以将办公建筑的用能高峰从峰电时间段转移至平电时间段,从而减小峰电时间段内的用电负荷,实现“移峰填谷”的效果。但是,根据图 6(b)也可以看出,在该模式下,办公建筑蓄热式中深层地热供暖系统的用能在 14:00 出现了较大幅度的阶梯式增长,这种突然的耗电量陡增,会造成电网系统的大幅度波动,不利于维持电网的稳定性。

从图 6(c)中可以看出,办公建筑蓄热式中深层地热供暖系统在定比例控制运行模式下,蓄热式

中深层地热供暖系统的耗电量总体处于平稳状态。白天的耗电量集中分布在 9:00~18:00, 其中, 15:00~18:00 时间段内, 由于热泵系统的供热比例增加, 办公建筑蓄热式中深层地热供暖系统的耗电量有小幅度的上涨, 而在峰电时间段 8:00~11:00, 办公建筑

蓄热式中深层地热供暖系统的耗电量较低。因此, 对于办公建筑来说, 定比例控制运行模式可以将办公建筑的用能高峰从峰电时间段转移至平电时间段, 从而减小峰电时间段内的用电负荷, 实现“移峰填谷”的效果。且在该模式下, 耗电量分布较为平均。

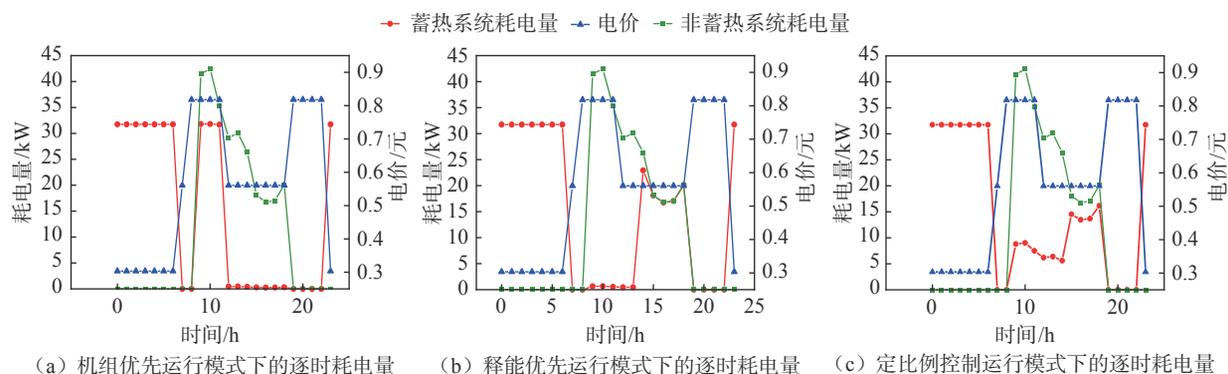


图 6 办公建筑蓄热式中深层地热供暖系统在不同运行模式下的逐时耗电量

Fig. 6 The power consumption of the office building's thermal storage middle-deep geothermal heating system in different operating modes

对办公建筑蓄热式中深层地热供暖系统进行日运行费用分析, 该系统在三种运行模式下的日运行费用最低的是释能优先运行模式, 为 132.35 元, 日运行费用最高的是机组优先运行模式, 为 156.38 元, 定比例控制运行模式的日运行费用为 140.41 元。

3.2 典型酒店建筑热负荷特性及控制策略分析

选取该酒店建筑全年逐时热负荷中的最大热负荷所在日(1月2日)作为典型日, 该酒店建筑典型日热负荷和室外温度变化曲线如图 7 所示。

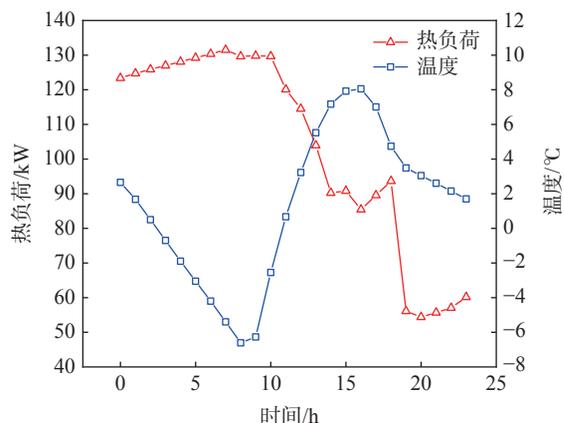


图 7 酒店建筑典型日热负荷和室外温度变化曲线

Fig. 7 The thermal load of the hotel building in the typical day and outdoor temperature

从图 7 可以看出, 酒店的供暖系统是 24 h 运行的, 从 0:00 至 7:00, 随着室外温度的逐渐降低, 酒

店建筑的热负荷逐渐增大, 并在 7:00 出现当日最大热负荷。8:00 之后, 随着室外温度的不断升高, 酒店建筑的热负荷也不断降低, 到 17:00, 室外温度再次降低, 酒店建筑热负荷随之出现小幅度上升, 并在 18:00 出现第二个峰值。在 20:00 之后, 随着室外温度的不断降低, 酒店建筑热负荷再次增加。

根据上文分析可知, 酒店建筑的热负荷特性与办公建筑有较大区别, 全天 24 h 均有热负荷, 且夜间谷电时间段内, 由于室外温度较低, 建筑热负荷较高。因此, 对于酒店建筑中深层地源热泵耦合蓄热系统选择利用谷电时间段和平电时间段, 热泵机组同时供热和蓄热。由于酒店建筑热负荷的特殊性, 热泵机组需要长时间同时供热和蓄热, 且蓄热量较小, 酒店建筑机运行模式配置参数如表 4 所列。

经过计算, 酒店建筑中深层地源热泵耦合蓄热系统在三种运行模式下的配置情况相同。本文以机组优先运行模式为例进行说明。该酒店建筑蓄热式中深层地热供暖系统在机组优先运行模式下的逐时耗电量与非蓄热式中深层地热供暖系统典型日逐时耗电量对比如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 对于酒店建筑, 采用蓄热式中深层地热供暖系统对建筑物进行供暖时, 与非蓄热式中深层地热供暖系统相比, 在峰电时间段内的耗电量有明显的下降, 具有一定的“移峰填谷”效

果。在该运行策略下,酒店建筑蓄热式中深层地热供暖系统的日运行费用为 326.83 元。

表 4 酒店建筑运行模式运行配置参数

Tab. 4 Parameter configuration with operation mode for the hotel building

时间	逐时热负荷/kW	机组负荷/kW	水箱负荷/kW
0:00~1:00	123.41	137.00	0.00
1:00~2:00	124.74	137.00	0.00
2:00~3:00	125.90	137.00	0.00
3:00~4:00	127.00	137.00	0.00
4:00~5:00	128.10	137.00	0.00
5:00~6:00	129.22	137.00	0.00
6:00~7:00	130.35	137.00	0.00
7:00~8:00	131.51	137.00	0.00
8:00~9:00	129.65	137.00	0.00
9:00~10:00	129.83	137.00	0.00
10:00~11:00	129.68	97.68	32.00
11:00~12:00	120.10	137.00	120.10
12:00~13:00	114.54	137.00	78.41
13:00~14:00	103.95	137.00	72.54
14:00~15:00	90.24	137.00	73.83
15:00~16:00	90.80	137.00	87.11
16:00~17:00	85.43	137.00	0.00
17:00~18:00	89.55	137.00	0.00
18:00~19:00	93.67	137.00	0.00
19:00~20:00	56.13	0.00	56.13
20:00~21:00	54.38	0.00	54.38
21:00~22:00	55.68	0.00	55.68
22:00~23:00	57.05	0.00	57.05
23:00~0:00	60.15	137	60.15

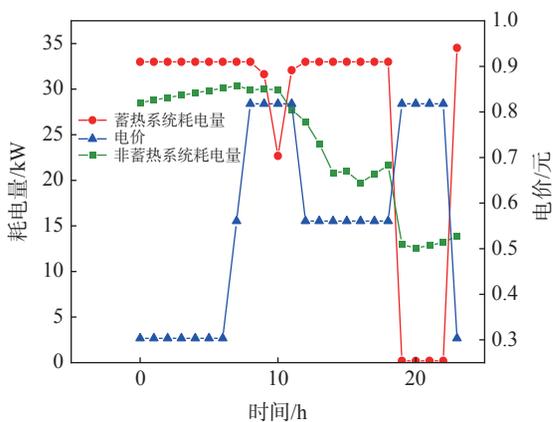


图 8 酒店建筑蓄热式中深层地热供暖系统在机组优先运行模式下的逐时耗电量

Fig. 8 The power consumption of the hotel building's thermal storage middle-deep geothermal heating system in the unit priority operation mode

3.3 典型商场建筑热负荷特性及控制策略分析

选取该商场建筑全年逐时热负荷中的最大热负荷所在日(1月14日)作为典型日,该商场建筑典型日热负荷和室外温度变化曲线如图9所示。

从图9中可以看出,与办公建筑类似,商场建筑的供暖系统同样为间歇运行,每天22:00至次日8:00为商场暂停营业时间,商场供暖系统停止运行,商场建筑的热负荷为0。9:00至21:00为商场营业时间,商场建筑的供暖系统开始运行,商场热负荷开始增加,并于10:00达到峰值热负荷。之后,商场建筑热负荷随着室外温度的不断升高而降低。17:00时,由于室外温度随着太阳辐射的减弱出现下降,商场建筑的热负荷也随之再次增加,并于21:00达到第二个峰值。

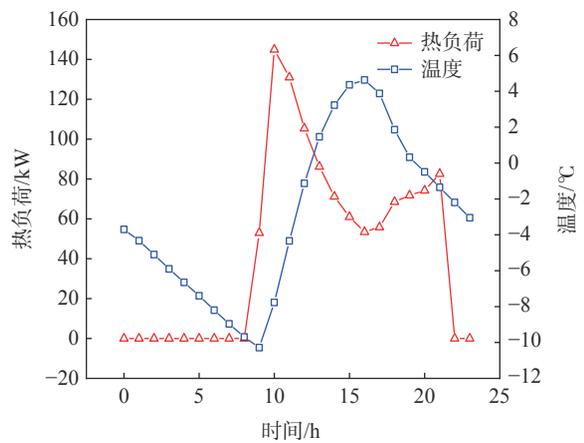


图 9 商场建筑典型日热负荷曲线和室外温度

Fig. 9 The thermal load of the mall building in the typical day and outdoor temperature

对于商场建筑,系统采用谷电时间段(23:00~7:00)对蓄热水箱进行蓄热,共蓄热 8 h。商场建筑机组优先运行模式配置参数如表5所列。

商场建筑机组释能优先运行模式配置参数如表6所列。

商场建筑机组定比例控制运行模式配置参数如表7所列。

根据上述商场建筑热负荷计算结果,该商场建筑蓄热式中深层地热供暖系统在三种运行模式下的逐时耗电量与非蓄热式中深层地热供暖系统典型日逐时耗电量对比如图10所示。

从图10(a)可以看出,商场建筑蓄热式中深层地热供暖系统在机组优先运行模式下,蓄热式中深层地热供暖系统的耗电量峰值小于非蓄热式中深

层地热供暖系统的耗电量峰值,具有一定的节能效果。在该模式下,可以充分发挥热泵机组的能力。但是,耗电量峰值出现在了白天的峰电时间段(10:00)。因此,对于商场建筑来说,机组优先运行模式并不能将商场建筑的用电高峰转移至夜间的谷电时间段,该模式的“移峰填谷”效果较差。

表5 商场建筑机组优先模式运行配置参数

Tab. 5 Parameter configuration with unit propriety mode for the mall building

时间	逐时热负荷/kW	机组负荷/kW	水箱负荷/kW
7:00~9:00	0.00	0.00	0.00
9:00~10:00	52.95	52.95	42.52
10:00~11:00	144.91	137.00	7.91
11:00~12:00	130.97	81.38	49.59
12:00~13:00	105.37	0.00	105.37
13:00~14:00	86.22	0.00	86.22
14:00~15:00	71.21	0.00	71.21
15:00~16:00	60.97	0.00	60.97
16:00~17:00	53.45	0.00	53.45
17:00~18:00	55.81	0.00	55.81
18:00~19:00	68.53	0.00	68.53
19:00~20:00	71.79	0.00	71.79
20:00~21:00	74.24	0.00	74.24
21:00~22:00	82.60	0.00	82.60
22:00~23:00	0.00	0.00	0.00

表6 商场建筑释能优先模式运行配置参数

Tab. 6 Parameter configuration with release energy priority mode for the mall building

时间	逐时热负荷/kW	机组负荷/kW	水箱负荷/kW
7:00~9:00	0.00	0.00	0.00
9:00~10:00	52.95	0.00	52.95
10:00~11:00	144.91	0.00	144.91
11:00~12:00	130.97	0.00	130.97
12:00~13:00	105.37	0.00	105.37
13:00~14:00	86.22	0.00	86.22
14:00~15:00	71.21	0.00	71.21
15:00~16:00	60.97	0.00	60.97
16:00~17:00	53.45	0.00	53.45
17:00~18:00	55.81	0.00	55.81
18:00~19:00	68.53	42.70	25.83
19:00~20:00	71.79	71.79	71.79
20:00~21:00	74.24	74.24	74.24
21:00~22:00	82.60	82.60	82.60
22:00~23:00	0.00	0.00	0.00

表7 商场建筑定比例控制模式运行配置参数

Tab. 7 Parameter configuration with release energy priority mode for the mall building

时间	逐时热负荷/kW	机组负荷/kW	水箱负荷/kW
7:00~9:00	0.00	0.00	0.00
9:00~10:00	52.95	42.36	10.59
10:00~11:00	144.91	28.98	115.93
11:00~12:00	130.97	26.19	104.77
12:00~13:00	105.37	21.07	84.30
13:00~14:00	86.22	17.24	68.97
14:00~15:00	71.21	14.24	56.96
15:00~16:00	60.97	12.19	48.78
16:00~17:00	53.45	42.76	10.69
17:00~18:00	55.81	44.65	11.16
18:00~19:00	68.53	13.71	54.82
19:00~20:00	71.79	71.79	71.79
20:00~21:00	74.24	14.85	59.39
21:00~22:00	82.60	16.52	66.08
22:00~23:00	0.00	0.00	0.00

从图10(b)可以看出,商场建筑蓄热式中深层地热供暖系统在释能优先运行模式下,蓄热式中深层地热供暖系统的耗电量峰值出现在了18:00~21:00,处于峰电时间段内。因此,对于商场建筑来说,释能优先运行模式的用电高峰时间段也同样处于峰电时间段,且与非蓄热式中深层地热供暖系统的耗电量基本持平。因此,释能优先运行模式的“移峰填谷”效果同样较差。

从图10(c)可以看出,商场建筑蓄热式中深层地热供暖系统在定比例控制运行模式下,蓄热式中深层地热供暖系统的耗电量总体处于平稳状态,其耗电量峰值出现在16:00~17:00,处于平电时间段内,在两个峰电时间段内的耗电量均较低。因此,对于商场建筑来说,定比例控制运行模式可以有效的将商场建筑的用电高峰从峰电时间段转移至平电时间段内,具有良好的“移峰填谷”效果。

对商场建筑蓄热式中深层地热供暖系统进行日运行费用分析,该系统在三种运行模式下的日运行费用最低的是定比例控制运行模式,为120.49元,日运行费用最高的是机组优先运行模式,为130.16元,释能优先运行模式的日运行费用为120.66元。

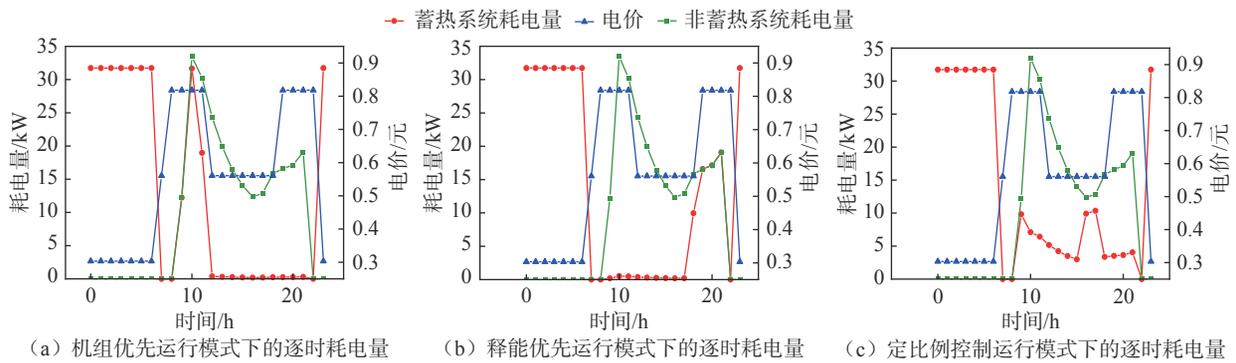


图 10 商场建筑蓄热式中深层地热供暖系统在不同运行模式下的逐时耗电量

Fig. 10 The power consumption of the mall building's thermal storage middle-deep geothermal heating system in different operating modes

4 结论

本文基于 TRNSYS 软件建立了西安地区三种典型公共建筑的蓄热式中深层地热供暖系统仿真流程,根据三种典型建筑的热负荷特性,探究三种典型建筑蓄热式中深层地热供暖系统的运行控制策略对于电网稳定性的影响。结果表明:

(1)对于办公建筑,释能优先运行模式和定比例控制运行模式具有较好的“移峰填谷”作用。其中,释能优先运行模式的日运行费用最低,为 132.35 元。在定比例控制运行模式下,耗电量分布较为均匀,电网稳定性最佳。

(2)对于酒店建筑,制定控制策略为:在谷电时间段内,热泵机组满负荷运行,首先满足建筑热负荷,剩余部分进行蓄热。在峰电时间段内,机组优先运行模式、释能优先运行模式和定比例控制运行模式配置相同,因而采用机组优先运行模式进行计算,日运行费用为 326.83 元。

(3)对于商场建筑,蓄热式中深层地热供暖系统在机组优先运行模式和释能优先运行模式下的电网稳定性均较差,在定比例控制运行模式下的电网稳定性最佳,且日运行费用最低,为 120.49 元。

参考文献:

[1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2021[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
 [2] 刘珊. 精准调适、智慧运维——“碳达峰碳中和”目标引领下公共建筑节能的挑战、机遇和建议 [J]. 城乡建设, 2021(20): 73-75.
 [3] HE Y, JIA M, LI X, et al. Performance analysis of coaxial heat exchanger and heat-carrier fluid in medium-deep geothermal energy development[J]. *Renewable Energy*, 2021,

168: 938-959.

[4] ROMANOV D, LEISS B. Geothermal energy at different depths for district heating and cooling of existing and future building stock[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 167: 112727.
 [5] DENG J W, MA M H, WEI Q P, et al. A specially-designed test platform and method to study the operation performance of medium-depth geothermal heat pump systems (MD-GHPs) in newly-constructed project[J]. *Energy and Buildings*, 2022, 272: 112369.
 [6] RENAUD T, VERDIN P, FALCONE G. Numerical simulation of a deep borehole heat exchanger in the Krafla geothermal system[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 143: 118496.
 [7] WANG Z H, WANG F H, LIU J, et al. Field test and numerical investigation on the heat transfer characteristics and optimal design of the heat exchangers of a deep borehole ground source heat pump system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 153: 603-615.
 [8] LIU J, WANG F H, CAI W L, et al. Numerical study on the effects of design parameters on the heat transfer performance of coaxial deep borehole heat exchanger[J]. *International Journal of Energy Research*, 2019, 43(12): 6337-6352.
 [9] DENG J, WEI Q, HE S, et al. Simulation analysis on the heat performance of deep borehole heat exchangers in medium-depth geothermal heat pump systems[J]. *Energies*, 2020, 13(3): 754.
 [10] CHEN C F, SHAO H B, NAUMOV D, et al. Numerical investigation on the performance, sustainability, and efficiency of the deep borehole heat exchanger system for building heating[J]. *Geothermal Energy*, 2019, 7(1): 1-26.

- [11] SEMENOV B A, SAPONENKO D S. The optimal parameters technique for the vertical ground heat exchangers of the geothermal heat pump systems[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1791(1): 012023.
- [12] FARZANEHKHAMENEH P, SOLTANI M, KASHKOOLI F M, et al. Optimization and energy-economic assessment of a geothermal heat pump system[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 133: 110282.
- [13] 景登岩,施志钢,刘福强,等. 基于 TRNSYS 的中深层地热供暖系统运行特性研究 [J]. *可再生能源*, 2022, 40(6): 751-759.
- [14] 杜克磊. 蓄热式土壤源热泵系统运行模式及经济性研究 [D]. 北京: 北方工业大学, 2018.
- [15] 褚赛,魏俊辉,刘启明,等. 埋管地源热泵复合水蓄能系统方案设计及经济性分析 [J]. *建筑节能*, 2020, 48(2): 58-61.
- [16] 陈慧子,石颖,姚钊超. 水蓄能型地源热泵空调系统能量分析 [J]. *建筑节能*, 2019, 47(1): 51-56.
- [17] 李永,李江辉,刘伟斌,等. 带有调峰热源的复合式空气源热泵系统设计 [J]. *制冷与空调*, 2018, 18(8): 92-95.
- [18] 王树超. 复合式地源热泵系统中地源占比经济性分析 [J]. *能源与节能*, 2020(9): 73-75.
- [19] 周瑞芳,龚德建,朱绳杰,等. 地源热泵与蓄能复合空调系统多参数优化研究 [J]. *建筑热能通风空调*, 2021, 40(8): 59-62.
- [20] LE K X, HUANG M J, 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: 113976.
- [21] SINHA R, BAK-JENSEN B, PILLAI J R, et al. Flexibility from electric boiler and thermal storage for multi energy system interaction[J]. *Energies*, 2019, 13(1): 98.
- [22] LU Q, NARSILIO G A, ADITYA G R, et al. Economic analysis of vertical ground source heat pump systems in Melbourne[J]. *Energy*, 2017, 125: 107-117.
- [23] 中国建筑科学研究院. 公共建筑节能设计标准: GB50189-2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [24] 张小刚. 西安地区岩土综合热物性参数分析及土壤源热泵经济适宜区研究 [D]. 西安: 长安大学, 2014.

(责任编辑:郭云)