

水蓄能地源热泵系统的一种在线优化运行控制

胡 涛¹, 周 群², 肖仁政¹, 高振军¹, 朱家玲³

(1. 三峡大学机械与动力学院, 宜昌 443002; 2. 广州地铁设计研究院有限公司, 广州 510010;

3. 天津大学机械工程学院, 天津 300072)

摘 要: 以水蓄能地源热泵系统为研究对象,通过理论与实验相结合的手段,对该系统进行在线优化运行控制的理论分析与实验研究。研究结果表明:在线优化运行控制能有效提高系统的运行效率,相对于地源热泵独立直接供能系统,应用优化运行控制后,大区间变容量运行热泵的性能系数可从3.0最大增至约4.5,同时在峰谷电价的基础上可为用户节省大量运行费用,日运行费用的节省比例(节费率)约为21.8%,可为在线优化运行控制技术在工程应用中的推广提供数据支持。

关键词: 地源热泵; 优化控制; 水蓄能; 节费率

中图分类号: TK323

文献标识码: A

0 引 言

地源热泵是一项高效环保且节能的技术^[1-5],当前地源热泵的主要应用是进行建筑物的空调和采暖。随着社会的不断进步,进一步的节能需考虑系统需求侧的运行平衡问题,而不仅仅对系统本身部件或循环进行改进。考虑到在空调领域为了实现系统的用能平衡(即移峰填谷),提高能源利用效率,同时降低用户的用能费用,目前常用的一种解决方案是将水蓄能技术与地源热泵系统相结合,构成水蓄能地源热泵(geothermal heat pump with water thermal energy storage, GHPWTES)系统。这种新的 GHPWTES 系统在起到建筑节能的同时大大减少了建筑物内全年空气冷热调节的运行费用,因此,得到大量投资者的广泛认可与推广。然而,从投资与运行成本上讲,系统的优劣很大程度上取决于实际的运行管理策略。由于最初建立或改造系统的盲目性,导致一些实际工程的运行效果不显著。目前公开的文献中大部分研究者针对 GSHPWTES 工程案例进行可行性、经济性、系统优化配置、运行方案、控制策略等方面的分析研究^[6-10],对于水蓄能同地源热泵相结合的在线最

优化运行控制自控系统的实现与验证相对较少,而工程中在线优化运行控制方面的研究较少见。因此,本文尝试性地针对 GHPWTES 系统为房间提供空调与供暖的在线优化控制技术及自控系统构建方法进行实践性的探索研究,根据试验的运行数据得到一些可行的方案。

1 在线优化控制理论分析

对于1套设计安装好的带蓄能空调系统,月运行成本(即月总运行费用)主要由月峰值负荷费用及运行电耗费用两部分组成。由于蓄能的削峰作用,可使月峰值负荷费用大大降低,但同时却增加了系统运行需要的电耗费用。因此,系统蓄放能的时序运行策略需进行合理优化,使总运行费用最小化。同时当系统装机容量较小(即一般的小负荷系统),月峰值负荷需求不大时,蓄能系统用于削峰带来的月峰值负荷费用的减少量趋于有限,而对于运行电耗费用的缩减量显著,此时总运行费用取决于运行电耗费用,优化时需完全根据日运行费用确定系统的蓄放启停运行策略。因此,后文从大负荷系统与小负荷系统两个方面讨论 GSHPWTES 系统的优化控制实现方法。

收稿日期: 2017-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(11605103); 广东省自然科学基金(2015A030310333); 广东省省级科技计划(2015B090901012); 佛山市院市合作项目(2014HK100225)

通信作者: 肖仁政(1985—), 男, 博士、讲师, 主要从事能源与动力方面的研究。rxiao@whu.edu.cn

下面介绍优化控制的数学模型:

1.1 小负荷系统

假设计算日 i 时刻末端用户的逐时负荷为 Q_i , kW; 且已知此时地源热泵机组承担的负荷量为 $Q_{h,i}$, kW; 蓄能装置承担的负荷为 u_i , kW。根据能量守恒, 有:

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

约束条件为:

$$0 \leq u_i \leq u_{\max,i} \quad (2)$$

$$0 \leq Q_{h,i} \leq Q_0 \quad (3)$$

式中, Q_0 ——地源热泵机组的额定制冷(制热)量, kW。

通过蓄能装置的放能实验发现, 放能过程中已放能量 M 与最大放能速率 u_{\max} 近似满足关系:

$$u_{\max} = A_1 - A_2 e^{-kM} \quad (4)$$

定义 x_i 为 i 时刻地源热泵机组的负荷率, 则:

$$x_i = \frac{Q_{h,i}}{Q_0} \quad (5)$$

地源热泵系统部分负荷曲线可根据式(6)拟合:

$$y = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \cdots + a_1 x + a_0 \quad (6)$$

式中, y ——地源热泵系统的功率百分数, 且 $y = P_i/P_0$; P_i ——计算日 i 时刻地源热泵机组耗功率, kW; P_0 ——地源热泵机组的额定功率, kW。

因此, 计算日 i 时刻地源热泵机组耗电量为:

$$P_i = yP_0 = (a_n x_i^n + a_{n-1} x_i^{n-1} + \cdots + a_1 x_i + a_0) \cdot P_0 \quad (7)$$

假设蓄能阶段机组满负荷运行, 设最大蓄能量为 \bar{Q}_{\max} :

$$\bar{Q}_{\max} = \sum_{i=8}^{19} (u_i \Delta t) = P_0 \times \overline{COP'} \times \eta \times m \quad (8)$$

式中, Δt ——单位时间, h; $\overline{COP'}$ ——地源热泵机组蓄能时平均性能系数; η ——蓄能装置的效率系数, 取 0.85; m ——蓄能时间, h。

则机组蓄能耗电量为:

$$W = \frac{\bar{Q}_{\max}}{\overline{COP'}} \quad (9)$$

计算日运行费用函数为:

$$F = \sum_{i=8}^{19} r_i P_i + r_{\min} \cdot W \quad (10)$$

式中, r_i —— i 时刻电价标准, ¥/kWh; r_{\min} ——用电

低谷时的最低电价标准, ¥/kWh。

优化控制的目的在于使目标函数 F 最小化时, 求解 x_i ($i=8\sim 19$) 及 m 的具体值。显然该过程为非线性规划的求解问题, 将式(1)~式(10)标准化后可表示为:

$$\min F = \sum_{i=8}^{19} [r_i (a_n x_i^n + a_{n-1} x_i^{n-1} + \cdots + a_1 x_i + a_0) P_0] + r_{\min} \sum_{i=8}^{19} \left(\frac{Q_i - Q_0 x_i}{\overline{COP'}} \right) \quad (11)$$

约束条件:

$$\sum_{i=8}^{19} (Q_i - Q_0 x_i) = \bar{Q}_{\max} \quad (12)$$

$$\frac{Q_i - u_{\max,i}}{Q_0} \leq x_i \leq \frac{Q_i}{Q_0} \quad (13)$$

该求解过程采用非线性优化计算的混合罚函数法, 应用 Matlab 编程予以实现。

为了对应用优化运行控制 GHPWTES 系统进一步量化分析, 提出节费率的概念, 优化控制后 GHPWTES 系统运行所减少的电耗费用比率即为节费率 χ , 其计算公式如式(14):

$$\chi = \frac{F - \min F}{F} \quad (14)$$

1.2 大负荷系统

这里定义大负荷系统为装机容量大, 设计的主机容量由于各种原因导致比实际需求量大很多, 这种情况下若无合适的控制运行手段, 运行的月峰值负荷费用 C_{mon} 的波动远大于运行电耗费用 C_e 的波动, 即 $C_{\text{mon}} \gg C_e$; 此时在寻求优化运行控制时, 应以减小月峰值负荷为主要目的, 即对运行控制的要求是以运行手段调节当月逐日的地源热泵空调主机峰值负荷, 使其最大输出功率限制在适当水平上。此时优化问题需要考虑的是月运行总电费问题, 可通过式(15)表示:

$$\min F = C_{\text{mon}} + C_e = \alpha \times P_m + \beta \times \sum_{i=1}^N E_i \quad (15)$$

式中, F ——月运行总电费; α ——月峰值负荷价格; β ——运行电耗时电价; i ——当月运行的时间; E_i ——运行的第 i 日的总耗电量。

限制日最大输出功率(即主机的日峰值需求负荷)在实际运行中的不同作用见图 1。

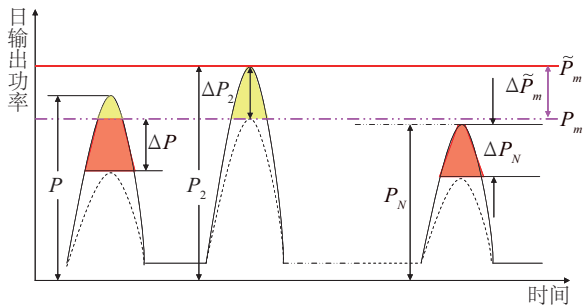


图1 限制最大输出功率与日输出功率曲线

Fig. 1 The curves for the limit maximum output power and daily output power

图1中 P_m 和 \tilde{P}_m 分别表示有无日峰值负荷限制时的月峰值负荷值,限制日峰值负荷后,月峰值需求负荷从 \tilde{P}_m 缩减到 P_m ;但从图中可看出不是所有日峰值负荷的缩减都会对月峰值的缩减起作用,如缩减的 ΔP_N 部分负荷,仅其中的 ΔP_2 部分对于月峰值的限制有效果。设计时大部分日峰值需求要小于甚至远小于月峰值需求负荷,这些日峰值负荷大小不影响月峰值负荷的费用。然而,无用的日峰值负荷缩减(见图中 ΔP_N 、 ΔP)会间接增大日运行能耗,同时增大日运行费用。因此,消除或减少无用的缩减对于优化运行能耗与费用很有必要。其中1种有效的方法是设置1个适当的限制阈值 \bar{P}_m ,使 F 取得最小值,当预测的日峰值负荷 P_i 超过该阈值时,应用蓄能装置补偿超过的部分,使主机的日功率输出限制在该阈值对应的功率之下以最小化月总运行费用,当预测的日峰值负荷 P_i 小于该阈值时,蓄能装置能量在高电价时释放,同时调节主机负荷率使主机运行性能系数 COP (coefficient of performance)处于较高水平。最佳的限制阈值 \bar{P}_m 与月总运行费用的关系见图2,以该

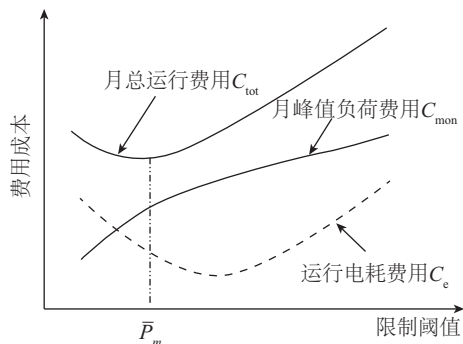


图2 限制阈值与费用成本的关系

Fig. 2 The relationship between limit threshold and cost

图为基础根据当地的电价结构、蓄能装置的蓄放效率以及预测的当月逐日峰值负荷,可确定出对应不同系统的 \bar{P}_m 值。

2 实验系统的构建

2.1 实验系统结构及设备参数

水蓄能地源热泵空调系统结构简图见图3,主要由常规地源热泵系统结合水蓄能罐及相应的循环泵、阀门、管道和配套控制系统组成,鉴于该系统的普遍性本文不再详述。该实验系统的主要设备参数特性见表1。

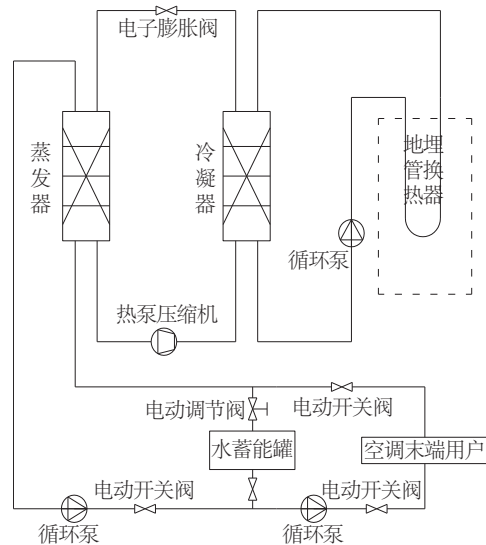


图3 水蓄能地源热泵空调系统

Fig. 3 The geothermal-source heat pump with water thermal energy storage

2.2 配套控制系统

控制系统的硬件主要包括:上位机(PC电脑)、可编程控制器(PLC)、数字量输入(输出)模块、模拟量输入输出模块、热电偶模块、电子膨胀阀驱动模块、电磁继电器(双位控制器)、交流接触器、24 V直流电源、功率变送器、压力变送器、温度传感器、流量传感器等。本实验系统安装于天津大学地热研究培训中心,所采用的在线运行控制技术在工程应用实现时的软件设计实现方案是:以3种软件为基础进行混合编程,其中核心计算软件为Matlab,组态监控软件为Kingview 6.54/WINCC V7.0及以上,数据采集与执行输出软件为STEP7 V5.4或以上。

表1 实验系统主要设备参数特性表

Table 1 The main equipments specification and characteristics of the experimental system

设备名称	型号	性能参数	备注
压缩机	DORIN DR-K750CC	额定功率5.5 kW, 额定电流 11.0 A, 排气量 32.54 m³/h	—
变频器	EMERSON EV2000-4T0075G	额定容量 11-17 KVA, 额定电流 17~25 A	—
热泵换热器	SLU650	设计换热量 21.0 kW, 设计压力 2.4/1.0 MPa	管壳式换热器,铜合金
地埋管换热器	自制	双 U 型,单程长度 100 m	交联聚乙烯(PEX)材料
循环水泵	WILO MHIL-404	扬程 12 m, 频率可变 3~50 Hz	不锈钢材料
蓄能水箱	自制	长 100 cm,宽 60 cm, 高 130 cm,2 组	不锈钢外壳,外加聚氨基甲酸酯保温, 总有效容积 1.5 m³
可编程控制器 (PLC)	西门子 S7-300 系列 CPU315-2PN/DP	—	工业以太网协议与 PC 中组态软件进行数据交换
数字输入模块	西门子 6ES7 321- 1BL00-0AB0	DI32×24 V _{DC}	系统中电动阀门、水泵、热泵主机,末端风机等的 本地/远程、运行状态、故障状态等信号采集
数字输出模块	西门子 6ES7 322- 1BL00-0AB0	DO32×24 V _{DC} /0.5 A	控制电动阀门、水泵、热泵主机,末端风机等的开 关(或启停)
模拟输入模块	西门子 6ES7 331- 1KF02-0AB0	AI8×13 位	系统运行总电耗、变频水泵及热泵主机运行频率 与功率、电子膨胀阀开度、压缩机进排气压力,供 回水压差与温度,冷冻、冷却侧水流量,室内外温 湿度,室外实际太阳辐射强度等信号的采集
模拟输出模块	西门子 6ES7 332- 5HF00-0AB0	AO8×12 位	控制变频水泵及热泵主机运行频率、 电子膨胀阀开度等

以 Matlab 为基本计算平台,编写的程序可实现三大功能:1)数据记录功能:逐时从组态软件读取关键数据(环境温度、相对湿度、太阳辐射强度、实时空调负荷等),并将其与自身预测的次日逐时负荷数据一起存储在数据库中;2)预测计算功能:定时对次日进行四大预测计算,即逐时气温预测计算、逐时相对湿度预测计算、逐时太阳辐射强度预测计算,逐时空调负荷预测计算^[11];3)非线性优化求解功能:以历史数据和预测数据为基础对运行费用目标函数进行最优化求解,最终得到次日运行费用最小时所需的蓄能时间、次日蓄能装置逐时的放能量、次日地源热泵逐时的负荷率。总的来说 Matlab 中包括 7 个子程序块:数据交换子程序(与

数据库、Kingview/WINCC 数据交换)、定时子程序、4 个预测子程序以及非线性优化求解子程序。

地源热泵与蓄能耦合优化运行时,软件内部的运行流程如图 4 所示。

过程中的逐时温度、相对湿度、太阳辐射强度以及逐时空调负荷预测通过 Matlab 编程实现^[11],预测及优化时所使用历史及实时数据可直接从数据库中调用,然后以 Matlab 为平台进行预测计算。接着,采用非线性优化计算的混合罚函数法,应用 Matlab 自编函数对式(11)优化目标函数 F 进行优化求解。最后,Matlab 将得到的控制输出结果传递给 Kingview/WINCC, Kingview/WINCC 将数据传递给下位机软件 STEP7 V5.4 中的相应子程序,由

STEP7 V5.4 的子程序直接控制与反馈机组的运行输出,并实时监测运行,将运行数据以 DDE 通讯方式借助 Kingview/WINCC 中介传递给 Matlab 后存入数据库供 Matlab 预测及优化计算时调用。

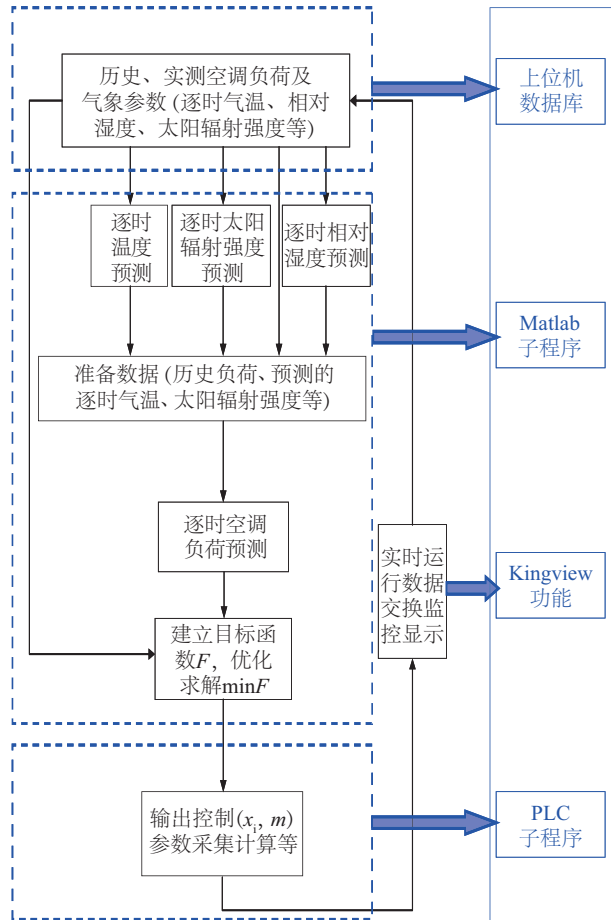


图4 优化计算流程框图

Fig. 4 The flow chart of optimal calculation

3 实验数据分析

对蓄能装置实测数据计算处理后,应用 Origin 应用程序中的 NLSF(nonlinear least squares fitter,非线性最小二次拟合)进行拟合。图5为2012年夏季8月蓄冷后释冷过程的运行数据,图6为2011年冬季12月蓄热后释热时的实际过程运行数据,其拟合结果分别见图5中细实线。夏季释冷时拟合参数 A_1 、 A_2 、 k 的值分别为 17.5858、0.01049、-0.4891;拟合公式: $u_{\max,i} = 17.5858 - 0.01049e^{0.4891M}$;冬季释热时拟合参数 A_1 、 A_2 、 k 的值分别为 27.4622、2.8105、-0.1749;拟合公式: $u_{\max,i} = 27.4622 - 2.8105e^{0.1749M}$, 其中,

$M = \sum_{k=8}^{i-8} (u_i \Delta t)$, 且本系统的制冷额定功率为 5.3 kW, 最大制冷量为 22 kW。

图中 Chi^2/DoF 表示拟合数据对测试数据的平均剩余残差平方和,其大小表达了测试数据与拟合数据间的实际差别; R^2 表示相关系数的平方,衡量拟合的显著性水平。图5与图6中 R^2 均大于 0.95, 认为显著性水平较高,拟合曲线可接受。

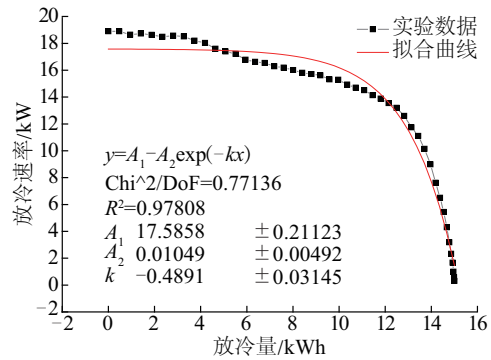


图5 释冷过程数据拟合曲线

Fig. 5 Data fit curves for cold release process

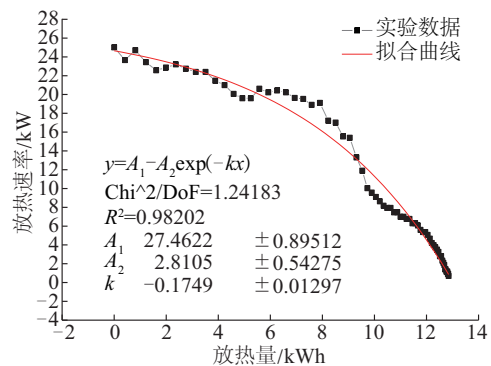


图6 释热过程数据拟合曲线

Fig. 6 Data fit curves for heat release process

将优化程序应用于地源热泵实验系统时,其中对机组部分负荷性能拟合模型为^[12,13]:

$$y = a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \quad (16)$$

即优化模型式(6)中: $n=2$, $a_2=0.8734$, $a_1=-0.0531$, $a_0=0.1696$ 。

图7为小负荷实验系统的优化运行负荷分配数据,图8为该过程的系统空调侧供回水温度变化曲线,对应于热泵主机承担不同负荷时的机组功率及COP见图9。

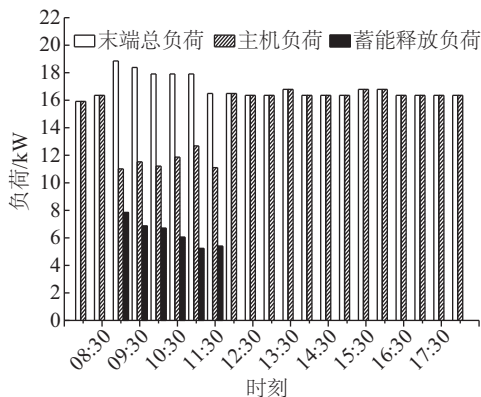


图7 优化控制各部分负荷比例关系

Fig. 7 The load relationship of various parts for optimal control

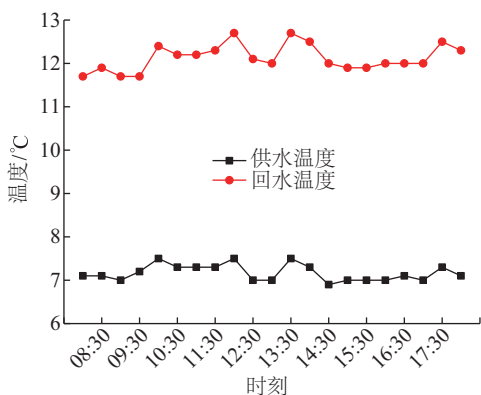


图8 优化控制空调末端供回水温度

Fig. 8 The supply and return water temperature of air conditioning for optimal control

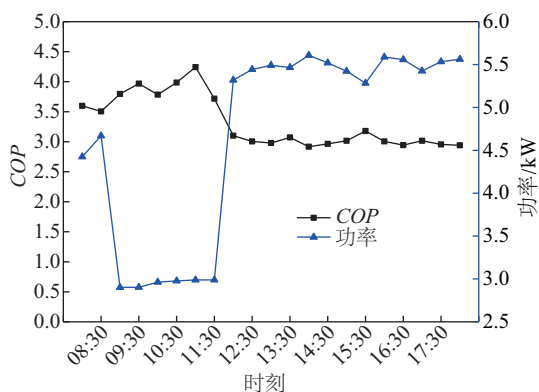


图9 热泵主机实时运行COP以及消耗的电功率

Fig. 9 The real-time COP and electric power of heat pump

由图7中负荷分配情况可见,经过优化控制后,主机的负荷输出控制在限定范围之内,同时总的负荷输出能确保末端需求,总负荷在09:00达到最大,09:00~12:00范围内处于系统日负荷高峰期,

此时由两部分同时供应末端:主机与蓄能同时输出,且各自所占比例通过前文计算方法获得,由图9可看出主机在这段时间的输出降低20%~30%,同时根据主机实时运行COP以及消耗的电功率可知,经过运行控制,主机在联合水蓄能对末端供能时,功率大大降低。由于负荷率的变化(降低至额定负荷的约58%),部分负荷性能(式(16))得到验证。从图9中可看出运行性能系数即COP得到较大提高(未联合水蓄能运行时,同样以本实验系统为研究对象,可测得地源热泵独立直接供冷时热泵COP基本稳定在3.0附近,图9的数据显示水蓄能分担部分主机负荷后,变容量运行热泵COP由3.0最大可增至约4.5)。

如图9所示,热泵主机实时运行过程中两个主要因素对运行费用起到关键作用:1)该调节控制过程的时间段是上午09:00~12:00,由天津市实施的分时电价可知,峰值时段定在08:00~11:00正好全部落在调节控制的运行时段中,此时耗电功率相对其他时间段最小,相对运行费用最小;2)COP先在负荷率下降后增大,然后出现锐减,不仅仅是系统由蓄能联合主机转为主机独立运行导致的,其中地源侧土壤平均温度上升导致冷凝器供回水温度整体升高,使热泵制冷循环运行的效率下降即表现为COP降低,这时耗电量也相应增加,即相对运行费用增加。采用天津市实行的调峰电价:峰时段08:00~11:00,18:00~23:00,电价1.213 ¥/kWh,非峰谷时段07:00~08:00,11:00~18:00,电价0.793 ¥/kWh,低谷时段23:00~07:00,电价0.393 ¥/kWh,对运行数据进行计算可知在进行优化前,日运行总费用约为54.35 ¥,在进行蓄放优化后日运行费用可节省约11.834 ¥,相对未进行优化运行控制时日运行费用的节省比例(即节费率)为21.8%。因此,对于带蓄能系统的地源热泵优化运行控制的作用显著,可减少运行成本,对于大负荷系统的节费率具体数值要远高于小负荷系统(月平均节费率最低为34.8%,最高为78.2%,总节费率为65.1%),需就工程实际应用进行数据分析,由于篇幅限制笔者已另文详细探讨^[14]。

4 结 论

针对水蓄能地源热泵系统的在线优化运行控制性能研究,本文首先对系统进行详细的理论模型

分析,配合控制系统的结构以及实现手段和搭建方法在天津大学地热研究培训中心成功建立该系统的在线优化运行控制试验台,在此基础上进行相关实验分析验证,可得到以下结论:应用文中提出的在线优化运行控制系统后,系统的运行效率显著提高,同时能提高热泵 *COP* 和降低系统运行费用。相对于地源热泵独立直接供能系统,应用优化运行控制后,大区间变容量运行热泵的 *COP* 可由 3.0 增至 4.5,同时日节费率可达到 21.8%,根据后续研究也能发现工程中大负荷系统的节费率(34.8%)要明显优于小负荷系统,所提出的设计与实现方法及数据验证可作为工程应用推广的参考依据。

〔参考文献〕

- [1] Jevgeni F, Raimo S, Jarek K, et al. Geothermal heat pump plant performance in a nearly zero-energy building [J]. *Energy Procedia*, 2016, 96(9): 489—502.
- [2] Hossein Y, Halldór A, Soheil R, et al. Feasibility study and economical evaluations of geothermal heat pumps in Iran[J]. *Geothermics*, 2018, 72(3): 64—73.
- [3] Halit A, Oguz A. Exergoeconomic analysis of district heating system boosted by the geothermal heat pump[J]. *Energy*, 2017, 119(1): 1159—1170.
- [4] 李新国, 赵 军, 朱 强. 地源热泵供暖空调的经济性[J]. *太阳能学报*, 2011, 22(4): 418—421.
- [4] Li Xinguo, Zhao Jun, Zhu Qiang. Economic analysis of ground source heat pump [J]. *Acta Energeiae Solaris Sinica*, 2011, 22(4): 418—421.
- [5] Pirjo M. Ground source heat pumps and environmental policy - The finnish practitioner's point of view[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 139(12): 740—749.
- [6] 钱 堃, 张 钦. 结合水蓄能的地源热泵系统经济性分析[J]. *制冷与空调*, 2013, 13(7): 96—99.
- [6] Qian Kun, Zhang Qin. Economic analysis of ground-source heat pump combined with water energy storage system[J]. *Refrigeration and Air-Conditioning*, 2013, 13(7): 96—99.
- [7] 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.
- [7] Yin Jianjie, Lyu 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.
- [8] Xia L, Ma Z J, McLauchlan C, et al. Experimental investigation and control optimization of a ground source heat pump system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 127(12): 70—80.
- [9] Shintaro I, Wonjun C, Ryoza O. Optimization method for multiple heat source operation including ground source heat pump considering dynamic variation in ground temperature[J]. *Applied Energy*, 2017, 193(5): 466—478.
- [10] 杨 静, 胡平放, 朱 娜, 等. 某办公楼地源热泵与水蓄能复合系统的优化配置[J]. *供热制冷*, 2015, (1): 69—71.
- [10] Yang Jing, Hu Pingfang, Zhu Na, et al. A building ground source heat pump as the optimal location of the composite system with water[J]. *Heating & Refrigeration*, 2015, (1): 69—71.
- [11] 胡 涛. 地源热泵控制策略理论与系统实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [11] Hu Tao. Theoretical research on control strategy and experimental investigation on operation of geothermal heat pump system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [12] 石 磊. 基于负荷预测在线修正的冰蓄冷空调系统优化运行研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2002.
- [12] Shi Lei. Optimal operation research based on on-line correction of cooling load prediction in ice storage air conditioning system[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2002.
- [13] Sun Y J, Wang S W, Huang G S. A demand limiting strategy for maximizing monthly cost savings of commercial buildings[J]. *Energy Buildings*, 2010, 42(11): 2219—2230.
- [14] 胡 涛, 管海凤, 董凯军, 等. 某水蓄冷空调系统的设计及经济性分析[J]. *制冷与空调(四川)*, 2017, 4(2): 188—193.
- [14] Hu Tao, Guan Haifeng, Dong Kaijun, et al. design and running economic analysis of an air conditioning system with water cold storage[J]. *Refrigeration & Air Conditioning*, 2017, 4(2): 188—193.

AN ONLINE OPTIMAL OPERATION CONTROL OF GROUND SOURCE HEAT PUMP SYSTEM WITH WATER HEAT STORAGE

Hu Tao¹, Zhou Qun², Xiao Renzheng¹, Gao Zhenjun¹, Zhu Jialing³

(1. *College of Mechanical & Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;*

2. *Guangzhou Metro Design & Research Institute, Guangzhou 510010, China;*

3. *School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)*

Abstract: Taking the ground source heat pump system with water heat storage as research subject, the online optimal operation control of the system was carried out through the combination of theoretical analysis and experimental research means. The results showed that relative to the independent direct energy supply system of ground source heat pump, the online optimal operation control can improve the system coefficient of performance (*COP*) effectively; the *COP* of heat pump operation in large range of variable capacity can be increased from 3.0 to 4.5 at the most by the application of optimal operation control. Meanwhile, the operation cost can be saved based on the peak valley price. The daily operation cost saving ration is about 21.8%, which can provide data support for the promotion of online optimization operation control technology in engineering application.s data support for the popularization of online optimal operation control technology in engineering application.

Keywords: geothermal heat pumps; optimal control systems; water thermal storage; economical rate of electricity charge efficiency