

DOI: 10.19666/j.rlfed.202209224

考虑充热动态特性的储热罐容积配置方法

李咸善^{1,2}, 苏传华^{1,2}, 鲁明芳^{1,2}

(1.梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002;
2.三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

[摘要] 电热转换是实现新能源就地消纳, 助力清洁低碳型供热系统建设的有效途径。为此, 设计了一种具有新能源消纳能力的新型热力站系统。该系统在传统热力站的基础上, 增设电锅炉和储热罐等调节设备。同时, 提出了基于一次热源和储热罐等灵活性资源协同调节的热力站调度策略, 实现新能源完全消纳, 满足热负荷需求, 并可获得所需储热罐的能量容量。进一步提出了考虑充热动态特性的储热罐容积及其结构参数的配置方法, 计算注入储热罐热水的体积和计及斜温层厚度的储热罐容积。通过最大充热流量, 确定储热罐的进出口管径; 选取合适的高径比, 保证储热罐较理想的温度分层特性。通过仿真算例验证了所提方法的有效性。该方法可为新能源的就地消纳和热力站建设提供参考。

[关键词] 热力站; 新能源消纳; 电热转换; 协调调度; 储热罐配置

[引用本文格式] 李咸善, 苏传华, 鲁明芳. 考虑充热动态特性的储热罐容积配置方法[J]. 热力发电, 2023, 52(2): 46-53.
LI Xianshan, SU Chuanhua, LU Mingfang. Volume configuration method of heat storage tank considering dynamic characteristics of charging[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(2): 46-53.

Volume configuration method of heat storage tank considering dynamic characteristics of charging

LI Xianshan^{1,2}, SU Chuanhua^{1,2}, LU Mingfang^{1,2}

(1.Hubei Provincial Key Laboratory of Operation and Control of Cascade Hydropower Stations (China Three Gorges University), Yichang 443002, China;
2.College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Electric-heat conversion is an effective way to realize local consumption of new energy and help build a clean and low-carbon heating system. To this end, a new heating substation system with new energy consumption capability is designed. The system is based on the traditional heating substation, and the adjustment equipment such as the electric boiler and heat storage tank is added. At the same time, a heating substation dispatch strategy based on the coordinated regulation of flexible resources such as the primary heat source and heat storage tank is proposed to achieve complete consumption of new energy, meet the heat load demand, and obtain the required energy capacity of the heat storage tank. Furthermore, the configuration method of the volume of the heat storage tank and its structural parameters considering the dynamic characteristics of charging is proposed to calculate the volume of hot water injected into the heat storage tank and the volume considering the thickness of the thermocline layer. The inlet and outlet pipe diameters of the heat storage tank determine through the maximum heat charging flow. Appropriate ratio of diameter to height is selected to ensure the ideal temperature stratification characteristics of the heat storage tank. The effectiveness of the proposed method is verified by a simulation example. This method can provide a reference for the local consumption of new energy and the construction of heating substations.

Key words: heating substation; local accommodation of renewable energy; electric-heat conversion; coordinate dispatch; heat storage tank configuration

收稿日期: 2022-09-16 网络首发日期: 2022-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51607105); 湖北省技术创新重大项目(2017AAA132)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (51607105); Hubei Province Technology Innovation Major Project (2017AAA132)

第一作者简介: 李咸善(1964), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为综合能源系统运行与控制、新能源与梯级水电站联合运行优化调度、水电站仿真与控制等方面, lixianshan@ctgu.edu.cn.

通信作者简介: 苏传华(1997), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电热综合能源系统, 1425658266@qq.com.

“双碳”目标下，可再生新能源将得到大规模发展，新能源消纳将成为我国能源转型进程中需要解决的核心关键问题。在多种新能源消纳途径中，综合能源系统因其可实现多种异质能源之间的互联互通、提高能源利用效率、促进可再生能源消纳、减少碳排放而受到国内外研究与应用界的广泛关注^[1-3]。电热综合能源系统是应用最广泛的综合能源系统类型之一，为新能源消纳提供了有效途径^[4-5]。基于此，本文设计了一种新型热力站系统，在传统热力站的基础上，增设电锅炉和储热罐等电热转换与调节设备，提供新能源消纳途径，并进行储热罐容量及其实际容积参数的优化配置研究，实现系统热量的时间和空间转移，助力热能系统节能减排。

目前，电热转换和储热在新能源消纳中的应用已受到广泛关注。文献[6-7]研究了电动热泵和蓄热罐组合在热力站的应用，通过电动热泵和蓄热罐的协调运行，降低了系统的运行费用。文献[8]分别在电源侧和负荷侧装设储热设备，分析了储热提升风电消纳能力的效果。其中在热电联产处装设储热，可以打破“以热定电”的刚性约束；而在热负荷处应用包含储热的风电供热系统，则可以增加本地电负荷、提高电力系统的调节能力。文献[9]将电加热站设置在换热站与热用户之间的二次管道上，将电网中多余的电能转化为热能。研究表明：该运行方式可以增加低谷电负荷，同时降低热电联产机组的热定电出力，为风电上网留出空间，提高电网的风电消纳能力；但受制于优化调度较大的时间尺度优化求解的难度，难以考虑系统的动态运行特性。以上文献说明电热转换及其调节可为电网多余电能提供消纳途径。

在储热罐的容量配置方面，目前的研究主要集中在热电联产机组的能量容量配置，没有涉及本文热力站场景的储热罐实际容积及其结构参数配置方法。文献[10]考虑了热力系统的储热特性，以热源年经济成本最小为目标，对包含储热罐的热源容量进行了优化配置，得到了储热罐的能量容量。文献[11]以提高电力系统的深度调峰空间和热电厂的收益为目标，研究了热电联产机组的储热罐最佳容量配置，求得了储热罐的最佳能量容量。

针对本文热力站场景进行储热罐容积配置，一方面需要基于热力站的多源协调调度策略，获得所需要的储热罐能量容量；另一方面，与储热罐能量容量相对应的储热罐容积配置，需考虑储热罐充

热过程的动态特性。对于充热动态特性的研究，文献[12]在给定充热温度和充热流量的情况下，研究了储热罐的温度分层动态特性。但对应用于新能源消纳的储热罐实际容积配置来说，其涉及到的充热过程较为复杂。一方面要考虑新能源波动性所带来的充热功率波动性，使得充热温度和充热流量发生变化；另一方面还要考虑充热温度和充热流量等运行参数对储热罐斜温层厚度的影响。为此，本文通过研究储热罐的动态模型，得到计及斜温层厚度的储热罐的容积。通过最大充热流量，确定储热罐的进出口管径。保证储热罐具有较理想的温度分层特性，选择合适的高径比，得到储热罐的结构参数。

基于上述，本文以优先使用新能源供热和减少储热罐容积配置为原则，提出了基于热力调节空间的热能协调调度策略，得到储热罐的充热功率。进一步提出了通过充热流量和充热温度来计算储热罐实际容积的储热罐容积配置方法。并通过充放热过程的仿真算例，验证了所配置储热罐的有效性。

1 新型热力站集成系统架构及其工作流程

1.1 新型热力站集成系统架构

图1为本文提出的具有新能源消纳能力的新型热力站架构。传统热力站由图1中的一次供水管路、换热器、一次回水管路和二次供水管路、二次回水管路组成，通过控制一次供水流量或温度，使得通过换热器换热后，来满足二次供水热功率（热负荷）的需求。新型热力站（后称热力站）则是在传统热力站的基础上，增设了电锅炉和储热罐装备，以提供电热转换与调节的新能源消纳途径。其中，电锅炉接入电网，利用电网中多余的新能源电力，实现电热转换，从而避免弃风弃光现象。

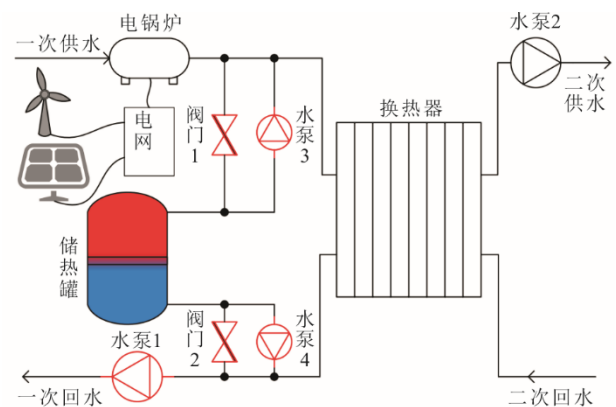


图1 新型热力站拓扑图

Fig.1 Topology of the new heating substation

1.2 新型热力站的基本工作流程

热力站的工作流程分为一次侧工作流程和二次侧工作流程(图1)。一次侧由一次热源(如热电厂)供给的一次供水首先经过电锅炉再加热后,分2路分别流过储热罐支路和换热器支路;当热力站系统处于充热过程中时,关闭水泵3,开启其余储热罐支路的阀门和水泵,一部分电锅炉出口供水经过阀门1流入储热罐,同时储热罐底部的冷水经过阀门2和水泵4流入一次回水管道^[3]。当热力站系统处于放热模式时,关闭阀门1,打开阀门2,开启水泵3,关闭水泵4,储热罐顶部的热水经过水泵3与一次供水混合后流向换热器,同时经过阀门2的一次回水进入储热罐的底部。一次供水的主要部分经过另一支路换热器进行热量交换后,经过水泵1流入回水管网。其中热源采用质调节方式。图1中标红的元件(水泵1、水泵3、水泵4、阀门1、阀门2),参与热力站的协调控制,使得二次侧供热温度等于目标供热温度,实现二次供热量满足热负荷需求。

在二次侧,二次回水在换热器中进行加热,达到目标温度后,经过水泵2加压输送至热负荷处。

2 热力站数学模型

2.1 一次热源的热力模型及其调节空间

选用热电厂作为供热的基础热源,其供热功率与供热温度之间的关系为:

$$H_s = cG_s(T_g - T_h), T_{g,\min} \leq T_g \leq T_{g,\max} \quad (1)$$

式中: T_g 、 T_h 分别为热源的供水和回水温度, $^{\circ}\text{C}$; H_s 为热源供热功率, kW ; G_s 为热源供热流量, kg/s ; $T_{g,\max}$ 、 $T_{g,\min}$ 分别为供水温度的上、下限。

如果将热源回水温度和供热流量作为定值考虑,则热源有其热出力的上限 $H_{s,\max}$ 和下限 $H_{s,\min}$,即一次热源的调节空间为 $H_{s,\min} \leq H_s \leq H_{s,\max}$ 。为了配合新能源优先消纳,通过降低热源的热出力,为新能源供热提供空间。

2.2 电锅炉热力模型

电锅炉是热力站内用来消纳电网中多余的新能源出力的设备,将电能转化为热能,储存于储热罐中或者直接用于供热。电锅炉的电热转换方程见式(2),电锅炉的出口温度通过式(3)计算。

$$H_b = \eta P_e \quad (2)$$

$$H_b = cG_b(T_{b2} - T_{b1}) \quad (3)$$

式中: P_e 为电锅炉输入电功率; η 为电锅炉的效率,取0.98; H_b 为电锅炉制热功率; T_{b1} 、 T_{b2} 分别为电

锅炉的进、出口温度; c 为比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; G_b 为质量流量。

2.3 储热罐热力模型

储热罐在充热或放热过程中,其充放热温度在变化。储热罐的动态模型为^[4]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c v \frac{\partial T}{\partial x} - \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (4)$$

式中: ρ 为水的密度, kg/m^3 ; λ 为水的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$; $v = G_{st}/(\rho S)$, v 为沿储热罐轴向的水流速度, m/s ; G_{st} 为储热罐充热或放热的质量流量,规定放热时水流由底部流向顶部符号为正,反之符号为负; S 为储热罐的横截面积, m^2 。

假设储热罐具有很好的隔热性能,不考虑储热罐通过外壳对环境的散热。由图1可见:储热罐充热时,热水从顶部流入,冷水从底部流出;放热时热水从顶部流出,冷水从底部流入。另外,由于充入的热水和冷水的温差,使得热水和冷水产生热量交换,冷水和热水之间会形成一定厚度的斜温层,降低储热罐的充放热效率。

定义储热罐的充放热功率方程为:

$$H_{st} = cG_{st}(T_H - T_L) \quad (5)$$

式中: T_H 和 T_L 分别为储热罐顶部进出口温度和底部的进、出口温度; H_{st} 为储热罐的充放热功率。

3 储热罐配置方法

3.1 基于调节空间热力站的协调调度策略

在接入具有波动性、间歇性和不可控性的新能源电力供热的前提下,为了减少配置储热罐的容积,本文制定了基于调节空间的热力站协调调度策略,实现热负荷的供需平衡。公式(6)为热力站的能量守恒方程。

$$H_L(t) - (H_s(t) + H_b(t) + H_{st}(t)) = 0 \quad (6)$$

式中: $H_L(t)$ 为 t 时刻的热负荷, kW 。

调节空间协同调节的基本思路是:储热罐没有储存的热量时,本着优先使用新能源供热原则,首先调节一次热源的供热温度,充分利用一次热源的调节空间;仍有多余的热功率时,再调节储热罐的逻辑顺序,从而得到储热罐容积最小的配置结果,尽量减小配置储热罐的容积,实现新能源的完全消纳;充热结束后,为避免储热罐静置过程的热量散失,优先放出储热罐储存的热量,协调控制一次热源的供热功率,实时满足热负荷需求。

根据以上调节思路,定义充热过程中一次热源

多余负荷 $\Delta H_s(t)$ 如式(7)所示, 定义储热罐出水与电锅炉出水在交汇处的水温混合公式 $T_m(t)$ 如式(8)所示, 定义一次侧额定供热温度 $T_{g1N}(t)$ 如式(9)所示。

$$\Delta H_s(t) = H_L(t) - H_{s,min} - H_b(t) \quad (7)$$

$$T_m(t) = \frac{G_1(t) * T_{b2}(t) + G_3(t) * T_H(t)}{G_1(t) + G_3(t)} \quad (8)$$

$$T_{g1N}(t) = T_{h1N}(t) + H_L(t) / cG_{1N} \quad (9)$$

式中: $G_1(t)$ 、 $G_3(t)$ 分别为 t 时刻下水泵 1、水泵 3 的流量; G_{1N} 为水泵 1 的额定流量; $T_{g1N}(t)$ 和 $T_{h1N}(t)$ 分别为 t 时刻一次侧额定供、回水温度。

1) 当储热罐没有储存的热量时, 若 $\Delta H_s(t) \geq 0$, 此时一次热源就可为新能源供热提供供热空间; 随着新能源出力的增加, $\Delta H_s(t) < 0$, 这时一次热源的调节空间已经用尽, 热力站仍有多余的新能源供热功率, 此时热力站进入充热工作模式, 对储热罐充热, 以平衡多余的制热功率。

2) 当热力站充热结束, 且储热罐有储存的热量时, 这时热力站进入放热工作模式。开启水泵 3 (定流量运行), 流量为 G_{3N} , 调节水泵 1 的流量为 $G_{1N} - G_{3N}$, 使得流过换热器的流量始终为水泵 1 的额定流量。调节一次热源的供热温度, 使得经过电锅炉加热的一次供水与储热罐的出水混合后, 始终等于一次供水的额定温度, 满足热力站功率平衡并保证储热罐出水与一次供水混合后不影响二次侧供热品质。

以 10s 为计算周期, 热力站的协调调度策略流程如图 2 所示。

3.2 储热罐容积及其结构参数配置

由热负荷数据 $H_L(t)$ 和新能源数据 $P_e(t)$, 根据 3.1 节的协调调度策略, 由公式(10)可以计算出储热罐的全天各小时的充热功率 $H_{st,c}(t)$, 即:

$$H_{st,c} = \begin{cases} H_{st}(t), & (H_{st} < 0) \\ 0, & (H_{st} \geq 0) \end{cases} \quad (10)$$

则储热罐的功率容量为:

$$H_c = \max(|H_{st,c}(t)|), \quad t \in [1, 86400] \quad (11)$$

式中: H_c 为储热罐的最大充热功率。

要求配置的储热罐, 即使某时刻新能源电功率很大时, 也能将多余的热功率储存其中, 使得供热量不超过热负荷, 避免造成能量浪费。

同时, 可得到储热罐的能量容量:

$$Q_c = \max\left(\sum_{t=i}^j |H_{st,c}(t)\Delta t|, \dots, \sum_{t=m}^n |H_{st,c}(t)\Delta t|\right), \quad (12)$$

$$(1 \leq i < j < m < n \leq 86400)$$

式中: $H_{st,c}(t) < 0$, ($t=i..j, m..n$), 即 $t=i..j$ 和 $t=m..n$ 分别为 2 个连续充热周期。其中 $\Delta t=10s$, 以每小时为最小区间进行计算。取 1 天中充热量最大的充热周期来配置储热罐的能量容量, 即 Q_c 为 1 天 24 h 内充热周期储热罐的最大充热能量容量。

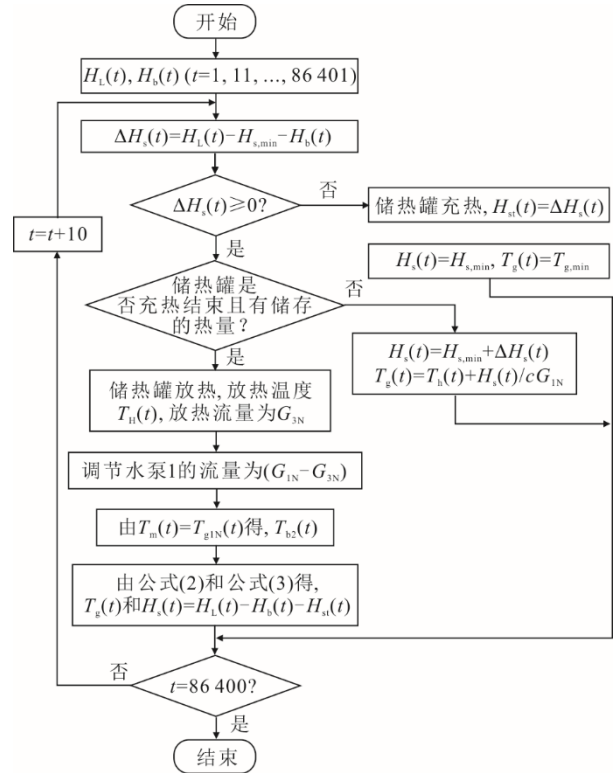


图 2 热力站协调调度策略流程
Fig.2 The coordination dispatch strategy process of the heating substation

实际工程中还需要计算储热罐的结构参数, 其与储热罐的充热动态特性密切相关。为此, 本文提出了基于充热动态特性的储热罐结构参数设计方法。根据储热罐的功率容量对应的储热罐的最大充热流量, 确定储热罐的进出口管径; 根据储热罐的能量容量对应的储热罐的容积, 从而确定储热罐的直径和高度。

1) 储热罐的最大充热流量 (即阀门 1 开度达到最大, 流过阀门的质量流量) 根据热力站调度策略和公式(1)可以得到一次热源的供热温度。经过电锅炉加热, 根据公式(3)得到电锅炉的出口温度, 即为储热罐顶部的入口温度。根据公式(5), 已知储热罐充热过程中, 各时刻顶部的入口温度和底部的出口温度, 可以计算得到储热罐各时刻的充热流量。其中假设充热过程中, 斜温层始终没有到达储热罐底部, 则出口温度为储热罐初始时刻温度, 始终保

持不变。从而储热罐的进出口管径可根据计算得到的最大充热流量确定。

2) 储热罐的容积 根据上述计算得到储热罐的充热流量,进行时间积分,即可得到整个充热过程的热水质质量(为避免歧义,下文提到的热水质量均为单位是 kg 或 t 的物理学概念),但是充热过程中,热水与冷水具有热量传递,产生一定厚度的斜温层,需要预留适当的斜温层厚度,避免充热过程后期热量的流失。参考文献[15]结构参数对充热动态特性影响的研究,在储热罐的设计中,应选择较大的高径比,可以保证较好的温度分层效果。从而可以选择合适的高径比,根据注入热水的体积和斜温层体积,得到储热罐直径和高度。

4 仿真算例分析

仿真算例数据为:水泵 1 采用变频运行方式,其额定体积流量和额定转速为 50 m³/h、2 980 r/min;水泵 2 定流量运行,其额定体积流量和额定转速为 100 m³/h、2 980 r/min;水泵 3 和水泵 4 同型号,其中水泵 3 采用定流量运行,额定体积流量和额定转速分别为 6.3 m³/h、1 480 r/min;热源供热温度上限和下限分别为 140 ℃和 80 ℃。假设热源供热温度等于一次侧的供热温度。

4.1 储热罐模型的数值求解方法

由于新能源出力处于连续变化过程中,储热罐的充热温度和充热流量处于不断变化之中,需要对储热罐的动态方程进行数值求解。对该方程的求解较为复杂,但其本质是一维对流扩散方程,有很多专家学者对该类方程的数值求解方法进行了深入研究。文献[16]提出了一种四阶紧致隐式差分格式,并证明了该差分格式是无条件稳定的。隐式差分法最大的优点是可以选取较大的时间步长进行数值计算而不影响计算结果的收敛性。因此,可以利用该方法对储热罐模型进行数值求解。

4.2 储热罐容积配置结果

在我国北方地区,热负荷数据和新能源数据受天气影响程度较大,热负荷需求和新能源出力在供暖前期和后期差异较大。若单考虑某天的数据来配置储热罐,可能产生很大误差;而要考虑供暖期每天热负荷和新能源出力,则又使得工作量很大。因此,可以计算供暖期内每月各天每小时热负荷和新能源出力的平均值作为特征日数据,来计算储热罐的容量^[11,17]。

以北京市某居民小区的热力站为例,根据当地情况,采暖期为 11 月、12 月、1 月和 2 月 4 个月。查询该区域的热负荷、电负荷及新能源数据,求得每个月特征日热负荷和多余的新能源功率如图 3 所示。为保证充热过程的连续性,下文均以时刻 10:00 作为仿真周期的开始。

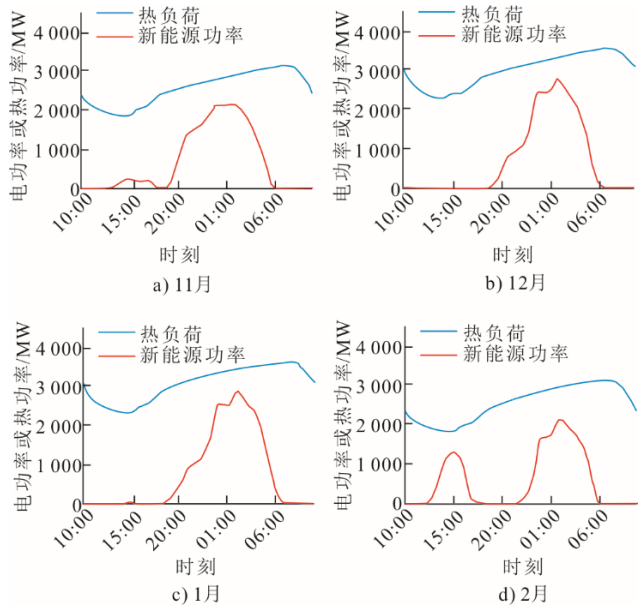


图 3 各月特征日各时段热负荷和新能源功率
Fig.3 Heat load and new energy power in each period of the characteristic day of each month

由 3.1 节的协调调度策略,根据公式(10)可以计算出储热罐的充热功率如图 4 所示。

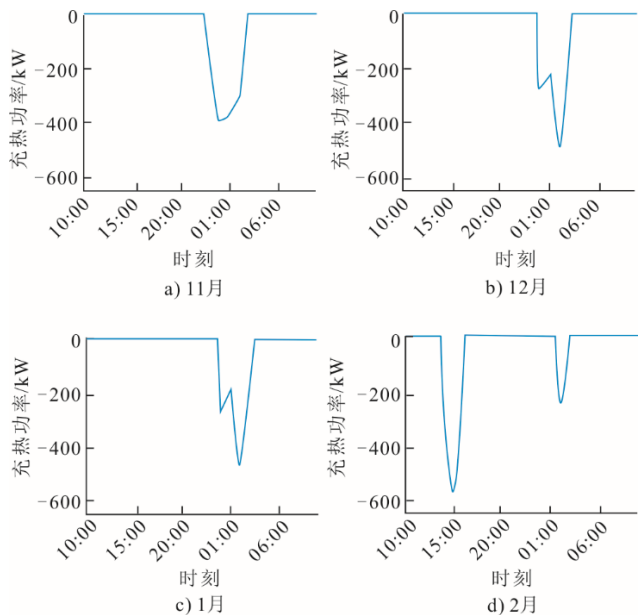


图 4 各月特征日各时段储热罐充热功率
Fig.4 The charging power of the heat storage tank in each period of the characteristic day of each month

储热罐初始时刻装满 60 °C 的冷水，由新能源功率和充热功率数据，根据式(3)和式(5)计算得到储热罐的充热温度和充热流量的绝对值如图 5 所示。图 5 中，橙色的曲线（实线和虚线）表示电锅炉出口温度。考虑到只有充热过程中电锅炉的一部分热水才充入储热罐中，因此图 5 中橙色的实线即代表充热温度曲线。

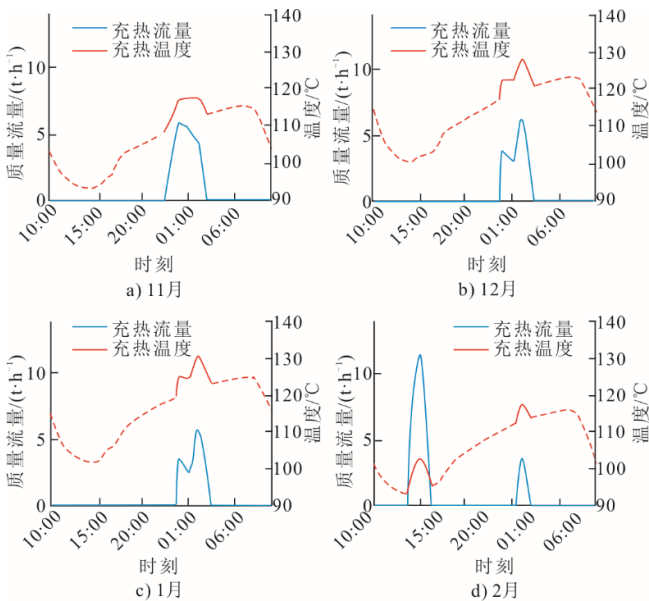


图 5 各月特征日各时段储热罐充热流量和充热温度
Fig.5 The charging mass flow and charging temperature of the heat storage tank in each period of the characteristic day of each month

由充热功率数据，根据公式(11)可以计算出储热罐各月特征日的功率容量，即图 4 中各月特征日充热功率最大的绝对值。根据图 5 中各月特征日的充热流量数据，可以得到最大充热流量，进一步可以计算得到储热罐的进出口管径（管道内径），结果见表 1。

表 1 储热罐的进出口管径配置结果

Tab.1 The configuration result of the inlet and outlet pipe diameter of the heat storage tank

月份	功率容量/kW	最大充热流量/(t·h ⁻¹)	管径/mm
11	389.456	5.848	63.4
12	487.883	6.121	64.5
1	465.780	5.684	62.7
2	572.509	11.436	81.9

由充热功率数据，根据公式(12)可以计算得到各月特征日储热罐连续的充热周期最大能量容量。由图 5 中各月特征日的充热流量，经过积分计算可以得到各月特征日下的连续充热过程中注入

储热罐的热水质量。其中 2 月份有 2 个连续充热周期，而处于时段 10:00—20:00 的充热周期注入的热水质量最大，所以 2 月份储热罐的容积配置结果由该时段的充热周期决定。进一步根据热水的密度 ($\rho=960 \text{ kg/m}^3$) 可以计算得到充热过程中注入热水的体积，结果见表 2。

表 2 注入储热罐的热水体积

Tab.2 Volume of hot water injected into the heat storage tank

月份	能量容量/(kW·h)	热水质量/t	热水体积/m ³
11	1 193.3	18.070	18.82
12	1 115.6	14.715	15.33
1	1 067.8	13.658	14.23
2	978.3	20.649	21.51

由表 1 可知，2 月份特征日有最大的充热流量，所以储热罐的进出口管径相应的要按照 2 月份的最大充热流量设计。由表 2 可知，在各月连续的充热周期中，11 月的能量容量最大，但是其注入的热水体积不是最大的，而 2 月份处于时段 10:00—20:00 的充热过程注入的热水体积最大。

综上所述，为保证储热罐可以将多余的新能源完全储存起来，满足最大充热流量 11.436 t/h，则储热罐的进、出口管径可选取公称直径为 80 mm 的管道；储热罐在充热过程中，由于热量的扩散，在冷水和热水之间形成一定厚度的斜温层，斜温层厚度约为 1.0~2.0 m^[2]。因此储热罐的容积应设置为注入热水的体积与斜温层的体积之和。考虑变化的储热罐充热流量和充热温度对斜温层厚度的影响，假设斜温层厚度为 1.5 m。根据文献[15]，为保证储热罐具有良好的充热温度分层动态特性，应尽量采用较大的高径比。根据文献[18]的研究，储热罐的高径比一般不超过 4；且实际工程储热罐的选型原则，高径比一般在 1.0~1.5；因此，设置储热罐的高径比为 1.5。根据表 2 的充入储热罐的热水体积并考虑斜温层厚度，可以计算得到储热罐的高度和直径分别约为 4.5 m 和 3.0 m。

利用配置好的储热罐，以图 5 中 4 个月特征日的充热温度和充热流量数据，利用动态方程(式(4))进行仿真验证。储热罐顶部入口位置设置为 0 m，沿储热罐轴向高度增加，储热罐底部出口位置设置为 4.5 m，可以得到储热罐各时刻下的温度分布，结果如图 6 所示。由图 6 可以看出，充热结束时，斜温层均未到达储热罐底部，没有产生热量流失，可以满足储热要求。但与常规储热罐的常规运行方式

(充热过程中充热温度和充热流量保持不变)相比,变化的充热温度和充热流量使得储热罐不能以最高效的方式利用。另外与表 2 中的结果对比,充热结束时斜温层的厚度大约为 1.0~1.2 m。

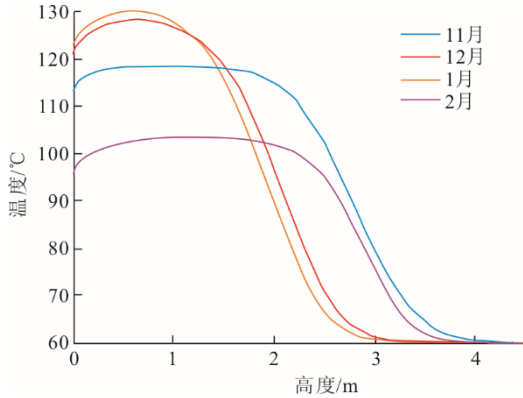
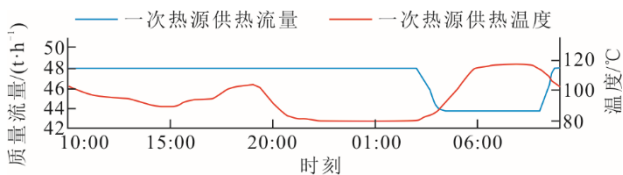


图 6 各月特征日充热结束时储热罐的温度分布

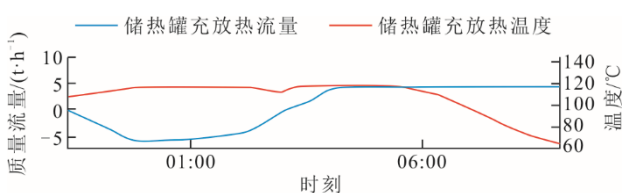
Fig.6 The temperature distribution of the heat storage tank at the end of charging on the characteristic day of each month

4.3 热力站的协调控制过程

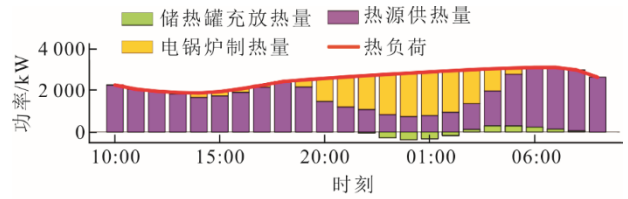
根据 3.1 节热力站的协调调度策略,以 11 月特征日的仿真过程为例,根据热力站放热过程的协调控制思路,协调控制一次热源的供热温度和流量以及储热罐的充放热流量,保证热负荷供需平衡及良好的供热品质。一次热源的供热流量和温度如图 7a)所示,储热罐的充放热温度和流量如图 7b)所示,一次热源、电锅炉的供热功率和储热罐的充放热功率与热负荷的关系如图 7c)所示。放热过程不同时刻下储热罐温度分布如图 8 所示。由图 7c)可知,热力站的协调控制满足热负荷平衡。储热罐充热时间约为 4h,充入热量为 1214.8kW·h,放热时间约为 5h,放出热量为 1106.3 kW·h。综合考虑,本文配置的储热罐可以应用于热力站,以平衡多余的热负荷,满足热力站储热需求。



a) 一次热源的供热流量和温度



b) 储热罐的充放热温度和流量



c) 一次热源、电锅炉的供热功率和储热罐的充放热功率与热负荷的关系

图 7 热力站的协调控制结果

Fig.7 Results of coordinated control of the heating substation

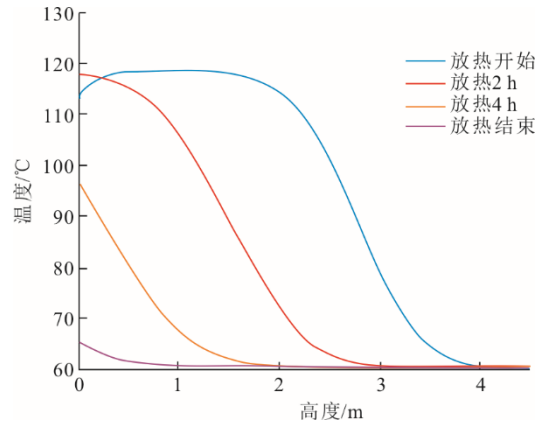


图 8 放热过程不同时刻下储热罐的温度分布

Fig.8 Temperature distribution of the heat storage tank at different times during the discharging process

5 结 论

本文基于一种具有新能源消纳能力的新型热力站系统,提出了基于一次热源和储热罐的协调调度策略,实现新能源的完全消纳;进一步提出了考虑充热动态特性的储热罐容积配置方法,以满足热力站充放热需求。通过仿真分析,得到如下结论。

1) 提出的热力站协调调度策略,可以为新能源供热预留供热空间。当新能源供热功率较大时,一次热源预留给新能源供热空间不足,储热罐开始进行充热。基于此调度策略,可以得到储热罐较小的充热能量容量,减小要配置储热罐的容积。

2) 以供暖季各月特征日数据,通过协调调度策略计算得到储热罐的充热功率,进一步提出了考虑充热动态特性的储热罐的实际容积及其结构参数的配置方法。该方法计及斜温层厚度,可以避免充热过程的能量流失。通过热力站的充放热过程的仿真过程,验证了其合理性,对热力站储热罐的建设具有指导意义。

[参 考 文 献]

[1] 吕佳炜,张沈习,程浩忠,等.考虑互联互动的区域综合能源系统规划研究综述[J].中国电机工程学报,

- 2021, 41(12): 4001-4021.
LYU Jiawei, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Review on district-level integrated energy system planning considering interconnection and interaction[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4001-4021.
- [2] 臧海祥, 耿明昊, 黄蔓云, 等. 电-热-气混联综合能源系统状态估计研究综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(7): 187-199.
ZANG Haixiang, GENG Minghao, HUANG Manyun, et al. Review and prospect of state estimation for electricity-heat-gas integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 187-199.
- [3] 黎静华, 朱梦姝, 陆悦江, 等. 综合能源系统优化调度综述[J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2256-2272.
LI Jinghua, ZHU Mengshu, LU Yuejiang, et al. Review on optimal scheduling of integrated energy systems[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2256-2272.
- [4] 徐飞, 郝铃, 陈磊, 等. 电热综合能源系统中热力管网动态建模及协调运行研究综述[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(1): 55-63.
XU Fei, HAO Ling, CHEN Lei, et al. Review of district energy network dynamic modeling and coordinate optimal operation in integrated electricity and heat energy systems[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 55-63.
- [5] 潘超, 范宫博, 王锦鹏, 等. 灵活性资源参与的电热综合能源系统低碳优化[J/OL]. 电工技术学报: 1-14. (2022-03-31)[2022-09-15]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.211725>.
PAN Chao, FAN Gongbo, WANG Jinpeng, et al. Low-carbon optimization of electric and heating integrated energy system with flexible resource participation[J/OL]. Transactions of China Electro-technical Society: 1-14. (2022-03-31) [2022-09-15]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.211725>.
- [6] 孙健, 刘靖宇, 谈政, 等. 电动热泵与蓄热组合实现低温回水实验研究[J]. 暖通空调, 2020, 50(2): 72-75.
SUN Jian, LIU Jingyu, TAN Zheng, et al. Experimental study on low temperature return water with combination of electric heat pump and heat storage system[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2020, 50(2): 72-75.
- [7] 谈政. 电动热泵与蓄热联用的热力站系统模拟与实验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018: 7-24.
TAN Zheng. Simulation and experimental research on thermal substation with the electrical heat pump and heat storage system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018: 7-24.
- [8] 陈磊, 徐飞, 王晓, 等. 储热提升风电消纳能力的实施方式及效果分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4283-4290.
CHEN Lei, XU Fei, WANG Xiao, et al. Implementation and effect of thermal storage in improving wind power accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4283-4290.
- [9] 杨帅, 陈磊, 徐飞, 等. 基于能量流的电热综合能源系统弃风消纳优化调度模型[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 417-426.
YANG Shuai, CHEN Lei, XU Fei, et al. Optimal dispatch model of wind power accommodation in integrated electrical-thermal power system based on power flow model[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 417-426.
- [10] 许彦平, 黄越辉, 孙勇, 等. 计及热力系统热特性的热源容量优化配置及经济性分析[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 97-105.
XU Yanping, HUANG Yuehui, SUN Yong. Optimal capacity allocation of heat power supply and its economic analysis considering thermal characteristics of heat energy system[J]. Electric Power, 2020, 53(11): 97-105.
- [11] 曹丽华, 丁皓轩, 葛维春, 等. 热电联产机组储热罐最佳容量的确定方法[J]. 太阳能学报, 2021, 42(2): 61-67.
CAO Lihua, DING Haoxuan, GE Weichun, et al. Determination method of optimum capacity of heat storage tank in combined heat and power plant[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(2): 61-67.
- [12] 曹丽华, 丁皓轩, 彭培森, 等. 储热罐热分层动态特性分析[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 35-41.
CAO Lihua, DING Haoxuan, PENG Peisen, et al. Analysis on dynamic characteristics of thermal stratification of thermal storage tank[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 35-41.
- [13] 葛世文. 热电厂热水储热罐热特性与控制应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019: 4-10.
GE Shiwen. Study on thermal characteristics and control application of hot water storage tank in cogeneration power plant[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019: 4-10.
- [14] XU C, LIU M, JIAO S, et al. Experimental study and analytical modeling on the thermocline hot water storage tank with radial plate-type diffuser[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 186: 122478.
- [15] 曹丽华, 刘喜峰, 司和勇. 结构参数对储热罐动态特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 3216-3223.
CAO Lihua, LIU Xifeng, SI Heyong. Influence of structural parameters of heat storage tank on its dynamic characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3216-3223.
- [16] 魏剑英, 葛永斌, 田振夫. 一种求解一维对流扩散方程的高精度紧致隐式差分格式[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2007(2): 120-123.
WEI Jianying, GE Yongbin, TIAN Zhenfu. A high-order compact implicit scheme of the 1D convection-diffusion equation[J]. Journal of Ningxia University(Natural Science Edition), 2007(2): 120-123.
- [17] KATULIĆ Stjepko, ČEHIL Mislav, BOGDAN Željko. A novel method for finding the optimal heat storage tank capacity for a cogeneration power plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 65(1-2): 530-538.
- [18] IEVERS S, LIN W X. Numerical simulation of three-dimensional flow dynamics in a hot water storage tank[J]. Applied Energy, 2009, 86(12): 2604-2614.

(责任编辑 刘永强)