



面向风光驱动的固体储热砖耦合供热系统动态建模与典型日运行特性分析

张湘晴¹, 高 静², 李 磊¹, 张 彪², 韩 宇², 刘均庆¹, 于 东¹

(¹北京低碳清洁能源研究院, 北京 102211; ²国能榆林能源有限责任公司, 陕西 榆林 719000)

摘 要: 利用高温固体储热技术实现可再生能源灵活利用, 是破解风电、光伏发电波动性与间歇性难题的重要途径之一。本工作采用模块化建模方法, 基于 Matlab/Simulink 平台构建了包含风电、光伏、固体储热砖及氮气-水换热器等部件的风光驱动固体储热供热耦合系统动态仿真模型, 以我国西北地区气候特征为背景, 选取四季典型日开展全天候动态特性分析, 探究储/放热工况切换及热/冷氮混合控制下的系统响应规律。结果表明, 在额定工况下系统以 12 MW 电功率蓄热 6 h, 热/冷氮混合策略可保障无外电输入时连续 24 h 稳定热水供应; 在四季典型日边界条件下, 热氮占比均值由春季 0.196 逐季升至冬季 0.428, 其变化与可再生能源平均发电功率递减趋势高度契合, 储热砖温随季节阶梯式下移而出口热水参数保持稳定, 春季储热能力最强、冬季需依赖高比例热氮维持供热。本研究明确了我国西北地区风光-储热-供热系统的动态耦合规律和季节性优化策略, 为高温固体储热技术在新能源系统中的工程化应用与控制优化提供了可参考的仿真方法与设计依据。

关键词: 固体储热; 电加热; 可再生能源消纳; 动态仿真; 供热系统

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1131

中图分类号: TK 12

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 06-2197-12

Dynamic modeling and typical-day operational characteristics of a solid thermal storage-coupled heating system driven by wind and solar power

ZHANG Xiangqing¹, GAO Jing², LI Lei¹, ZHANG Biao², HAN Yu², LIU Junqing¹, YU Dong¹

(¹National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102211, China; ²Guoneng Yulin Energy Co., Ltd., Yulin 719000, Shaanxi, China)

Abstract: Flexible renewable energy utilization via high-temperature solid thermal energy storage is a key approach for addressing the volatility and intermittency of wind and photovoltaic power generation. A modular modeling approach was adopted to develop a dynamic simulation model for a wind-solar-driven solid thermal energy storage-coupled heating system that integrates wind turbines, photovoltaic modules, solid thermal energy storage bricks, and a nitrogen-water heat exchanger using the MATLAB/Simulink platform. Based on the climatic characteristics of Northwest China, typical days across four seasons

收稿日期: 2025-12-16; 修改稿日期: 2026-01-13。

基金项目: 国家能源集团科技创新项目资助 (GJNY-23-138)。

第一作者: 张湘晴 (1996—), 女, 博士, 工程师, 研究方向为储热技术, E-mail: 20101368@chnenergy.com.cn; 通信作者: 李磊, 工程师, 研究方向为储热技术, E-mail: 12094809@chnenergy.com.cn。

引用本文: 张湘晴, 高静, 李磊, 等. 面向风光驱动的固体储热砖耦合供热系统动态建模与典型日运行特性分析[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(6): 2197-2208.

Citation: ZHANG Xiangqing, GAO Jing, LI Lei, et al. Dynamic modeling and typical-day operational characteristics of a solid thermal storage-coupled heating system driven by wind and solar power[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(6): 2197-2208.

were selected to perform all-day dynamic characteristic analysis, investigating the system response laws under charge/discharge mode switching and hot/cold nitrogen mixing control. The results demonstrate that under rated conditions, the developed system stores heat with an electric power of 12 MW for 6 h; the hot/cold nitrogen mixing strategy ensures a stable hot water supply for 24 consecutive hours without external power input. Under the boundary conditions of typical seasonal days, the average hot nitrogen ratio increases from 0.196 in spring to 0.428 in winter, which strongly aligns with the decreasing trend of average renewable power generation. The temperature of the solid thermal energy storage bricks decreases stepwise with seasons, whereas the outlet hot water parameters remain stable. In other words, the developed system exhibits the strongest heat storage capacity in spring and relies on a high hot nitrogen ratio to maintain heating in winter. This study clarifies the dynamic coupling laws and seasonal optimization strategies of the wind-solar-thermal energy storage/heating system in Northwest China, providing a referable simulation method and design basis for the engineering application and control optimization of high-temperature solid thermal energy storage technology in new energy systems.

Keywords: solid thermal storage; electric heating; renewable energy consumption; dynamic simulation; heating systems

随着中国“双碳”目标的提出,我国能源结构正处于加速向清洁化、低碳化转型的过程中,正如《“十四五”可再生能源发展规划》中明确提出,到2030年风电与光伏发电装机容量之和将超过12亿千瓦,占据总发电装机容量近40%^[1]。然而以风电和光伏发电为代表的可再生能源发电具有强波动性与间歇性特点,仅仅依赖电网侧条件与传统化石能源发电调节难以满足其并网需求,成为限制可再生能源装机容量占比提升的重要原因。因此如果能够通过提升热侧负荷调节与大容量储热技术构建更强的吸纳与调峰能力^[2],可以为减少弃风弃光的情况并提高终端清洁供热比例^[3]提供支持。我国西北地区兼具优质的风光资源与广泛的冬季供热需求,但由于这些风光伏电力资源呈现“整体富余、尖峰负荷紧张、局部时段紧缺以及季节错配严重”的特点^[4]，“新能源-储热-供热”的一体化路径成为应对电热时空错位的重要手段。

高温固体储热技术凭借其所需材料廉价、温度适应范围广(数百至上千摄氏度)^[5]、循环寿命长及可直接灵活适配电加热等优点,成为近年来“新能源-储热-供热”系统中的主要选择之一。国际上已出现以电加热+固体储热为核心的示范工程,如西门子歌美飒公司(Siemens Gamesa)的电热储能系统采用火山岩为介质,通过电阻加热将空气加

热至约750℃,实现长时储热与按需供热^[6];兰多能源公司(Rondo Energy)开发的热能电池(heat battery)系统则以固体储热砖为介质,在风光电可用时充热、按需输出高温空气或蒸汽,实现为工业热过程的持续供能^[7]。这都表明高温固体储热与新能源机组的耦合能源系统具有天然匹配性和工程可行性。作为一类新兴的新能源综合利用能源系统,针对其关键参数的影响机制与动态特性的研究近年间刚刚起步,国内外的研究人员主要围绕固体储热系统的传热机理与结构优化开展了一系列探索研究。廖晋^[8]针对风电弃风消纳问题,提出风电就地消纳的固体电储热技术,建立了固体电储热单元与冷流体换热的数学模型;黄新晨等^[9]进一步利用计算流体力学方法对固体电储热单元的充放热过程进行了数值模拟;陈梦东等^[10]采用响应面优化方法对砖体几何与通道参数进行了优化;邢作霞等^[11-12]开展了储热单元的数值模拟与多参数协同优化,并分析了系统不同供热工况下的经济性;赵岷等^[13]、Trevisan等^[14]与陈久林等^[15]分别采用数值模拟与实验测量的方式,针对显热储热装置的结构与设计参数对其温度分布、充放热效率等指标的影响进行了研究;Eggers等^[16]进一步讨论了以岩石为介质的储热系统的运行可行性。可以看出现有研究多聚焦于“新能源-储热-供热”系统中稳定工作状态

中独立部件的工作特性并开展结构参数优化^[17], 缺少对“风光发电-电加热-固体储热-热水供热”这一完整链路的系统级动态特性的相关研究。特别是在风光出力波动与终端稳定供热需求并存的情形下, 如何通过电-热耦合与多时间尺度协调实现稳定运行, 仍缺乏系统动态建模研究。

针对“新能源-储热-供热”一体化综合能源系统动态特性尚未明确这一问题, 本工作以我国西北地区典型的风光资源分布与供热需求特点为背景, 基于 Matlab/Simulink 平台建立了包含风电、光伏、固体储热装置、气-水换热器的动态仿真模型, 并围绕春、夏、秋、冬四季典型日进行了一体化能源系统的动态仿真研究, 所得到的动态特性可以为现有高温固体储热系统的稳定运行与清洁供热提供仿真方法与理论支撑。

1 固体储热砖耦合供热系统

本工作的研究对象为典型的可再生能源驱动的固体储热砖耦合供热系统, 主要由风电与光伏组件、固体储热砖组件和气-水换热器三部分构成。系统选用炭材料作为固体储热介质^[18-20], 该材料具有耐超高温、低热膨胀系数等优点, 但高温下易与氧气发生化学反应, 因此采用惰性氮气作为中间换热介质, 系统结构组成如图1所示。在供热系统工作过程中, 风光发电作为一次能源, 当风光资源充足、出力富余时, 电能经电热变换以高温显热形式存储于固体储热砖体之中, 当无风光电输入或存在供热需求时, 可由氮气快速携热, 通过换热器稳定输出热水, 实现清洁、可控、可调的工业与民用供热, 整体包含储热和放热两种基本工况。

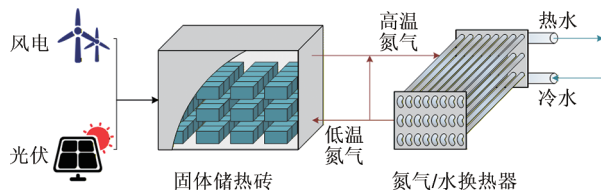


图1 “风电+光伏-固体储热砖-氮气-水”耦合供热系统
Fig. 1 “Wind power + photovoltaic-solid thermal storage brick-nitrogen-water” coupled heating system

1.1 储热工况

根据可用风光功率与限制条件（具体包括功率上限、爬坡率、砖体最高允许温度），控制电加热

器将热量输送进储热砖体。此阶段氮气回路可关闭或保持低流量, 重点在于提高砖体温度, 将可再生能源发电量以高温显热的形式存储。

1.2 放热工况

启动氮气循环, 控制风机转速和阀门开度, 使氮气沿流道与高温砖体对流换热而升温; 离开储热砖的热氮气与一定流量的低温氮气混合后进入换热器与管程水进行显热传递, 按设定出水温度闭环调节。放热后氮气降温回流至砖体入口, 形成闭合回路并持续取热。其中, 热氮与冷氮混合是保障热水稳定输出的关键。通过按比例混合砖体出口的热氮与低温氮气, 以保持换热器入口氮气温度维持稳定, 从而去除储热砖体在运行中的温度变化对换热器入口的影响。随后氮气总流量根据所需热负荷进行调整, 可在较宽负荷范围内维持热水流量与温度。同时, 热氮、冷氮混合后可以显著减小换热器的受热冲击与材料热疲劳。

本系统具有以下优势与工程特性: 一是高比例可再生消纳, 将不稳定电能转化为可调可储的热, 使风光出力与热负荷在时间上解耦, 可以显著提高可再生能源消纳; 二是安全简洁, 固体砖体无相变、无循环衰减, 维护工作量低; 三是高扩展性, 通过模块化并联, 可在千瓦至多兆瓦范围扩展; 四是动态可控, 系统可在分钟级完成储放热的工况切换, 出水温度偏差小, 适配工业与民用热水的稳定性需求。

2 系统关键部件的动态建模方法

2.1 风电机组模型

风电机组的核心设备为风力机, 其风机功率 P_w 与气动转矩 T_a 分别为^[21]

$$P_w = \frac{1}{2} \rho_a A_w v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

$$T_a = \frac{P_w}{\omega_r} \quad (2)$$

式中, ρ_a 为空气密度, kg/m^3 ; 扫掠面积为 $A_w = \pi R_w^2$, m^2 ; R_w 为风机叶片半径, m ; v 为来流风速, m/s ; λ 为叶尖速比; β 为桨距角, rad ; ω_r 为转速, rad/s ; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数, 是与叶尖速比和桨距角有关的函数, 最大值为 0.593, 也就是贝兹极限。根据风力发电机功率特性曲线以及相关设计参数, 可以采用参数拟合的方式计算 C_p 。

在风速低于额定风速时, 调节电机转速来达到

当前风速下的最佳转速,以维持最佳叶尖速比,实现风能的最大功率点跟踪。当风速高于额定风速时,电机转速恒定。桨距角和风速一定时,风力机输出功率大小是随着转速的变化而变化的,当转速为某一特定值时输出功率才达最大值,风速与最优转速之间的关系为:

$$\omega_r = \frac{\lambda v}{R_w} \quad (3)$$

2.2 光伏机组模型

光伏组件由多个串联连接的太阳能电池组成,通过建立单个电池特性模型即可获得其输出特性。电池建模方法常见方式包括单二极管模型和双二极管模型。双二极管模型是目前能够最全面表征光伏电池特性的模型,其在单二极管模型基础上增加一个二极管以反映耗尽区载流子复合损失^[22]。然而该模型需求解七个及以上参数,大大增加了复杂度和求解难度,因此不适用于动态模型的实时仿真。

单二极管模型足以满足常规使用需求,如图2所示。

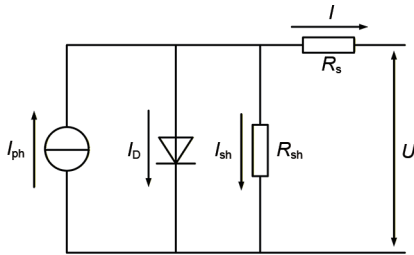


图2 单二极管模型

Fig. 2 Single diode model

图中各电流可按式计算

$$I_{out} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (4)$$

$$I_{out} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{e(U + I_{out}R_s)}{nkT_c} \right) - 1 \right] - \frac{U + I_{out}R_s}{R_{sh}} \quad (5)$$

式中, I_{out} 为输出电流, A; I_{ph} 为光生电流, A; I_D 为暗电流, A; I_{sh} 为流经内部分流电阻的电流, A; I_0 为反向饱和电流, A; e 为元电荷, C; U 为输出电压, V; R_s 为内部串联电阻, Ω ; n 为理想因子; k 为玻尔兹曼常数; T_c 为太阳能电池温度, $^{\circ}\text{C}$; R_{sh} 为内部分流电阻, Ω 。

由于太阳能电池特性受其所处环境的影响,上述方程中的参数会发生变化,且各参数值可通过工作温度进行修正^[23]。在建立单体太阳能电池的特性方程后,可结合太阳能电池模型的具体连接方式计

算其整体输出特性。

2.3 固体储热砖模型

该部分将风电、光伏的输出电能通过布置在储热砖内部的加热电阻丝转化为热量,储存在固体储热砖中,再以氮气为传热工质从砖体中取热。单块储热砖-氮气-电加热一体化单元的结构示意如图3所示,其中外层为固体储热砖,中间为贯通的氮气流道,流道中心布置加热电阻丝。

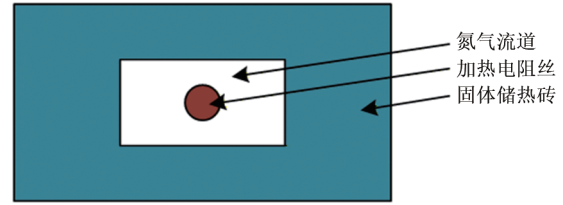


图3 固体储热砖模型

Fig. 3 Solid thermal storage brick model

在长时间的系统级动态建模中,为兼顾计算精度与求解效率,储热砖单元采用集总参数模型处理。假设单块固体储热砖内部导热远快于其表面对流换热,即满足 Biot 数较小的条件,将其视为单温度节点,温度 (T_s) 在整个砖体内均匀分布。砖体与流经的氮气之间发生对流换热,热量通过气固界面实现传递。氮气侧,流道内的气体被视为一次通过,温度以平均值 T_g 表征。此种简化可有效反映系统能量变化趋势,并在保证机理合理性的前提下降低计算复杂度。结合电阻丝布置与高温辐射换热分析,可认为电阻丝产生的热量主要被周围固体储热砖吸收,氮气仅获得其中一部分用于携带和运输。因此引入分配系数 $\phi \in (0, 1)$, ϕ 表示电功加热氮气的比例, $1 - \phi$ 表示加热砖体的比例。

可再生能源发电量以热的形式进入固体储热砖,对储热砖建立能量守恒方程:

$$c_{p,s} M_s \frac{dT_s}{dt} = (1 - \phi) \eta_e P_e - Q_g - Q_{loss} \quad (6)$$

式中, $c_{p,s}$ 为储热砖的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; M_s 为储热砖质量, kg; η_e 为电-热转换效率,计算中取 0.99; P_e 为输入的发电功率, W; Q_g 为储热砖与氮气的换热量, W; 对环境散热 Q_{loss} 包含了与周围环境的对流散热以及辐射散热,可按下式计算:

$$Q_{loss} = h_{o,s} A_{o,s} (T_s - T_0) + \varepsilon \sigma A_{o,s} (T_s^4 - T_0^4) \quad (7)$$

式中, $h_{o,s}$ 为储热砖组件与外部环境的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; $A_{o,s}$ 为储热砖组件外部换热面

积, m^2 ; T_0 为环境温度, $^\circ\text{C}$; ε 为表面发射率; σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

储热砖与氮气的换热量 Q_g 可按式计算:

$$Q_g = hA_h(T_s - T_g) \quad (8)$$

式中, A_h 为储热砖与氮气的换热面积, m^2 。

氮气侧视作并联通道, 换热系数 h 可根据努塞数 Nu 计算:

$$h = \frac{Nu k_g}{D_c} \quad (9)$$

式中, k_g 为氮气导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; D_c 为当量直径, m ; Nu 是雷诺数 Re 和普朗特数 Pr 的函数, 可按式计算^[24]:

$$Re = \frac{\dot{m}_g D_c}{A_c \mu_g} \quad (10)$$

$$Pr = \frac{c_{p,g} \mu_g}{k_g} \quad (11)$$

$$Nu = \begin{cases} 3.66, & Re < 2300, \\ 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}, & Re \geq 2300, \end{cases} \quad (12)$$

式中, $\dot{m}_g$ 为氮气的质量流量, kg/s ; A_c 为通道截面积, m^2 ; μ_g 为黏性系数, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; $c_{p,g}$ 为氮气的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

氮气侧可以建立能量守恒方程:

$$c_g M_g \frac{dT_g}{dt} = \dot{m}_g (h_{in} - h_{out}) + hA_h (T_s - T_g) + \phi \eta_e P_e \quad (13)$$

式中, M_g 为氮气质量, kg ; h_{in} 与 h_{out} 为入口和出口氮气的焓值, kJ/kg 。

2.4 氮气-水换热器模型

翅片管式换热器将氮气携带的热量经管壁传递给管内的给水, 最终输出热水。为兼顾精度与可计算性, 采用集总参数法与等效热阻模型, 将壳程氮气 T_g 、管程水 T_l 视作两个控制体, 管壁 T_w 视作质量不发生变化的控制体。翅片管式换热器如图4所示。

氮气流经的管外换热面积 $A_{o,tube}$ 可按式计算,

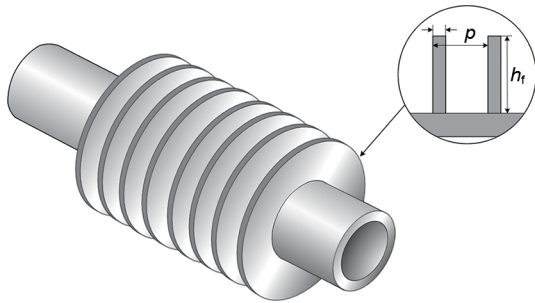


图4 翅片管式换热器模型

Fig. 4 Solid thermal storage brick model

$$A_{o,tube} = n(\pi d_{o,tube} L_{tube} + N_f \eta_f A_{fin}) \quad (14)$$

式中, n 为并联管数; $d_{o,tube}$ 为外径, m ; L_{tube} 为管长, m ; N_f 为单根管上翅片数; η_f 为单片翅片的热效率; A_{fin} 为单片翅片面积, $A_{fin} = \pi d_{o,tube} h_f$ ^[25], m^2 ; h_f 为翅片高度, m 。

给水流经的管内换热面积 $A_{i,tube}$ 为:

$$A_{i,tube} = n \frac{\pi d_{i,tube}^2}{4} \quad (15)$$

式中, $d_{i,tube}$ 为内径, m 。

针对换热管壁, 其导热热阻 R_{cond} 可表示为:

$$R_{cond} = \frac{\ln(d_{o,tube}/d_{i,tube})}{2\pi k_{tube} L_{tube} n} \quad (16)$$

式中, k_{tube} 为换热管导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$;

将导热热阻等分至管壁的内侧 R_i^{eff} 和外侧 R_o^{eff} , 得

$$R_o^{eff} = \frac{1}{h_{o,tube} A_{o,tube}} + \frac{1}{2} R_{cond} \quad (17)$$

$$R_i^{eff} = \frac{1}{h_{i,tube} A_{i,tube}} + \frac{1}{2} R_{cond} \quad (18)$$

式中, $h_{i,tube}$ 和 $h_{o,tube}$ 为管内、外壁面的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

那么动态过程中的换热管内、外壁面的瞬时热流为:

$$Q_{i,tube} = \frac{T_w - T_l}{R_i^{eff}} \quad (19)$$

$$Q_{o,tube} = \frac{T_g - T_w}{R_o^{eff}} \quad (20)$$

壳程氮气 C_g 、管壁 C_w 、管程水 C_l 的等效热容分别为:

$$C_g = \rho_g V_g c_{p,g} \quad (21)$$

$$C_w = m_{tube} c_{p,tube} \quad (22)$$

$$C_l = \rho_l V_l c_{p,l} \quad (23)$$

式中, ρ_g 和 ρ_l 为氮气与水的密度, kg/m^3 ; V_g 和 V_l 分别为壳/管侧滞留体积, m^3 ; m_{tube} 为换热管质量, kg ; $c_{p,tube}$ 和 $c_{p,l}$ 为换热管与水的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

根据上述公式, 可以对三者建立能量守恒方程:

$$C_g \frac{dT_g}{dt} = \dot{m}_g (h_{g,in} - h_{g,out}) - Q_{o,tube} \quad (24)$$

$$C_w \frac{dT_w}{dt} = Q_{o,tube} - Q_{i,tube} \quad (25)$$

$$C_l \frac{dT_l}{dt} = \dot{m}_l (h_{l,in} - h_{l,out}) + Q_{i,tube} \quad (26)$$

式中, $h_{g,in}$ 和 $h_{g,out}$ 为氮气入口、出口的焓值, kJ/kg ; $h_{l,in}$ 和 $h_{l,out}$ 为水入口、出口的焓值, kJ/kg 。

2.5 数值实现、耦合与运行策略

在上述部件模型的基础上,本研究进一步依托 Matlab/Simulink 平台实现系统级的动态特性仿真与控制设计,在动态模拟过程中,假定风电与光伏在直流母线侧并联输入,其中风机与光伏环节采用小时间步长进行离散化,换热器相关模型求解时采用显式欧拉法。

在动态模拟系统运行的过程中,本研究采取了热/冷氮混合运行策略,由于本系统的最终产品为高温热水,为保证热水的流量、温度接近恒定,需要保证入口氮气的温度、流量尽可能减少波动。所以进入固体储热砖取热的氮气被分为两股,一股取热后变为热氮气,另一股与取热后的氮气混风,再进入氮气-水换热器加热给水。氮气混合过程如下式:

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{g, \text{hot}} + \dot{m}_{g, \text{cold}} \quad (27)$$

$$R = \frac{\dot{m}_{g, \text{hot}}}{\dot{m}_g} \quad (28)$$

其中, $\dot{m}_{g, \text{hot}}$ 和 $\dot{m}_{g, \text{cold}}$ 分别为热氮气和冷氮气的质量流量, kg/s; R 为热氮占比。

3 额定工况系统动态特性分析

本研究首先对所考虑的固体储热系统,在额定储热与放热工况下开展了动态仿真模拟,系统主要参数如表 1 所示。

表 1 系统主要参数

Table 1 Main parameters of the system

参数	数值
固体储热砖质量/kg	212000
固体储热砖比热容/[J/(kg·K)]	23.39762+2.58506T-9.09368E-4T ²
换热器给水温度/℃	90
换热器给水压力/MPa	1.25
换热器给水流量/(kg/s)	28.5

储热阶段,以 12 MW 电功率持续蓄热,此过程无氮气流入,储热砖初始温度 220℃。如图 5 所示,储热砖的温度整体呈线性升温特性,但是温度变化速率随时间略有放缓。当蓄热 6 h 时,总电输入能量为 72 MWh,储热砖温升至 900℃。

放热阶段,无外部电能输入,储热砖初始温度 900℃,向负荷侧持续 24 h 供应 115℃/1.25 MPa 的热水,放热功率约为 3 MW。为保障供热稳定,采取热/冷氮混合运行策略,在储热砖中取热后的

热氮气与未取热的冷氮气混合后进入氮气-水换热器,混风后的氮气参数基本保持为 165℃/111.1 kg/s。放热过程中储热砖的温度变化及氮气流量变化分别如图 6 和图 7 所示,储热砖的温度变化呈现出整体线性降低的趋势,当放热 24 h 时,储热砖温降至 223℃。

上述结果验证了系统容量与传热驱动力可匹配负荷需求。额定工况单次储/放热循环效率,会受环境散热损失、放热终止时储热砖残余显热、补充氮气的能量输入等因素影响,仿真模型已考虑储/放热过程中的能量转化情况。

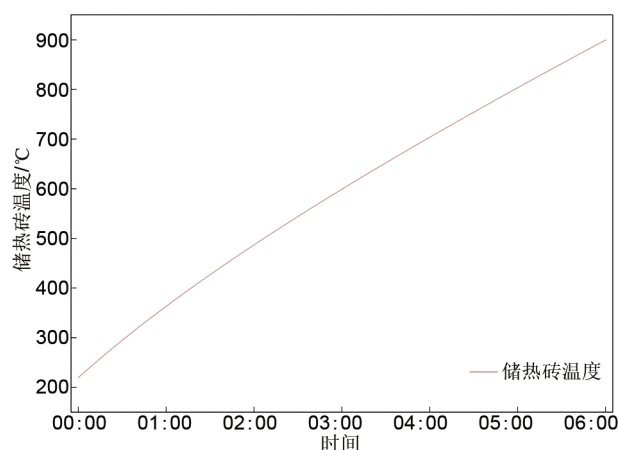


图 5 额定储热过程储热砖温度变化

Fig. 5 Temperature change of thermal storage bricks during rated thermal storage process

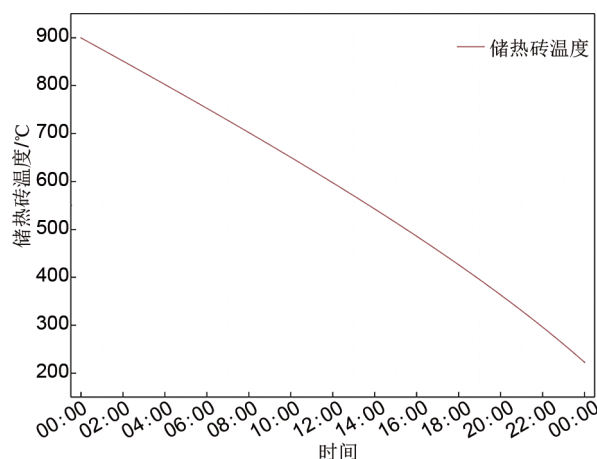


图 6 额定放热过程储热砖温度变化

Fig. 6 Temperature change of heat storage brick during rated heat release process

4 典型日系统动态特性分析

本研究进一步考虑该系统在真实环境下的动态

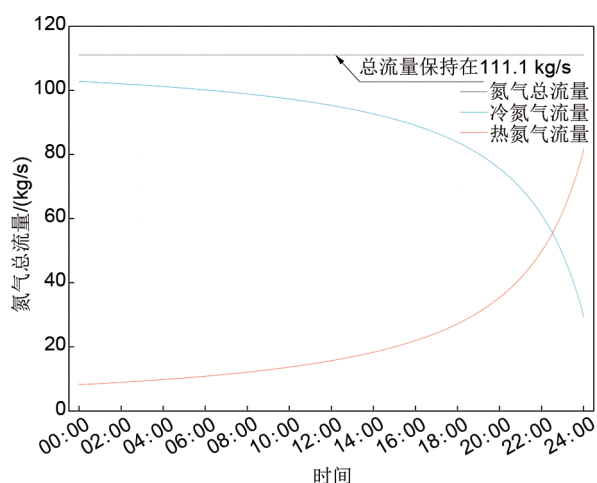


图7 额定放热过程氮气流量变化

Fig. 7 Nitrogen flow rate change during rated exothermic process

运行特性,选取风光资源丰富的我国西北某地区的典型日作为边界条件,针对前文所描述的耦合供热系统为对象,探究典型日下的系统动态特性,通过

对环境输入进行标准化建模,开展全天的仿真实验。该地区环境数据的时间分辨率为1 min,包含太阳总辐照、环境温度与近地风速,相关参数如表2所示,变化趋势如图8所示。

上述环境输入呈现出清晰的季节性:夏季辐照最强、昼长最长,冬季辐照与气温最低;春冬风速相对更高,有利于风电对光伏的互补。在后续仿真中,太阳辐照将用于计算光伏组件平面辐照并与环境温度、风速共同计算光伏发电量;风速则按幂律进行高度换算以驱动风电机组,从而为系统的能量耦合与控制策略提供一致、可复现的外部边界。

在全天候仿真中,光伏5 MW,风电 5×1.5 MW(合计7.5 MW),受机组额定与限功约束,系统总峰值额定功率不超过12.5 MW。与额定工况中不同的是,此时耦合供热系统运行过程中储热和放热两种工况同时进行。通过动态模拟,本工作得到的四季典型日可再生能源发电量的变化曲线如图9所示。

表2 太阳辐照、环境温度和风速相关参数

Table 2 Parameters related to solar irradiance, ambient temperature, and wind speed

季节	日总辐照/(kWh/m ²)	平均温度/℃	最低温度/℃	最高温度/℃	平均风速/(m/s)	最低风速/(m/s)	最高风速/(m/s)
春	6.45	2.1	-4.7	11.1	6.1	4.4	8.4
夏	8.15	23.0	12.4	32.0	5.2	4.3	6.7
秋	7.25	17.4	11.9	24.6	4.6	3.7	6.8
冬	3.18	-5.0	-8.6	0.3	4.9	4.0	6.3

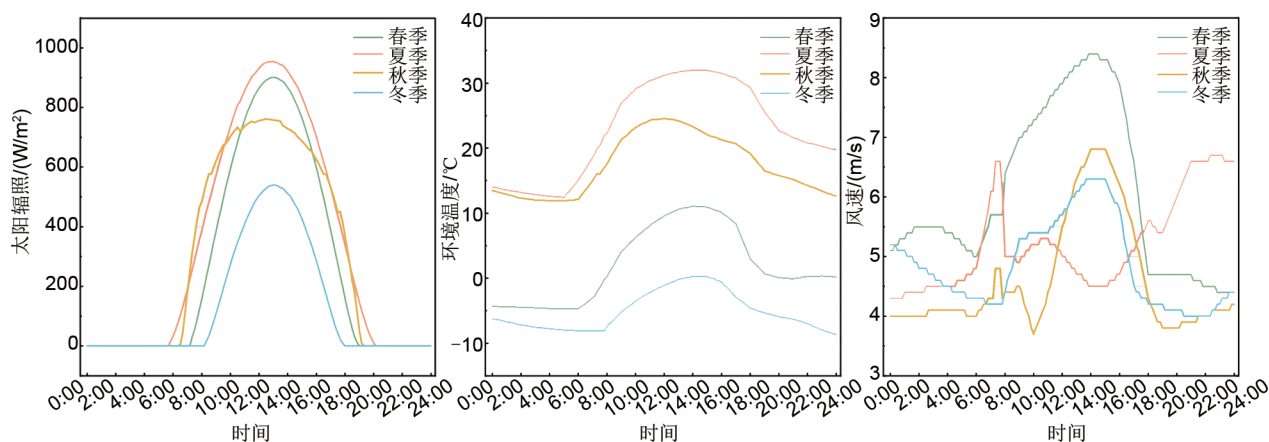


图8 地区内太阳辐照、环境温度和风速变化

Fig. 8 Changes in solar radiation, ambient temperature and wind speed within the region

从图9中可以看出,本系统在该地区春季的可再生发电功率均值为4.44 MW(风电2.96 MW+光伏1.48 MW),峰值发电功率为11.05 MW。风电对发电峰值功率的贡献明显,这也正体现了我国西

北地区春季风强、互补性突出的特点。夏季可再生能源发电功率均值为3.53 MW(风电1.83 MW+光伏1.70 MW),峰值功率6.22 MW。夏季该地区虽然白天有强光伏,但是由于气候导致的平均风速下降

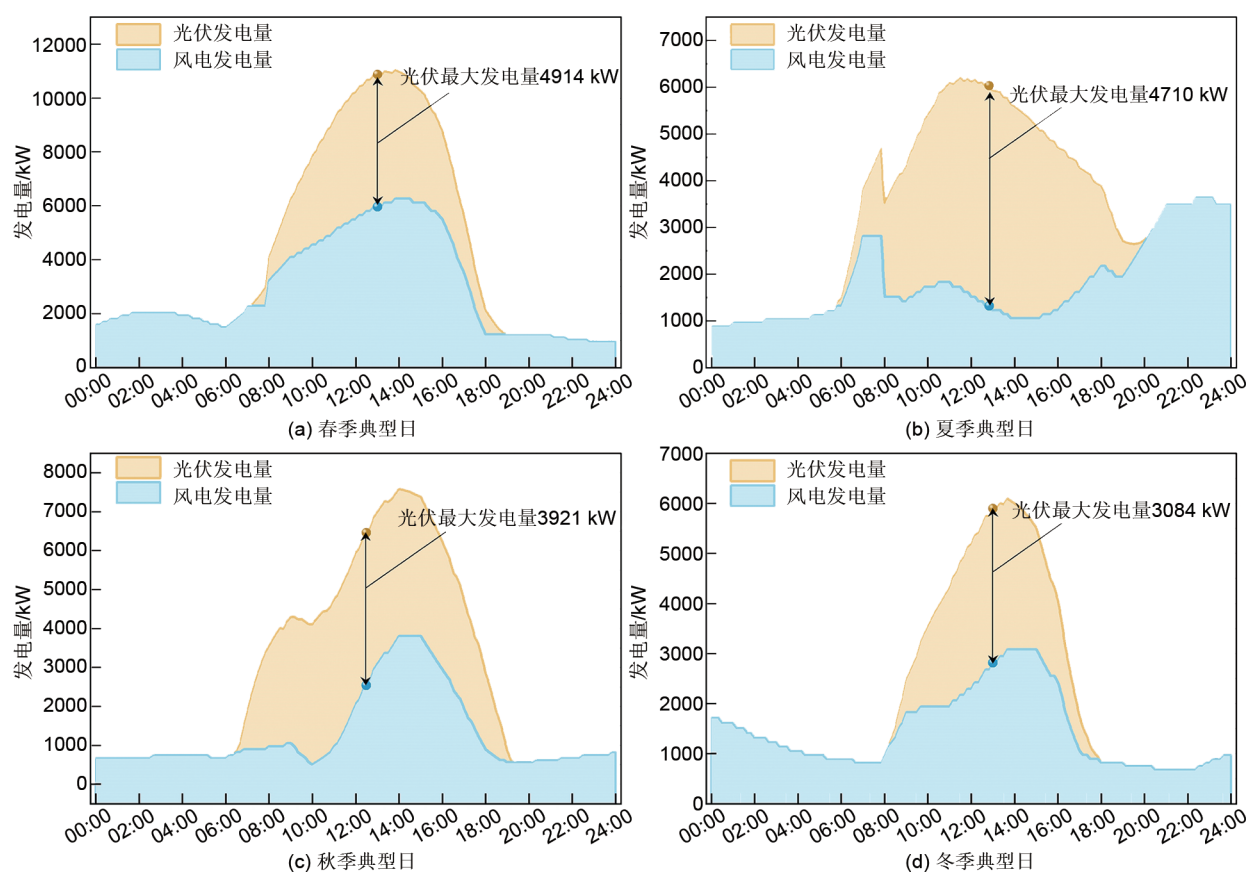


图9 风电、光伏发电量变化

Fig. 9 Changes in wind and solar power generation

使得本系统的风力发电功率相对温和,总均值低于春季。本系统在秋季的可再生发电功率均值为2.87 MW (风电1.30 MW+光伏1.57 MW),峰值功率为7.59 MW,该地区秋季的风光强度曲线更平缓,峰谷较夏季收敛。本系统在冬季的可再生发电功率均值为2.23 MW (风电1.47 MW+光伏0.76 MW),峰值功率为6.10 MW,这主要是由于该地区冬季昼短且辐照弱、风光强度整体偏低。

在本系统中,风电、光伏发电量全部由电阻丝转换成热量输入至固体储热砖中,仿真初始条件设定为储热砖温度400℃,储热砖在不同季节典型日下的温度变化曲线如图10所示。在动态特性模拟过程中,本系统春季日的储热砖温度均值564.22℃,变化范围为328.3~842.7℃,日间的砖温上升迅速,这主要是由于该地区白天风电、光伏发电量较大;而夜间“放热”期温降较慢,是由于春季相较于其他季节拥有较大的风速,可以减缓夜间的储热砖温降。本系统夏季日的储热砖温度均值为413.54℃,变化范围为289.3~536.7℃。此时固

体储热砖温度总体相比春季低,但仍保持清晰的“午后升温-夜间放热”规律;在当天日落后,由于当日风速仍很高,风力发电机的发电量可以覆盖储热砖的放热功率,所以储热砖温在短暂小幅度下降后甚至呈现出缓慢上升的变化趋势。本系统秋季日的储热砖温度均值为370.75℃,变化范围254.8~502.1℃;在相对中等的可再生能源发电功率的条件下,砖温波动相对温和,日落后夜间放热时间大约能够持续6个小时,最终储热砖温下降到略低于初始条件的400℃。本系统冬季日储热砖温度均值为318.44℃,变化范围为240.5~400.0℃;此时地区环境由于季节导致的低温与较低的可再生能源发电功率使砖体温区进一步下移,同时在夜间放热降温更快,此时本系统中全天的可再生能源发电量不足以支持24 h持续3 MW放热,因此如果想保证冬天的连续运行,需考虑最不利运行条件下增加一定的光伏或是风电机组。

在四季典型日的全天运行动态模拟过程中,本系统的热氮气、冷氮气流量变化如图11所示。可

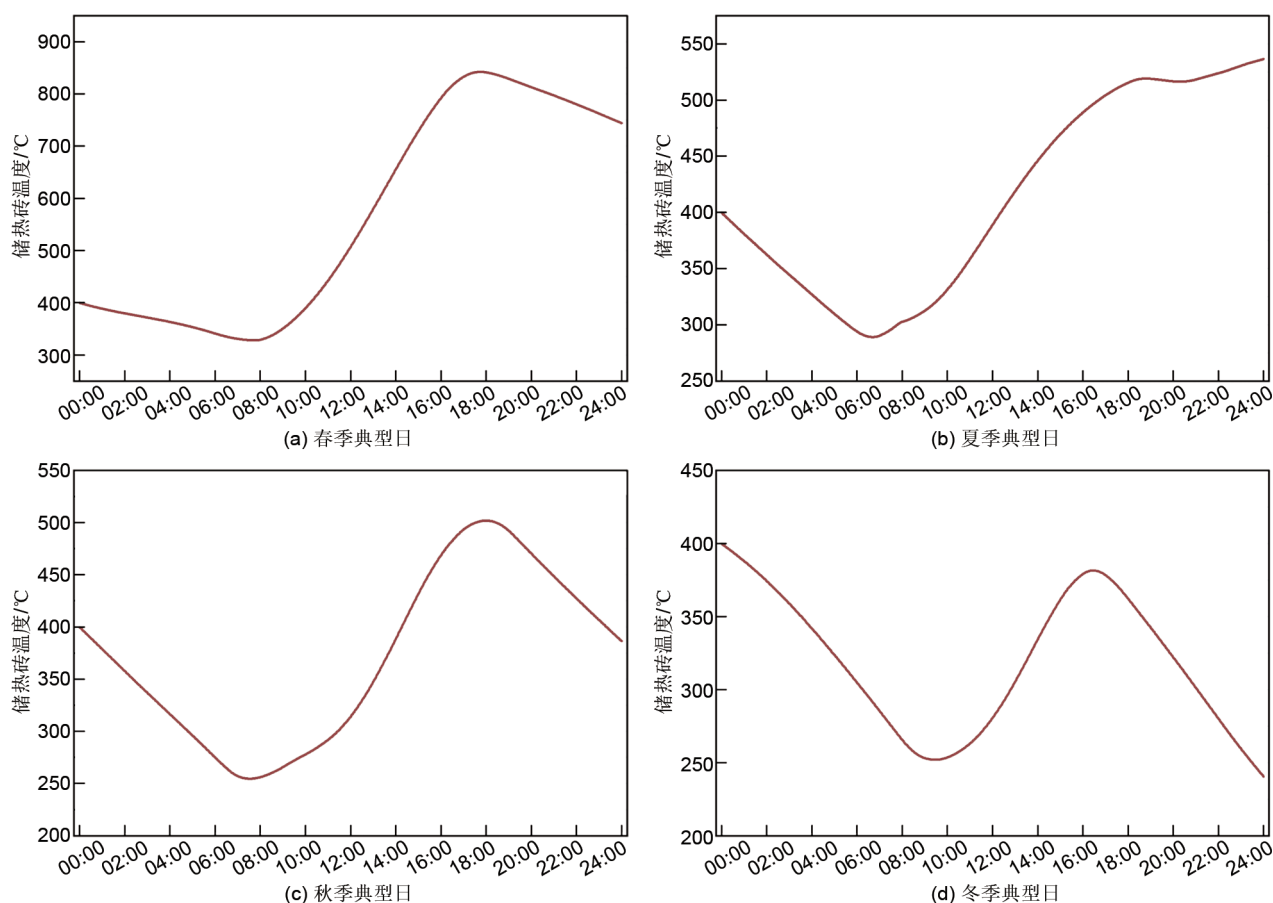


图10 储热砖温度变化

Fig. 10 Temperature change of thermal storage bricks

以从图中看出，四季典型日内的换热器入口氮气总质量流量保持在 111.1 kg/s ，其中热氮、冷氮的占比存在不同的变化趋势。春季日内热氮均值为 21.81 kg/s ，冷氮均值为 89.29 kg/s ，热氮占比 $R=0.196\pm 0.105$ ，表明大多数时段冷氮占比较高，以维持换热器入口氮气温度。夏季日内热氮均值为 30.52 kg/s ，冷氮均值为 80.58 kg/s ， $R=0.275\pm 0.107$ ，相比春季提高约40%，显示在午后砖温偏热时段，控制策略会适度上调热氮比例，继续以混风的形式保障入口温度缓变、降低热冲击。秋季日内热氮均值为 38.28 kg/s ，冷氮均值为 72.83 kg/s ， $R=0.345\pm 0.151$ ，相较夏季进一步抬升25%左右。说明当可再生发电功率继续走低、放热需求上升时，系统进一步通过提高热氮占比保持供热能力，以保持总流量恒定。冬季日内热氮均值为 47.56 kg/s ，冷氮均值为 63.56 kg/s ， $R=0.428\pm 0.136$ ，较春季提升约118%。这表明冬季工况作为最不利工况，系统需以较高的热氮比例来维持换热器入口氮气温度，保

障供热。

四季典型日仿真结果如表3所示。为量化风光输入波动与储热热响应的耦合特性，本工作引入三个指标：输入侧爬坡率 $r(t) = \frac{P(t) - P(t-1)}{\Delta t}$ 、波动强度 $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [P(i) - \bar{P}]^2}$ ，以及储热侧砖体温度变化率 $dT_s = \frac{T_s(t) - T_s(t-1)}{dt}$ 。统计结果表明，春季输入波动强度最大（爬坡率绝对值的95%分位数， $|r|_{95\%}=50.45 \text{ kW/min}$ ），对应储热砖温度响应也更显著（温变率绝对值的95%分位数， $|dT_s|_{95\%}=1.251^\circ\text{C/min}$ ）；冬季输入整体偏弱且砖温区间下移时，稳温控制对热氮占比的调控需求更突出，但砖温变化速率相对较小（ $dT_s=0.467^\circ\text{C/min}$ ），这一现象反映出储热端热惯性与能量积分效应对短时波动具有显著缓冲作用。

以稳定供应热水为目标，风光出力通过影响可

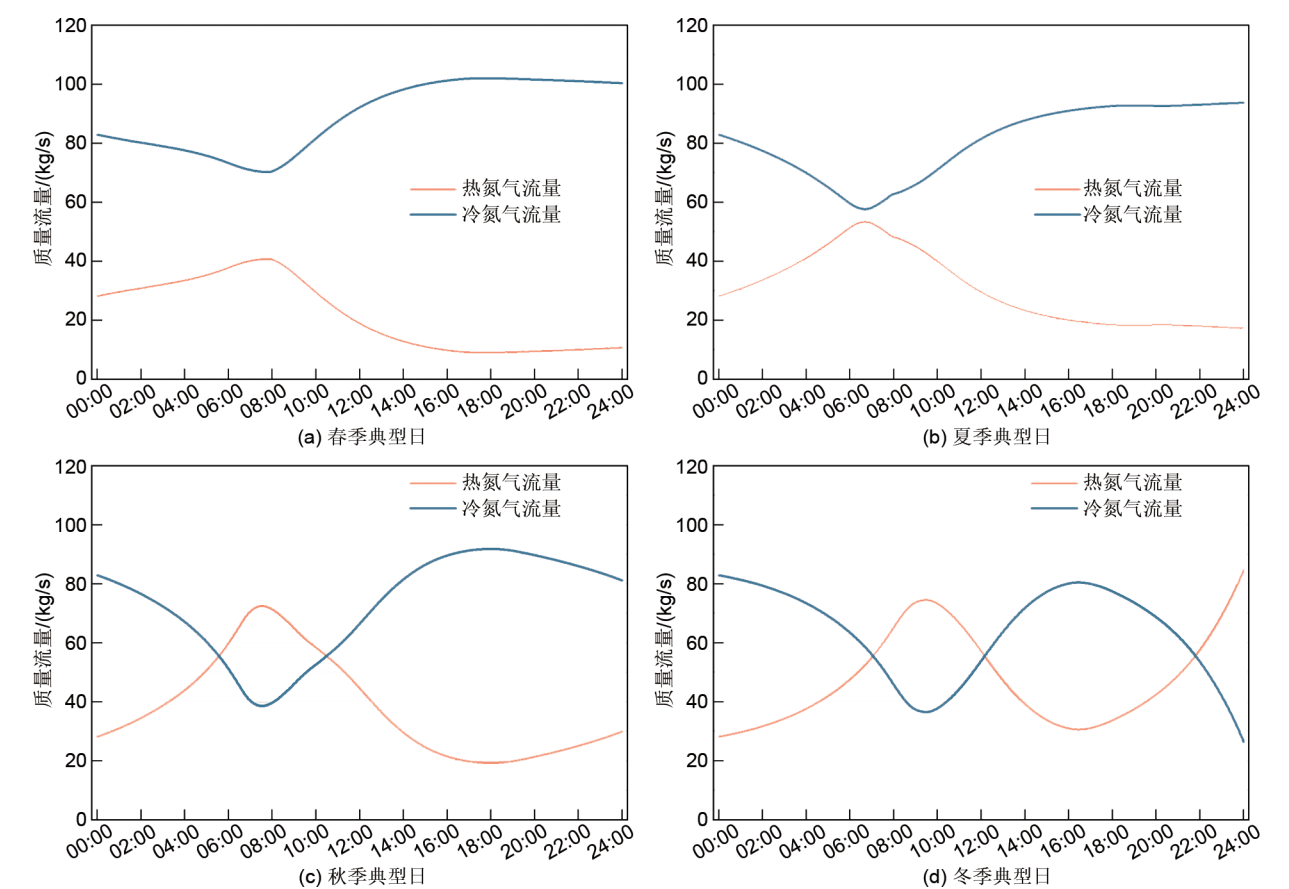


图 11 氮气流量变化
Fig. 11 Nitrogen flow rate change

表 3 四季典型日仿真结果

Table 3 Simulation results for typical days across the four seasons								
季节	可再生发电功率均值/kW	可再生发电总量/(MWh/d)	砖温/℃	热氮占比 R	相关系数($R, -T_s$)	爬坡率/(kW/min)	波动强度/kW	砖温变化率/(℃/min)
春季	4444.43	106.72	328.29~842.70	0.081~0.37	0.965	-72.88~118.35	3669.54	-0.30~1.28
夏季	3527.18	84.67	289.28~536.66	0.16~0.48	0.969	-133.02~55.82	1745.69	-0.41~0.52
秋季	2866.18	68.82	254.75~502.11	0.17~0.65	0.949	-38.84~43.27	2470.56	-0.45~0.73
冬季	2225.30	53.42	240.54~400.00	0.25~0.76	0.972	-51.75~37.76	1828.98	-0.35~0.50

再生充热功率、储热砖温度及热氮占比，最终影响系统运行稳定性。仿真结果表明，不同季节可再生出力的特性与均值差异，导致砖温轨迹及热氮占比 R 的调节强度呈现显著不同：当可再生能源供给不足或环境条件更不利时，砖温衰减更快或上升速率更慢，系统需要更高的 R 来维持出水温度；当 R 继续增加至接近上限时，系统将进入“仅通过热冷氮混合已无法进一步提升氮气温度”的边界工况。

四季典型日仿真结果充分揭示了该新能源固体储热耦合供热系统在我国西北地区不同气象边界下的动态运行特性。春季风能充沛、光照适中，系统

储热能力最强且热稳定性较好；夏季虽具较高辐照，但风力发电功率相对较低，使储热功率略有减弱；秋季风光资源均衡、系统运行平稳，表现出典型的中间季调节特征；冬季因辐照和气温双低，储热砖温度区间整体下移，系统需通过提高热氮比例维持放热输出。若需实现冬季24 h连续稳定的热水供应，需在最不利气象条件来临前预储热，并适度抬高热氮占比，必要时可配置小幅风/光冗余或降低给水流量。

在总氮气流量近似恒定、出水温度闭环调控的条件下，为补偿砖体温度衰减，热氮占比 R 呈单调

上升趋势,并在接近约束边界时出现饱和。此饱和点表明,仅通过热冷氮混合已无法进一步提升氮气出口温度,可见热氮占比 R 不仅是系统控制变量,更可作为判定剩余可用储热量与稳定供热可持续时间的关键指标。典型日的季节差异由风光资源出力特性、储热积分效应及换热不可逆损失等因素共同主导。例如夏季太阳直射辐照(DNI)峰值高但风功率偏低,易出现“峰值储热能力强、日均储热水平不足”的特征,导致系统整体储热能力并非最优;而春季风光资源供给更均衡,储热砖温度轨迹更平缓,系统稳温控制的调节幅度更小。当日均可再生能源发电量低于供热负荷功率时,系统将不可避免地进入“提高热氮占比 R 仍无法维持设定出水温度”的失稳区间,这一临界限制为不同地区、不同装机规模及不同保温水平下的系统容量配置提供了直接判据。

总体来看,四季运行结果验证了风光互补机制、储热平衡与氮气混流控制策略的有效性,表明所构建的动态模型能够合理反映可再生能源驱动下耦合供热系统的日内动态运行特性,为后续系统优化与季节性运行策略设计提供了可靠依据。

5 结 论

本研究聚焦风光驱动固体储热砖耦合供热系统,搭建了系统级动态仿真模型,提出并验证了恒定质量流量+热/冷氮混合的运行策略,为高温固体储热系统的稳定运行与清洁供热提供了仿真方法与理论支撑,主要结论如下。

(1) 构建了以固体储热砖为主体的风光驱动固体储热砖耦合供热系统级动态模型,明确了风光发电输入与储热砖温度、氮气-水换热的动态耦合规律。所建的动态模型在保持模型物理机理可解释性的同时降低了仿真计算的复杂度。

(2) 揭示了我国西北地区四季典型日系统动态运行规律。当换热器入口氮气参数维持稳定以保障供热时,热氮占比 R 的季节均值从春季0.196、夏季0.275、秋季0.345到冬季0.428,其变化特征与可再生能源平均发电功率递减趋势一致;所提出的混风运行策略有效解耦了砖温波动对供热侧的影响,实现全天热水稳定供应,揭示了新能源固体储热系统在不同季节下的温度变化与能量传递规律。

(3) 提出了季节性运行优化方案。在源侧出力

强(春/夏)时段,系统可以通过低热氮占比来抑制砖温过热;在源侧出力弱(秋/冬)时段,则需要提高热氮占比 R 保障供热稳定。针对冬季最不利工况,如希望实现24 h连续稳定的热水供应,需在最不利气象条件来临前提前预储热、轻度扩容风光装机或降低给水流量以维持热平衡。

本研究结论的适用边界如下:模型采用集总参数法,忽略了储热砖内部非均匀温度场及局部热应力,气固换热及系统散热过程均采用等效系数表征;当储热材料特性、流道结构存在显著差异时,需重新辨识相关参数并校核模型适用性。

本研究建模采用了集总参数法,后续研究中可以引入翅片污垢、多节点砖体或沿程分段等细致化建模方法,并结合实验平台开展参数辨识与不确定性量化,实现固体储热系统动态特性的精确仿真。为深入揭示结论的深层机理、提升成果的工程可迁移性,下一步将搭建小型化实验平台,测量砖体特征点温度、氮气进出口温度与流量、换热器水侧进出口温度与流量等关键参数,并辨识砖体有效热容、气固对流换热系数、等效散热系数等核心指标,形成“机理建模-实验校核-工程整定”的闭环体系,为技术工程化应用提供更坚实的支撑。

参 考 文 献

- [1] 国家发展改革委,国家能源局,财政部,等.关于印发“十四五”可再生能源发展规划的通知(发改能源〔2021〕1445号)[EB/OL]. [2021-10-21]. https://zfxxgk.nea.gov.cn/2021-10/21/c_1310611148.htm.
- [2] 丁明,刘新宇,解蛟龙,等.面向提高风电接纳能力的多区域热-电联合调度模型[J].中国电机工程学报,2017,37(14): 4079-4088.
DING M, LIU X Y, XIE J L, et al. Research on heat and electricity coordinated dispatch model of multi-area for improving wind power accommodation ability[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4079-4088.
- [3] 国家发展改革委,国家能源局.关于印发“十四五”现代能源体系规划的通知(发改能源〔2022〕210号)[EB/OL]. [2022-01-29]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/content_5680759.htm.
- [4] 任景,高敏,程松,等.面向新能源不确定性的西北电力电量平衡机制[J].中国电力,2023,56(9): 66-78.
REN J, GAO M, CHENG S, et al. A balance method for power supply-demand adapting to high uncertainties of renewable energy in northwest power grid[J]. Electric Power, 2023, 56(9): 66-78.
- [5] HUANG X Y, LI M Z, LI Y J, et al. Current progress in energy utilization of building systems combining solar thermal and heat storage technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2026, 226: 116330. DOI:10.1016/j.rser.2025.116330.

- [6] LIANG Y R, LI P, XING L L, et al. Current status of thermodynamic electricity storage: Principle, structure, storage device and demonstration[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 80: 110347. DOI:10.1016/j.est.2023.110347.
- [7] PANTALEO A M, TREVISAN S, MATTEUCCI F, et al. Innovation trends on high-temperature thermal energy storage to defossilize energy systems[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 103: 114261. DOI:10.1016/j.est.2024.114261.
- [8] 廖晋. 固体电蓄热装置的传热特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
LIAO J. Research on heat transfer characteristics of solid electric heat storage device[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [9] 黄新晨, 秦勤, 于庆波. 固体电蓄热装置结构优化及蓄放热特性的模拟[J]. *材料与冶金学报*, 2021, 20(4): 290-296. DOI:10.14186/j.cnki.1671-6620.2021.04.009.
HUANG X C, QIN Q, YU Q B. Simulation on structure optimization and heat storage and release characteristics of solid electric heat storage device[J]. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2021, 20(4): 290-296. DOI: 10.14186/j.cnki.1671-6620.2021.04.009.
- [10] 陈梦东, 章康, 马美秀, 等. 基于 Workbench 的固体电蓄热装置换热通道参数优化[J]. *热能动力工程*, 2023, 38(10): 64-71, 94. DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.10.008.
CHEN M D, ZHANG K, MA M X, et al. Optimization of heat exchange channel parameters of solid electric heat storage device based on workbench[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2023, 38(10): 64-71, 94. DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.10.008.
- [11] 邢作霞, 樊金鹏, 陈雷, 等. 固态电制热储热传热匹配特性及热控制方法[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(11): 2439-2447. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.190442.
XING Z X, FAN J P, CHEN L, et al. Heat transfer matching characteristic and heat control method of solid-state electric heating thermal storage system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(11): 2439-2447. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.190442.
- [12] 邢作霞, 赵海川, 马士平, 等. 电制热固体储热装置关键参数设计研究和经济性评估[J]. *储能科学与技术*, 2019, 8(6): 1211-1216. DOI: 10.12028/j.issn.2095-4239.2019.0070.
XING Z X, ZHAO H C, MA S P, et al. Study on key parameters design and economic evaluation of the electric heating and solid sensible heat thermal storage device[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2019, 8(6): 1211-1216. DOI: 10.12028/j.issn.2095-4239.2019.0070.
- [13] 赵岷, 王启民. 基于 ANSYS 分析的蓄热砖蓄热特性数值模拟及实验研究[J]. *沈阳工程学院学报(自然科学版)*, 2020, 16(2): 34-38. DOI: 10.13888/j.cnki.jsie(ns).2020.02.008.
ZHAO D, WANG Q M. Numerical simulation and experimental study on thermal storage characteristics of thermal storage brick based on ANSYS analysis[J]. *Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science)*, 2020, 16(2): 34-38. DOI:10.13888/j.cnki.jsie(ns).2020.02.008.
- [14] TREVISAN S, JEMMAL Y, GUEDEZ R, et al. Packed bed thermal energy storage: A novel design methodology including quasi-dynamic boundary conditions and techno-economic optimization[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 36: 102441. DOI:10.1016/j.est.2021.102441.
- [15] 陈久林, 薛晓迪, 王丽, 等. 基于中高温烟气余热回收的固体显热储热装置热性能实验研究[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(8): 3185-3193.
CHEN J L, XUE X D, WANG L, et al. Experimental investigation of thermal performance in a solid sensible heat storage device for medium-high-temperature flue gas waste heat recovery[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(8): 3185-3193.
- [16] EGGERS J R, VON DER HEYDE M, THAELE S H, et al. Design and performance of a long duration electric thermal energy storage demonstration plant at megawatt-scale[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105780. DOI: 10.1016/j.est.2022.105780.
- [17] ALLEN K G, VON BACKSTRÖM T W, KRÖGER D G, et al. Rock bed storage for solar thermal power plants: Rock characteristics, suitability, and availability[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2014, 126: 170-183. DOI:10.1016/j.solmat.2014.03.030.
- [18] 段春婷, 郭亮东, 魏巍, 等. 电镀铜法增强导热炭材料力学性能的研究[J]. *炭素技术*, 2023, 42(4): 54-57. DOI: 10.14078/j.cnki.1001-3741.2023.04.010.
DUAN C T, GUO L D, WEI W, et al. Study on mechanical properties of thermal-conductive carbon materials strengthened by copper electroplating[J]. *Carbon Techniques*, 2023, 42(4): 54-57. DOI:10.14078/j.cnki.1001-3741.2023.04.010.
- [19] 于东, 王宏刚, 梁文斌, 等. 储热系统: CN119594772A[P]. 2025-03-11.
- [20] 高光辉, 刘均庆, 周友, 等. 一种制备碳基储热材料用组合物、碳基储热材料及其制备方法: CN119591406A[P]. 2025-03-11.
- [21] 胡阳, 邵茂峰, 王蔚然, 等. CDR 风力发电机多领域耦合动态建模及全工况分层协同控制[J]. *动力工程学报*, 2024, 44(10): 1600-1610, 1639.
HU Y, SHAO M F, WANG W R, et al. Multi-domain coupled dynamic modelling and full operating condition hierarchical cooperative control of CDR wind turbine[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2024, 44(10): 1600-1610, 1639.
- [22] SEGEV G, MITTELMAN G, KRIBUS A. Equivalent circuit models for triple-junction concentrator solar cells[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2012, 98: 57-65. DOI: 10.1016/j.solmat.2011.10.013.
- [23] DE SOTO W, KLEIN S A, BECKMAN W A. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance[J]. *Solar Energy*, 2006, 80(1): 78-88. DOI:10.1016/j.solener.2005.06.010.
- [24] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
YANG S M, TAO W Q. Heat transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [25] 李孟山, 雷睿, 周永骥, 等. 翅片管换热器快速计算仿真模型开发与验证[J]. *制冷技术*, 2024, 44(4): 1-6, 15. DOI:10.3969/j.issn.2095-4468.2024.04.101.
LI M S, LEI R, ZHOU Y J, et al. Development and verification of simulation model for fast calculation of finned tube heat exchanger[J]. *Chinese Journal of Refrigeration Technology*, 2024, 44(4): 1-6, 15. DOI:10.3969/j.issn.2095-4468.2024.04.101.