

考虑地源热泵变流量热交换特性的电-热协同调度方法

杨越¹,武平辉¹,陈垒²,杨晓东¹,蔺晨晖^{3,4},吴文传^{3,4}

- (1. 合肥工业大学 电能高效高质转化全国重点实验室,安徽 合肥 230009;
2. 北京大学 能源研究院,北京 100871;3. 清华大学 电机工程与应用电子技术系,北京 100084;
4. 清华大学 新型电力系统运行与控制全国重点实验室,北京 100084)

摘要:地源热泵运行特性与埋管换热器网络的热交换过程存在紧密耦合,这给地源热泵的准确建模与优化控制带来挑战。为此,提出一种基于变流量控制下地源热泵精细热模型的电-热协同调度方法。建立变流量调节下的埋管换热器网络端口等效解析模型,描述流体流量变化时土壤与流体间的热交换过程;建立地源热泵系统的变流量电-热耦合模型,揭示其电功率消耗、流体流量对供热能力的动态影响;构建以最小运行成本为目标电-热协同调度优化框架,通过动态调节地源热泵的流量与功率,实现地源热泵系统与电力系统的协同优化。仿真结果表明,该调度方法能够充分发挥地源热泵系统的调节灵活性,在满足建筑供热需求的同时,提升系统的运行经济性与分布式可再生能源消纳能力。

关键词:地源热泵;电-热协同调度;变流量控制;埋管换热器;综合能源系统;日前调度

中图分类号:TM73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202602010

0 引言

在“双碳”目标驱动下,构建清洁低碳、安全高效的新型电力系统已成为我国能源转型的重要方向^[1-2]。随着可再生能源的快速发展和高比例接入,电力系统运行面临波动性增强、灵活性资源不足等挑战,亟需通过多能源系统协同优化提升整体调控能力^[3-5]。在此背景下,多类型可控设备协同与源-网-荷-储高度互动化已成为提升系统灵活性的关键路径^[6-7]。建筑作为终端能源消费大户,其冷热负荷的柔性调节潜力为提升电力系统灵活性提供了重要支撑^[8]。同时,通过挖掘柔性负荷的调节潜力,能够有效提高系统运行的经济性以及降低碳排放水平^[9-10]。

热泵技术因高效、稳定、低碳等特性在建筑供暖和制冷中的应用日益广泛^[11-12]。近年来,地源热泵(ground source heat pump, GSHP)系统被越来越多地纳入源-网-荷协同调度框架,在满足建筑热舒适

性的同时,为电力系统提供削峰填谷、负荷移峰等辅助服务^[13-14]。

现有研究大多聚焦于GSHP系统的电-热双模运行特性建模及其在综合能源系统中的优化调度策略。文献[15]提出一种同时考虑冷热负荷与机组性能不确定性的鲁棒优化方法,用于GSHP区域能源系统调度,有效降低了运行成本;文献[16]提出一种配微网有功、无功协调优化方法,在保证用户舒适度的前提下,保证了电压安全;文献[17]提出一种兼顾用户舒适度与公平性的热泵调控策略,有效提升了负荷调控过程中的用户体验与新能源消纳能力;文献[18]将GSHP和储热/冷装置引入园区综合能源系统中,增强了综合能源系统的供电可靠性和经济性。

现有研究通常采用恒定^[19-20]或经验性^[21-22]的性能系数(coefficient of performance, COP)模型来近似描述GSHP系统热量输出与电力消耗之间的关系。然而,这类简化模型未能考虑GSHP系统中埋管换热器与土壤的换热过程,以及换热器与热泵之间的强物理耦合,难以准确反映GSHP系统在不同埋管换热器配置、流体流量等不同运行边界下的非线性电-热耦合特性。

在埋管换热器的热力学建模方面已有大量研究,构建的模型包括解析模型^[23-24]和基于空间离散的数值模拟方法^[25-26],但这些模型通常未考虑与热泵系统的耦合,因而难以直接应用于GSHP系统的调度优化问题。文献[27]提出一种更为详细的GSHP建模方法,利用有限差分方法将埋管划分为多个小段来描述其热动态特性,并将这类模型以解析约束的形式嵌入优化模型中,但该方法引入了大

收稿日期:2025-09-22;修回日期:2026-01-30

在线出版日期:2026-02-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52377090, U22B20116);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2025HGTA0155);新型电力系统运行与控制全国重点实验室资助课题(SKLD25KM10);北京市科技新星项目(20250484829)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52377090, U22B20116), the Fundamental Research Funds for the Central Universities(JZ2025HGTA0155), the Project of State Key Laboratory of Power System Operation and Control(SKLD25KM10) and Beijing Nova Program(20250484829)

量的中间变量,增加了模型规模和求解复杂度。

GSHP系统中流体流量变化会直接影响其换热效率、出水温度、最大功率等关键运行参数^[28],从而显著影响电力消耗与供热能力之间的耦合关系。控制流量不仅能提高系统的运行效率,还有助于提升系统的灵活性。

在现有研究中,流体流量通常被设定为固定值。这种定流量运行模式虽控制简单,却存在如下两大物理瓶颈,未能充分挖掘作为连续控制变量的流量在提升GSHP系统调节性能上的调节潜力:一是无效输送能耗高,在部分负荷下仍维持设计流量,导致水泵能耗未能随实际换热需求同步降低;二是系统调节能力受限,定流量不仅约束了主机的最大可达功率,还使得系统仅能依赖压缩机进行调节,缺乏通过流量-功率协同调控来实现快速、精细响应的能力。这导致传统系统在面对快速波动的负荷、分时电价或间歇性可再生能源时的调节灵活性不足。

GSHP的运行机理、现有控制方式存在的瓶颈,以及引入流量控制所需解决的关键问题如附录A所示。

为此,本文面向电-热协同调度场景,提出一种在考虑GSHP变流量控制下地理管热模型的电-热协同调度方法。首先,构建考虑地理管换热过程和热泵运行特性的电-热耦合模型,解析描述流量与热泵电功率、供热能力之间的非线性关系;其次,在光伏出力波动、分时电价、负荷需求及调度边界约束下,建立电-热协同调度模型,通过动态调节热泵流量和功率实现系统运行成本最小化;最后,通过算例分析验证所提方法在提升新能源消纳以及系统经济性和灵活性等方面的实际效果。

1 考虑变流量热交换特性的GSHP解析模型

1.1 单根地理管的解析热模型

GSHP的运行依赖于地理管换热器与土壤交换热量,为了准确描述GSHP在不同运行条件下的热力学性能,本文首先对单根地理管热模型进行系统分析与建模,为后续多地理管网络建模提供基础。

单根U型地理管换热器的侧面和横截面如图1所示。图中: z 为钻孔深度; T_b 为钻孔壁的平均温度; $T_{f,in}$ 、 $T_{f,out}$ 分别为某一深度处地理管横截面入口侧和出口侧的流体温度; q_{in} 、 q_{out} 分别为该横截面入口侧和出口侧流体与钻孔之间产生的热交换量; H 为地理管底部深度。则有:

$$T_{f,in} - T_b = R_{11}q_{in} + R_{12}q_{out} \quad (1)$$

$$T_{f,out} - T_b = R_{21}q_{in} + R_{22}q_{out} \quad (2)$$

$$T_f - TT_b = Rq \quad (3)$$

式中: R_{11} 、 R_{12} 、 R_{21} 、 R_{22} 为热阻矩阵 R 中的4个元素; T_f

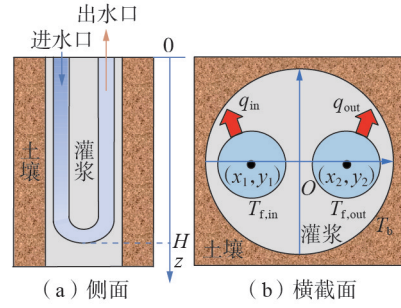


图1 典型单U型管竖直地热钻孔示意图及其截面图

Fig.1 Schematic diagrams of vertical geothermal borehole and its cross section for typical single U-pipe

为流体温度列向量; I 为 2×1 阶全1矩阵; q 为入口侧和出口侧流体与钻孔壁之间产生的热交换向量。

将管道空间位置记为 (x_i, y_i) ,则热阻矩阵 R 中的元素由式(4)~(6)计算^[29-30]。

$$R_{ii} = R_{fp,i} + \frac{1}{2\pi k_g} \left[\ln \frac{r_b}{r_{out}} - \sigma \ln \left(1 - \frac{x_i^2}{r_b^2} \right) \right] \quad (4)$$

$$R_{ij} = -\frac{1}{2\pi k_g} \left[\ln \frac{x_{ij}}{r_b} + \sigma \ln \sqrt{\left(1 - \frac{x_i^2}{r_b^2} \right) \left(1 - \frac{x_j^2}{r_b^2} \right) + \frac{x_{ij}^2}{r_b^2}} \right] \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{k_g - k_s}{k_g + k_s} \quad (6)$$

式中: R_{ii} 为管道的自热阻; R_{ij} 为管道间的互热阻; $R_{fp,i}$ 为第 i 根管流体与管壁之间的热阻; k_g 、 k_s 分别为灌浆导热率和土壤导热率; r_b 为钻孔半径; r_{out} 为U型管的外径; x_i 、 x_j 分别为第 i 根管和第 j 根管到钻孔中心的距离; x_{ij} 为第 i 根管和第 j 根管之间的距离; σ 为修正系数。

流体与管壁之间的热阻根据式(7)~(10)计算^[31-32]。

$$R_{fp} = \frac{\ln \frac{r_{out}}{r_{in}}}{2\pi k_{pipe}} + \frac{1}{Nu k_f \pi} \quad (7)$$

$$Nu = \begin{cases} 3.66 & Re \leq 2300 \\ (1-\gamma)N_{lam}^u + \gamma N_{turb}^u & 2300 < Re < 4000 \\ \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12.7\sqrt{f/8}((Pr)^{2/3}-1)} & Re \geq 4000 \end{cases} \quad (8)$$

$$Re = \frac{2\dot{m}}{\mu_f r_{in} \pi} \quad (9)$$

$$Pr = \frac{c\mu_f}{k_f} \quad (10)$$

式中: R_{fp} 为流体与管壁之间的热阻; r_{in} 为U型管的内径; k_{pipe} 、 k_f 分别为管材导热率和流体导热率; Nu 为努赛尔数; N_{lam}^u 为层流努塞尔数; N_{turb}^u 为湍流努塞尔数; γ 为权重因子,用于平滑过渡层流与湍流; Re 为随流体流量变化的雷诺数; Pr 为普朗特数; f 为流体的达

西摩擦系数; c 、 \dot{m} 、 μ_f 分别为流体的比热容、质量流量和动力粘稠度。

U型管中的传热导致流体温度沿深度 z 方向变化。考虑流体在流入管与流出管中的流动特性,热交换会导致流体温度的变化,根据能量守恒定律,可建立如下控制方程及其矩阵形式:

$$q_{in} = -\dot{m}c \frac{\partial T_{f,in}}{\partial z} \quad (11)$$

$$q_{out} = \dot{m}c \frac{\partial T_{f,out}}{\partial z} \quad (12)$$

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} -\dot{m}c & 0 \\ 0 & \dot{m}c \end{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{T}_f}{\partial z} \quad (13)$$

结合式(3)和式(13),可得到描述U型管内流体温度随深度变化的微分方程,即:

$$\frac{\partial \mathbf{T}_f}{\partial z} = \mathbf{A}(\mathbf{T}_f - \mathbf{IT}_b) \quad (14)$$

$$\mathbf{A} = \frac{1}{\dot{m}} \begin{bmatrix} -\frac{1}{c} & 0 \\ 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \mathbf{R}^{-1} = \frac{1}{\dot{m}} \mathbf{B} \quad (15)$$

式(14)是一个线性一阶微分方程组,其通解由齐次解与特解之和构成。通过对微分方程进行解析求解,可以得到流体温度沿钻孔深度变化的通解表达式,即:

$$\mathbf{T}_f(z) = \exp\left(\frac{z}{\dot{m}} \mathbf{B}\right) (\mathbf{T}_f(0) - \mathbf{IT}_b) + \mathbf{IT}_b \quad (16)$$

$$\exp\left(\frac{z}{\dot{m}} \mathbf{B}\right) = \mathbf{P} \begin{bmatrix} \exp\left(\frac{z\lambda_1}{\dot{m}}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(\frac{z\lambda_2}{\dot{m}}\right) \end{bmatrix} \mathbf{P}^{-1} \quad (17)$$

式中: $\exp\left(\frac{z}{\dot{m}} \mathbf{B}\right)$ 为矩阵指数; λ_1 、 λ_2 为矩阵 \mathbf{B} 的特征值; \mathbf{P} 为矩阵 \mathbf{B} 的特征向量。

由于U型管内流体的连续性,在钻孔底部($z=H$ 处),进水管与出水管中的流体温度相等,可通过该处的温度连续性条件建立流体入口与出口温度之间的关系,即:

$$T_{f,in}(H) = T_{f,out}(H) \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} T_{f,in}(H) \\ T_{f,out}(H) \end{bmatrix} = \exp\left(\frac{H}{\dot{m}} \mathbf{B}\right) \begin{bmatrix} T_{f,in}(0) - T_b \\ T_{f,out}(0) - T_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_b \\ T_b \end{bmatrix} \quad (19)$$

联立式(18)和式(19),可以得到单U型管内流体在给定流量 \dot{m} 下的出口温度 $T_{f,out}(0)$ 与入口温度 $T_{f,in}(0)$ 以及管壁温度之间的线性关系式,即:

$$T_{f,out}(0) = K_{in}(\dot{m}) T_{f,in}(0) + K_b(\dot{m}) T_b \quad (20)$$

$$K_{in}(\dot{m}) = \frac{\exp\left(\frac{H}{\dot{m}} \mathbf{B}\right)_{11} - \exp\left(\frac{H}{\dot{m}} \mathbf{B}\right)_{21}}{\exp\left(\frac{H}{\dot{m}} \mathbf{B}\right)_{22} - \exp\left(\frac{H}{\dot{m}} \mathbf{B}\right)_{12}} \quad (21)$$

$$K_b(\dot{m}) = 1 - \frac{\exp\left(\frac{H}{\dot{m}} \mathbf{B}\right)_{11} - \exp\left(\frac{H}{\dot{m}} \mathbf{B}\right)_{21}}{\exp\left(\frac{H}{\dot{m}} \mathbf{B}\right)_{22} - \exp\left(\frac{H}{\dot{m}} \mathbf{B}\right)_{12}} \quad (22)$$

式中: $K_{in}(\dot{m})$ 为与入口流体温度相关的系数; $K_b(\dot{m})$ 为与钻孔壁温度相关的系数。

1.2 多根钻孔地埋管解析热模型

为提升换热效率,GSHP系统通常包含多根地埋管组成的换热网络。在单根垂直U型管出口温度与流体流量、入口温度及管壁温度之间关系模型的基础上,可进一步通过叠加多个单管模型得到多U型管系统的整体热力学响应模型,从而更全面、准确地描述地埋管网络的热交换过程。

假设地埋管网络中共有 N_{pipe} 个钻孔,且已知起始端输入流体温度和钻孔壁温度,将每个钻孔的进、出口流体温度依次排列,可构建一个 $2N_{pipe}+1$ 维的温度列向量 \mathbf{T}_{bf} ,即:

$$\mathbf{T}_{bf} = [T_{f,1,in} \quad T_{f,1,out} \quad \cdots \quad T_{f,N_{pipe},in} \quad T_{f,N_{pipe},out} \quad T_{out}]^T \quad (23)$$

式中: $T_{f,i,in}$ 、 $T_{f,i,out}$ ($i=1, 2, \dots, N_{pipe}$)分别为第 i 根U型管的进、出口流体温度; T_{out} 为钻孔场输出流体温度。

起始端U型管(如图2中钻孔1和钻孔2所示)的入口流体温度与钻孔场输入温度 T_{in} 相同,即:

$$T_{f,i,in} = T_{in} \quad (24)$$

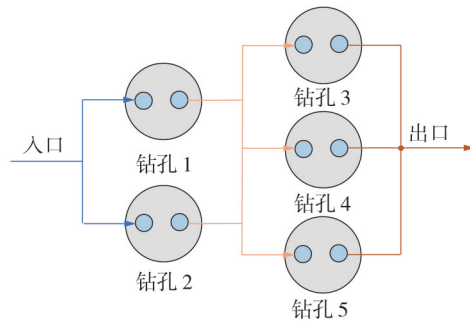


图2 5个垂直地热钻孔组成的钻孔场

Fig.2 Bore field consisting of 5 vertical geothermal boreholes

其余U型管的入口流体温度等于其上游所有U型管出口流体温度 $T_{f,k,out}$ 的流量加权平均值,即:

$$T_{f,i,in} = \frac{\sum_{k \in \Omega_{UPi}} \dot{m}_k T_{f,k,out}}{\sum_{k \in \Omega_{UPi}} \dot{m}_k} \quad (25)$$

式中: Ω_{UPi} 为与第 i 根U型管直接相连的所有上游管道集合; \dot{m}_k 为集合 Ω_{UPi} 中第 k 根U型管内流体的质量流量。

同理,终端出口流体温度等于终端处所有U型管(如图2中钻孔3—5所示)出口流体温度 $T_{f,k,out}$ 的流量加权平均值,即:

$$T_{\text{out}} = \frac{\sum_{k \in \Omega_{\text{OUT}}} \dot{m}_k T_{f,k,\text{out}}}{\sum_{k \in \Omega_{\text{OUT}}} \dot{m}_k} \quad (26)$$

式中： Ω_{OUT} 为终端处所有U型管道构成的集合。

地理管网络中的每根U型管均满足式(20)所示的关系,根据式(24)~(26)确定每根U型管进、出口的流体温度,即确定向量 T_{bf} 。

在确定每根U型管进、出口的温度之后,可建立一个 $2N_{\text{pipe}}+1$ 维的矩阵方程,即:

$$A_{\text{bf}}(\dot{m})T_{\text{bf}} = b_{\text{bf},\text{in}}T_{\text{in}} + b_{\text{bf},\text{b}}(\dot{m})T_{\text{b}} \quad (27)$$

式中:系数矩阵 $A_{\text{bf}}(\dot{m})$ 为 $(2N_{\text{pipe}}+1) \times (2N_{\text{pipe}}+1)$ 阶的矩阵,其元素随流体流量变化; $b_{\text{bf},\text{in}}$ 为与起始端流体温度相关的项, $b_{\text{bf},\text{b}}(\dot{m})$ 为与钻孔壁温度相关的系数向量,其元素同样由流体流量决定,2个向量均为 $2N_{\text{pipe}}+1$ 维。

为了更加清晰地描述该方程,以图2为例进行说明,在图2所示情况下, $A_{\text{bf}}(\dot{m})$ 、 $b_{\text{bf},\text{in}}$ 、 $b_{\text{bf},\text{b}}(\dot{m})$ 分别如附录B式(B1)~(B3)所示。可以看出,按照U型管顺序排列的矩阵 $A_{\text{bf}}(\dot{m})$ 具有严格的下三角结构,且对角线元素非零,具备可逆性。该结构表明,各个钻孔单元的温度仅受其上游单元的影响,而不依赖于下游单元的状态。利用这一特性,可以通过式(28)高效地求解GSHP系统中各位置的温度分布 T_{bf} 。

$$T_{\text{bf}} = A_{\text{bf}}^{-1}(\dot{m})b_{\text{bf},\text{in}}T_{\text{in}} + A_{\text{bf}}^{-1}(\dot{m})b_{\text{bf},\text{b}}(\dot{m})T_{\text{b}} \quad (28)$$

由此可知,地理管场的出口流体温度是起始端入口流体温度和钻孔壁温度的线性组合,其系数取决于流体流量,即:

$$T_{\text{out}} = K_{\text{bf},\text{in}}(\dot{m})T_{\text{in}} + K_{\text{bf},\text{b}}(\dot{m})T_{\text{b}} \quad (29)$$

式中: $K_{\text{bf},\text{in}}(\dot{m})$ 为钻孔场入口流体温度对钻孔场出口温度的影响系数; $K_{\text{bf},\text{b}}(\dot{m})$ 为钻孔壁温度对钻孔场出口温度的影响系数。

流体从土壤中提取的总热量 H_{bf} 可通过各支路的流量与进、出口温差计算得到,即:

$$H_{\text{bf}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{pipe}}} \dot{m}_i c (T_{f,i,\text{out}} - T_{f,i,\text{in}}) = C_{\text{bf},\text{H}}^T(\dot{m})T_{\text{bf}} = C_{\text{bf},\text{H}}^T(\dot{m})[A_{\text{bf}}^{-1}(\dot{m})b_{\text{bf},\text{in}}T_{\text{in}} + A_{\text{bf}}^{-1}(\dot{m})b_{\text{bf},\text{b}}(\dot{m})T_{\text{b}}] = K_{\text{bf},\text{H},\text{in}}(\dot{m})T_{\text{in}} + K_{\text{bf},\text{H},\text{b}}(\dot{m})T_{\text{b}} \quad (30)$$

$C_{\text{bf},\text{H}}(\dot{m}) = [-\dot{m}_1 c \quad \dot{m}_1 c \quad \cdots \quad -\dot{m}_{N_{\text{pipe}}} c \quad \dot{m}_{N_{\text{pipe}}} c \quad 0]^T$ (31) 式中: $C_{\text{bf},\text{H}}(\dot{m})$ 为热容流量向量; $K_{\text{bf},\text{H},\text{in}}(\dot{m})$ 为钻孔场入口流体温度对流体从土壤中提取热量的影响系数; $K_{\text{bf},\text{H},\text{b}}(\dot{m})$ 为钻孔壁温度对流体从土壤中提取热量的影响系数。

1.3 GSHP的变流量电-热耦合模型

GSHP系统通过消耗一定的电能,从地下稳定的热源中提取或释放热量,实现建筑供暖或制冷。

COP是衡量其性能的重要指标,由供热量 H_{heat} 与消耗功率 P_{hp} 的比值得到,即:

$$\gamma_{\text{COP}} = H_{\text{heat}}/P_{\text{hp}} \quad (32)$$

式中: γ_{COP} 为COP。

GSHP的实际COP受运行模式和工况条件影响,并非恒定不变的常数。本文采用热泵进水温度(即地理管网络流体的出口温度)作为变量的线性近似模型^[33-34],用于刻画GSHP的COP变化规律,如式(33)所示。

$$\gamma_{\text{COP}} = a + bT_{\text{out}} \quad (33)$$

式中: a 、 b 为系数。

结合式(29)和式(30),可以得到终端出口温度与换热器提取热量的关系式为:

$$T_{\text{out}} = K_{\text{bf},\text{in}}(\dot{m}) \frac{H_{\text{bf}} - K_{\text{bf},\text{H},\text{b}}(\dot{m})T_{\text{b}}}{K_{\text{bf},\text{H},\text{in}}(\dot{m})} + K_{\text{bf},\text{b}}(\dot{m})T_{\text{b}} = \frac{K_{\text{bf},\text{in}}(\dot{m})}{K_{\text{bf},\text{H},\text{in}}(\dot{m})} H_{\text{bf}} + \left(K_{\text{bf},\text{b}}(\dot{m}) - \frac{K_{\text{bf},\text{in}}(\dot{m})K_{\text{bf},\text{H},\text{b}}(\dot{m})}{K_{\text{bf},\text{H},\text{in}}(\dot{m})} \right) T_{\text{b}} \quad (34)$$

GSHP系统向室内提供的总制热量由地热获取量与电功率共同构成,即:

$$H_{\text{heat}} = H_{\text{bf}} + P_{\text{hp}} \quad (35)$$

结合式(30)~(35),可将GSHP的制热功率、起始端入口温度及钻孔场输出温度表示为电功率与流体流量的二元函数,即:

$$H_{\text{heat}}(\dot{m}, P_{\text{hp}}) = \frac{k_{\text{heat},1}(\dot{m})P_{\text{hp}} - k_{\text{heat},2}(\dot{m})P_{\text{hp}}^2}{1 - k_{\text{heat},2}(\dot{m})P_{\text{hp}}} \quad (36)$$

$$k_{\text{heat},1}(\dot{m}) = a + b \left(K_{\text{bf},\text{b}}(\dot{m}) - \frac{K_{\text{bf},\text{in}}(\dot{m})K_{\text{bf},\text{H},\text{b}}(\dot{m})}{K_{\text{bf},\text{H},\text{in}}(\dot{m})} \right) T_{\text{b}} \quad (37)$$

$$k_{\text{heat},2}(\dot{m}) = b \frac{K_{\text{bf},\text{in}}(\dot{m})}{K_{\text{bf},\text{H},\text{in}}(\dot{m})} \quad (38)$$

$$T_{\text{out}} = \frac{k_{\text{heat},3}(\dot{m}) - k_{\text{heat},4}(\dot{m})P_{\text{hp}}}{1 - k_{\text{heat},2}(\dot{m})P_{\text{hp}}} \quad (39)$$

$$k_{\text{heat},3}(\dot{m}) = \left(K_{\text{bf},\text{b}}(\dot{m}) - \frac{K_{\text{bf},\text{in}}(\dot{m})K_{\text{bf},\text{H},\text{b}}(\dot{m})}{K_{\text{bf},\text{H},\text{in}}(\dot{m})} \right) T_{\text{b}} \quad (40)$$

$$k_{\text{heat},4}(\dot{m}) = (1-a) \frac{K_{\text{bf},\text{in}}(\dot{m})}{K_{\text{bf},\text{H},\text{in}}(\dot{m})} \quad (41)$$

$$T_{\text{in}} = \frac{k_{\text{heat},5}(\dot{m})P_{\text{hp}} - k_{\text{heat},6}(\dot{m})}{1 - k_{\text{heat},2}(\dot{m})P_{\text{hp}}} \quad (42)$$

$$k_{\text{heat},5}(\dot{m}) = \frac{a + bK_{\text{bf},\text{b}}(\dot{m})T_{\text{b}} - 1}{K_{\text{bf},\text{H},\text{in}}(\dot{m})} \quad (43)$$

$$k_{\text{heat},6}(\dot{m}) = \frac{K_{\text{bf},\text{H},\text{b}}(\dot{m})}{K_{\text{bf},\text{H},\text{in}}(\dot{m})} T_{\text{b}} \quad (44)$$

式中: $k_{\text{heat},1} - k_{\text{heat},6}$ 为与流体质量流量相关的综合传热系数。

1.4 水泵能耗模型

在以循环流量为调控手段的GSHP模型中,水

泵能耗 P_{pump} 由式(45)计算^[35]。

$$P_{\text{pump}} = \frac{gH_{\text{pump}}\dot{m}_{\text{total}}}{\eta_{\text{pump}}} \quad (45)$$

式中: g 为重力加速度; H_{pump} 为水泵扬程; \dot{m}_{total} 为质量流量总和; η_{pump} 为水泵效率。

2 电-热协同优化调度模型

基于GSHP的变流量电-热耦合模型,本文考虑区域配电网中的电-热协同优化调度,旨在通过调整GSHP的电、热功率和流量,促进本地分布式光伏的消纳。

2.1 目标函数

目标函数为最小化配电网从上级电网获取电力的总成本,即:

$$\min \sum_{t=1}^N \lambda_t P_{\text{tr},t} \quad (46)$$

式中: N 为运行总时刻数; λ_t 为 t 时刻的分时电价; $P_{\text{tr},t}$ 为 t 时刻配电网与输电网交换的功率。当配电网向输电网反向供电时,成本为负,表示配电网获得收益。

2.2 约束条件

2.2.1 配电网潮流约束

本文使用线性支路潮流模型来描述辐射状配电网中的潮流约束,具体包括节点功率平衡、支路潮流线性关系等约束条件,完整数学模型如附录B式(B4)~(B11)所示。

2.2.2 光伏运行约束

光伏发电功率 $P_{\text{pv},i,t}$ 应不大于预测值并且非负,即:

$$0 \leq P_{\text{pv},i,t} \leq P_{\text{pv},i,t}^{\text{forecast}} \quad (47)$$

式中: $P_{\text{pv},i,t}^{\text{forecast}}$ 为 t 时刻节点 i 上光伏发电的预测值。

2.2.3 建筑物室内温度约束

本文利用一阶热阻-热容模型来描述GSHP供暖/制冷的建筑物室内温度动态过程,室内温度 $T_{\text{build},i,t}$ 的变化由GSHP输入的热量 $H_{\text{heat},i,t}$ 和建筑物因室内外温差而产生的热量损失之间的平衡关系所决定,由一阶微分方程来表征,即:

$$C_{\text{th},i} \frac{dT_{\text{build},i,t}}{dt} = H_{\text{heat},i,t} - \frac{T_{\text{build},i,t} - T_{\text{env},t}}{R_{\text{th},i}} \quad (48)$$

式中: $C_{\text{th},i}$ 为建筑物的热容; $R_{\text{th},i}$ 为建筑物热阻; $T_{\text{env},t}$ 为 t 时刻的室外环境温度。

将式(48)所示微分方程在时域离散后,可用差分方程近似刻画建筑室内温度的变化,即:

$$T_{\text{build},i,t+1} = T_{\text{build},i,t} + \frac{\Delta t}{C_{\text{th},i}} \left(H_{\text{heat},i,t} - \frac{T_{\text{build},i,t} - T_{\text{env},t}}{R_{\text{th},i}} \right) \quad (49)$$

式中: Δt 为时间间隔。

考虑到GSHP系统运行过程中不影响用户的热舒适性,在优化模型中需引入室内舒适度温度约

束,即:

$$T_{\text{build},i}^{\min} \leq T_{\text{build},i,t} \leq T_{\text{build},i}^{\max} \quad (50)$$

式中: $T_{\text{build},i}^{\min}$ 、 $T_{\text{build},i}^{\max}$ 分别为室内温度的下限和上限。

2.2.4 GSHP电-热-流量耦合约束

为确保GSHP系统运行安全,需设置热泵功率、流量范围与换热流体温度的上、下界约束,具体如附录B式(B12)~(B15)所示。

3 求解算法

日前综合电-热调度模型的目标函数式(46)为线性函数,约束条件式(49)、(50)及式(B4)~(B11)、(B12)~(B15)为线性约束,但在GSHP部分引入了非线性关系,因此需采用可处理的重构与近似方法,以表征物理模型并将其纳入调度优化中。

采用二元函数分段线性对非线性的电-热-流体流量耦合方程式(36)进行近似处理。线性化过程如附录C图C1所示,数学模型如式(51)~(56)所示。先在流量 \dot{m} 方向设置 N_x 个断点,再在每个流量断点处沿功率 P_{hp} 方向设置 N_y 个断点,断点处的制热量根据非线性方程式(36)计算得到。引入非负辅助变量 $\theta_{\zeta,\varepsilon}$ 来表示每个断点在近似中的权重,凸约束式(54)保证了该近似是断点处值的凸组合。平面SOS2矩阵 Λ 的行/列求和向量构成SOS2约束,该约束确保只有相邻的4个顶点权重可以同时为非零值,从而确保近似结果落在相邻4点构成的局部区间内。

$$\dot{m} = \sum_{\zeta=1}^{N_x} \sum_{\varepsilon=1}^{N_y} \theta_{\zeta,\varepsilon} \dot{m}_{\zeta} \quad (51)$$

$$P_{\text{hp}} = \sum_{\zeta=1}^{N_x} \sum_{\varepsilon=1}^{N_y} \theta_{\zeta,\varepsilon} P_{\text{hp},\varepsilon} \quad (52)$$

$$H_{\text{heat}} = \sum_{\zeta=1}^{N_x} \sum_{\varepsilon=1}^{N_y} \theta_{\zeta,\varepsilon} H_{\text{heat},\zeta,\varepsilon} \quad (53)$$

$$\theta_{\zeta,\varepsilon} \geq 0 \quad (54)$$

$$\sum_{\zeta=1}^{N_x} \sum_{\varepsilon=1}^{N_y} \theta_{\zeta,\varepsilon} = 1 \quad (55)$$

$$\Lambda = [\theta_{\zeta,\varepsilon}] \quad (56)$$

式中: \dot{m}_{ζ} 、 $P_{\text{hp},\varepsilon}$ 分别为流量方向与功率方向上设定的断点值; $H_{\text{heat},\zeta,\varepsilon}$ 为第 ζ 个流量断点与第 ε 个功率断点处GSHP的制热量。

根据GSHP系统的方程式(39)和式(42),地理管场的起始端入口流体温度 $T_{\text{in},i,t}$ 与终端出口流体温度 $T_{\text{out},i,t}$ 可统一表征为GSHP电功率消耗 $P_{\text{hp},i,t}$ 和流体流量的分式函数;当GSHP电功率受运行约束式(B12)限制时,分母项恒为正数,据此,原流体温度约束式(B14)和式(B15)可等价重构为线性不等式组式(57)~(60)。

$$k_{\text{heat},3}(\dot{m}) - k_{\text{heat},4}(\dot{m})P_{\text{hp},i,t} \leq (1 - k_{\text{heat},2}(\dot{m})P_{\text{hp},i,t})T_{\text{out},i,t}^{\text{max}} \quad (57)$$

$$k_{\text{heat},3}(\dot{m}) - k_{\text{heat},4}(\dot{m})P_{\text{hp},i,t} \geq (1 - k_{\text{heat},2}(\dot{m})P_{\text{hp},i,t})T_{\text{out},i,t}^{\text{min}} \quad (58)$$

$$k_{\text{heat},5}(\dot{m})P_{\text{hp},i,t} - k_{\text{heat},6}(\dot{m}) \leq (1 - k_{\text{heat},2}(\dot{m})P_{\text{hp},i,t})T_{\text{in},i,t}^{\text{max}} \quad (59)$$

$$k_{\text{heat},5}(\dot{m})P_{\text{hp},i,t} - k_{\text{heat},6}(\dot{m}) \geq (1 - k_{\text{heat},2}(\dot{m})P_{\text{hp},i,t})T_{\text{in},i,t}^{\text{min}} \quad (60)$$

至此,GSHP系统的非线性约束被转化为可处理的线性约束组与SOS2约束,从而可将日前综合电热调度模型构建为混合整数线性规划问题,直接采用商业求解器(如CPLEX、Gurobi)进行高效求解。

4 算例分析

4.1 流体流量对GSHP热力性能的影响机制分析

流体流量的变化会对流体与管壁之间的热阻 R_{fp} 造成影响,通过计算在不同流量下对应的热阻变化,能够定量揭示流量调节对地源侧换热过程的影响机制,为变流量控制策略优化提供理论依据。本文在0.1~0.7 kg/s的流量内进行分析。不同流量下流体到管壁的热阻如图3所示。随着流体流量的增加,流体流动状态向湍流方向发展,流体到管壁的热阻随之减小,流体与管壁之间的对流换热系数变大。

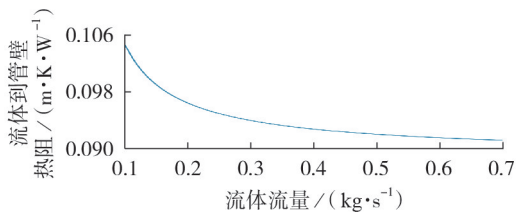


图3 不同流量下流体到管壁的热阻

Fig.3 Thermal resistance from fluid to pipe wall under different flow rates

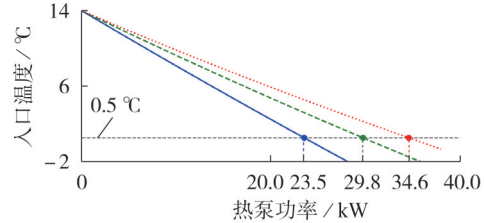
流体温度是限制GSHP系统最大功率的重要因素之一,若流体温度过低导致流体结冰,则将直接影响GSHP的换热效率和制热能力。在制热模式下,流体在地理管中从地下吸收热量后进入GSHP主机,其入口温度通常低于出口温度。因而GSHP的最大功率取决于起始端入口处的流体温度。

以8组并联且每组由2个串联钻孔组成的地理管网络的GSHP系统为例,设置流体的最低温度为0.5℃,设置流量为0.25、0.35、0.45 kg/s这3种工况,起始端入口流体温度与最大功率之间的关系如图4所示。

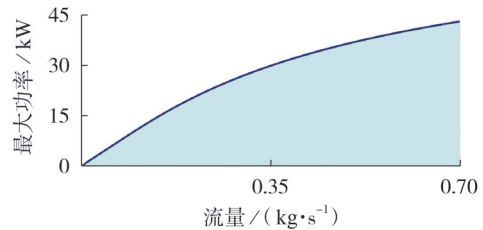
由图4(a)可知,随着流体流量的增加,曲线的斜率逐渐增大,GSHP系统的最大功率也会逐渐增加,这表明增大流量能够显著提高GSHP系统的功率输出能力。此外,图中入口流体温度和GSHP功率的

近似线性关系印证了式(39)和式(42)的分母项恒为正数,为模型约束的线性化提供了依据。

图4(b)的定义域区域图进一步明确了在给定流量条件下GSHP系统所能达到的最大输出功率,通过刻画不同流量对应的最大功率边界,反映了系统在流体温度受限时的运行极限,从而为后续制热量的计算提供合理且物理可行的定义域。



(a) 不同流量下最大功率与入口流体温度的关系



(b) 定义域区域图

图4 流体流量与最大功率之间的关系

Fig.4 Relationship between fluid flow and maximum power

图5展示了流量为0.20、0.30、0.45、0.60 kg/s这4种工况下地理管场出入口流体温差以及COP与GSHP功率之间的关系。

由图5(a)可知,在相同的GSHP功率下,随着流量的增加,地理管场出入口流体温差逐渐减小,其原因在于,虽然流量 \dot{m} 的增加会使流体与管壁间的对流热阻 R_{fp} 有所下降,但由于其下降幅度较小, $\dot{m}R$ 总体上仍随流量的增加而增大,导致温度梯度 $\partial T_r / \partial z$ 减小,因而在相同的钻孔长度下,出入口流体温差减小。

进、出口温差的变化进一步影响系统的能量传递行为。在制热工况下,当入口温度保持不变时,流量的增加虽然增大了流体与管壁之间的对流换热系数,但也导致流体在钻孔中的停留时间缩短,换热不充分,进入GSHP主机的流体温度降低,从而导致COP下降,如图5(b)所示。

制热量随GSHP功率与流体流量变化的三维响应曲面如附录C图C2所示。图中直观展示了系统制热量随GSHP功率和流量的同步增加而持续上升的趋势,表明二者协同作用能够显著提升系统的制热性能。

为使该非线性函数关系适用于优化调度,对制

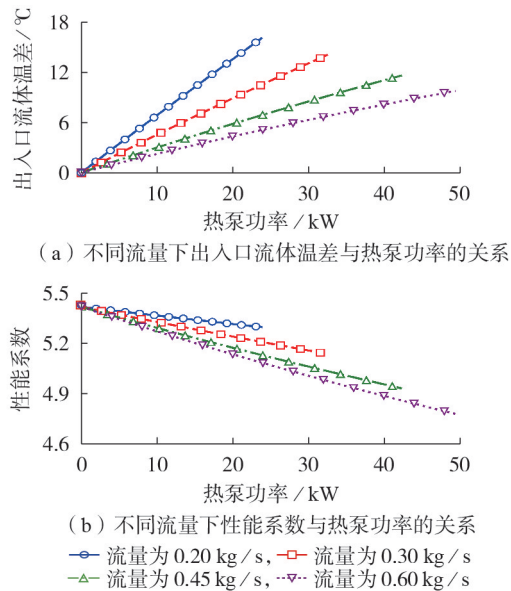


图5 不同流量下地埋管场出入口流体温差以及COP与GSHP功率之间的关系

Fig.5 Temperature difference between inlet and outlet of underground pipe fields under different flows and relationship between COP and GSHP power

热量函数进行分段线性化处理。先在流体流量维度设置16个分段点,再在每个流量分段点上对GSHP功率设置16个分段点,从而实现制热量函数的线性化。误差分析结果表明,该分段线性化方法的最大相对误差为0.55%,验证了该方法能够较为准确地描述GSHP系统在不同流量和功率条件下制热量的变化趋势。

4.2 基于GSHP流量调控的多能源系统协同效应评估

本文构建一个融合流体流量动态调控功能的IEEE 141节点电-热综合调度测试系统。该系统包含16栋配备GSHP的建筑,各建筑所对应的地埋管网络采用差异化流量配置,钻孔数量为54~90个,单孔规格为150 m深、7.5 cm半径,各钻孔通过串-并联拓扑结构连接。此外,还在系统中设置分布于不同节点的5个分布式光伏系统。

为实现经济高效的运行调度,引入如附录D表D1所示的分时电价结构^[36],引导GSHP根据电价时段合理分配运行功率。本文采用日前优化调度策略,将全天划分为24个时刻,对GSHP的运行计划进行优化。优化模型通过Python环境下的PyOptInterface建模接口进行构建^[37],使用Gurobi求解器进行求解并获得最优调度结果。

在冬季,GSHP系统以供暖模式运行来维持建筑内部的温暖环境。负荷、分布式光伏出力以及环境温度的日前预测结果如附录D图D1所示。考虑到用户的舒适度要求,建筑室内温度的允许范围设

定如下:09:00—17:00为17~26℃,其余时段为21~24℃。

本文设置固定流量与变流量2种GSHP运行的调度策略。在固定流量策略中,GSHP系统以恒定的循环工质流量运行,优化模型仅调度GSHP功率以适应室内温度变化、光伏出力及分时电价等因素。在变流量策略中,进一步将流体流量纳入调度变量,固定流量策略中的GSHP流量设置为0.4 kg/s,而变流量策略允许流量在(0,0.7] kg/s内动态调节。图6和附录D图D2展示了8个典型的GSHP系统在2种策略下系统功率及室内温度的调度结果,二者在整体运行趋势上具有一定的相似性,但也存在一些差异。

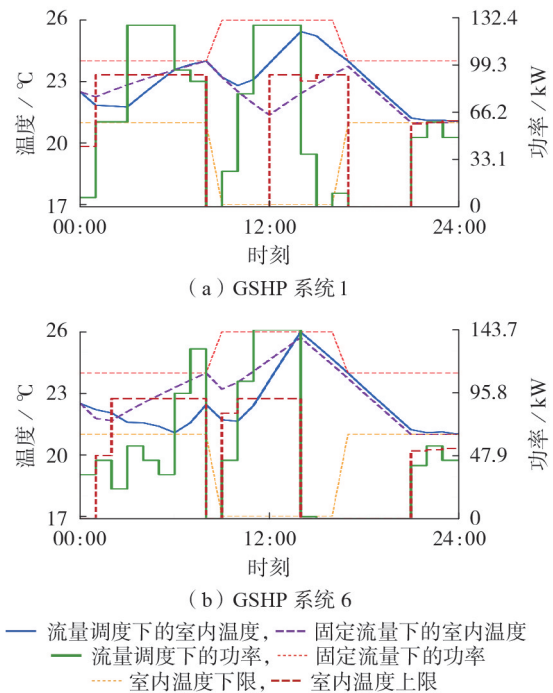


图6 2个典型GSHP在2种策略下的调度结果

Fig.6 Scheduling results of two typical GSHP under two strategies

由图6可知,2种策略均在凌晨电价较低及中午光伏发电充足的时段内以较高的功率驱动GSHP运行,借助建筑结构的蓄热能力,通过在低电价或光伏充沛时段提前加热室内环境,实现热量的时移调控,从而减少GSHP在高电价时段的电量消耗,有效降低对电网的依赖。

相较而言,变流量策略能够根据电价和光伏出力的动态变化,在电价较低或光伏出力较高的时段适时提高流量,拓展GSHP系统的可达运行功率区间,加快室内温度的提升速率。该策略表现出更高的调节灵活性和响应能力,从而更有效地响应光伏发电波动及电价信号,其优势在于,不仅能在短时间内实现快速的热量补偿,还能更好地消纳分布式光

伏产生的电能,从而提升可再生能源的利用率。

图7展示了GSHP系统在变流量策略下的流量调度结果。结合图6和附录D图D2所示的功率及温度调度结果可知,流体流量的变化趋势与GSHP运行功率高度相关。在电价较低的凌晨时段以及光伏出力较高的中午时段,GSHP以较高的功率运行,流体流量也相应提高,以提升GSHP输出能力。当室内温度达到所设上限后,为避免过度加热,GSHP功率和流体流量被调节至最小值,系统进入待机状态。上述结果表明,变流量策略能够实现GSHP系统流量与功率的动态联动调控,有效适应电价和光伏出力的变化。系统在低电价和高光伏出力时段通过提升流量快速提高供热能力,在满足热负荷后及时降低流量和功率,进入节能运行状态。这一机制不仅提升了系统运行的灵活性,还验证了变流量控制在降低电网负担和提升可再生能源利用方面的可行性。

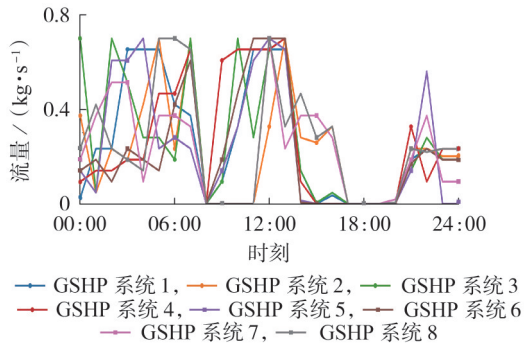


图7 变流量策略下的流量调度结果

Fig.7 Flow scheduling results under variable flow strategy

表1对比了3种策略下的调度优化结果,其中温度恒定值为22.5℃,流量恒定值为0.4 kg/s。结果显示:室内温度和流量均恒定策略下的系统运行成本最高,为247.85万元,光伏消纳总电量最少,为149.68 MW·h,GSHP主机与水泵耗电总量也达到最大值,为23 946.91 kW·h,这表明该运行策略经济性较差且不利于可再生能源的高效利用;允许室内温度在设定范围内变化能显著改善系统性能,通过在电价较低或光伏出力充足的时段提前升温,减少高

表1 3种策略下调度优化结果

Table 1 Optimization results under three scheduling strategies

调控策略	目标函数值/万元	光伏消纳总电量/(MW·h)	GSHP主机与水泵耗电总量/(kW·h)
室内温度和流量均恒定	247.85	149.68	23 946.91
室内温度可调,流量恒定	184.05	150.83	22 363.07
室内温度和流量均可调	168.27	152.14	21 669.78

电价时段的运行负荷,实现能源的错峰利用,该策略下的运行成本下降至184.05万元,光伏利用和能耗指标也随之优化;进一步引入流量调节后,系统运行效果最佳,在GSHP主机与水泵耗电总量进一步降低至21 669.78 kW·h的同时,实现了168.27万元的最低运行成本和152.14 MW·h的最高光伏消纳量。

上述结果表明,引入流量调节机制,能够在满足GSHP供热需求的同时,更好地适应电价与光伏波动,提升系统的运行经济性与可再生能源利用效率。

5 结论

本文针对电-热协同调度需求,提出一种GSHP系统的流体流量-电力-热力耦合建模与优化调度方法。通过建立GSHP系统变流量下的电-热耦合模型,揭示其电功率消耗、流体流量对供热能力的动态影响,并将流体流量和GSHP电功率设置为优化调度变量,设计兼顾运行效益与灵活性的协同优化框架。算例分析表明,所建模型在提升系统运行经济性的同时能够促进光伏消纳,验证了GSHP流量调节在提升综合能源系统灵活性方面的潜力。

本文的日前优化调度模型可以通过与现有能源管理系统和数字孪生平台的数据接口对接,结合预测得到的光伏发电、负荷需求以及环境温度数据进行日前调度优化。平台通过整合历史数据与预测信息,驱动模型进行调度计算,提前安排GSHP的运行计划,并合理调整调度策略,从而实现能源系统的灵活调度与高效运行。

本文未考虑地下热积累对长期运行的影响,后续可进一步开展在季节耦合和长期运行场景下的模型优化研究,使模型更好地满足复杂运行条件和多时间尺度的调度需求。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2819.
ZHANG Zhigang,KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(8):2806-2819.
- [2] 梁俊鹏,张高航,李凤婷,等. 计及氢储能-制氨-碳捕集的综合能源系统低碳优化调度[J]. 电力自动化设备,2024,44(10):16-23.
LIANG Junpeng,ZHANG Gaohang,LI Fengting,et al. Low-carbon optimal scheduling of integrated energy system considering hydrogen energy storage, ammonia production and carbon capture[J]. Electric Power Automation Equipment,2024,44(10):16-23.
- [3] 段佳南,谢俊,邢单玺,等. 含径流式水电的风-光-氢多能系统合作博弈增益分配策略[J]. 电力自动化设备,2023,43(12):222-230,247.
DUAN Jianan,XIE Jun,XING Shanxi,et al. Incremental benefit allocation strategy based on cooperative game for multi-

- stakeholder wind-PV-hydrogen system with runoff hydropower [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(12): 222-230, 247.
- [4] 唐成虹,王靖韬,曾博,等. 计及含蒸汽热泵工业园区能量品位转换的综合能源优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(2): 191-199.
TANG Chenghong, WANG Jingtao, ZENG Bo, et al. Optimal dispatch for integrated energy considering energy grade conversion in industrial park with steam heat pumps[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(2): 191-199.
- [5] 郝丹宁,胡志坚,谈竹奎,等. 考虑绿证-阶梯碳双向交互与碳捕集的综合能源系统低碳经济调度[J]. *电力自动化设备*, 2025, 45(2): 69-77.
HAO Danning, HU Zhijian, TAN Zhukui, et al. Low-carbon economic scheduling of integrated energy system considering bi-directional interaction of green certificate-ladder carbon and carbon capture[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025, 45(2): 69-77.
- [6] 姚明明,张新,杨培宏,等. 基于改进风光场景聚类联合虚拟储能的源网荷储低碳优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(15): 115-130.
YAO Mingming, ZHANG Xin, YANG Peihong, et al. Low-carbon optimal scheduling of source-grid-load-storage based on improved wind-solar scene clustering combined with virtual energy storage[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(15): 115-130.
- [7] 陆艺丹,况理,叶希,等. 源网荷储协调参与的运行备用容量分配策略及优化模型[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(7): 156-164.
LU Yidan, KUANG Li, YE Xi, et al. Operating reserve capacity allocation strategy and optimization model with coordinated participation of source-network-load-storage[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(7): 156-164.
- [8] 刘学智,张沛超,严正. 第5代区域供热供冷驱动的产消型综合能源系统多能流分析[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(4): 78-90.
LIU Xuezhi, ZHANG Peichao, YAN Zheng. Analysis on multi-energy flow of prosumer-based integrated energy system driven by the fifth generation district heating and cooling network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(4): 78-90.
- [9] 肖勇,陆煜铨,尹雁和,等. 考虑动态碳势和需求响应的配电网低碳调度策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(21): 40-49.
XIAO Yong, LU Yuxin, YIN Yanhe, et al. Low-carbon scheduling strategy for distribution networks considering dynamic carbon potential and demand response[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(21): 40-49.
- [10] 崔杨,邹新鹏,赵钰婷,等. 考虑动态电碳排放因子的新型电力系统电碳综合需求响应调度方法[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(10): 1-7.
CUI Yang, ZOU Xinpeng, ZHAO Yuting, et al. Electricity-carbon integrated demand response scheduling method for new power system considering dynamic electricity-carbon emission factor[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(10): 1-7.
- [11] 孙健,柯德平,徐箭,等. 基于高精度热泵模型的电热协同独立微网设备优化配置[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(7): 198-204, 213.
SUN Jian, KE Deping, XU Jian, et al. Optimal configuration of electric-heat cooperative independent micro-grid equipment based on accurate heat pump model[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(7): 198-204, 213.
- [12] IKEDA S, CHOI W, OOKA R. Optimization method for multiple heat source operation including ground source heat pump considering dynamic variation in ground temperature[J]. *Applied Energy*, 2017, 193: 466-478.
- [13] 栗子豪,吴文传,宋洁,等. 基于机会约束的主动配电网热泵日前调度模型及可解性转换[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(11): 24-31.
LI Zihao, WU Wenchuan, ZHU Jie, et al. Chance-constrained model for day-ahead heat pump scheduling in active distribution network and its tractability transformation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(11): 24-31.
- [14] 崔杨,姜涛,仲悟之,等. 电动汽车与热泵促进风电消纳的区域综合能源系统经济调度方法[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(2): 1-7.
CUI Yang, JIANG Tao, ZHONG Wuzhi, et al. Economic dispatch approach of RIES for electric vehicle and heat pump to promote wind power accommodation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(2): 1-7.
- [15] 吴亮红,王维,张红强,等. 邻域自适应粒子群算法求解地源热泵区域能源系统鲁棒优化调度问题[J]. *控制理论与应用*, 2024, 41(6): 1089-1100.
WU Lianghong, WANG Wei, ZHANG Hongqiang, et al. Neighborhood adaptive particle swarm optimization algorithm for robust optimization dispatch of the ground source heat pump district energy system[J]. *Control Theory & Applications*, 2024, 41(6): 1089-1100.
- [16] 李世辉,王琪,贾晓卜,等. 考虑热泵负荷和分布式光伏的配电网协调调度[J]. *中国电力*, 2022, 55(9): 29-37.
LI Shihui, WANG Qi, JIA Xiaobo, et al. Coordinated scheduling of distribution networks and microgrids considering heat pump load and distributed photovoltaic[J]. *Electric Power*, 2022, 55(9): 29-37.
- [17] 孙毅,陈一童,李彬,等. 计及用户舒适性及公平性的热泵负荷集群控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(5): 122-128.
SUN Yi, CHEN Yitong, LI Bin, et al. Heat pump load aggregated control strategy considering comfort and fairness of customers[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(5): 122-128.
- [18] XING Z X, ZHU Z, GAI M, et al. Coordinated optimisation scheduling of park integrated energy system considering heat pump coupled with thermal/cool storage devices[J]. *Energy Internet*, 2025, 2(2): 155-173.
- [19] ZHANG Z L, ZHANG H J, XIE B, et al. Energy scheduling optimization of the integrated energy system with ground source heat pumps[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 365: 132758.
- [20] REN X Y, WANG Z H, LI L L. Coordinated optimization of a novel integrated energy system considering ground source heat pump, organic Rankine cycle and power-to-gas[J]. *Renewable Energy*, 2025, 244: 122624.
- [21] ZHANG X F, LI H Q, LIU L F, et al. Optimization analysis of a novel combined heating and power system based on biomass partial gasification and ground source heat pump[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 163: 355-370.
- [22] ZENG R, ZHANG X F, DENG Y, et al. Optimization and performance comparison of combined cooling, heating and power/ground source heat pump/photovoltaic/solar thermal system under different load ratio for two operation strategies[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 208: 112579.
- [23] CIMMINO M. Semi-analytical method for g-function calculation of bore fields with series- and parallel-connected boreholes[J]. *Science and Technology for the Built Environment*, 2019, 25(8): 1007-1022.
- [24] WANG X, BAO L L, JIN P F, et al. Analytical model of heat transfer of U-shaped borehole heat exchanger under convection theory and its optimal heat extraction analysis[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2023, 193: 108496.
- [25] WU X, LIU X P, WANG J B, et al. Numerical investigation

- on thermal storage and release characteristics of ground heat exchangers under cross-seasonal multi-cycle operation[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 281: 128574.
- [26] FANG L, DIAO N R, SHAO Z K, et al. A computationally efficient numerical model for heat transfer simulation of deep borehole heat exchangers[J]. Energy and Buildings, 2018, 167: 79-88.
- [27] PERALTA D, CAÑIZARES C A, BHATTACHARYA K. Ground source heat pump modeling, operation, and participation in electricity markets[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(2): 1126-1138.
- [28] 程楠. 深浅混合地理管群地源热泵性能分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
CHENG Nan. Performance analysis of deep- and shallow-mixed underground pipe group ground source heat pump[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2024.
- [29] LI M, PENG H X. Stepwise multi-objective framework for decoupling multi-parameter estimation of ground heat exchangers[J]. Geothermics, 2025, 127: 103249.
- [30] CIMMINO M. Fluid and borehole wall temperature profiles in vertical geothermal boreholes with multiple U-tubes[J]. Renewable Energy, 2016, 96: 137-147.
- [31] GAO W, QADRAN M. A composite analytical model to predict the thermal performance of borehole ground heat exchangers within stratified ground[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 258: 124668.
- [32] GNIELINSKI V. On heat transfer in tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 63: 134-140.
- [33] NIBBS W, WATSON S M, KOLO I, et al. Repurposing onshore hydrocarbon wells as deep borehole heat exchangers: a comprehensive modelling study for the UK[J]. Applied Thermal Engineering, 2026, 288: 129530.
- [34] HEIN P, KOLDITZ O, GÖRKE U J, et al. A numerical study on the sustainability and efficiency of borehole heat exchanger coupled ground source heat pump systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 100: 421-433.
- [35] LI B, LI Z Z, WU C X, et al. Dynamic heat storage and release characteristics and flow control optimization of photovoltaic / thermal-heat pump coupled packed bed thermal energy storage system (PV / T-HP-PBTES) [J]. Energy, 2025, 334: 137736.
- [36] 刘贝贝. 引入地源热泵和储能装置的综合能源系统优化调度[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
LIU Beibei. Optimized dispatch of integrated energy systems incorporating ground-source heat pumps and energy storage devices[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [37] YANG Y, LIN C H, XU L, et al. Accelerating optimal power flow with structure-aware automatic differentiation and code generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2025, 40(1): 1172-1175.

作者简介:

杨越(1995—),男,副教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统优化方法、综合能源系统优化运行(E-mail: yue.yang@hfut.edu.cn);

武平辉(2001—),男,硕士研究生,主要研究方向为地热系统建模、电-热耦合系统运行控制(E-mail: 18749545758@163.com);

陈垒(1992—),男,助理研究员,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为新型电力系统监测与控制、零碳园区优化(E-mail: chenlpku@pku.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

Electric-thermal coordinated scheduling method considering variable flow heat exchange characteristic of ground source heat pump

YANG Yue¹, WU Pinghui¹, CHEN Lei², YANG Xiaodong¹, LIN Chenhui^{3,4}, WU Wenchuan^{3,4}

(1. State Key Laboratory of High-efficiency and High-quality Conversion for Electric Power,

Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Energy, Peking University, Beijing 100871, China;

3. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

4. State Key Laboratory of Power System Operation and Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The operational characteristic of ground source heat pump is closely coupled with the heat exchange process of underground pipe heat exchanger network, which brings challenges for accurate modeling and optimal control of ground source heat pump. Therefore, an electric-thermal coordinated scheduling method based on a refined thermal model of ground source heat pump under variable flow control is proposed. An equivalent analytical model of underground pipe heat exchanger network port under variable flow regulation is established to describe the heat exchange process between the soil and fluid when the fluid flow changes. A variable flow electric-thermal coupling model of ground source heat pump system is built to reveal the dynamic effect of electric power consumption and fluid flow on heating ability. An optimization framework for electric-thermal coordinated scheduling is constructed for the goal of minimizing the operating cost, which achieves coordinated optimization between ground source heat pump system and power system by dynamically adjusting the flow and power of ground source heat pump. The simulation results show that the proposed scheduling method can fully leverage the regulation flexibility of ground source heat pump system, improve system operational economy and accommodation ability of distributed renewable energy while meeting the building heating demand.

Key words: ground source heat pump; electric-thermal coordinated scheduling; variable-flow control; underground pipe heat exchanger; integrated energy system; day-ahead scheduling