

# 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

徐飞<sup>1</sup>, 郝玲<sup>1\*</sup>, 陈磊<sup>1</sup>, 田冉<sup>2</sup>, 魏名山<sup>2</sup>, 陈群<sup>3</sup>, 闵勇<sup>1</sup>

(1. 清华大学电机系(电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室), 北京市 海淀区 100084;

2. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京市 海淀区 100081;

3. 清华大学工程力学系(热科学与动力工程教育部重点实验室), 北京市 海淀区 100084)

## Review of District Energy Network Dynamic Modeling and Coordinate Optimal Operation in Integrated Electricity and Heat Energy Systems

XU Fei<sup>1</sup>, HAO Ling<sup>1\*</sup>, CHEN Lei<sup>1</sup>, TIAN Ran<sup>2</sup>, WEI Mingshan<sup>2</sup>, CHEN Qun<sup>3</sup>, MIN Yong<sup>1</sup>

(1. State Key Lab of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China;

2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Haidian District, Beijing 100081, China;

3. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China )

**Abstract:** A district energy network with integrated electricity and heat energy systems has a passive heat storage capacity because of its strong thermal inertia. This naturally improves the regulating ability of the electric power system and provides space for the grid-connected consumption of large-scale renewable energy. Under the premise of no additional equipment, the method can achieve the purpose of smoothing the intermittence of renewable energy only through the optimal combined dispatch of heat and power. Therefore, this method has become one of the means with the greatest potential for enhancing power system flexibility and has gradually been given much attention both at home and abroad. However, because of the characteristics of district energy systems, including multi-variable, non-linear, and time delay characteristics, the research has faced several bottlenecks such as incompatibility between power systems and district energy system modeling. There has also been a lack of coordination between the different kinds of energy systems when describing and evaluating the improvements in the regulating ability of district energy networks. This study reviewed the latest research on utilizing the thermal inertia of district energy networks to improve the

regulating ability of integrated energy systems based on three aspects. First, heat transportation dynamic modeling of district energy networks was necessary. Second, the modeling of closely related units was a key factor. Third, a combined heat and power dispatch method was eventually established based on the above two factors. In addition, this study compared the advantages and disadvantages of the lumped parameter method, node method, element method, equivalent thermal-electricity analogue circuit method, and other dynamic modeling methods. The key factors affecting the performance of an integrated electricity and heat energy system are summarized, and several suggestions are given for further research.

**Keywords:** integrated electricity and heat energy systems; district energy networks; dynamic modeling; optimal operation; renewable energy consumption

**摘要:** 电热综合能源系统中的热力管网由于较强的热惯性而具备被动储热能力, 可以提高电力系统的调节能力, 为大规模可再生能源并网消纳提供空间。利用热力管网储能的方法可在不增加额外设备与投资的前提下, 仅通过电力、热力系统的协调优化, 达到平抑可再生能源波动性与间歇性、提高可再生能源使用率的目标。该方法已成为目前较具潜力的灵活性提升手段之一, 逐渐受到国内外广泛关注。热力系统本身具有多变量、非线性、时延性等特点, 且热力管网运行调节独立于电力系统调度之外, 导致在刻画评估热力管网所具备的调节能力时, 面临电热系统动态建模难以兼容、异质能源系统运行机制难以协调等瓶颈。研究围绕热力管网动态

**基金项目:** 国家电网公司总部科技项目(蓄热式电采暖优化配置及互动关键技术研究与应用(5400-201914172A-0-00))。

Science and Technology Foundation of SGCC (Key Technology and Application for the Optimal Configuration and Market-based Interaction of the Regenerative Electric Heating (5400-201914172A-0-00)).

特性建模及电热协调优化等方面,对利用热力管网热惯性提升电热综合能源系统调节能力的研究方法展开回顾:比较分析了节点法、元素法、集总参数法、等效热电路法及能路法等动态建模方法的优劣,剖析了电力系统与热力管网协调运行研究中的关键要素,并针对进一步研究方向提出了几点建议。

**关键词:** 电热综合能源系统; 热力管网; 动态建模; 优化运行; 可再生能源消纳

## 0 引言

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,电力系统与热力系统二者运行特性互补,是实现高比例可再生能源接入电网的重要应用场景与载体<sup>[1-2]</sup>。电热综合能源系统一直未有十分清晰的定义,从综合能源系统的定义可知,电热综合能源系统即为集电/热能生产、传输、转换、存储、利用于一体的综合能源系统。热电联产和冷热电联供是较早出现的电热综合能源系统的形式,热力发电也是一种热力系统,由于发电循环可以归入电力系统,故电热综合能源系统可理解为由常规火电、风/光/水电等电力系统与集中供热系统、区域供冷系统及储热、储冷等典型热力系统耦合而成<sup>[3]</sup>,如图1所示。

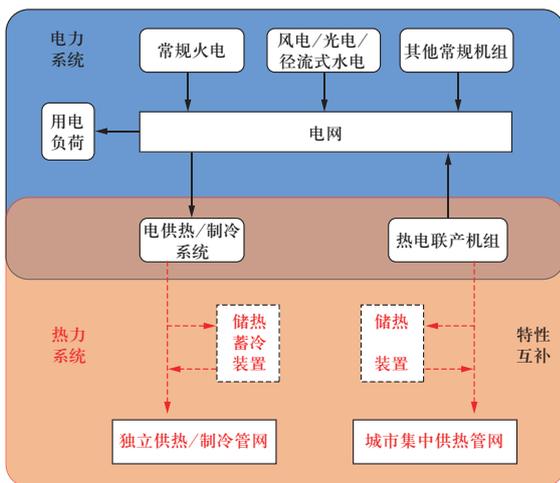


图1 电热综合能源系统示意图

Fig. 1 Integrated electricity and heat energy systems

在可再生能源未大规模接入电网前,电热综合能源系统的协调优化主要以供给侧的协调为主体,即协调发电机组、电网与集中供热热源的运行,其主要目的为提高能源效率等,对集中供热系统、区域供冷系统的热力管网、热用户、换热器等部件的运行管理较为粗放,热力管网及热用户等部件的运行特性也很少

被纳入系统优化调度范畴。随着高比例可再生能源接入电网,热电联产以热定电的模式制约了电力系统的灵活性,仅从发电和供热的供给端调节不能适应可再生能源大规模接入的发展形势,故从热力管网、换热器、热用户等热力传输及负荷环节中寻求新的调节能力提升方式的研究需求日益迫切<sup>[4]</sup>,电热协调的范围已逐渐从能源供给侧扩展到传输侧、负荷侧等。

利用热力管网热惯性提升电力系统调节能力的具体原理是:热源与热用户间存在一定的空间距离,则管网热源处的高温热媒水需经过一定的“热量传输延迟”才能到达热用户。也就是说,热量从热源传递到热用户期间,相当于将这部分热量“储存”在管网中,使得管网具备一定的被动储热能力<sup>[5]</sup>。与促进新能源消纳的主动储热技术效果类似,被动储热可打破供热量与热负荷实时平衡的刚性约束,提高电热综合能源系统的调节能力,促进可再生能源消纳<sup>[6]</sup>。该方法是对已有的管网运行方式进行改进,无需增加额外的设备投资,也无需对现有发电系统运行方式进行大的调整<sup>[7-8]</sup>,在可实施性、经济性、可持续性等方面具有优势<sup>[9]</sup>,故逐渐受到国内外学者广泛关注<sup>[10]</sup>。文献[11]建立了管道热媒水热量传输过程的经验模型,并将其纳入电热协调优化调度模型,结果表明考虑供热管道在电力调度中的传输延迟可使得风电消纳提升35.5%。文献[12]研究发现在电热协调优化调度中考虑供热管网的天然储热能力可使风电消纳提升12.31%。

总的来说,将热力管网纳入电热综合能源系统调度、并对其进行精细化管理可以提升可再生能源消纳量,同时还可满足用户日益升高的热舒适性需求<sup>[13-14]</sup>,但是,这给电力、热力系统动态的协同优化运行带来挑战<sup>[15-16]</sup>。在集中供热系统研究领域,热力管网的水力及热力计算并不是新问题,已有较成熟的仿真模型,运行调节机制也较为完善,但将其纳入电热协调优化模型后则出现算法兼容性差、管网及其他重要元件模型精度低、计算复杂程度高等问题<sup>[17-18]</sup>,目前已有的计及热力管网的电热协调优化模型所考虑的因素各异,仍未形成统一的模型<sup>[19]</sup>。具体存在三方面问题:第一,热力管网的动态热量传输模型是非线性方程,大多采用数值方法求解,难以与电力系统算法兼容;第二,热力管网属于热量传输环节,考虑其瞬态模型意味着要同时考虑与热力管网密切相关的热用户、换热器等关键部件的运行特性,这些多参数、时延性、非线性的热力系统模型给计算进一步带来难度;第三,热力管网具备独立的运行调节机制,当电力系统与热力管

网联合优化时，热力管网原运行模块仍发挥作用，在实现电热综合能源协调优化时必须将热力系统自身运行模式纳入考虑，仅以电力系统性能为指标会导致分析偏差。以下从热力管网动态建模、其他关键部件建模及热力管网与电力系统协调运行三方面对已有研究展开回顾。

## 1 热力管网动态建模

本文提到的热网热量传输模型是基于能量守恒定律建立的，可同时适用于一次网、二次网。是否在电热综合能源系统协调优化中考虑一次网、二次网模型取决于具体案例。通常一次网连接热源与换热站，供热半径较大；二次网连接换热站与热用户，而供热站位置的选取以距离热用户较近为原则，二次网较短。故二次网的热量传输延迟很短，其对电力系统调度的影响极小，本文述及的电热协调优化通常仅以长度较大、热惯性较强的一次网为重点，但并不绝对，针对二次网也较长的案例，则需同时考虑一次网、二次网的热量传输延迟。

### 1.1 传统热力模型

热力管网的非稳态热力模型可为热力系统运行调节、电热协调优化提供精确约束<sup>[20-21]</sup>，包含两部分：第一是管道的热量传输动态模型，用于求解沿途热损失与传输时延；第二是网络的水力与热力拓扑模型，用于求解各网络节点流量、热量的分流与汇流过程。管道热量传输动态模型是复杂热力管网建模的基础：文献[22-23]从20世纪90年代研究集中供热系统管网水力、热力模型，首先在能量守恒定律的基础上，列出管道热量传输动态特性微分方程，见式(1)，其初始条件与边界条件见式(2)，并提出了元素法(element method)与节点法(node method)两种数值解法，见式(3)、式(4)；其次将管道的方程代入网络拓扑矩阵方程进行求解；最后通过实验验证这两种方法具有较高的精度<sup>[24-26]</sup>。元素法中逐时出口温度是通过逐时进口温度与各节点初始温度计算的，而节点法的逐时出口温度的数值解是关于初始温度与一定时刻之前的进口温度的函数。这两种数值解法精度较高，但是具有高度的非线性，内在参数关系复杂。

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi}{\partial t} + v \frac{\partial \phi}{\partial x} + a\phi = 0 \\ \phi = T_w - T_s \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\phi$ 为管内热流体的过剩温度，K； $T_w$ 、 $T_s$ 分别为热流体与管外周围土壤的温度，K； $v$ 为流体速度，m/s； $a$ 为热流体向土壤的散热系数， $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ； $t$ 、 $x$ 分别为时间项与空间项，s、m。

$$\begin{cases} \phi(x, 0) = \phi_0(x) \\ \phi(0, t) = \phi_i(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\phi_0(x)$ 、 $\phi_i(t)$ 分别表示管内热流体的初始温度与各时刻进口温度，即式(1)的初始条件与边界条件。

元素法的基本数值离散格式见式(3)。

$$\frac{\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j}}{\Delta t} + v \frac{\phi_{i,j} - \phi_{i-1,j}}{\Delta x} + a\phi_{i,j+1} = 0 \quad (3)$$

式中： $i$ 、 $j$ 分别表示离散的空间节点与时间节点； $(j+1)$ 代表时刻节点 $j$ 的下一时刻； $(i-1)$ 代表空间节点 $i$ 的上一节点。

节点法的基本数值解表达式见式(4)。

$$\phi_{i,j+1} = \left( n + 1 - \frac{1}{c} \right) \phi_{i-1,j-n+1} + \left( \frac{1}{c} - n \right) \phi_{i-1,j-n} \quad (4)$$

文献[27]借鉴元素法，建立了双管道的热量传输微分方程，并采用数值方法求解得到单根管道出口水温随进口水温的动态变化曲线；在此基础上，并未建立网络拓扑模型，而是结合流量-负荷等经验公式得到热力管网出口水温的延迟特性。文献[28]研究了热水供热管道动态热力工况，依据能量守恒定律，采用集总参数法针对管道热量传输过程建立了瞬态模型，分别提出单独考虑热损失的管网“散热模型”与同时考虑散热效应与储热特性的“蓄热模型”，并采用数值解法进行求解。

以上传统数值解法求解的热传输延迟时间精度较高，在热力系统内已被广泛应用。但是将其纳入现有电力系统优化调度则出现问题。现有电力系统优化调度模型中主要包含发电机组约束、电网传输约束等。其中，用于求解电网传输特性的潮流模型通常采用电网等值计算方法，先将复杂电网转化为等值电路，并建立相应的导纳矩阵方程，最后对方程进行求解。以图2的电路为例，其潮流方程和导纳矩阵分别如式(5)、式(6)所示。

$$\begin{cases} Y_{11}\dot{V}_1 + Y_{12}\dot{V}_2 + Y_{13}\dot{V}_3 + Y_{14}\dot{V}_4 + Y_{15}\dot{V}_5 = \dot{I}_1 \\ Y_{21}\dot{V}_1 + Y_{22}\dot{V}_2 + Y_{23}\dot{V}_3 + Y_{24}\dot{V}_4 + Y_{25}\dot{V}_5 = \dot{I}_2 \\ Y_{31}\dot{V}_1 + Y_{32}\dot{V}_2 + Y_{33}\dot{V}_3 + Y_{34}\dot{V}_4 + Y_{35}\dot{V}_5 = \dot{I}_3 \\ Y_{41}\dot{V}_1 + Y_{42}\dot{V}_2 + Y_{43}\dot{V}_3 + Y_{44}\dot{V}_4 + Y_{45}\dot{V}_5 = \dot{I}_4 \\ Y_{51}\dot{V}_1 + Y_{52}\dot{V}_2 + Y_{53}\dot{V}_3 + Y_{54}\dot{V}_4 + Y_{55}\dot{V}_5 = \dot{I}_5 \end{cases} \quad (5)$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & Y_{n3} & \cdots & Y_{nm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中：下角标 $i=1\sim n$ 表示节点序号； $I$ 表示节点电流； $V$ 表示节点电压； $Y$ 表示节点间的导纳值。

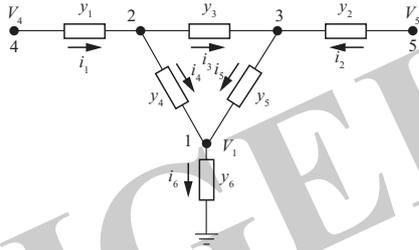


图2 简单电路案例

Fig. 2 Example of a simple electrical circuit

可以看出，式(5)为线性化矩阵方程。方程中 $I$ 与 $V$ 仅有一组量未知，导纳矩阵 $Y$ 为该方程的系数。导纳是电导和电纳的统称，用来表征节点电压与电流间的定量关系，反映了交流电通过电路或系统时的困难程度。在电力电子学中导纳定义为阻抗的倒数。该方程为线性、代数约束，可直接代入优化调度模型中进行求解。

由于热力系统模型的求解主要采用数值解法，数值解形式如式(3)、式(4)所示，数值迭代过程引入了大量中间节点温度（除全时刻进口温度与出口温度以及初始温度以外的其他温度，都为中间节点温度），内在参数关系复杂；这导致现有热力模型无法与电力调度系统通用的线性化模型兼容。此外，实际场景中复杂管网的热量传输模型比单根管道的非线性程度更高，进一步为电热协调优化带来难度。因此，有必要从模型算法及物理意义的角度实现管网模型与电力系统优化模型的统一。

## 1.2 适用于电力系统调度的热力管网模型

为解决上述问题，电力系统的学者将其进行适当简化。文献[29]提出将管网热量传输的时延与热损失拆分计算，用动态模型计算延迟，热损失则采用稳态模型计算，见式(7)；再将两个结果组合代入电热协调优化模型，精度较原始模型有所降低，但计算便利。文献[30-31]对节点法模型进行改进，在此基础上提出了热量传输的线性化模型，基于改进的节点法建立了计及管网的电热联合调度模型。文献[32]建立了

考虑供热管网改进节点法模型、用户热舒适性柔性约束的电热综合能源系统优化调度模型，结果表明该模型可通过电-热供需曲线的平移与最优匹配，实现可再生能源消纳水平的大幅提升。然而，改进后的节点法模型与电力系统兼容性好，但计算时刻不能从0时刻起始，精度较传统数值解法略低。

$$T_{\text{out}} = (T_{\text{in}} - T_s) e^{-\frac{\lambda L}{c_p m}} + T_s \quad (7)$$

式中： $T_{\text{out}}$ 、 $T_{\text{in}}$ 分别代表管道出口与进口水温，K； $T_s$ 代表土壤温度，K； $\lambda$ 为管道的单位长度的换热系数， $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ； $L$ 为管道轴向长度，m； $m$ 为质量流量， $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ； $c_p$ 为热流体的比热容， $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

文献[33]借鉴节点法思路，采用统一能路方法，将热力管网动态热力过程比拟为类似于电路的“热路”模型，使方程形式统一为矩阵形式，为热力管网与电力系统的协调优化提供模型基础。文献[34]在节点法基础上，对方程进行拉普拉斯变换，并将供热管道比拟为包含电阻、电容、电感的电路，如图3所示。据此得到的出口温度关于进口温度的代数方程，如式(8)所示。该热网动态模型可用于电力系统调度，但其主要用于求解大于 $\tau$ 时刻后的出口温度变化曲线，小于 $\tau$ 时刻的温度动态变化规律则不易掌握。

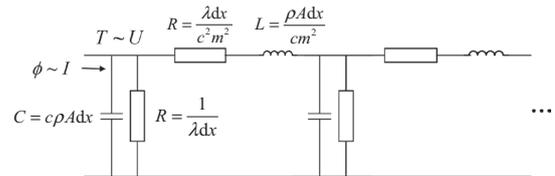


图3 供热管网热量传输用等效电路<sup>[34]</sup>

Fig. 3 Equivalent circuit of the district heating pipe in Ref.[34]

$$\begin{cases} T(x, t) = T(0, t - \tau) e^{-\left(\frac{\lambda}{c_p m}\right)x} \\ \tau = \frac{\rho A x}{m} \end{cases} \quad (8)$$

式中： $T$ 是流体温度，K； $x$ 是管内某点到进口的距离，m； $t$ 是时间，s； $\tau$ 是流体从进口流至出口所需时间，s； $\rho$ 是流体密度， $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ； $A$ 是管道横截面积， $\text{m}^2$ ； $m$ 是流体质量流量， $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

文献[35]等基于能量守恒定理建立了热力管网的热量传输动态微分方程，借鉴电磁暂态理论中的诺顿等值计算方法，提出热电比拟电路与等效热电路，见图4—图5。图4中的 $T_1$ 、 $T_2$ 等分别表示各连续流体微元的温度； $E_1 \sim E_n$ 表示各流体微元间由于对流导致的温度

增加;  $T_s$ 表示周围土壤温度;  $R_1 \sim R_n$ 表示各流体微元与外界的热阻;  $C_1 \sim C_n$ 表示各流体微元自身的内能储存。图5中的 $q_1$ 表示由于温度变化而存储在流体微元中的热能,  $q_2$ 表示节点 $(i-1, j)$ 和 $(i, j)$ 之间的热量,  $q_3$ 是节点 $(i, j+1)$ 到土壤的热损失。

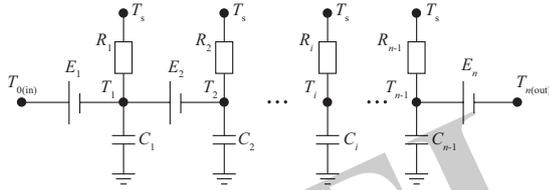


图4 供热管网初步热电比拟图<sup>[35]</sup>

Fig. 4 Electricity-thermal-analogue circuit of district heating pipe in Ref.[35]

图5则借鉴电磁暂态诺顿等效计算方法, 将图4中的热网热量传输的热电比拟图进一步简化, 省略中间温度, 实现热网动态模型的线性化。具体过程是, 将 $q_2$ 分解为 $q_{2a}$ 与 $q_{2b}$ , 则可将图4所示的比拟电路转换为仅包含上一节点在上一时刻的温度, 依次类推则可将出口温度表示为仅关于进口温度与初始温度的函数, 中间节点温度被省略, 最终建立了出口温度关于进口水温的线性化矩阵方程, 如式(9)所示。由于 $A_i$ 、 $B_j$ 是关于流体流动参数及管道结构参数的函数, 属已知量, 故该模型可直接用于电热协调优化。

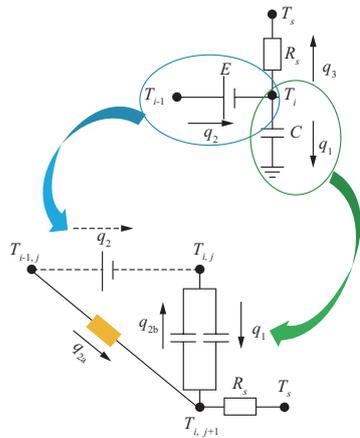


图5 热网等效热电路<sup>[35]</sup>

Fig. 5 Thermal-electrical-analogue equivalent model of the heating pipes in Ref.[35]

$$T_{out, n\Delta\tau} = \begin{cases} \sum_{i=m}^{m-n} (T_{i,0} - T_s) A_i + T_s, (n < m) \\ \sum_{i=1}^m (T_{i,0} - T_s) A_i + \sum_{j=0}^{n-m} (T_{m,j} - T_s) B_j + T_s, (n \geq m) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $T_{out, n\Delta\tau}$ 表示第 $n$ 个时间间隔 $\Delta\tau$ 处的出口温度, K;  $T$ 为流体微元温度, K; 下标 $i$ 和 $j$ 分别表示空间节点和时间节点;  $m$ 为管道的空间节点数; 则 $T_{i,0}$ 表示空间节点 $i$ 的初始温度, K;  $T_{m,j}$ 表示进口在时间节点 $j$ 的温度, K。

上述两种方法都是从热力学原理出发, 结合电力系统算法, 借助数学方法, 实现了电热模型物理意义与形式的化归统一, 兼具精度与兼容性, 为热力管网与电力系统的协调优化提供良好的模型基础。但要实现电、热两个系统协调运行管理, 仅完成兼容性高的模型还是不够的, 还需将与热力管网运行密切相关的其他部件、以及管网自身运行机制融入电力系统调度, 通过优化运行效果的优劣检验模型的可靠性。

## 2 电热协调中其他关键部件建模

集中供热(供冷)系统包含热(冷)源、热用户、热力管网及水泵等辅助动力装置, 其中热力管网作为集中供热系统的核心元件, 不能将其孤立出来纳入电力调度中, 而应将其与区域能源系统中的其他关键部分(包括换热器、回水管网集水器以及热用户等)<sup>[36]</sup>一并考虑。

针对换热器, 文献[37]在电热协调优化调度模型中考虑了一次网与二次网换热过程的约束。文献[38-39]将热力管网水力及热力模型纳入电热协调优化, 重点分析了热力管网与电力系统的耦合优化运行效果, 但是其供水温度是在给定换热量与回水温度的条件下求解的, 未考虑换热器换热过程约束, 导致优化结果与实际换热过程存在一定偏差。

针对热用户, 文献[40]为重点分析电力系统与热力系统的联合运行效果, 直接给定用户热负荷, 虽然有利于分析整体效果, 但是未对热用户稳态换热过程进行全面分析, 即未考虑二次网与用户、用户与室外环境的换热过程, 无法根据室外温度和供水温度求得用户室内温度。另外, 给定各时刻热负荷为确定值, 根据建筑供暖标准, 满足用户热舒适性的室内温度可在一定范围内波动, 给定热负荷则导致用户室内温度从一段区间缩小为一个点, 为评估管网所能提供的调节能力带来分析偏差。文献[41]将柔性热负荷纳入其电热协调优化模型, 并研究了热负荷波动对可再生能源消纳、热电联产机组热出力的影响规律, 结果较可靠。

针对回水管网集水器, 文献[29]建立了回水节点的温度混合模型, 符合实际情景。文献[42]提出了计

及回水管网热损失的热力系统潮流前推回代算法, 不仅考虑了回水混合过程, 而且将回水在传输过程中的热损失计入混合过程, 具有较高的计算精度, 研究结果表明回水管网热损失较大, 若忽略将会造成优化结果的偏差(回水管网向周围土壤的散热通常小于供水管网, 但是忽略该传输延迟与热损失会造成回水温度计算值高于实际值、计算供热量小于实际所需值; 为降低计算偏差, 则不可忽略回水管网的热量传输特性)。

与管网运行密切相关的各关键部分运行特性建模是影响热力管网调节能力的重要因素, 在构建电热协调模型过程中, 应当对其予以充分考虑, 以为实际的系统协调优化运行提供准确的运行边界。

### 3 热力管网与电力系统协调运行研究

在完成热力管网和与热力管网密切相关的关键部件建模后, 最终目的是将其纳入电力系统优化调度模块实现电热协调运行。要实现热力管网与电力系统的协调优化, 仅单一地考虑电力或者热力系统性能是不够的, 最终要从运行层面建立协调运行策略与综合性能指标。热力管网的运行调节方式研究比较成熟, 但是在电热综合能源系统协调优化运行中对热力管网的运行调节机制考虑还不全面, 下面对电热协调优化中热力管网的质、量调节与温度反馈调节机制的研究方法进行详细分析。

#### 3.1 管网流量调节的研究方法

热力管网主要采用质调节、量调节、分阶段变

流量的质调节、质量并调以及间歇调节等5种传统方式<sup>[43-44]</sup>。其中, 质调节仅调节管网热媒水供水温度, 量调节仅调节热媒水流量, 其他3种调节方式则是针对不同类型供热场景的细分调节方式<sup>[45]</sup>。这几种调节方式本质上都是对温度和流量进行稳态调节(如图6所示), 未在管网调节中对管网热量传输动态特性进行深入分析。仅考虑稳态模型导致热量传输延迟被忽略, 无法实时保证用户热舒适性<sup>[46]</sup>, 故管网的动态运行调节仍然是研究热点<sup>[47-48]</sup>。

电热协调优化方法考虑了热量传输动态特性, 但是为了简化分析, 仅考虑质调节机制, 未考虑流量调节<sup>[49]</sup>。导致流量对于热量传输延迟等动态特性的影响被忽略<sup>[50]</sup>: 传统管网稳态量调节的主要目的仅在于改变循环泵功, 对供热量的影响几乎不予考虑<sup>[51]</sup>, 然而在实际的动态电热协调优化运行中, 改变流量对管网热量传输特性影响较大, 而热量传输动态特性对逐时供热量、用户热舒适性以及电热综合能源系统中的可再生能源消纳量有较大影响。因此, 有必要将流量纳入动态的管网调节与电热协调优化中, 分析电热综合能源系统关键性能参数即风电消纳量、供热量、用户热舒适性随流量的变化趋势及内在原因, 以寻求使系统综合性能达到最优的热媒水流量值。

#### 3.2 管网温度反馈调节机制的研究方法

目前文献中将管网模型纳入电热协调优化的主要目的在于分析考虑热量传输延迟对于可再生能源消纳的促进作用, 但对热力管网自身运行调节的影响探讨不足。以文献[4]为例, 该研究建立了考虑管道热量传输动态特性的电热联合优化模型, 以分析热力系统运

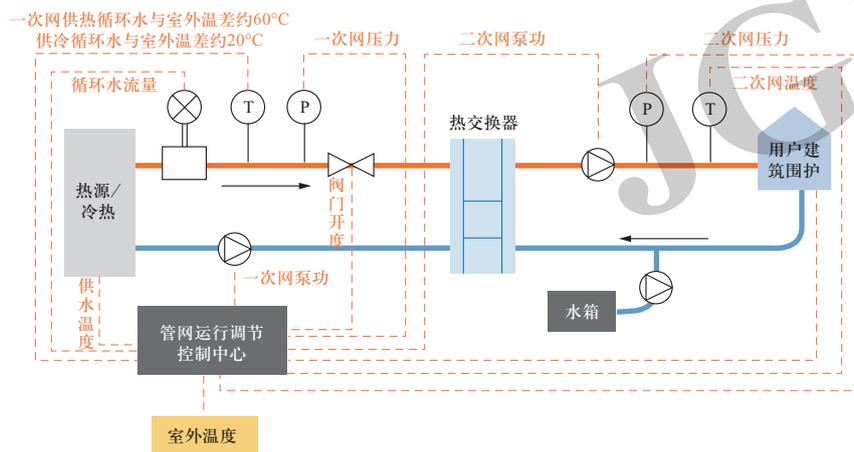


图6 热力管网运行调节示意图

Fig. 6 Sketch of the operation and regulation mechanism for district energy network

行参数对系统优化运行的整体影响, 对比分析了在系统调度中考虑热损失与不考虑情形下的风电消纳量, 得出了对照组(系统调度中不考虑管网热损失)比实验组(精确考虑管网热损失)的供热量低, 风电消纳量大的结论。该结论的趋势与常理不同(精确的管道热损失模型反而会导致弃风量增大), 导致结果偏离的原因就在于用于保证用户热舒适性的温度反馈调节机制未被考虑。

尽管热力系统目前的运行处于粗放控制阶段, 在热力调节中未对热量传输延迟时间定量考虑, 但是实际管网运行中通常设有室温或回水测温反馈装置, 一旦一次网回水温度过低, 就意味着供热量小于用户热负荷, 管网运行调节中心随即增大热源供热量, 以充分保证用户热舒适性。可以推断, 如果在文献[4]中考虑管网自身温度反馈调节机制, 那么在供热计划中不考虑热损失就会导致供热量不足, 回水温度低于预期温度, 供热调节控制系统收到温度反馈后, 会下发提高供热量的指令, 实际供热量会比计划值高。也就是说, 不考虑热损失情形的供热量可能与考虑热损失的情形相同。因此, 将热力管网自身的温度反馈调节机制纳入电热协调优化是准确评估热力管网对提升清洁能源消纳所起作用的前提。

## 4 总结

本文梳理了利用热力管网热惯性提升电热综合能源系统调节能力的研究进展, 从热力管网动态建模、其他关键部件建模以及热力管网运行调节机制方面进行回顾分析, 得到3个结论。第一, 热力管网动态建模是实现电热协调优化的基础; 目前提出的等效热电路法、能路法均具备良好精度与兼容性佳的优势, 已初步解决了热力管网与电力系统计算不兼容的问题, 但各类建模方法的有效性和可靠性尚需通过后续协调优化效果检验。第二, 目前研究较少对与管网运行密切相关的换热器、热用户及回水管网集水器等部件进行考虑, 极大程度影响电热综合能源系统协调优化结果的合理性, 故还需在后续研究中补充完善。第三, 要发挥电热综合能源系统中热力管网潜在的调节能力, 仅单一地将热力系统动态特性纳入电力系统运行是不足的, 还需考虑热力管网自身运行调节机制, 包括流量调节与温度反馈调节, 最终从运行层面建立电热协调运行策略与电热系统综合性能评价指标。

总之, 热力管网与电力系统协调优化控制是实现

大规模可再生能源并网、满足居民日益提高的热舒适性需求的有效手段。在实现过程中, 并不能只着眼于电力系统或者热力系统的局部, 更要厘清学科内建模及优化运行的方法, 再跳出学科、实现学科间理论的交叉融合。不仅要实现电力、热力系统模型的兼容性, 还要综合考虑热力管网自身优化运行原则与电力系统调度方法, 真正实现供给侧、负荷侧、传输网络、储能侧的协调运行与最优资源配置。

## 参考文献

- [1] BUFFA S, COZZINI M, D'ANTONI M, et al. 5th generation district heating and cooling systems: a review of existing cases in Europe[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 104: 504-522.
- [2] 徐飞, 闵勇, 陈磊, 等. 包含大容量储热的电-热联合系统[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(29): 5063-5072.  
XU Fei, MIN Yong, CHEN Lei, et al. Combined electricity-heat operation system containing large capacity thermal energy storage[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(29): 5063-5072(in Chinese).
- [3] 巩志皓, 王程. 基于风险的电-热综合能源系统风电消纳能力评估[J]. *全球能源互联网*, 2019, 2(4): 325-332.  
GONG Zhihao, WANG Cheng. Risk-based admissibility assessment of wind generation in integrated electric-heat systems[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2019, 2(4): 325-332(in Chinese).
- [4] 周晓鸣, 丁一, 邵常政, 等. 计及电-热综合需求侧响应的热电联产机组优化配置研究[J]. *全球能源互联网*, 2019, 2(3): 248-254.  
ZHOU Xiaoming, DING Yi, SHAO Changzheng, et al. Multi-objective sequential CHP placement based on flexible demand in heat and electricity integrated energy system[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2019, 2(3): 248-254(in Chinese).
- [5] 顾泽鹏, 康重庆, 陈新宇, 等. 考虑热网约束的电热能源集成系统运行优化及其风电消纳效益分析[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(14): 3596-3604.  
GU Zepeng, KANG Chongqing, CHEN Xinyu, et al. Operation optimization of integrated power and heat energy systems and the benefit on wind power accommodation considering heating network constraints[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(14): 3596-3604(in Chinese).
- [6] 孟宪君, 穆云飞, 王明军, 等. 基于热循环蓄热特性的电-热综合能源系统风电消纳策略[J]. *全球能源互联网*, 2019, 2(4): 318-324.  
MENG Xianjun, MU Yunfei, WANG Mingjun, et al. Wind power consumption strategy for electric heating integrated energy system based on thermal storage characteristics of heat

- cycle[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2019, 2(4): 318-324(in Chinese).
- [7] CHEN Y W, GUO Q L, SUN H B, et al. A water mass method and its application to integrated heat and electricity dispatch considering thermal inertias[J]. *Energy*, 2019, 181: 840-852.
- [8] 徐业琰, 彭思成, 廖清芬, 等. 考虑用户互补聚合响应与热能传输延时的综合能源园区运营商两阶段短期优化调度[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(6): 152-163.  
XU Yeyan, PENG Sicheng, LIAO Qingfen, et al. Two-stage short-term optimal dispatch of MEP considering CAUR and HTTD[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(6): 152-163(in Chinese).
- [9] LE DRÉAU J, HEISELBERG P. Energy flexibility of residential buildings using short term heat storage in the thermal mass[J]. *Energy*, 2016, 111: 991-1002.
- [10] HEIER J, BALES C, MARTIN V. Combining thermal energy storage with buildings – a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42: 1305-1325.
- [11] GU W, WANG J, LU S, et al. Optimal operation for integrated energy system considering thermal inertia of district heating network and buildings[J]. *Applied Energy*, 2017, 199: 234-246.
- [12] DAI Y H, CHEN L, MIN Y, et al. Integrated dispatch model for combined heat and power plant with phase-change thermal energy storage considering heat transfer process[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(3): 1234-1243.
- [13] OLSTHOORN D, HAGHIGHAT F, MIRZAEI P A. Integration of storage and renewable energy into district heating systems: a review of modelling and optimization[J]. *Solar Energy*, 2016, 136: 49-64.
- [14] HAJIAH A, KRARTI M. Optimal control of building storage systems using both ice storage and thermal mass - Part I: Simulation environment[J]. *Energy Conversion and Management*, 2012, 64: 499-508.
- [15] BASCIOTTI D, JUDEX F, POL O, et al. Sensible heat storage in district heating networks: a novel control strategy using network as storage[C]//6th International Renewable Energy Storage Conference(IRES 2011), November 28-30, 2011, Berlin, Germany.
- [16] VERDA V, COLELLA F. Primary energy savings through thermal storage in district heating networks[J]. *Energy*, 2011, 36(7): 4278-4286.
- [17] 崔杨, 陈志, 严干贵, 等. 基于含储热热电联产机组与电锅炉的弃风消纳协调调度模型[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(15): 4072-4081.  
CUI Yang, CHEN Zhi, YAN Gangui, et al. Coordinated wind power accommodating dispatch model based on electric boiler and CHP with thermal energy storage[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(15): 4072-4081(in Chinese).
- [18] 江泽涛. 含多能源站的电气热综合能源系统区间运行优化和博弈均衡研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [19] COX S J, KIM D, CHO H, et al. Real time optimal control of district cooling system with thermal energy storage using neural networks[J]. *Applied Energy*, 2019, 238: 466-480.
- [20] SHABANPOUR-HAGHIGHI A, SEIFI A R. Effects of district heating networks on optimal energy flow of multi-carrier systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 59: 379-387.
- [21] DEL HOYO ARCE I, HERRERO LÓPEZ S, LÓPEZ PEREZ S, et al. Models for fast modelling of district heating and cooling networks[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 1863-1873.
- [22] PÁLSSON H. Methods for planning and operating decentralized combined heat and power plants[D]. Denmark: Technical University of Denmark, 2000.
- [23] BØHM B, HA S K, KIM W T, et al. Simple models for operational optimization[D]. Denmark: Technical University of Denmark, 2002.
- [24] GABRIELAITIENE I, BØHM B, SUNDEN B. Modelling temperature dynamics of a district heating system in Naestved, Denmark: a case study[J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(1): 78-86.
- [25] Benonysson A. Dynamic modeling and operational optimization of district heating systems[D]. Denmark: Technical University of Denmark, 1991: 42-87.
- [26] Zhao H. Analysis, Modeling and operational optimization of district heating systems[D]. Denmark: Technical University of Denmark, 1995: 30-41.
- [27] 李爽. 基于室温调节的热水供热管网动态水力和热力工况研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [28] 周守军. 基于管网动态模型的城市集中供热系统参数预测及运行优化研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [29] LIU X Z, JENKINS N, WU J Z, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. *Energy Procedia*, 2014, 61: 155-159.
- [30] DAI Y H, CHEN L, MIN Y, et al. Dispatch model of combined heat and power plant considering heat transfer process[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(3): 1225-1236.
- [31] LI Z G, WU W C, SHAHIDEHPOUR M, et al. Combined heat and power dispatch considering pipeline energy storage of district heating network[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(1): 12-22.
- [32] 王婉璐, 杨莉, 王蕾, 等. 考虑供热网储热特性的电-热综合能源系统优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(21): 45-55.  
WANG Wanlu, YANG Li, WANG Lei, et al. Optimal dispatch of integrated electricity-heat energy system considering heat storage characteristics of heating network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(21): 45-55(in Chinese).
- [33] 陈彬彬, 孙宏斌, 陈瑜玮, 等. 综合能源系统分析的统一能路理论(一): 气路[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(2): 436-444.  
CHEN Binbin, SUN Hongbin, CHEN Yuwei, et al. Energy

- circuit theory of integrated energy system analysis (I): gaseous circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 436-444(in Chinese).
- [34] YANG J W, ZHANG N, BOTTERUD A, et al. On an equivalent representation of the dynamics in district heating networks for combined electricity-heat operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 560-570.
- [35] HAO L, XU F, CHEN Q, et al. A thermal-electrical analogy transient model of district heating pipelines for integrated analysis of thermal and power systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 139: 213-221.
- [36] 杨卫肖. 计量供热系统运行调节方式分析[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [37] DAI Y H, CHEN L, MIN Y, et al. Dispatch model for CHP with pipeline and building thermal energy storage considering heat transfer process[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(1): 192-203.
- [38] 邵世圻. 计及热网特性的电热联合系统调度方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [39] 刘述欣. 电热联合系统潮流及最优潮流研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [40] PAN Z G, GUO Q L, SUN H B. Interactions of district electricity and heating systems considering time-scale characteristics based on quasi-steady multi-energy flow[J]. Applied Energy, 2016, 167: 230-243.
- [41] DAI Y H, CHEN L, MIN Y, et al. Active and passive thermal energy storage in combined heat and power plants to promote wind power accommodation[J]. Journal of Energy Engineering, 2017, 143(5): 04017037.
- [42] 刘述欣, 戴赛, 胡林献, 等. 计及回水管网热损失的电热联合系统潮流模型及算法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 77-81.  
LIU Shuxin, DAI Sai, HU Linxian, et al. Power flow model and algorithm of combined power and heat system considering heat loss in return pipe network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 77-81(in Chinese).
- [43] 王海超. 多热源联合供热系统调峰方式及综合优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [44] 吴洁清, 姜永成, 赵春阳, 等. 供热系统分阶段质-量调节的节能分析[J]. 暖通空调, 2012, 42(12): 137-140.  
WU Jieqing, JIANG Yongcheng, ZHAO Chunyang, et al. Energy efficient analysis of staged constant-variable flow regulation for heating systems[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2012, 42(12): 137-140(in Chinese).
- [45] OLULEYE G, VASQUEZ L, SMITH R, et al. A multi-period mixed integer linear program for design of residential distributed energy centres with thermal demand data discretisation[J]. Sustainable Production and Consumption, 2016, 5: 16-28.
- [46] 曾竞. 区域供冷供热管网系统优化设计研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [47] JIE P F, TIAN Z, YUAN S S, et al. Modeling the dynamic characteristics of a district heating network[J]. Energy, 2012, 39(1): 126-134.
- [48] AWAD B, CHAUDRY M, WU J Z, et al. Integrated optimal power flow for electric power and heat in a microgrid[C]//IET Conference Publications. Prague, Czech Republic. IET, 2009.
- [49] DELANGLE A, LAMBERT R S C, SHAH N, et al. Modelling and optimising the marginal expansion of an existing district heating network[J]. Energy, 2017, 140: 209-223.
- [50] SAMETI M, HAGHIGHAT F. Optimization approaches in district heating and cooling thermal network[J]. Energy and Buildings, 2017, 140: 121-130.
- [51] 秦冰, 江亿, 付林. 热电联产热源供热量调节及室内温度的响应[J]. 煤气与热力, 2006, 26(8): 53-58.  
QIN Bing, JIANG Yi, FU Lin. Regulation of heat supply from heat source of heat and power cogeneration and response of indoor temperature[J]. Gas & Heat, 2006, 26(8): 53-58(in Chinese).

收稿日期: 2020-10-13; 修回日期: 2020-12-02。

#### 作者简介:



徐飞

徐飞 (1974), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为电热综合能源系统动态建模及协调优化运行, 可再生能源消纳提升技术, E-mail: xufei@tsinghua.edu.cn。

郝玲 (1991), 女, 博士, 主要研究方向为电热综合能源系统动态建模及协调优化运行, 可再生能源消纳提升技术。通信作者, E-mail: haolg@foxmail.com。

陈磊 (1982), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统动态分析与控制, E-mail: Chenlei08@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 张鹏)