

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，是未来实现高比例可再生能源接入电

网的重要应用场景与载体^[1-2]。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^[3]，如图 1 所示。

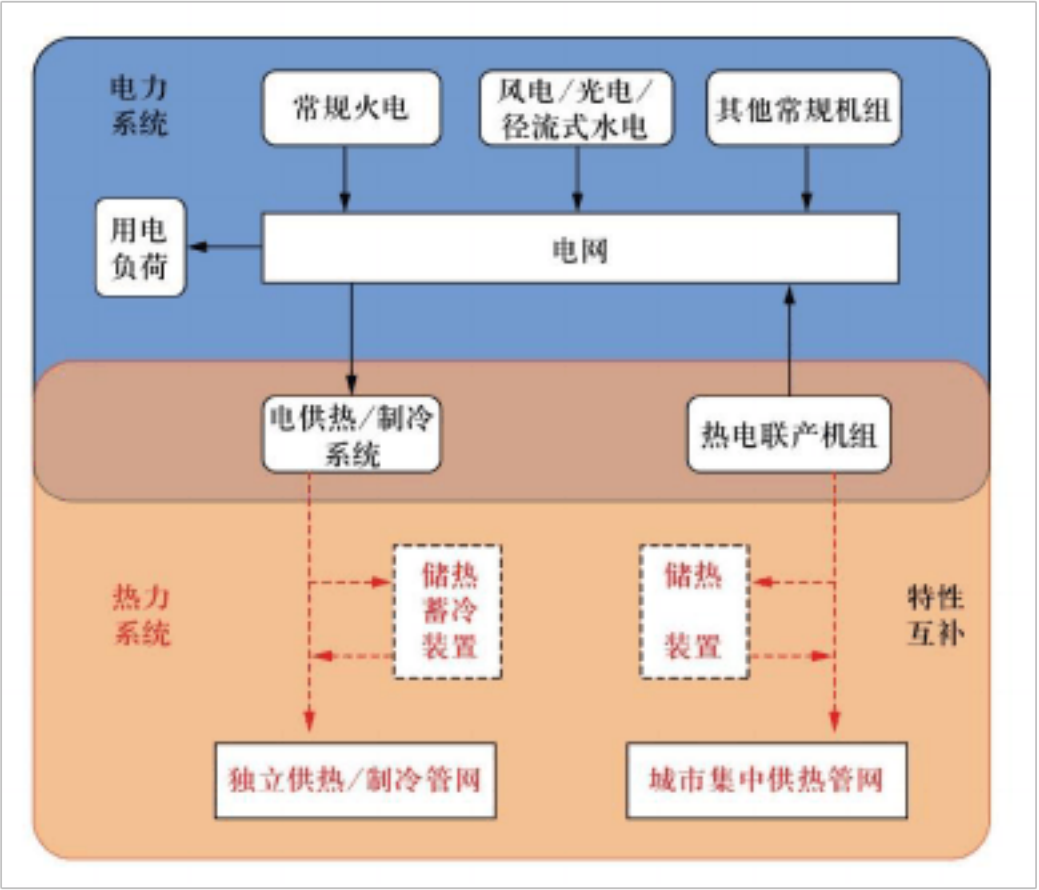


图 1 电热综合能源系统示意图

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^[4]，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^[5]。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^[6]。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^[7-8]，在可实施性、经济性、可持续性等方面具有优势^[9]，故逐渐受到国内外学者广泛关注^[10]。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%。

总地来说，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^[13-14]，但是，这给电力、热力系统动态的协同优化运行带来挑战^[15-16]。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^[17-18]，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^[19]。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^[20-21]，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^[24-26]。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： ϕ 为管内热流体的过余温度，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，最后对该方程进行求解。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。

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

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & Y_{i3} & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & Y_{n3} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

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。

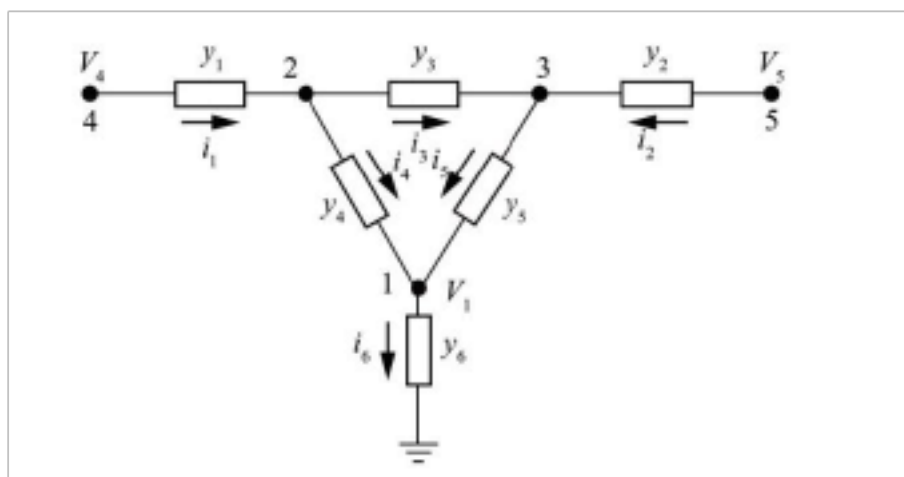


图 2 简单电路案例

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 $\mathbf{I}$ 与 $\mathbf{V}$ 仅有一组量未知，导纳矩阵 $\mathbf{Y}$ 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值。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情况非线性程度更高，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

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

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，

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/906205204010010154>