

综合能源系统多时间尺度动态时域仿真关键技术

夏越¹, 陈颖², 杜松怀¹, 苏娟¹, 兰天³, 宋瑞凯¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京市 100083; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 100084; 3. 全球能源互联网欧洲研究院, 柏林 10623, 德国)

摘要: 近年来,为实现多种能源互补共济与高效利用,集电、热、气于一体的综合能源系统在世界范围内得到了广泛的关注。高效、精确的多时间尺度动态时域仿真是支撑综合能源系统运行和控制的关键技术。文中以综合能源系统动态建模仿真为研究对象,首先介绍了典型综合能源系统的结构与动态过程。然后,从基础模型、仿真技术、数值计算3个关键点介绍了综合能源系统动态建模仿真技术所取得的研究进展,主要包括多能耦合通用建模理论、分区多速率仿真技术、异质能源网络高效数值计算实现方法。在此基础上,讨论了现有研究中仍需解决的关键难题,如变工况动态建模、多速率分区接口处理、数值求解格式选取等问题。最后,对未来综合能源系统动态建模仿真关键技术的研究方向与应用前景进行了展望。

关键词: 综合能源系统; 多时间尺度; 多能源耦合; 动态时域仿真; 多速率仿真

0 引言

在传统能源系统中,电网、热网、天然气网相对独立,能源利用方式粗放,能源使用效率总体不高^[1]。集电、热、气于一体的综合能源系统(integrated energy system, IES)对多类能源互联集成和互补融合,提高了能源利用效率和可再生能源消纳能力^[1-2]。

多能源系统紧密耦合也带来诸多安全运行风险。热网、天然气网和电网互相依存,不同能源网络的暂态过程交互影响、愈加复杂^[3-4]。在此情况下,单一能源网络故障可能引发级联事故,进而破坏综合能源系统运行安全性^[2-3]。例如,2011年2月,天然气管道故障导致美国西南部得克萨斯州与新墨西哥州大面积停电,事故又重新通过耦合元件传播至天然气系统,进一步加重天然气系统的故障,引发连锁故障^[5];2019年2月20日,德国柏林 Salvador-Allende-Brücke 电缆损坏导致附近居民小区的热电联产设备无法正常运作,多个小区供暖系统关闭^[6];2019年11月27日,中国新疆博州电网设备故障导致双河市供暖中断^[7];2021年2月15日,美国得克萨斯州因极端低温天气导致天然气管道发生冰堵,继而造成电力长时间中断^[8]。可见,研究热网、天然气

网与电网动态相互作用机理具有重要的学术和工程价值。

综合能源系统结构复杂、造价昂贵、故障形式多样,难以采用实物实验研究其耦合动态特性。数字化时域仿真成为综合能源系统规划设计和运行控制所必需的技术工具,其作用包括:1)可为研究综合能源系统动态特性,各类调控、故障保护策略验证测试提供必要的技术手段;2)通过准确模拟小规模园区级综合能源系统的动态变化,检测关键系统参数是否达标,为综合能源系统设备选型、参数设计提供参考依据;3)通过对大规模区域级综合能源系统动态过程的精确仿真,能够分析不同能源子系统故障对综合能源系统整体运行产生的连锁影响,挖掘系统薄弱环节,进而优化控保策略,降低大规模综合能源系统连锁故障发生的风险,提高系统供电可靠性。

诸多学者针对综合能源系统仿真技术展开专门研究,取得了诸多研究成果。已有一些文献对部分研究成果进行了综述。文献[9]对10个具有代表性的综合能源系统仿真与规划平台进行了对比和介绍;文献[10]从计算模型和求解方法角度对综合能源系统多能流潮流计算的研究成果进行概括和总结;文献[11]研究了基于能量枢纽的综合能源系统仿真模型,对综合能源系统的优化、规划、需求侧管理等稳态问题进行了梳理总结。上述文献主要从稳态分析角度对当前综合能源系统仿真、规划与运行研究进行总结和评述。本文期望考察综合能源系统的动态特性与多时间尺度特性,对动态仿真所需的

收稿日期: 2020-12-03; 修回日期: 2021-05-24。

上网日期: 2021-11-01。

国家自然科学基金资助项目(52007194)。

关键技术进行综述。由于不同能源网络动态特性差异较大,需要同时使用常微分方程和偏微分方程描述综合能源系统动态。同时,由于系统整体刚性强,相关仿真准确性和效率难以兼顾。为了更好地理解和解决上述难题,本文首先详细介绍了综合能源系统基本特征;然后,从多能耦合建模理论、多速率仿真算法、数值计算方法3个方面梳理总结了多能量流动态建模仿真方法研究现状及所面临的技术难题;在此基础上,结合当前综合能源系统多元化的发展,提出了综合能源系统动态建模与仿真关键技术的研究方向。

1 综合能源系统动态过程与动态模型

1.1 典型综合能源系统的基本结构

图1为典型综合能源系统的结构图。综合能源

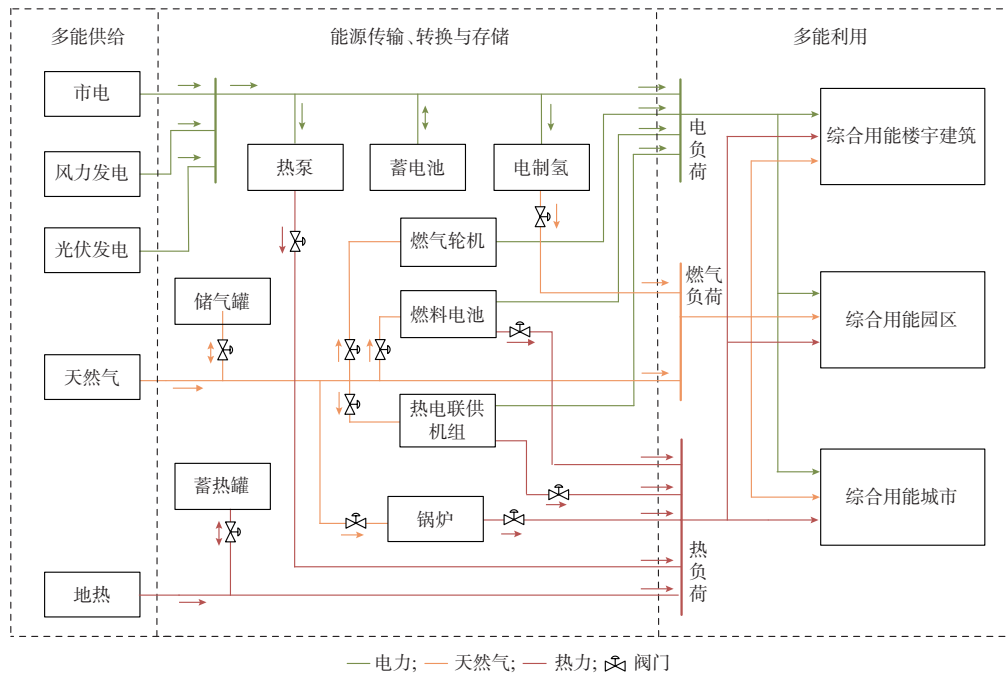


图1 典型综合能源系统结构
Fig. 1 Structure of typical integrated energy system

1.2 国内外典型综合能源示范工程

目前,国外已建成一系列综合能源示范工程,旨在通过能源梯级利用提高能源利用效率和清洁能源利用率。国外代表性的综合能源工程包括:英国曼彻斯特示范工程、德国朗根费尔德斯示范工程、加拿大耶洛奈夫镇示范项目等^[12]。

近些年,中国从国家层面大力推进综合能源系统的建设。在各类利好政策推动下,综合能源技术得到迅速发展,各类热电联产设备、燃气轮机装机容量持续提高,多个综合能源示范工程项目均已投产。截至2019年底,中国燃气轮机装机容量达到

系统以电力网络为核心,包括了热力网络与天然气网络。除常规的交流电气设备(如传输线、用电负荷)外,电力网络包含了大量的分布式新能源发电设备(如风力发电系统、光伏发电系统)和电储能设备。热力网络主要包括热力管道、阀门、蓄热、热负荷等设备。天然气网络主要由燃气管道、阀门、储气罐等设备构成。在综合能源系统中,电、热、气等能源流通过形式多样的能源转换装置耦合在一起,并完成不同能源之间的相互转换。典型的能源转换设备有:燃气轮机、电制氢、锅炉、热电联产装置(如燃料电池、热电联供机组)、热泵。综合能源系统应用范围十分广泛,小至单个楼宇建筑,大至整座城市。根据系统规模,可划分为3种不同级别:用户级、园区级、城市/区域级。

90.22 GW,同比增长7.7%^[13],热电联产装机容量达到524.23 GW^[14]。中国的天然气系统、供热系统和电力系统将有更加广泛的互联。

中国典型综合能源工程包括:国网客服中心北方园区、天津大学滨海工业研究院综合能源示范工程、苏州同里综合能源小镇等^[15]。以2018年投运的苏州同里综合能源小镇一期工程为例,该工程采用光伏发电、高温相变光热发电、风力发电等多种可再生分布式电源,清洁能源占比达到70%。园区通过电锅炉、热泵、冰蓄冷系统等能源转换装置实现多能耦合,满足用户的多种能源需求,提升能源使用效

率;利用高温相变储热系统、压缩空气储能系统保障长期可靠的能源供给。

1.3 综合能源系统动态过程

综合能源系统动态过程复杂,且时间尺度跨度大,从微秒级到分钟级不等。一方面,在综合能源系统中,电力系统、热力系统、天然气系统惯性及响应特性存在较大差异。电力系统的暂态响应时间最小,天然气系统次之,热力系统再次之。电力系统所关注的电磁暂态过程与机电暂态过程是综合能源系统典型快速耦合动态,时间尺度通常在微秒级和毫秒级;机械能-电力、电力-热力之间的转换过程则是一类慢速耦合动态,时间尺度通常在秒级和分钟级。另一方面,电力系统、热力系统、天然气系统动态过程相互耦合、交互影响。例如:天然气网络故障会造成燃气机组、热电联产等装置停运,继而导致综合能源系统中的电力系统和热网失去平衡^[3];电网故障可能会导致供气、供暖中断,增加系统级联事故的风险^[2]。此外,为实现能源优化利用,综合能源系统增设的控制器及控制系统进一步增加了动态过程的复杂度。

1.4 综合能源系统动态模型

目前,国内外对综合能源系统仿真研究大多建立在稳态模型上。文献[16]建立了电网与天然气网耦合运行时的稳态多能流模型。文献[17]研究了电网与供热网络的联合稳态多能流计算。文献[18-20]研究了电、热、气联合稳态多能流计算。文献[21]进一步考虑了时间尺度特性,提出了准稳态的多能流模型。文献[22]构建了计及天然气传输慢动态特性的电-气统一潮流模型,探究了电网-天然气网的相互作用特性。此类模型类似于电力系统所使用的潮流模型。然而,上述稳态模型仅考虑电、热、气各系统的静态特性,无法准确反映综合能源系统各种装备及网络暂态期间的运行情况。

与综合能源系统稳态模型不同,综合能源系统动态模型需考虑系统和设备详细的动态特性(如电力电子器件的非线性动态特性、热力管道的散热特性、天然气管道气体的可压缩特性),具备准确刻画系统从微秒级到分钟级动态过程的能力。综合能源系统动态模型可用于:1)研究系统和设备的动态特性;2)故障模拟,研究故障场景与故障传播机制;3)耦合暂态仿真,如不同能源系统的相互作用和影响机理;4)控制系统闭环测试,验证设备级和系统级调控策略有效性;5)分析系统稳定性。

1.5 问题与挑战

综合能源系统是一个复杂、强刚性的动态系统。为实现准确、高效的综合能源系统动态仿真,需

开展下述3个关键层面的研究。

1.5.1 多能耦合动态建模理论

综合能源系统各类元件精细化建模是实现综合能源系统动态仿真的基础。在综合能源系统中,电、热、气异质能源系统动态特性差异大,动态建模方法各有不同^[23-25]。目前,单一能源网络及其相关设备的建模研究已比较充分。但如何在已有的能源系统建模框架下,采用统一的数学描述形式,对异质能源网络不同时空尺度的动态过程及能源转换装置的多能耦合机理进行建模是亟须解决的关键问题。

1.5.2 协同仿真算法

在综合能源系统中,不同能源网络动态过程相互耦合且复杂多变,表现出多时间尺度特性。在系统的某一区域或位置可能关注快速动态,而其他区域则着重分析慢速动态。同时,不同速率的动态过程在时间轴上可能交替出现。如果综合能源系统全网全过程只采用单一固定仿真步长进行动态仿真,则仿真效率与准确性难以兼顾。在保证准确度的前提下提高仿真效率,需要设计适用于不同结构的综合能源系统多速率协同仿真算法。

1.5.3 高效数值计算方法

电网元件暂态模型多通过常微分方程表示。热网和天然气网元件动态模型则需要考虑空间上的场分布,多为偏微分方程。例如,热力管网的流体传热过程可通过二阶抛物型偏微分方程描述^[26];天然气管网的气体流动过程可通过一阶二元偏微分方程组描述^[27]。考虑到综合能源系统元件模型表示方法和不同能源网络时间常数的差异性,综合能源系统动态过程仿真需要处理大规模常微分和形式不一的偏微分方程长过程求解问题。高效、稳定的数值计算方法是提高综合能源系统动态仿真精度与速度的关键。

2 综合能源系统动态建模方法研究进展

针对不同类型能源系统的动态过程,学界工业界常采用不同的建模方法和工具进行仿真分析。本章首先分别对电力系统、热力系统、天然气系统动态建模理论进行总结与归纳;在此基础上,介绍了综合能源系统动态建模方法最新研究进展。

2.1 电网暂态建模方法

电网的暂态建模方法是:基于欧姆定律、基尔霍夫电流和电压定律,通过常微分方程描述电网的暂态运行特性,采用数值积分方法(如梯形积分法)构建离散时间模型^[28]。电网暂态模型可分为两大类:机电暂态模型与电磁暂态模型。机电暂态模型主要用于分析电力系统稳定性,只能反映系统工频特性

与低频振荡等特性。与机电暂态模型不同,电磁暂态模型能够准确地刻画电网的高频动态特性,可用于激磁涌流、开关动作等高频暂态过程仿真,是针对电网仿真精度最高的模型。国内外常用的电网电磁暂态仿真软件有 EMTP-RV^[29]、PSCAD^[30] 和 CloudPSS^[31]。

综合能源系统电网区域含有大量可再生能源、储能等电力电子设备,精确计及开关动作的动态过程对仿真结果具有至关重要的影响。然而电磁暂态模型复杂度高,仿真步长多在微秒级。当使用电磁暂态模型进行暂态仿真时,计算规模大、仿真耗时长。为了提升电网电磁暂态仿真效率,国内外学者探索了3种不同的解决思路:动态相量法^[32]、平均化建模^[33]和移频分析建模^[34-39]。

动态相量法基于时变傅里叶级数,通过构造多个不同频段的微分方程描述系统的动态过程。动态相量法虽可实现较大步长的仿真,但仿真准确性取决于相量的选择。平均化建模主要针对电力电子系统,通过忽略高频纹波,利用原始信号的平均值信号进行等效。动态相量法和平均化建模本质上都是通过牺牲仿真精度来提升电磁暂态仿真效率。移频分析建模采用希尔伯特变换,构造基于解析信号的电磁暂态模型,通过对解析信号的频率进行偏移处理,改变系统暂态响应特性的频谱分布,实现较大仿真步长下的准确仿真。移频分析建模方法保留了电磁暂态模型完整的动态特性,可以处理各类非线性过程,是一种无损的建模方法,获得了IEEE电力系统建模工作组的认可与推荐^[40]。

2.2 热网与天然气网动态建模方法

热网的状态变量(如温度、压强)与时间及管道距离相关,热网的动态过程可用偏微分代数方程组进行描述^[41]。热网模型基于管道压力损失方程、节点流量方程和压力方程构建。常用的热网动态模型有节点法模型^[42]和数值模型^[43]。节点法模型只能计算热力管网每个节点的温度,无法获得管道的温度分布。数值模型可计算热力管道不同位置的温度。相对于节点法模型,数值模型准确度更高,然而计算复杂度也显著增加。常用的热网仿真软件有 Dymola/Modelica^[44]、ANSYS Fluent^[45] 和 TERMIS^[46]。

天然气网的状态受质量守恒、动量守恒、能量守恒以及气体状态方程等多个物理规律支配。与热网模型相似,气网模型数学本质上是偏微分代数方程组^[47]。针对不同的管道工况,气网动态模型主要分为动态等温和动态非等温2种。文献[25]构建了动态等温天然气管网模型。文献[48-49]构建了动态

非等温气体网络模型。常用的天然气网的动态仿真软件有 TGNET^[50]和 SPS^[51]。

2.3 综合能源系统动态建模方法

综合能源系统模型主要由能源网络模型和耦合单元模型2个部分组成。前者主要用于描述系统中能量的输送和分配等行为的模型,如管网模型、负荷模型;后者主要用于描述系统中能量转换行为的模型。

2.3.1 综合能源系统网络建模方法

综合能源系统网络建模存在2种思路:混合建模和通用建模。文献[52-53]针对电、热、气网动态特性不同的特点,提出了一种综合能源系统混合建模方法,主要思想是构建一个特定的模型接口,将不同能源领域的仿真软件连接起来实现联合建模。然而,由于建模机理不同,不同建模方法和积分时序会导致数据接口形式不一致,在能源系统接口处易产生数据交互误差。

通用建模方法旨在通过一般性表达描述系统动态特性,并在同一仿真框架下构建动态模型。文献[54]对换热系统进行了电路类比,成功运用电路方法分析了换热系统的运行与优化问题。文献[55-56]对供热网络进行了电路类比,并分别应用于潮流分析和端口等值。文献[57-60]基于电路比拟法和能量守恒方程,以天然气网络和供热网络为研究对象,推导了等值气路模型和等值热路模型,实现将电力网络分析方法,应用于指导其他能源网络的分析。上述工作将电网建模理论推广应用到供热网络与天然气网络中,有助于突破电力系统、热力系统、天然气系统不同学科之间的知识壁垒。

国外已出现一些可用于综合能源系统网络规划运营、设计分析的软件,如 RETScreen^[61] 和 EnergyPlan^[62],但尚未有通过测试被工业界或学术界广泛接受或认定的综合能源系统动态仿真软件。

2.3.2 耦合单元建模方法

能源转换装置是实现电、热、气多种能源耦合的关键单元。常见耦合单元建模方法有:能量枢纽模型、数学模块模型和等效电路模型。本节以固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)为例,简要介绍上述3种耦合元件建模方法。

1) 能量枢纽模型

图2为能量枢纽模型的结构图。能量枢纽模型将电、热、气等能源之间的转换、传输、存储等各类耦合关系抽象为输入能源和输出负荷端口的线性耦合矩阵^[63]:

$$P_{\text{out}} = CP_{\text{in}} \quad (1)$$

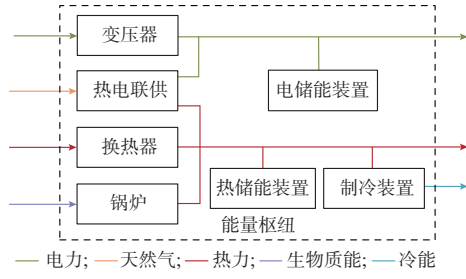


图2 典型能量枢纽模型结构
Fig. 2 Structure of typical energy router model

$$C = \begin{bmatrix} C_{\alpha\alpha} & C_{\beta\alpha} & \cdots & C_{\zeta\alpha} \\ C_{\alpha\beta} & C_{\beta\beta} & \cdots & C_{\zeta\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{\alpha\zeta} & C_{\beta\zeta} & \cdots & C_{\zeta\zeta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： $P_{in} = [P_{in,\alpha} \ P_{in,\beta} \ \cdots \ P_{in,\zeta}]^T$ 为输入矩阵； $P_{out} = [P_{out,\alpha} \ P_{out,\beta} \ \cdots \ P_{out,\zeta}]^T$ 为输出矩阵； C 为该模型不同能源之间的耦合关系矩阵。

SOFC为单输入多输出能源转换装置,其输入为燃气,输出为电能和热能。该元件的能量枢纽模型如图3所示。其中 $P_{in,gas}$ 为输入, $P_{out,elec}$ 和 $P_{out,heat}$ 为输出。输入和输出满足下述耦合关系:

$$[P_{out,elec} \ P_{out,heat}] = [C_{g,e} \ C_{g,h}] P_{in,gas} \quad (3)$$

式中： $C_{g,e}$ 和 $C_{g,h}$ 为该装置的转换效率。



图3 SOFC能量枢纽模型
Fig. 3 Energy router model of SOFC

能量枢纽模型将设备内部复杂的多能耦合特性简化为线性矩阵,主要用于反映能源在转换环节的静态关系。

2) 数学模块模型

能源转换装置内部不同能源子系统之间存在较强耦合关系,导致不同类型能源变量计算相互耦合,其一般形式的表达式为:

$$\begin{cases} p_\alpha(t) = f_x(p_\beta(t), T_m(t), e_v(t)) \\ T_m(t) = f_y(p_\alpha(t), T_n(t), e_v(t)) \\ e_v(t) = f_z(p_\alpha(t), T_m(t), e_c(t)) \end{cases} \quad (4)$$

式中： $p_\alpha(t)$ 和 $p_\beta(t)$ 为与燃气系统相关的状态变量； $T_m(t)$ 和 $T_n(t)$ 为与热力系统相关的状态变量； $e_c(t)$ 和 $e_v(t)$ 为与电力系统相关的状态变量； f_x 、 f_y 和 f_z 分别为燃气系统、热力系统和电力系统状态变量之间的耦合关系。若考虑强非线性耦合关系,则式(4)难以直接求解。

针对上述难题,文献[64-65]将SOFC模型按照

物理边界划分为电气子系统、热力子系统和气动子系统,具体如图4所示。子系统模型通过微分代数方程组描述。采用电力系统-控制系统联合建模思想^[66],通过引入单个步长延时,实现不同子系统计算解耦,如图5所示。使用 $t - \Delta t$ 时刻的已知数值近似替代 t 时刻的未知数值(Δt 为时间步长),电气子系统、气动子系统和热力子系统可实现顺序求解。基于上述思想,文献[64]在MATLAB/Simulink环境下采用基本数学模块对SOFC多时间尺度动态进行了建模和求解。与能量枢纽模型不同,该模型考虑了元件内部耦合机理,可准确描述燃料电池内外部动态特性。

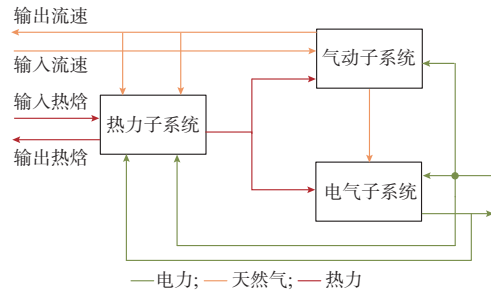


图4 SOFC子系统模型结构框图
Fig. 4 Block diagram of SOFC subsystem model structure

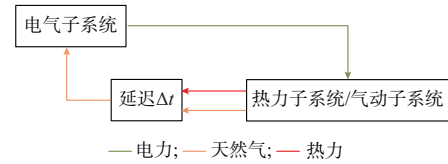


图5 基于单个步长延时的SOFC模型求解时序示意图
Fig. 5 Schematic diagram of solution sequence in SOFC model with single-step time delay

3) 等效电路模型

为了提供与电网暂态模型更好的模型接口,文献[67-68]在文献[64]的基础上,采用基本电路元件建立了SOFC动态模型。以燃料电池的热力子系统为例,说明耦合元件等效电路建模原理。固体燃料电池的热力方程可表示为^[41,69]:

$$C_{th} \frac{dT_{fc}}{dt} = H_{I_{fc,H_2}} + H_{I_{fc,O_2}} - H_{I_{fc,H_2O}} - Q_{conv,an} - Q_{conv,ca} - P_e \quad (5)$$

$$Q_{conv,an} = Nk_{an} A_{an} (T_{fc} - T_{n,an}) \quad (6)$$

$$Q_{conv,ca} = Nk_{ca} A_{ca} (T_{fc} - T_{n,ca}) \quad (7)$$

$$P_e = V_{fc} I_{fc} \quad (8)$$

式中： V_{fc} 和 I_{fc} 分别为燃料电池的端电压和输出电流； P_e 为燃料电池的输出功率,在燃料电池中起到冷却的作用； T_{fc} 为燃料电池堆温度； C_{th} 为燃料电池

的热容; H_{I_{fc}, H_2} 、 H_{I_{fc}, O_2} 和 H_{I_{fc}, H_2O} 分别为燃料电池中氢气、氧气和水的焓值, 这些焓值大小与气体流速有关^[41, 69]; $Q_{conv, an}$ 和 $Q_{conv, ca}$ 分别为燃料电池固体区域到阳极流体区域和阴极流体区域的对流传热; $T_{n, an}$ 和 $T_{n, ca}$ 分别为管道内阳极流体和阴极流体的温度; k_{an} 和 k_{ca} 分别为阳极流体和阴极流体的对流换热系数; A_{an} 和 A_{ca} 分别为阳极和阴极的面积; N 为燃料电池数量。

根据表1将电气量与热力变量进行类比, 然后可用图6所示的等效电路表示式(5)中的热力方程。由于采用等效电路建模, 可实现与2.3.1节的基于电路比拟法的综合能源系统网络模型直接连接。

表1 电气量与热力变量类比
Table 1 Analogies between electrical and thermal quantities

类型	电路	热路
势	电压	温度
流	电流	热传导率
阻	电阻	热阻
容	电容	热容

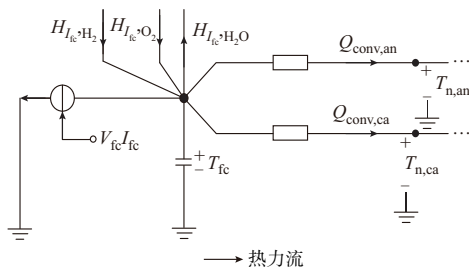


图6 SOFC热力子系统等效电路模型
Fig. 6 Equivalent circuit model for thermal subsystem in SOFC

2.4 综合能源系统动态建模技术难点

从上述分析可以看出, 综合能源系统动态建模方法已取得较大进展。随着综合能源技术的不断推广, 系统运行场景日益复杂。综合能源系统动态建模层面尚有如下技术难点需要解决。

1) 动态模型前提假设与参数设定问题

对于综合能源系统中的各类设备或子系统, 需要选择适用于动态建模的前提假设条件。这些假设直接影响了模型暂态期间的动态行为。例如: SOFC模型毫秒级时间尺度动态仿真需考虑电池的双电层电容效应; 秒级时间尺度动态仿真需考虑电池进气口压力的影响; 分钟级及以上时间尺度动态仿真需考虑电池温度对其动态特性的影响^[64]。综合能源系统需考虑电、气、热等因素, 其动态建模前提假设条件较单一能源系统更为复杂。此外, 综合

能源系统模型中存在大量的设备参数(如热容、换热系数等)需要设定。如何选取较为贴近实际的前提假设条件与模型参数是动态建模的难点。

2) 非连续性事件通用动态建模问题

已有事故表明^[5], 综合能源系统热网、天然气管网的非连续性事件(如管道泄漏与冰堵、开关阀动作)是引起综合能源系统复杂动态过程产生的主要原因。虽然已有部分文献基于特定的流体仿真软件对泄漏时管道内流动情况进行了建模^[70], 但如何基于已有的电路类比、统一能路等通用建模方法实现对综合能源系统的非连续性事件建模是需要解决的一个技术难点。

3) 变工况动态建模问题

综合能源系统各设备通常具有非线性工作特征, 系统状态的变化可能导致设备处于变工况运行状态, 使其运行特性发生改变。例如, 气体/水流的质量流量对换热器的换热系数有较大的影响, 储气罐内空气与罐壁传热会引起储气罐压力发生变化。仅考虑单一工况的设备运行特性(如恒流速的热力学特性或恒温动力学特性), 难以满足复杂场景精确仿真的需求。因此, 需要解决变工况带来的建模问题。

3 综合能源系统协同仿真方法研究进展

电网的动态过程时间常数小于热网和天然气管网。为了实现高效的综合能源系统仿真, 分区多速率协同仿真是研究综合能源系统多时间尺度动态最有效的手段。

3.1 电力系统暂态多速率仿真技术

电力系统电磁暂态多速率仿真技术已发展多年。文献[71]提出了节点撕裂法, 通过“撕裂”部分节点将系统划分为多个子系统; 针对不同子系统, 采用不同仿真步长计算快-慢电磁暂态过程。文献[72]提出了多区戴维南等值(multi-area Thevenin equivalent, MATE)方法, 通过任意支路拆分电力网络。文献[73]在MATE的基础上将子网络继续进行分块, 提出了多层MATE的方法并应用于控制系统和非线性元件的仿真。文献[74]提出了基于Latency技术的多速率电磁暂态仿真方法, 在慢动态系统一个步长内, 通过内插对快动态系统等值, 提高仿真精度。文献[75]提出了长输电线路解耦法, 通过传输线电磁暂态模型实现系统分区仿真。文献[76]提出了基于特征值分析的配电网多速率暂态仿真方法, 并对分区接口数值精度等性能进行了评估。

3.2 综合能源系统分区多速率仿真技术

目前, 对于综合能源系统分区多速率协同仿真

虽有一些研究,但主要停留在理论层面。如文献[77]提出的方案:对电网和热-气网分别采用机电暂态程序与稳态模型程序进行混合仿真;按照不同的能源属性划分分区,针对不同的能源网络,采用不同的计算步长进行交互以提高计算效率。文献[78]提出了按不同的仿真模式划分原则,充分利用成熟的模型和求解方法,依据建模和求解方法划分网络,根据研究需要在不同位置任意选择接口,并按照建模方程和算法联立融合。文献[79]讨论了电-气耦合系统多时间尺度仿真方案,参考电力系统中机电-电磁混合仿真,整体上慢速的天然气系统采用大步长仿真,电力系统则采用小步长的机电暂态仿真,两者在大步长时同步并交换数据。文献[80]提出了综合能源系统混合时间尺度运行调度方法,采用与气网、热网动态过程相匹配的模型分辨率刻画能流动态过程。文献[81-82]提出了基于奇异摄动理论小型综合能源系统的多时间尺度仿真方法,电网状态变量、气网状态变量和热网状态变量分别采用不同的时间步长进行计算。文献[83]提出了一种基于投影积分的电-气耦合园区综合能源系统的动态仿真方法,通过对投影积分整体架构与仿真步长合理设计实现了在多场景下的快速、稳定求解。文献[84]提出了基于MATLAB和PSCAD的电-气综合能源系统全动态多速率联合仿真算法。文献[85]提出了一种半实物仿真方法,电气部分采用数字仿真,而与电气系统耦合密切的供能环节则采用实物模拟。

3.3 综合能源系统分区多速率仿真技术难点

本节介绍了电力系统与综合能源系统多速率仿真技术的研究现状。电力系统多速率仿真研究较为成熟,而综合能源系统多速率仿真技术研究起步较晚,主要针对较小规模的系统。为了使多速率仿真技术能够应用于大规模、长时间综合能源系统仿真,还需针对以下技术难点开展研究。

1) 分区接口处理问题

综合能源系统分区多速率仿真需要选择合适的分区接口位置。现有分区划分原则过于粗放,通常以物理系统的边界作为分区依据。由于耦合元件和控制算法的存在,近耦合元件的热网区域、气网区域时间尺度显著缩小,与电网的动态响应时间接近^[3,67]。因此,需要寻找合理的指标指导接口位置的选择。另外,异质能源时间尺度跨度非常大,与电磁-机电多速率仿真分区相比,综合能源系统不同分区的仿真步长差距更大。接口数据交互过程存在的延迟、误差累积等问题将更为突出。分区接口处理是综合能源系统多速率仿真技术难点之一。

2) 含电力电子装备的综合能源系统长过程仿真问题

综合能源系统中的热力网络与天然气网络动态过程时间尺度较大。这导致综合能源系统动态仿真需要处理长过程仿真问题。综合能源系统电网侧通常含有大量电力电子设备和复杂的控制系统。虽然已有部分建模方法(如平均化、移频建模方法)有效提高了电力电子设备暂态模型的仿真步长,但电网长过程仿真计算成本仍然较大。这导致综合能源系统整体仿真效率依然较低。

4 综合能源系统数值计算方法研究进展

综合能源系统不同子系统动态特性差异大,系统呈现强刚性特性。因此,综合能源系统动态仿真依赖低截断误差、高稳定性的数值计算方法。

4.1 电力系统暂态数值计算方法

电力系统暂态仿真所采用数值算法主要为具有A-稳定性的隐式梯形积分法^[28]。然而,隐式梯形积分法不是L-稳定,没有能量耗散性,即不具备阻尼特性。因此,在电磁暂态数值计算过程中,当发生开关元件动作等情况时,使用隐式梯形积分方法会产生数值振荡。

为解决数值振荡问题,文献[86]提出了根匹配法,但该方法对指数函数的高精度计算涉及迭代过程,计算量较大,实际应用受到限制。文献[87]提出了临界阻尼调整(critical damping adjustment, CDA)法,即在系统突变现象发生时刻,采用2个半步长的具有L-稳定性的隐式欧拉法进行数值积分,从而消除数值振荡,提高数值稳定性。文献[88]提出了一套具有L-稳定的二阶段隐式龙格库塔(2-stage diagonally implicit Runge-Kutta, 2s-DIRK)法。相较于CDA法,该方法主要优点是电磁暂态计算期间无需对突变现象进行检测或判断。

上述积分算法主要针对线性微分方程。文献[89]提出了一套具有非线性B-稳定性的二阶段三阶龙格库塔法,并在电磁暂态仿真中得到验证。与A-稳定不同,B-稳定主要用于分析非线性微分方程稳定性问题^[90]。为了兼顾电磁暂态计算的精度和效率,并且有效抑制数值振荡,文献[91]将同时具有L-稳定性和B-稳定性的高阶Radau IIA积分方法应用于电磁暂态仿真。

4.2 热网与天然气网动态数值计算方法

目前,面向热网与天然气网模型主要的数值计算方法包括有限差分法、有限体积法和有限元法。

有限差分法是将求解域离散为差分网格,以有限个网格点来代替连续的求解域,用网格点上的差

商来近似代替网格点上的空间导数,从而将原来的微分方程转化为以网格节点上的场值作为未知量的代数方程组,然后进行求解。从是否对时间进行离散来划分,有半离散格式和全离散格式。采用半离散格式时,只离散空间导数,原偏微分方程转化为常微分方程。从差分形式来划分,可分成隐式格式和显式格式。从格式精度划分,有一阶、二阶和高阶格式。表2给出了这几种热传导方程离散格式的性能对比。可以看出,隐式差分格式稳定性不受时间步长与空间步长的影响;差分格式阶数越高,计算的复杂度随之提升。有限差分法发展较早,相关收敛性和稳定性理论较为成熟。文献[92]研究了不同差分格式和差分步长对热力网络模型准确度的影响。为提高数值精度和稳定性,文献[93]对传统的有限差分法进行了改进,提出了非标准有限差分法。文献[94]针对热传导涉及的对流扩散方程,提出了非标准格式的高精度紧致差分方法,通过对现有低阶格式进行截断误差分析,修正原低阶格式的系数,降低截断误差。

表2 热传导方程常见差分格式性能比较
Table 2 Performance comparison of common differential formats for heat conduction equations

差分格式	格式精度	计算复杂度	稳定性
古典显格式	一阶	低	有条件稳定
古典隐格式	一阶	低	无条件稳定
Crank-Nicolson隐式格式	二阶	较高	无条件稳定

有限体积法基本思路是:首先,将计算区域划分为一系列不重复的控制体积,并使每个网格点周围有一个控制体积;然后,将待解的微分方程对每一个控制体积积分;最后,对积分式进行离散化处理,得到关于未知函数的代数方程。文献[95-96]分别提出了基于有限体积法的热网和天然气网动态模型。与有限差分法不同,有限体积法所划分的每一个网格都需满足能量守恒、质量守恒和动量守恒,离散后的方程有较明确的物理意义,更适合处理复杂边界问题。

有限元法的基本思想是将计算区域划分为有限个互不重叠的单元。首先,在每个单元内,选择一些合适的节点作为求解函数的插值点,单元上所作用的力等效到节点上;然后,将微分方程中的变量改写成由各变量或其导数的节点值与所选用的插值函数组成的线性表达式;最后,基于变分原理或加权余量法,对微分方程进行离散求解。文献[24]和文献[97]基于有限元法分别建立了热网和天然气网动态模型。有限元法适用性强、精度较高,但求解过程复

杂,计算量大。

4.3 综合能源系统数值计算方法技术难点

基于上述调研成果可知,针对单一类型微分方程或单一能源网络的数值计算方法研究已较为充分。然而,如何将已有的数值计算方法应用于2.3节介绍的综合能源系统动态模型有待进一步研究完善。通用建模层面的数值求解仍存在理论问题,具体如下。

1) 通用建模框架下数值离散格式及离散步长选择问题

综合能源系统通用建模方法的核心思想是通过数值计算方法将偏微分方程离散为常微分或代数方程,进一步通过电气量类比构建动态模型。在上述过程中,数值求解格式与离散步长的选择对于模型的准确性和稳定性尤为重要。模型的精度取决于离散格式和离散步长。高阶的离散格式和较小的步长往往意味着更大的计算量。此外,还需考虑通用建模框架下可能存在的数值振荡问题。面对涉及多能耦合、多类型微分方程的综合能源系统通用动态模型求解,如何选择合适的离散格式和离散步长是未来进一步发展通用建模理论所需解决的技术难题。

2) 初值和边界条件设置问题

偏微分方程数值求解需要考虑初值和边界条件问题。因此,初值和边界条件的设置对于综合能源系统暂态问题的求解十分关键。不合适的初值会导致模型达到稳态所需的时间非常漫长,而不适合的边界条件会导致综合能源系统动态仿真失稳。初值和边界条件的设置问题极大地限制了相关技术走向实用。

5 综合能源系统动态仿真的研究方向及建议

考虑上文讨论的综合能源系统动态仿真的技术难点,本章提出以下研究思路供参考。

1) 多能耦合动态建模方法

针对动态模型前提假设与参数设定问题,可根据物理实体运行机理及特点,确定前提假设需考虑的因素。通过仿真模拟各设备的特性曲线,调整不同前提假设对应的物理方程,得到与实测特性曲线或规律相近似的前提假设。进一步,可引入参数辨识技术,通过仿真模拟各设备的输出状态,对比模拟所得状态与实际量测之间的差别,通过调整模型的参数减小两者之间的差别,从而确定模型参数。

针对非连续性事件通用动态建模难题,可从非连续性事件产生机理出发,根据其物理规律(如采用流体力学作为管道泄漏建模的理论基础),经过适当

的简化,建立相关数学模型。在此基础上,借鉴已有的电气量类比等方法,进一步拓展通用建模方法的适用范围。

变工况动态建模方面,可采用“主导因素法”建模。基于机理分析和实际运行数据,研究各个设备的特性参数,确定对特性参数起决定性作用的主导因素。根据实际运行数据建立设备特性参数与主导因素之间的映射关系。在恒定工况通用模型的基础上,依据该映射关系构建变工况动态通用模型(如采用查表法)。此外,可采用基于数据驱动的动态等值建模方法,将综合能源系统中通过机理分析建模较为困难的区域设置为等值区域,保持非等值区域的网络拓扑不变。在非等值区域内设置多种扰动(如阶跃、切换、故障)和不同运行工况(如不同质量流量、温度),形成动态数据样本集。利用数据驱动型建模方法(如机器学习),分析得到等值区域输入与输出之间的依赖关系,建立可近似表征原系统动态特性的等值模型。

2) 多速率分区仿真技术的应用

多速率仿真分区接口处理方面,主要解决思路是根据综合能源系统不同节点的时频响应特性或特征值分析设置仿真分区;研究分区接口误差的本质原因与传播机制,选择合适的数据交互方式,基于分解协调计算理论或接口变量预测技术,消除或降低分区数据交换机制引入的数值误差。

针对含电力电子装置的综合能源系统长过程仿真效率低的问题,主要解决思路是基于离散事件状态驱动建模方法进一步提高考虑电力电子开关特性模型的计算效率。同时,可考虑综合能源系统不同设备模型的差异性,结合图形处理单元(graphical processing unit, GPU)的细粒度并行特点,在GPU中设计异构计算核函数,引入并行计算技术,进一步提升各个分区内的仿真效率。此外,可以考虑采用高效的数学求解器(如KLU和NICSLU)对系统的节点方程等进行求解。

3) 动态仿真数值计算方法的应用

针对通用建模框架下离散格式及离散步长选择问题,可研究不同离散格式下典型综合能源系统设备模型离散化形式。通过仿真分析,研究不同离散方法的单步误差、长时间仿真下的全局误差及计算效率的变化,基于误差估计方法分析离散步长与误差之间的关系,进而形成兼顾仿真精度和计算效率的典型设备模型离散格式及离散步长选择方法。此外,还可以研究面向分区仿真的混合数值求解方法。多能耦合较为紧密的区域可以考虑采用高阶的数值计算方法;动态变化较慢的区域可以采用低阶

的数值计算方法,提高计算效率。

初值和边界条件设置方面,可根据稳态潮流数据计算暂态初始条件。依据不同设备模型的潮流计算结果设置模型的初值和边界值。进一步,可考虑各个设备拓扑连接关系,研究分阶段分网分区的初值和边界值设置方法。

除上述研究方向之外,仿真模型优化(如模型降维技术),仿真平台构建(如仿真平台计算架构),硬件接口设计(如与实时仿真装置接口、半实物仿真接口、数模仿真接口)也是未来综合能源动态仿真技术发展的重要研究方向。

6 综合能源系统动态仿真技术应用前景

当前,多个园区综合能源系统和城市能源互联网示范项目已经在中国北京、江苏等经济发达地区开展。随着综合能源系统数量和规模的不断增加,系统安全运行问题日益突出,如 $N-1$ 故障、级联故障和多重同时故障等。这些都是综合能源系统建设时需要深入研究的内容。而上述工作的开展依赖于准确高效的动态仿真。综合能源系统动态建模仿真不仅为系统安全稳定运行提供必要的基础分析工具,还可为系统优化设计、故障恢复策略等研究提供重要参考依据。

另外,综合能源系统动态仿真可应用于能源互联网数字孪生技术。对能源互联网物理系统的准确数字建模与高效仿真模拟是能源互联网数字孪生的关键环节之一。首先,通过仿真结果分析对物理系统的未来发展进行预测和推演;然后,将预测得到的信息反馈给物理系统;最后,通过调控改变物理系统的行为特征。数字模型需基于实体对象遵循的物理规律建立(如基于时空相关偏微分方程组的气、热系统动态模型)^[98]。而本文介绍的考虑时空动态特性的综合能源系统动态模型可为能源互联网数字孪生的实现提供必要的技术支撑^[99]。

7 结语

动态建模仿真是指导综合能源系统设计、保障系统安全运行的重要手段。本文从综合能源动态仿真研究的需要出发,回顾了综合能源系统的结构和动态过程的时空特性的研究,对动态建模仿真存在的问题进行探讨。最后,从建模理论、仿真技术、数值计算方法3个层面,综述、总结了已有文献,介绍了综合能源系统多时间尺度动态仿真研究取得的进展。

随着综合能源系统的不断发展,必将对多能网络联合仿真在增加仿真系统规模、提高仿真速度与

准确性等方面提出更高的要求。针对综合能源系统动态仿真所面临的建模方法、仿真技术、数值求解算法等关键问题,本文简要探讨了可能的解决方案,提出了后续研究工作的建议。

本文在撰写过程中得到国家自然科学基金项目(51861135312)、电力系统国家重点实验室课题(SKLD20M04)和中国农业大学“2115”人才工程的资助,特此感谢!

参考文献

- [1] 孙宏斌,潘昭光,郭庆来.多能流能量管理研究:挑战与展望[J].电力系统自动化,2016,40(15):1-8.
SUN Hongbin, PAN Zhaoguang, GUO Qinglai. Energy management for multi-energy flow: challenges and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 1-8.
- [2] 吴建中.欧洲综合能源系统发展的驱动与现状[J].电力系统自动化,2016,40(5):1-7.
WU Jianzhong. Drivers and state-of-the-art of integrated energy systems in Europe[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 1-7.
- [3] XIE D, CHEN A K, GU C H, et al. Time-domain modeling of grid-connected CHP for its interaction with the power grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6430-6440.
- [4] 李聪睿.含气网和热网的配电网电压稳定分析[J].电气自动化,2019,41(3):78-80.
LI Congrui. Analysis of voltage stability of distribution networks containing gas and heating networks[J]. Electrical Automation, 2019, 41(3): 78-80.
- [5] HIBBARD P J, SCHATZKI T. The interdependence of electricity and natural gas: current factors and future prospects[J]. The Electricity Journal, 2012, 25(4): 6-17.
- [6] 德国柏林电力系统大崩溃[EB/OL].[2019-02-22].<http://m.chinasmartgrid.com.cn/mnews/20190222/632033.shtml>.
Power system collapsed in Berlin, Germany[EB/OL].[2019-02-22]. <http://m.chinasmartgrid.com.cn/mnews/20190222/632033.shtml>.
- [7] 零下16摄氏度,连续奋战14小时——新疆楚星公司打赢保电供热攻坚战[EB/OL].[2020-11-28].<https://www.oktoutiao.com/a/20191128543760.html>.
At minus 16 degrees Celsius, continuous battle for 14 hours—Xinjiang Chuxing Co., Ltd. won the battle for power supply and heating[EB/OL].[2020-11-28]. <https://www.oktoutiao.com/a/20191128543760.html>.
- [8] Texas' natural gas production just froze under pressure[EB/OL].[2021-02-17]. <http://www.theverge.com/2021/2/17/22287130/texas-natural-gas-production-power-outages-frozen>.
- [9] 曾鸣,刘英新,王星,等.区域综合能源系统仿真平台研发现状及技术路线初探[J].中国电力,2019,52(6):87-93.
ZENG Ming, LIU Yingxin, WANG Xing, et al. Research status and technical route of regional integrated energy system simulation platform[J]. Electric Power, 2019, 52(6): 87-93.
- [10] 黎静华,黄玉金,张鹏.综合能源系统多能流潮流计算模型与方法综述[J].电力建设,2018,39(3):1-11.
LI Jinghua, HUANG Yujin, ZHANG Peng. Review of multi-energy flow calculation model and method in integrated energy system[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(3): 1-11.
- [11] 王伟亮,王丹,贾宏杰,等.能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述[J].中国电机工程学报,2016,36(12):3292-3306.
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Review of steady-state analysis of typical regional integrated energy system under the background of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3292-3306.
- [12] 彭克,张聪,徐丙垠,等.多能协同综合能源系统示范工程现状与展望[J].电力自动化设备,2017,37(6):3-10.
PENG Ke, ZHANG Cong, XU Bingyin, et al. Status and prospect of pilot projects of integrated energy system with multi-energy collaboration [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 3-10.
- [13] 2019—2020年度全国电力供需形势分析预测报告[R/OL].[2020-12-03].<https://guangfu.bjx.com.cn/news/20200122/1038578.shtml>.
2019—2020 national electricity supply and demand situation analysis and forecast report [R/OL]. [2020-12-03]. <https://guangfu.bjx.com.cn/news/20200122/1038578.shtml>.
- [14] 2020—2026年中国热电联产行业市场现状调研及投资前景预测报告[R/OL].[2020-12-03].<https://wenku.baidu.com/view/0cc4f313091c59eef8c75fbfc77da26924c59608.html>.
2020—2026 China's combined heat and power industry market status survey and investment prospect forecast report [R/OL]. [2020-12-03]. <https://wenku.baidu.com/view/0cc4f313091c59eef8c75fbfc77da26924c59608.html>.
- [15] 封红丽.国内综合能源服务发展现状调研及发展建议[J].电器工业,2019(2):18-28.
FENG Hongli. Research on the status quo of domestic comprehensive energy service development and development suggestions[J]. China Electrical Equipment Industry, 2019(2): 18-28.
- [16] MARTINEZ-MARES A, FUERTE-ESQUIVEL C R. A unified gas and power flow analysis in natural gas and electricity coupled networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2156-2166.
- [17] 荆江平,吴奕,胡伟,等.电-热互联综合能源系统潮流计算的数值方法[J].电力建设,2020,41(2):58-66.
JING Jiangping, WU Yi, HU Wei, et al. Numerical calculation method for energy flow of combined electricity and heat networks [J]. Electric Power Construction, 2020, 41(2): 58-66.
- [18] 徐宪东,贾宏杰,靳小龙,等.区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3634-3642.
XU Xiandong, JIA Hongjie, JIN Xiaolong, et al. Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3634-3642.

- [19] LIU X Z, MANCARELLA P. Modelling, assessment and Sankey diagrams of integrated electricity-heat-gas networks in multi-vector district energy systems [J]. *Applied Energy*, 2016, 167: 336-352.
- [20] 郑展,张勇军.电-气-热一体化混合能源系统研究评述与展望[J].*广东电力*,2018,31(9):98-110.
ZHENG Zhan, ZHANG Yongjun. Research comment and prospect of electricity-natural gas-heat integrated hybrid energy system[J]. *Guangdong Electric Power*, 2018, 31(9): 98-110.
- [21] 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.
- [22] 苏洁莹,林楷东,张勇军,等.基于统一潮流建模及灵敏度分析的电-气网络相互作用机理[J].*电力系统自动化*,2020,44(2): 43-52.
SU Jieying, LIN Kaidong, ZHANG Yongjun, et al. Interaction mechanism of electricity-gas network based on unified power flow modeling and sensitivity analysis [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(2): 43-52.
- [23] DOMMEL H W. Digital computer solution of electromagnetic transients in single- and multiphase networks [J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1969, 88(4): 388-399.
- [24] GABRIELAITIENE I, BÖHM B, SUNDEN B. Evaluation of approaches for modeling temperature wave propagation in district heating pipelines [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2008, 29(1): 45-56.
- [25] RACHFORD H H, DUPONT T. A fast, highly accurate means of modeling transient flow in gas pipeline systems by variational methods [J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1974, 14(2): 165-178.
- [26] 张文生.科学计算中的偏微分方程有限差分法[M].北京:高等教育出版社,2006.
ZHANG Wensheng. Finite difference method for partial differential equations in scientific computing [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [27] CORREA-POSADA C M, SÁNCHEZ-MARTÍN P. Integrated power and natural gas model for energy adequacy in short-term operation [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(6): 3347-3355.
- [28] DOMMEL H. EMTP theory book[M]. Vancouver, Canada: Microtran Power System Analysis Corporation, 1992.
- [29] Electromagnetic transient program V4.2, EMTP-RV [EB/OL]. [2021-09-01]. <http://www.emtp-software.com>.
- [30] PSCAD/EMTDC V4.6.0 on-line help [EB/OL]. [2020-05-02]. <http://www.pscad.com>.
- [31] CloudPSS user's manual V2.0 [EB/OL]. [2020-05-02]. <http://www.cloudpss.net>.
- [32] STANKOVIC A M, SANDERS S R, AYDIN T. Dynamic phasors in modeling and analysis of unbalanced polyphase AC machines [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2002, 17(1): 107-113.
- [33] CHINIFOROOSH S, JATSKEVICH J, YAZDANI A, et al. Definitions and applications of dynamic average models for analysis of power systems [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, 25(4): 2655-2669.
- [34] ZHANG P, MARTI J R, DOMMEL H W. Shifted-frequency analysis for EMTP simulation of power-system dynamics [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 2010, 57(9): 2564-2574.
- [35] STRUNZ K, SHINTAKU R, GAO F. Frequency-adaptive network modeling for integrative simulation of natural and envelope waveforms in power systems and circuits [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 2006, 53(12): 2788-2803.
- [36] GAO F, STRUNZ K. Frequency-adaptive power system modeling for multi-scale simulation of transients [C]// IEEE PES General Meeting, July 25-29, 2010, Minneapolis, USA.
- [37] YE H, STRUNZ K. Multi-scale and frequency-dependent modeling of electric power transmission lines [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, 33(1): 32-41.
- [38] XIA Y, CHEN Y, YE H, et al. Multiscale induction machine modeling in the dq0 domain including main flux saturation [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2019, 34(2): 652-664.
- [39] XIA Y, CHEN Y, SONG Y K, et al. Multi-scale modeling and simulation of DFIG-based wind energy conversion system [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2019, 35(1): 560-572.
- [40] JALILI-MARANDI V, DINAHAHI V, STRUNZ K, et al. Interfacing techniques for transient stability and electromagnetic transient programs: IEEE Task Force on Interfacing Techniques for Simulation Tools [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, 24(4): 2385-2395.
- [41] MORAN M, SHAPIRO H, BOETTNER D. Fundamentals of engineering thermodynamics[M]. New York, USA: John Wiley & Sons Inc, 2010.
- [42] GABRIELAITIENE I. Numerical simulation of a district heating system with emphases on transient temperature behaviour [C]// 8th International Conference on Environmental Engineering, May 19-20, 2011, Vilnius, Lithuania.
- [43] WANG Y R, YOU S J, ZHANG H, et al. Thermal transient prediction of district heating pipeline: optimal selection of the time and spatial steps for fast and accurate calculation [J]. *Applied Energy*, 2017, 206: 900-910.
- [44] Dymola [EB/OL]. [2020-11-27]. <http://www.dynasim.se>.
- [45] AnsysFluent 2019 [EB/OL]. [2020-08-31]. <https://www.ansys.com>.
- [46] GABRIELAITIENE I, BÖHM 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.
- [47] PAMBOUR K A, BOLADO-LAVIN R, DIJKEMA G P J. An integrated transient model for simulating the operation of natural gas transport systems [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 28: 672-690.
- [48] OSIADACZ A, CHACZYKOWSKI M. Simulation of non-

- isothermal transient gas flow in a pipeline [J]. Archives of Thermodynamics, 2001, 22(1): 51-70.
- [49] ABBASPOUR M, CHAPMAN K S. Nonisothermal transient flow in natural gas pipeline[J]. Journal of Applied Mechanics, 2008, 75(3): 031018.
- [50] 杨光大. 天然气集输管网瞬态模拟软件 TGNET 及其应用[J]. 天然气与石油, 1998, 16(1): 1-4.
YANG Guangda. Transient analog software TGNET for gas gathering pipeline and its application[J]. Natural Gas and Oil, 1998, 16(1): 1-4.
- [51] 苏欣, 章磊, 刘佳, 等. SPS 与 TGNET 在天然气管网仿真中应用与认识[J]. 天然气与石油, 2009, 27(1): 1-3.
SU Xin, ZHANG Lei, LIU Jia, et al. Application of SPS and TGNET in natural gas pipeline network simulation[J]. Natural Gas and Oil, 2009, 27(1): 1-3.
- [52] WU D, MA H W, ZHENG H. Key technology summary for integrated energy system hybrid simulation[C]// 2018 IEEE 2nd International Electrical and Energy Conference (CIEEC), November 4-6, 2018, Beijing, China.
- [53] 褚晓东, 张荣祥, 黄昊怡, 等. 全球能源互联网物理-信息系统协同仿真平台[J]. 山东大学学报(工学版), 2016, 46(4): 103-110.
CHU Xiaodong, ZHANG Rongxiang, HUANG Haoyi, et al. Synergetic physical-cyber simulation platform for global energy interconnection [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2016, 46(4): 103-110.
- [54] CHEN Q, FU R H, XU Y C. Electrical circuit analogy for heat transfer analysis and optimization in heat exchanger networks[J]. Applied Energy, 2015, 139: 81-92.
- [55] 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.
- [56] LAN T, STRUNZ K. Modeling of the enthalpy transfer using electric circuit equivalents: theory and application to transients of multi-carrier energy systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(4): 1720-1730.
- [57] SONG R K, XIA Y, DU S H, et al. Dynamic modeling of natural gas pipeline using electric circuit equivalents[C]// 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI²), October 30-November 1, 2020, Wuhan, China: 1512-1516.
- [58] YANG J, ZHANG N, BOTTERUD A, et al. Situation awareness of electricity-gas coupled systems with a multi-port equivalent gas network model[J]. Applied Energy, 2020(258): 114029.
- [59] 陈群, 郝俊红, 陈磊, 等. 电-热综合能源系统中能量的整体输运模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 7-13.
CHEN Qun, HAO Junhong, CHEN Lei, et al. Integral transport model for energy of electric-thermal integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 7-13.
- [60] 杨经纬, 张宁, 康重庆. 多能源网络的广义电路分析理论:(一) 支路模型[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(9): 21-32.
YANG Jingwei, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Analysis theory of generalized electric circuit for multi-energy networks: Part one branch model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9): 21-32.
- [61] SWARNKAR N M, GIDWANI L. Analysis of hybrid energy system for supply residential electrical load by HOMER and RETScreen: a case in Rajasthan, India [C]// 2016 International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), December 23-25, 2016, Jaipur, India.
- [62] VALDMANIS G, BAŽBAUERS G. Application of EnergyPlan modelling tool for comparative analysis of selected energy policies in case of Latvia [C]// 2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), October 7-9, 2019, Riga, Latvia.
- [63] GEIDL M, KOEPEL G, FAVRE-PERROD P, et al. Energy hubs for the future [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(1): 24-30.
- [64] WANG C S, NEHRIR M H. A physically based dynamic model for solid oxide fuel cells [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(4): 887-897.
- [65] WANG C S, NEHRIR M H, SHAW S R. Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(2): 442-451.
- [66] DUBÉ L, DOMMEL H W. Simulation of control systems in an electromagnetic transients program with TACS [C]// IEEE Power Industry Computer Applications Conference, May 24-27, 1977, Toronto, Canada.
- [67] LAN T, STRUNZ K. Multiphysics transients modeling of solid oxide fuel cells: methodology of circuit equivalents and use in EMTP-type power system simulation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(4): 1309-1321.
- [68] JIANG M Y, LAN T, XIA Y, et al. Implementation of equivalent circuit model of solid oxide fuel cells for multi-physics transients simulation using Simulink/SimPowerSystems [C]// 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI²), October 30-November 1, 2020, Wuhan, China.
- [69] NAGATA S, MOMMA A, KATO T, et al. Numerical analysis of output characteristics of tubular SOFC with internal reformer[J]. Journal of Power Sources, 2001, 101(1): 60-71.
- [70] 马弘毅, 闫宏伟, 李昕, 等. 流体管道小孔泄漏建模与仿真研究 [J]. 机电工程技术, 2015, 44(3): 15-17.
MA Hongyi, YAN Hongwei, LI Xin, et al. Research on modeling and simulation of fluid pipe small hole leakage [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2015, 44(3): 15-17.
- [71] STRUNZ K, CARLSON E. Nested fast and simultaneous solution for time-domain simulation of integrative power-electric and electronic systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 277-287.
- [72] MARTI J R, LINARES L R, CALVINO J, et al. OVNI: an object approach to real-time power system simulators [C]//

- 1998 International Conference on Power System Technology, August 18-21, 1998, Beijing, China: 977-981.
- [73] ARMSTRONG M, MARTI J R, LINARES L R, et al. Multilevel MATE for efficient simultaneous solution of control systems and nonlinearities in the OVNI simulator [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1250-1259.
- [74] MOREIRA F A, MARTI J R. Latency techniques for time-domain power system transients simulation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1): 246-253.
- [75] 穆清, 李亚楼, 周孝信, 等. 基于传输线分网的并行多速率电磁暂态仿真算法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(7): 47-52.
- MU Qing, LI Yalou, ZHOU Xiaoxin, et al. A parallel multi-rate electromagnetic transient simulation algorithm based on network division through transmission line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(7): 47-52.
- [76] 刘科研, 叶华, 裴玮, 等. 基于特征值分析的配电网多速率暂态仿真性能评估方法研究[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4088-4096.
- LIU Keyan, YE Hua, PEI Wei, et al. Research on computational performance of multi-rate transient simulation in distribution network based on eigen-value analysis [J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4088-4096.
- [77] XIA T, LIN Z H, PAN Z G, et al. Modeling and simulation for multi energy flow coupled network computing [C]// 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON), November 6-8, 2018, Guangzhou, China: 992-998.
- [78] 马凯琪, 吴迪, 郑灏. 综合能源系统混合仿真技术路线探讨[J]. 供用电, 2018, 35(7): 28-33.
- MA Kaiqi, WU Di, ZHENG Hao. A look at hybrid simulation technology for integrated energy system [J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(7): 28-33.
- [79] 李亚楼, 李芳, 刘赫川, 等. 基于PSASP的综合能源仿真分析系统[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2498-2506.
- LI Yalou, LI Fang, LIU Hechuan, et al. Framework design of simulation system for integrated energy systems based on PSASP [J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2498-2506.
- [80] 顾伟, 陆帅, 姚帅, 等. 综合能源系统混合时间尺度运行优化[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 203-213.
- GU Wei, LU Shuai, YAO Shuai, et al. Hybrid time-scale operation optimization of integrated energy system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 203-213.
- [81] XU X, JIA H J, CHIANG H D, et al. Dynamic modeling and interaction of hybrid natural gas and electricity supply system in microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1212-1221.
- [82] SHEN F, JU P, SHAHIDEHPOUR M, et al. Singular perturbation for the dynamic modeling of integrated energy systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 1718-1728.
- [83] 田伟堃, 于浩, 李鹏, 等. 基于投影积分的气-电耦合园区综合能源系统动态仿真方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11): 40-50.
- TIAN Weikun, YU Hao, LI Peng, et al. Projective integration-based dynamic simulation method for community integrated energy system with gas-electricity coupling [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 40-50.
- [84] 欧阳自强, 韩鹏飞, 严正, 等. 计及双向耦合的气-电综合能源系统全动态多速率联合仿真算法研究[J/OL]. 中国电机工程学报 [2021-09-25]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.211123>.
- OUYANG Ziqiang, HAN Pengfei, YAN Zheng, et al. Research on complete dynamic multi-rate co-simulation algorithm of integrated electric-gas energy system with two-way coupling [J/OL]. Proceedings of the CSEE [2021-09-25]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.211123>.
- [85] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207.
- JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.
- [86] WATSON N R, IRWIN G D. Comparison of root-matching techniques for electromagnetic transient simulation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 629-634.
- [87] LIN J M, MARTI J R. Implementation of the CDA procedure in the EMTP [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(2): 394-402.
- [88] NODA T, TAKENAKA K, INOUE T. Numerical integration by the 2-stage diagonally implicit Runge-Kutta method for electromagnetic transient simulations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1): 390-399.
- [89] 杨萌, 汪芳宗. 基于2级3阶单对角隐式Runge-Kutta法的电磁暂态计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 68-73.
- YANG Meng, WANG Fangzong. 2-stage 3-order diagonally implicit Runge-Kutta method for electromagnetic transient calculation [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 68-73.
- [90] 李寿佛. 刚性微分方程算法理论[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1997.
- LI Shoufo. Theory of computational methods for stiff differential equations [M]. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 1997.
- [91] WANG F Z, YANG M. Fast electromagnetic transient simulation for over-voltages of transmission line by high order Radau method and V-transformation [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(14): 3639-3645.
- [92] VIVIAN J, DE URIBARRI P M Á, EICKER U, et al. The effect of discretization on the accuracy of two district heating network models based on finite-difference methods [J]. Energy Procedia, 2018, 149: 625-634.
- [93] MICKENS R E. Nonstandard finite difference models of differential equations [M]. Singapore, Singapore: World Scientific, 1993.
- [94] 杨雪源, 王彩华, 齐海涛, 等. 对流扩散问题的一种紧致差分方法[J]. 水动力学研究与进展, 2008, 23(4): 426-437.
- YANG Xueyuan, WANG Caihua, QI Haitao, et al. A compact finite difference method for convection-diffusion problem [J].

- Chinese Journal of Hydrodynamics, 2008, 23(4): 426-437.
- [95] VEERSTEG H, MALALASEKERA W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method [M]. Zug, Schweiz: Pearson Schweiz AG, 1995.
- [96] QIU Y, GRUNDEL S, STOLL M, et al. Efficient numerical methods for gas network modeling and simulation[J]. Networks & Heterogeneous Media, 2020, 15(4): 653-679.
- [97] 李宏艳, 梁冰. 非等温气固耦合模型的有限元分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2004, 34(增刊1): 515-519.
LI Hongyan, LIANG Bing. The analysis of non-isothermal gas-solid coupled with finite element method [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2004, 34 (Supplement 1): 515-519.
- [98] 沈沉, 贾孟硕, 陈颖, 等. 能源互联网数字孪生及其应用[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 1-13.
SHEN Chen, JIA Mengshuo, CHEN Ying, et al. Digital twin of the energy internet and its application [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 1-13.
- [99] 白浩, 周长城, 袁智勇, 等. 基于数字孪生的数字电网展望和思考[J]. 南方电网技术, 2020, 14(8): 18-24.
- BAI Hao, ZHOU Changcheng, YUAN Zhiyong, et al. Prospect and thinking of digital power grid based on digital twin [J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(8): 18-24.
-
- 夏 越(1988—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统建模与仿真、综合能源系统动态建模与仿真。E-mail: xiayuexiayue@163.com
- 陈 颖(1979—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统动态仿真、并行和分布式计算。E-mail: chen_ying@tsinghua.edu.cn
- 杜松怀(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统分析、电力市场、剩余电流保护技术、农村智慧能源。E-mail: songhuaidu@cau.edu.cn
- 苏 娟(1980—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力市场、综合能源系统优化运行、电力需求侧管理。E-mail: sujuan@cau.edu.cn

(编辑 杨松迎)

Key Technologies for Multi-time-scale Dynamic Time-domain Simulation of Integrated Energy System

XIA Yue¹, CHEN Ying², DU Songhuai¹, SU Juan¹, LAN Tian³, SONG Ruikai¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

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

3. Global Energy Interconnection Research Institute Europe GmbH, Berlin 10623, Germany)

Abstract: In order to improve the energy efficiency, integrated energy systems (i.e. integrated electricity-heat-gas systems) attract increasing attention worldwide in recent years. Efficient and accurate multi-time-scale dynamic time-domain simulations play an essential role in the operation and control of the integrated energy system. Taking the dynamic modeling and simulation of the integrated energy system as the research object, the structure and dynamic process of integrated energy system is presented first in this paper. Then, this paper introduces the research progress achieved in the dynamic modeling and simulation technology of integrated energy system from three key points of basic model, simulation technology and numerical calculation, mainly including multi-energy coupling general modeling theory, partitioned multi-rate simulation technology, and efficient numerical calculation implementation method for heterogeneous energy networks. On this basis, the key challenges that still need to be solved in the existing research are discussed, such as dynamic modeling under variable operating conditions, multi-rate partitioning interface processing, and selection of numerical solution formats. Finally, the research directions and application scenarios of key dynamic modeling and simulation techniques for the future integrated energy system are prospected.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52007194).

Key words: integrated energy system; multi-time-scale; multi-energy coupling; dynamic time-domain simulation; multi-rate simulation

