

园区级综合能源系统优化模型功能综述及展望

黄子硕¹,何桂雄²,闫华光²,唐艳梅²

(1. 同济大学 建筑与城市规划学院,上海 200092;2. 中国电力科学研究院,北京 100192)

摘要:物理-数学模型是研究园区级综合能源系统生成与运行机制的基础工具。当前,园区级综合能源系统优化模型集中涌现,结合工程规划设计和系统运行核心需求对已有模型进行检视,有助于促进园区级综合能源系统模型体系的完善。基于园区供用能设施建设、运营核心需求差异的分析,指出宜根据工程项目所处的具体阶段确定相适应的建模粒度和精度,通过相互衔接的多模型体系而非一个大而全的模型满足工程需求。结合解析模型和数值优化模型的特征,归纳了2类模型在不同阶段应用的优缺点。基于园区级综合能源系统运行优化需要,探讨了运行优化中高鲁棒性调控模式的必要性,对优化调控模型的构建进行了展望。

关键词:多能互补;园区级综合能源系统;模型功能;鲁棒调控;综述

中图分类号:TM 71;TK 01

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202001013

0 引言

近年来,随着我国供用能形态的变化,供用能设施多头分散规划、条块分割管理、互不协调运行的弊端凸显,亟需新模式的统领。终端能源转换利用技术的进步以及信息采集传输、大规模计算分析成本的降低为跨越多时空尺度的多能源供用能链条纵向(阶段)与横向(范围)集成优化提供了条件。在供用能系统自身矛盾和外部技术进步内外因素的综合作用下,多能互补集成优化成为我国能源革命的重要抓手和突破口,是未来能源发展转型变革的方向^[1]。面向终端用户电、热、冷、气等多种用能需求,以常规能源和新能源协同高效利用为特征的园区级综合能源系统是其中重要的一环^[2]。

在上述背景下,需求侧多能源互补、多供用能主体互联互通、资源设施共享的供用能模式引发关注。特别是以可再生能源和化石能源为输入,同时提供冷、热、电等能源产品的综合能源系统建模理论和方法吸引了不同专业领域学者的关注,涌现了大量的综合能源系统仿真优化模型。文献[3]对用于区域能源系统综合规划的模型和工具进行了评述,指出了已有模型各自的特点和适用对象。文献[4]对已有模型的结构进行了分析和总结,梳理了这些模型的构建思路,分析了各模型的区域负荷预测、区域可再生能源资源利用潜力及系统优化的功能。文献[5]对利用能源集线器(energy hub)工具进行的综合能源系统建模研究进行了综述,指出了各类模型

的优势、缺陷及面临的挑战。文献[6]对社区综合能源系统优化模型和计算及工具的结构进行了梳理,指出了综合能源系统优化的基本思路。文献[7]按照源-网-荷的结构对能源互联网进行了划分,梳理了能源系统规划建模过程中负荷预测、能源转换系统描述以及潮流优化等方面的研究成果。文献[8]认为研究区域综合能源系统规划、设计、安全性、运行机制与系统运行控制的核心应为区域综合能源系统仿真理论与方法,指出了区域综合能源系统建模的一般思路,强调了基于量化分析模型进行综合能源系统建设实践的必要性,并指出了当前综合能源系统模型存在的问题。文献[9]综述了综合能源和能源互联网的相关研究,指出能源集线器模型可用于描述多种能源传输、转换过程中复杂的交互关系。文献[10]对面向可再生能源消纳的多能源系统研究进行了总结梳理,对系统仿真建模、规划设计及运行优化的已有研究进行了评述,将研究对象归结为个体电-热耦合能源系统及跨区域的电-气耦合的多能源系统2种。

近年来面向园区级综合能源系统规划、设计及运行优化的模型大量涌现,已有研究对能源路由器、能源总线、能源集线器等具体仿真模型的工作原理及构建方法进行了较多的讨论。但园区级综合能源系统的复杂性决定了设计和运营中面临众多不同的问题,需要从项目建设全过程出发,对已有模型的功能定位及建模原理进行梳理归类,通过匹配分析识别出已有模型在解决实际工程问题时存在的缺陷和不足,以便完善已有模型体系。

本文基于园区级综合能源系统的数学抽象,结合综合能源系统自身层次结构及涉及的时空范围,从系统优化的基本原理出发对已有成果进行梳理和归类,并与综合能源系统规划、设计和运行过程中需

收稿日期:2019-01-15;修回日期:2019-11-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0704602);上海市自然科学基金资助项目(19ZR1460500)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2018YFC0704602) and the Natural Science Foundation of Shanghai(19ZR1460500)

要解决的关键问题进行对照分析,识别出已有模型研究取得的成果和缺陷,为已有模型的工程应用和更新完善奠定基础。

1 园区级综合能源系统结构

园区级综合能源系统是指特定地理范围内所有能源的转换-转移-存储-消费过程的总和,其包含多个供用能子系统,这些供用能子系统之间既可以发生物理联系(有能量的交换),也可以是在物理上相互独立的(相互间没有能量交换)^[11]。因此,综合能源系统的概念强调的是对特定范围内所有供用能活动的统筹安排,即基于全局信息对特定地理范围内整个供用能系统的设计和运行进行优化。

典型的园区级综合能源系统中不同供用能节点间的能量传递关系如图1所示。电力、燃气、热力、冷量各自以用户和能源站为节点形成有向网络图,在节点处不同种类的能源通过能源转换、存储及耗散设备发生关系。

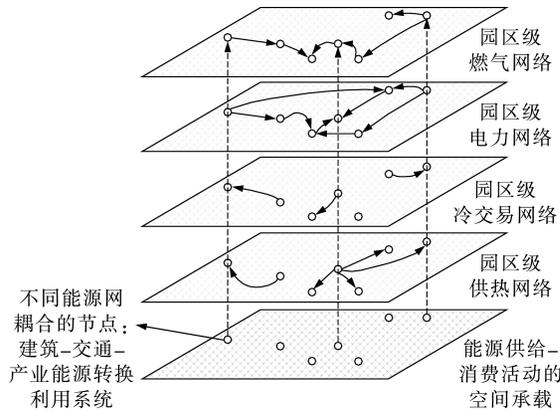


图1 不同供用能节点间的能量传递关系

Fig.1 Energy transmission relationship among different power supply nodes

典型的园区不同种类能源间相互转化关系如图2所示。以建筑能源系统为例,跨节点能量系统耦合关系如图3所示。整个园区综合能源系统可视为节点间的能量交易层(图1)、节点内部的冷热电产品生产层(图2)与用户内部能量产品的消费层(图3)。从图3可以看出,园区级综合能源系统的3个层次具有紧密的耦合关系,末端设备运行参数的调整将会产生级联反应,对整个系统的协同性能产生影

响。综合能源系统三层系统间存在复杂的耦合关系,以图3中空调系统为例,负荷不变时终端冷媒温度的降低可减少冷冻水流量,降低水泵能耗,但冷媒温度的降低需要制冷机制冷温度的降低,制冷机主机热力学性能将下降,如果是区域集中供冷,不同用户间也存在着相互制约的关系。

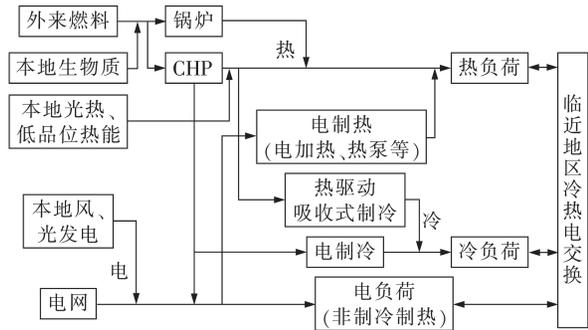


图2 不同能源种类间典型的相互转化过程

Fig.2 Typical energy conversion process among different kinds of energy

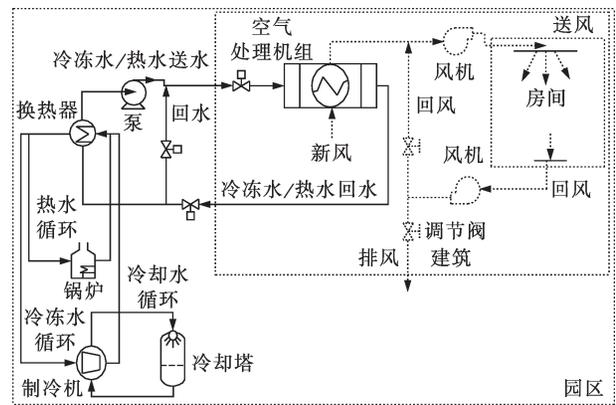


图3 空调采暖系统中跨节点能量系统耦合关系

Fig.3 Coupling relationship of cross-node energy system in air-conditioning heating system

园区级综合能源系统3个层次相对应的空间载体如图4所示,分别对应于园区、建筑(厂房)和房间(车间)尺度。对应于不同的空间尺度,能源系统设施的构建主体不同。园区级综合能源系统构建与传统自主构建供用能系统相比,涉及的利益主体更多,主体间权-责-利关系更为复杂,不同利益主体间关系协调是系统构建的前提。因此,综合能源系统的构建需要早期规划降低协调合作成本、全局优化设

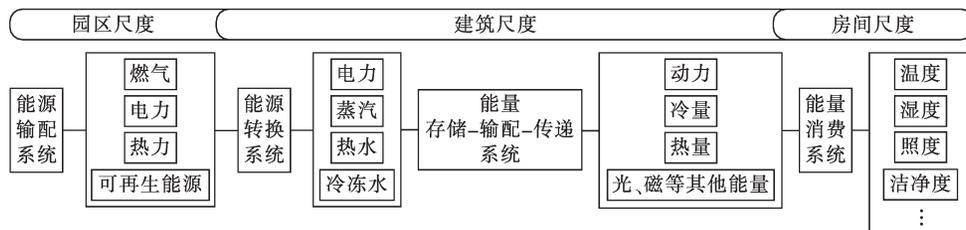


图4 3个层次的能源系统与空间尺度的对应关系

Fig.4 Relationship between different energy systems and related spatial scales

计确保各子系统紧密衔接、精细的运行管理机制确保优化运行。由于大型工程建设项目无法开展实际试验,所以综合能源系统的规划、设计及运行调控都需要预先通过模型试验得到不同情景下的结果,以支撑科学决策,确保项目顺利开展。

2 园区级综合能源系统营建进程及模型需求

园区级综合能源系统是为城乡居民、工业企业等服务的,并受到城乡基础设施的制约。按照我国城乡开发建设管理体系,当土地用途和开发建设内容确定后,主要供用能对象、能源设施可选位置等可基本确定。综合能源系统规划设计主要是在用地规划确定的基础上按要求确定供用能方案,明确主要设备型号、台数、位置及管网结构等,并拟定施工方案和时序。在实际运行阶段,以设计建造的设备为载体和约束条件,根据实际供用能条件的变化,对各个设备运行出力、启停等进行合理调配,满足用户各类能源需求。基于综合能源项目阶段划分,可按照早期规划、系统设计及系统实际运行3个主要环节的决策需求,探讨园区供用能系统设施建设主体科学理性决策的模型需求。

2.1 园区级综合能源系统早期规划阶段

在早期规划阶段,园区主要建设方可能是一个也可能是多个,各建设主体基于土地招拍挂进度在不同地块开展建设活动。园区能源基础设施建设一般与建筑建设项目同步,由于土地开发建设涉及多专业、多机构、多主体的协同交互,应及时确定将对其他同步协作主体产生较大的影响的个体决策。

在早期初步规划方案阶段,考虑供用能系统对园区能源基础设施建设方案和建设用地利用的影响(如园区管网及能源站房地预留、建筑立面屋顶及机房空间预留等),供用能主体主要关注以下几个方面的问题。一是供能分区的划分。采用园区集中供能还是楼宇分别独立供能:如果是集中式,供能组团如何划分,机房位置在哪里,所需机房面积是多少;若是楼宇分别供能,所有房间集中设置楼宇式能源中心,还是各个房间分散供能不设置集中机房。二是供能系统初步方案的确定。在初步的建筑设计方案下,快速提出粗略的系统建设方案及不同方案相应的投资回报、能效、污染物排放及安全可靠性等信息,辅助建设主体确定粗略的能源系统方案,为建筑设计和能源基础设施建设提供设计依据。

在该阶段,由于建设利益相关方较多,某一利益相关方的新要求 and 方案变化都可能影响整个园区各专业的建设方案。在实际项目中,各专业的设计方案基于不同诉求和约束不断调整修改,综合能源系统模型需要根据建筑、市政设施、能源资源等信息输

入和优化目标的不断变化而给出调整后的新方案。为提高各方协同决策的效率,推动项目尽快开展,对综合能源优化模型的灵活性和建模速度具有较高的要求。由于该阶段各专业均是初步方案,以建筑为例,该阶段仅确定了建筑功能、初步的形态特征和建设面积,对冷热电需求仅能做出粗略的预测,在模型输入信息较为粗略、准确度较低的情况下,精细的综合能源系统优化模型是不必要的。

2.2 园区级综合能源系统设计阶段

综合能源系统设计一般是基于详细的建筑设计,开展能源系统详细方案和施工图的设计。综合能源系统设计主要关注以下几个方面的内容:一是各个供能分区具体的地理边界和供能对象,在可选用地中确定能源站房和管线的具体位置;二是冷、热、电等各类能源需求及其时空分布,一般需进行全年逐时分析,以满足大多数情况下高效经济供能的目标;三是供能系统总设计容量及各能源转换子系统的容量配置(各设备及管线型号等);四是能源系统分期建设计划。

园区级综合能源系统设计是运用系统科学的思想和方法设计出能最大限度满足目标(或目的)的过程。园区级综合能源涉及多供用能节点、多种能源的统筹优化利用。相较于单个供能设备满足单个用户需求,系统内不同设备耦合关系复杂,系统设计容量和各个设备的配置方案复杂。仍沿用火电厂、燃气能源站、区域供冷供热等项目设计的方法和经验,缺乏精细化分析,忽视综合能源系统内部子系统间的关系,粗犷式设计导致综合能源系统难以展现出协同互补的特点,彻底牺牲了综合能源系统自身的优势。

因此,园区级综合能源系统模型是支撑工程设计人员设计决策的重要依循。通过对园区各类能量需求、各类能源资源及不同能源转换技术设备的综合考虑,结合系统设计的经济、能效及安全性等目标,通过量化分析模型确定供能分区、系统最佳设计容量及设备配置方案。

在系统设计阶段,设计规范、设计指标和设计参数是信息交互的主要载体。这就要求综合能源系统分析模型的输入输出数据也应与主要的信息载体相一致,便于设计人员选用。此外,模型的构建和输入很大程度上受到工程设计人员自身对综合能源系统模型认识 and 实践经验的影响,工程设计人员需要与其自身知识结构水平和工作模式相适应的分析模型,过于复杂和难以理解的模型都将影响其实际使用效果。

2.3 园区级综合能源系统的运行阶段

由于负荷和部分能源资源供给能力的动态波动,园区级综合能源系统的运行调节对系统实际运

行效果具有重要影响。系统实际运行调节需根据供需双方条件的变化制定合理的运行方案,提高系统的运行能效和经济性。系统运行调控有季节调控、应急保障、日前调节、逐时调整、实时控制等不同时间层次的调控阶段,需要根据基础数据条件,通过量化计算制定最优的运行调控策略。

实际项目中,园区级综合能源系统有完全自动化智能精准调控和人工简单调控2种典型的运维模式,不同调控模式下对系统运行优化模型的需求有所不同。人工调控依据固定的触发条件,一天之中通过少量几次运行策略的切换,主要通过能源转换设备启停台数控制及主干管阀门开度调整,控制能量的输出量,对综合能源系统模型要求较低。综合能源系统的自动智能精准调控是指根据数据采集器提供的各类数据,通过智能调控主机自动计算得到系统最优时各个设备运行状态参数,将调控命令发送至执行器对设备进行调控,使系统在外部条件变化时能够始终处于最佳运行状态。该类调控对系统运行优化模型的要求较高,为计算得到系统最优状态下各个设备运行状态数据,需要准确和精细的设备特性建模,便于提供准确的调控命令。此外,综合能源系统涉及多种能源转换利用设备,内部各类设备动态特性差异较大,不同系统拓扑形式在不同的动态调控过程中由于冷热水系统响应滞后所产生的惯性累积量也不同,需要准确计算时间惯量。

由于电力和冷热数据时间尺度的不同步,一般需要按照其中时间尺度较长的数据进行间歇性耦合同步,以较长的时间步长为标准进行数据同步,发出调控指令。表1基于现行标准规范^[12],给出了主流温度传感设备T型热电偶的测量精度和稳定时间。以供冷为例,供冷系统设计供回水温差一般为5℃,实际非满负荷状态下供回水温差大多低于5℃,即使最理想状态下,测量误差也将达到20%。笔者于2018年7月对国内6个综合能源站的实测发现,有4个项目系统自动监测平台中数据采集系统温度测量误差在±1℃左右。可以看出,实际系统中基础信息数据误差较大,如何处理较大误差的基础数据,实现综合能源系统的精准调控,是高精度运行调控对综合能源优化模型的核心需求。

表1 供冷供热系统常用热电偶测量精度及稳定时间

Table 1 Measurement accuracy and stabilization time of common thermocouple for cooling and heating supply system

精度等级	测量范围/℃	测量误差/℃	稳定时间
1级	-40~125	±0.5	液体5 min以上, 气体15 min以上
2级	-40~133	±1	
3级	-67~140	±1	

3 园区级综合能源系统最优化原理及功能

从园区级综合能源系统自身的复杂性以及规划、设计、优化运行阶段的要求可以看出,个人经验很难满足项目的要求,通过仿真模型最优化计算,基于计算数据进行相应的决策是综合能源系统构建的必然选择。根据最优化的基本原理,将当前园区级综合能源系统优化模型的研究成果给予梳理和归类。

3.1 数值优化模型

数值计算指有效使用数字计算机求数学问题近似解的方法与过程。数值计算主要研究如何利用计算机更好地解决各种数学问题,包括连续系统离散化和离散方程的求解,并考虑误差、收敛性和稳定性等问题^[13]。

数值优化模型包括基于简单规则的智能算法模型和采用数值算法求解的数学规划模型2种。基于简单规则的智能算法模型通过设定基本规则,利用计算机数值迭代得到最优的供能网络形态和能源转换系统结构配置。数学规划模型则是通过适当简化,对供用能系统的约束条件与优化目标进行较为详细的数学描述,通过求解有约束的优化问题得到可行域内的最优解。特别是对于非线性大规模数学规划,很难直接通过数学演绎得到理论最优解,大部分需要借助于计算机程序通过迭代寻优求解方程组。

3.2 系统解析模型

解析法又称为分析法,它是应用数学推导、演绎求解数学模型的方法。解析法将对象系统间的物理关系转化为相应的数学关系式,利用数学法或数据结构搜寻的方式求得问题的解。解析法又称“精确解法”,是因为相对于计算机数值求解不会在求解过程中将数值位数部分截断产生截断误差,严格地将物理过程及其相互间的关系进行表达。由于数学规则和物理过程数学表达的有限性,采用解析法求解系统需要首先对物理对象进行合理的假设,以便于建立数学关系式。

3.3 解析法与数值法的比较

结合数值模型和解析模型的特征可以看出,解析模型需要在建模之前对建模对象进行合理的简化和抽象,识别出系统本身最为本质的规律,通过数学工具对核心要素间的关系进行分析。解析模型将系统要素间的关系表达得较为清晰,与人类的逻辑思考过程结合较为紧密,便于模型应用者理解系统内部主要元素间的关系,增进对系统的认识。而数值模型在建模前期对系统抽象的要求相对较低,通过大量的迭代计算方式寻找最优解。数值模型的应用者很难窥探系统模型最优解(系统最优结构)产生的过程,不便于把握系统运行的规律。但对于大多数

复杂系统,很难通过抽象的方式将系统内部众多要素间多层次的关系厘清,难以建立解析模型,此时数值建模的优势更为明显。应综合运用 2 种建模方法,根据所要解决的问题以及对象的复杂程度确定适宜的方法。已有能源系统优化模型构建原理与归类情况如表 2 所示。

4 模型功能梳理与新模型探讨展望

4.1 模型功能梳理

园区级综合能源系统与所处的环境进行能量与信息的交换,内部又包含众多的层次结构,可将其划分为以下几个典型层次。①物理过程:热的传导、辐射,管道内流体的流动,燃烧过程等。②部件:具有部分功能的元器件,如热泵设备自带的防护装置、自动调节装置等。③设备:具有完整功能的独立设备和设施,如水泵、风机、锅炉、热泵等。④能源子系统:由多个设备组成,可完成一种功能,具有一定的自主性,如冷冻水制取系统、锅炉制取热水系统、冷热量输配系统。⑤能源系统:可满足用户需求的一整套供用能系统。⑥多能源系统:多个供用能系统,满足多个用户的需求。⑦体系(园区供用能体系):园区内多个能源系统本身及其所处的环境,此处环境是指与能源系统发生物质、能量和信息交换的其他人工和自然系统。

基于文献梳理,适用于不同阶段的已有园区级综合能源系统模型功能与结构特征如表 3 所示。

不同构建阶段园区级综合能源系统模型的粒度层次如图 5 所示。针对不同的阶段,模型的粒度应有所差异。

在早期规划阶段,聚焦于解决全局整体多种能源资源、多用户及多种设施和技术的统筹问题。用户需求以及系统构建均具有较大的不确定性,在粗

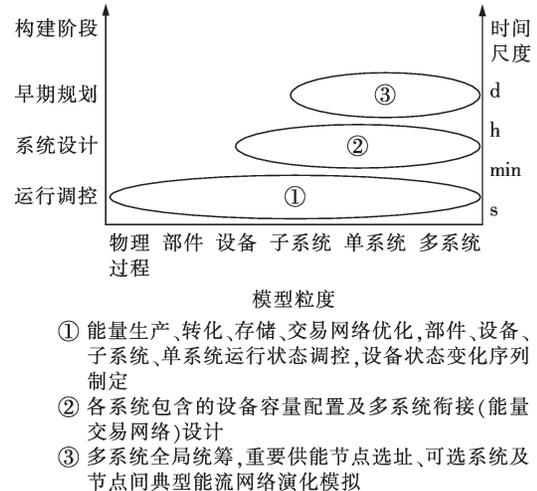


图 5 不同构建阶段园区级综合能源系统模型的粒度层次

Fig.5 Granularity level of community-scale integrated energy system model for different modeling stages

糙数据条件下过于精细的模型也难以得到准确的结果,该阶段更多的是基于统计意义上的技术水平、负荷特征、资源利用潜力等数据进行建模,并不需要对具体设备的瞬态特性进行精细化描述。而且,过于精细的模型覆盖场景少,灵活性低,使用效率较低。因此,在早期规划阶段,解析模型具有一定的优势:可以根据主要变量和结果间的关系,在主要条件(解析模型的自变量)发生变化时,快速计算得到结果(如经济性、碳排放及能效等对决策具有重要影响的指标)。

在系统设计阶段,聚焦于如何基于众多的运行状态确定设计状态点并配置出全年整体性能最好的物理系统。需要明确各类设备的容量、性能参数等指标,应将设备描述模块纳入系统优化模型,对全年 8760 h 进行动态的和完整的分析。

表 2 园区级综合能源系统模型构建原理与归类

Table 2 Principle and category of modeling community-scale integrated energy system

类型	数值模型		解析模型(系统动力学模型)
	数学规划模型	数值计算模型	
建模技术	线性/非线性规划、整数规划、混合规划、模糊规划、区间规划、随机规划、参数规划等	神经网络、多智能、进化算法、有限状态自动机等	代数微分方程
建模原理	基于物理定律、供需平衡、资源有限性等约束确定变量间的数学关系形成约束方程组,约束方程组对应变量变化的可行域,在可行域内搜索得到目标函数数值最优时变量值的组合	规定各个供用能主体与外部环境间基本的逻辑规则,通过大量迭代计算获得系统演化过程,筛选最优状态点及相应的变量值	建立设计变量和目标函数间的函数关系式,应用数学推导、演绎求解函数最大/最小值
现有模型	HOMER/HOMER Pro、DER-CAM、EAM、MARKAL/TIMES、RETScreen、H2RES等 ^[4]	文献[14-29]	文献[30-32]

表 3 园区级综合能源系统模型功能与结构特征分析

Table 3 Functional and structural characteristics of community-scale integrated energy system models

适用阶段	粒度层次	空间尺度	时间尺度	文献
初步规划	能源子系统-能源系统-多能源系统-体系	建筑-园区级	逐时-1 a, 1 a-20 a	文献[33-39]
系统具体设计	设备-能源子系统-能源系统	设备-建筑-园区级, 建筑级	逐时-1 a	文献[40-46]
运行优化	物理过程-能源系统	部件-设备-建筑-园区级	日前, 逐时, 分钟级/秒级	文献[47-53]

在系统运行优化阶段,需要结合具体部件(流体阀门、电容、断路器及仪表等)分钟级甚至秒级的运行状态数据,利用优化计算对其运行状态进行调控和调节,应将其状态参数和性能数据纳入系统模型。部分情况下,设备和部件的调控还需考虑热传递、流体质量传递的时滞特性或非线性特征,将部分物理过程的特征参数纳入系统模型。在该阶段,需要大量的动态计算以准确呈现系统运行的结果。在这种情况下,很难建立主要变量和系统运行结果之间准确的关系,即难以建立解析模型,就需要数值模型进行大量计算,得到不同情景下系统运行结果,为系统设计和运行决策提供支撑。

4.2 新模型探讨展望

按照上述层次,本节对园区级综合能源系统优化模型进行梳理,给出已有研究的成果和面临的挑战。

(1) 能源规划模型与非能源系统模型的衔接。

园区级综合能源系统规划受到园区气象、地理、建筑、自然资源、临近能源系统等自然与人工物质系统的影响。这些物理系统为园区级综合能源系统提供物质资源并提供空间载体。其他学科相关模型,如地理信息系统(GIS)模型^[54]、可再生能源资源潜力评估模型^[55-56]、冷热电负荷预测模型^[57-59]等为园区级综合能源系统构建和运行优化提供基础数据支撑。这些物理系统模型间存在比较清晰的边界,相互关系明确,可通过阶段性的数据交换实现模型的衔接。多源数据的接入接口的设计,有助于提高数据输入效率,通过协同分析提高规划设计效率。

(2) 基于高误差数据的健壮性系统优化模型。

当前自动化智能调控系统需要准确无误的数据作为边界条件,而热工领域中温湿度、流量、压力测量仪表和传感器很难达到这一要求,难以实现精准调控。这也是当前很少实时调控集中供冷供热系统,仅通过切换两三次产能-蓄能系统运行模式或者对冷热水流量进行调节应对需求变化的原因。

目前不确定优化模型研究中,考虑不确定的综合能源系统优化模型大多是面向系统规划设计的,主要考虑供用能场景变化基于不确定理论进行系统优化^[60],较少考虑设备运行状态参数的采集误差,对于综合能源系统中测量误差的分布特征和变化规律缺乏认识,运行调控优化模型中也没有考虑测量误差的影响。

(3) 整个供用能体系的建模。

现实中,没有一个系统是完全孤立存在的。同样地,对系统进行仿真时在关注系统内部结构的同时,也应对其与环境的关系进行梳理,明确系统建模仿真的边界。对于庞大而复杂的园区级供用能网络,探明其内部的层次结构及其与非能源系统间的

交互关系,并将其分解为多个适于分析的子系统,是对其进行建模优化的前提^[61]。对于复杂的园区级综合能源系统,其在规划、设计、运行阶段面临的优化问题是不同的,很难通过建立一个模型满足所有的要求。因此,如何综合运用生成论与整体论,研究园区级综合能源系统与环境间的关系,以及这种交互关系如何影响系统的内部结构,针对模型的关键目标确定适宜的粒度层次,是建模工作首先需解决的问题。

5 结论

基于园区级综合能源系统的特征探讨,对园区级综合能源系统建设和运行主体的实际需求进行了分析,结合当前优化模型构建原理和基本功能的梳理,从实际需求的角度指出了未来模型研究的重点,得到以下的主要结论。

(1) 园区级综合能源从规划设计到运行调控,涉及多种不同的需求。

在早期规划阶段,重点是确定综合能源整体框架和主要结构。在采用量化分析模型辅助决策时,模型输入数据来源宽泛且不确定性较大,需要便于修改并以较高的效率得到不同场景下的结果,便于多方协同决策。考虑模型输入数据较为粗糙,较大粒度的简化模型具有更高的效率。参数化的解析模型由于可以快速建立关键参数和优化结果间的关系,更适宜规划阶段选用。在设计阶段,主要目标是确定系统的设备配置方案。因此,需要基于设备在不同条件下输入输出特性数据对设备进行灰箱建模,较为准确地描述其输入输出特性。并需对系统的动态特征进行分析,通过计算不同状态下系统输入输出特性,基于对不同场景下系统运行结果的统计分析确定系统和各个设备的设计参数。在运维阶段,基于日前、实时调控的需求,需要对系统中各个设备进行精细化描述,并建立考虑累积效应进行不断迭代计算的动态优化模型。

(2) 综合能源系统运行优化模型需考虑数据监测系统的测量误差,构建鲁棒性较好的运行优化模型。

对于多个用户多能源供给的综合供用能系统,由于社会和自然环境因素的不确定性,很难完全按照模型输入的状态运行,改进预测理论和方法也难以消除不确定性。此外,数据测量系统测得的基础数据存在较大的测量误差,忽略这些误差所制定的精确调控策略可靠性值得商榷。综合上述2个方面的误差,完全避免不确定性是不现实的,应正视不确定性并研究不确定性的呈现规律。可通过改进系统配置,提高系统调控策略对负荷、资源等不确定性的适应能力,在全工况、多源数据不确定性基础上给出

综合最优的调控策略,而不应迷信某一状态点的特定数据并基于此追求极限最优。

(3)增强模型的针对性。

基于数值法与解析法涌现了众多的综合能源系统优化模型,但是很多模型的目标定位并不清晰,应针对具体需求确定最为适宜的建模思路和确定模型粒度,对于庞大而又复杂的园区级综合能源系统构建,很难一蹴而就,宜针对不同阶段、不同规划-设计-运行决策活动的需求,构建众多“小而美”的模型,寄希望于一个“大而全”的模型解决所有问题较难实现。

参考文献:

- [1] PARAG Y, SOVACOLB K. Electricity market design for the prosumer era[J]. *Nature Energy*, 2016, 1(4): 16032.
- [2] 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.
- [3] MENDES G, IOAKIMIDIS C, FERRAO P. On the planning and analysis of integrated community energy systems: a review and survey of available tools[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(9): 4836-4854.
- [4] HUANG Z, YU H, PENG Z, et al. Method and tools for community energy planning: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42(2): 1335-1348.
- [5] MOHAMMADI M, NOOROLLAHI Y, MOHAMMADI-IVATLOO B, et al. Energy hub: from a model to a concept—a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80: 1512-1527.
- [6] 于航, 黄子硕, 彭震伟. 社区能源综合规划及其方法初探[J]. *暖通空调*, 2014(12): 13-16.
YU Hang, HUANG Zishuo, PENG Zhenwei. Discussion about community energy planning and its operation method[J]. *Journal of HV & AC*, 2014(12): 13-16.
- [7] 别朝红, 王旭, 胡源. 能源互联网规划研究综述及展望[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(22): 6445-6462.
BIE Zhaohong, WANG Xu, HU Yuan. Review and prospect of planning of energy internet[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(22): 6445-6462.
- [8] 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.
- [9] 余晓丹, 徐宪东, 陈硕翼, 等. 综合能源系统与能源互联网综述[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(1): 1-13.
YU Xiaodan, XU Xiandong, CHEN Shuoyi, et al. A brief review to integrated energy system and energy internet[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(1): 1-13.
- [10] 杨经纬, 张宁, 王毅, 等. 面向可再生能源消纳的多能源系统: 述评与展望[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(4): 11-24.
YANG Jingwei, ZHANG Ning, WANG Yi, et al. Multi-energy system towards renewable energy accommodation: review and prospect[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(4): 11-24.
- [11] 黄子硕, 于航, 彭震伟, 等. 面向社区能源规划的建筑总系统模型[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2016, 50(2): 292-298.
- [12] HUANG Zishuo, YU Hang, PENG Zhenwei, et al. Building Total Energy System model(BTES) for community energy planning[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2016, 50(2): 292-298.
- [13] 中国机械工业联合会. 工业热电偶: GB/T 30429—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [14] 韩旭里, 万中. 数值分析与实验[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 63-65.
- [15] LAMBERT T, GILMAN P, LILIENTHAL P. Micropower system modeling with HOMER[EB/OL]. [2019-01-15]. <http://homerenergy.com/documents/MicropowerSystemModelingWithHOMER.pdf>.
- [16] BAHRAMARA S, MOGHADDAM M P, HAGHIFAM M R. Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 62: 609-620.
- [17] MONTUORI L, ALCAZAR M, ÁLVAREZ C, et al. Integration of renewable energy in microgrids coordinated with demand response resources: economic evaluation of a biomass gasification plant by HOMER simulator[J]. *Applied Energy*, 2014, 132: 15-22.
- [18] STADLE M, MARNAY C, NICHOLAS D, et al. Web-based economic and environmental optimization of microgrids[C]//2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference. Washington DC, USA: IEEE, 2012: 1-10.
- [19] MARNAY C, CHARD J, HAMACHI K, et al. Modeling of customer adoption of distributed energy resources[EB/OL]. [2019-01-15]. <http://certs.lbl.gov/pdf/49582.pdf>.
- [20] COSTA P M, MATOS M A. Economic analysis of microgrids including reliability aspects[C]//9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2006. Stockholm, Sweden: IEEE, 2006: 1-8.
- [21] RICHARD L, GARY G, KEN N. Energy technology systems analysis programme: documentation for the Markal family of models[EB/OL]. [2019-01-15]. http://www.iea-etsap.org/web/MrklDoc-I_StdMARKAL.pdf.
- [22] PAMBUDI N A, ITAOKA K, CHAPMAN A, et al. Industrial Carbon Capture Storage(CCS) model using times-Japan framework[J]. *Energy Procedia*, 2017, 142: 2525-2533.
- [23] ZANDI M, BAHRAMI M, ESLAMI S, et al. Evaluation and comparison of economic policies to increase distributed generation capacity in the Iranian household consumption sector using photovoltaic systems and RETScreen software[J]. *Renewable Energy*, 2017, 107: 215-222.
- [24] PAN Y, LIU L, ZHU T, et al. Feasibility analysis on distributed energy system of Chongming County based on RETScreen software[J]. *Energy*, 2017, 130: 298-306.
- [25] GASPAROVIC G, KRAJACIC G, SARE A, et al. Advanced modelling of an electric vehicle module in the H2RES energy planning software[C]//Digital Proceedings of the 8th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. Dubrovnik, Croatia: University of Dubrovnik, 2013: 1-6.
- [26] KRAJACIC G, DUIC N, MARIA DA GRACA C. H2RES, energy planning tool for island energy systems—the case of the island of Mljet[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(16): 7015-7026.
- [27] RAMLI M S, WAHIDS S A, HASSAN K K. A comparison of renewable energy technologies using two simulation softwares: Homer and RETScreen[C]//AIP Conference Proceedings. Penang, Malaysia: AIP Publishing, 2017: 3-13.
- [28] ABDELKADER A. Multi-objective genetic algorithm based

- sizing optimization of a stand-alone wind/PV power supply system with enhanced battery/supercapacitor hybrid energy storage[J]. *Applied Energy*, 2018, 163:351-363.
- [28] MARUGAN A. A survey of artificial neural network in wind energy systems[J]. *Applied Energy*, 2018, 228:1822-1836.
- [29] REYNOLDS J. Operational supply and demand optimization of a multi-vector district energy system using artificial neural networks and a genetic algorithm[J]. *Applied Energy*, 2018, 235:699-713.
- [30] FORRESTER J W. System dynamics—a personal view of the first fifty years[J]. *System Dynamics Review: the Journal of the System Dynamics Society*, 2007, 23(2-3):345-358.
- [31] ASLANI A, HELO P, NAARANOJA M. Role of renewable energy policies in energy dependency in Finland: system dynamics approach[J]. *Applied Energy*, 2014, 113:758-765.
- [32] HSU C W. Using a system dynamics model to assess the effects of capital subsidies and feed-in tariffs on solar PV installations[J]. *Applied Energy*, 2012, 100:205-217.
- [33] 黄子硕. 基于区域能量系统分析模型的社区能源规划方法[D]. 上海: 同济大学, 2015.
HUANG Zishuo. Community energy plan based on regional energy system models[D]. Shanghai: Tongji University, 2015.
- [34] SAGER-KLAUSS C. Energetic communities—planning support for sustainable energy transition in small and medium-sized communities[D]. Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2016.
- [35] DELPONTE I. Energy planning at the district level: an implementation plan as a first step towards smarter city development[J]. *CSE—City Safety Energy Journal*, 2016(2):111-122.
- [36] 程林, 张靖, 黄仁乐, 等. 基于多能互补的综合能源系统多场景规划案例分析[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(6):282-287.
CHENG Lin, ZHANG Jing, HUANG Renle, et al. Case analysis of multi-scenario planning based on multi-energy complementation for integrated energy system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(6):282-287.
- [37] 吴聪, 唐巍, 白牧可, 等. 基于能源路由器的用户侧能源互联网规划[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(4):20-28.
WU Cong, TANG Wei, BAI Muke, et al. Energy router based planning of energy internet at user side[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(4):20-28.
- [38] 陈娟, 黄元生, 鲁斌. 区域能源互联网“站-网”布局优化研究[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(3):675-684.
CHEN Juan, HUANG Yuansheng, LU Bin. Research on “stations-pipelines” layout and optimization of regional energy internet[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(3):675-684.
- [39] 王丹, 孟政吉, 贾宏杰, 等. 基于配置-运行协同优化的分布式能源站选型与定容规划[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(8):152-160.
WANG Dan, MENG Zhengji, JIA Hongjie, et al. Siting and sizing planning for distributed energy station based on coordinated optimization of configuration and operation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(8):152-160.
- [40] 何桂雄, 黄子硕, 闫华光, 等. 燃气三联供-热泵容量优化匹配分析方法[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(4):25-29.
HE Guixiong, HUANG Zishuo, YAN Huaguang, et al. Analytical method for capacity matching optimization of CCHP-HP[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(4):25-29.
- [41] 管霖, 陈鹏, 唐宗顺, 等. 考虑冷热电存储的区域综合能源站优化设计方法[J]. *电网技术*, 2016, 40(10):2934-2943.
GUAN Lin, CHEN Peng, TANG Zongshun, et al. Integrated energy station design considering cold and heat storage[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(10):2934-2943.
- [42] 管霖, 江泽涛, 唐宗顺. 基于集中质-量调节的综合能源系统供能管网管径优化设计方法及系统经济性分析[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(6):75-83.
GUAN Lin, JIANG Zetao, TANG Zongshun. Optimal diameter sizing based on centralized quality-quantity regulation and economic analysis of IES piping network[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(6):75-83.
- [43] 雷金勇, 郭祚刚, 陈聪, 等. 考虑不确定性及电/热储能的综合能源系统两阶段规划-运行联合优化方法[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(8):169-175.
LEI Jinyong, GUO Zuogang, CHEN Cong, et al. Two-stage planning-operation co-optimization of IES considering uncertainty and electrical/thermal energy storage[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(8):169-175.
- [44] 王珺, 顾伟, 陆帅, 等. 结合热网模型的多区域综合能源系统协同规划[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(15):17-24.
WANG Jun, GU Wei, LU Shuai, et al. Coordinated planning of multi-district integrated energy system combining heating network model[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(15):17-24.
- [45] 贾晨, 吴聪, 张超, 等. 基于电热系统联合规划的城市商住混合区能源站优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(6):30-36.
JIA Chen, WU Cong, ZHANG Chao, et al. Optimum configuration of energy station in urban hybrid area of commerce and residence based on integrated planning of electricity and heat system[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(6):30-36.
- [46] 钟俊杰, 李勇, 曾子龙, 等. 综合能源系统多能流准稳态分析与计算[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(8):22-30.
ZHONG Junjie, LI Yong, ZENG Zilong, et al. Quasi-steady-state analysis and calculation of multi-energy flow for integrated energy system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(8):22-30.
- [47] 朱承治, 陆帅, 周金辉, 等. 基于电-热分时间尺度平衡的综合能源系统日前经济调度[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(6):138-143, 151.
ZHU Chengzhi, LU Shuai, ZHOU Jinhui, et al. Disturbance source location method based on frequency-domain characterization with environmental excitation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(6):138-143, 151.
- [48] 曾艾东. 冷热电混合能源联合优化运行与调度策略研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
ZENG Aidong. Research on the optimized operation and schedule strategy of CCHP system[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [49] 杜琳, 孙亮, 陈厚合. 计及电转气规划的综合能源系统运行多指标评价[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(6):110-116.
DU Lin, SUN Liang, CHEN Houhe. Multi-index evaluation of integrated energy system with P2G planning[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(6):110-116.
- [50] 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.
- [51] 王英瑞. 基于条件风险价值的电-热-气综合能源系统经济调度[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
WANG Yingrui. Economic scheduling of integrated energy systems containing electricity, heat, and natural gas based on conditional value at risk[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [52] 赵曰浩, 彭克, 徐丙垠, 等. 综合能源系统分层分布式协调控制

- 方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 253-259.
ZHAO Yuehao, PENG Ke, XU Bingyin, et al. Hierarchical and distributed coordination control of integrated energy system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 253-259.
- [53] 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, 134.
LIU Shuxin, DAI Sai, HU Linxian, et al. Power flow models 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, 134.
- [54] 朱庆. 三维GIS及其在智慧城市中的应用[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(2): 151-157.
ZHU Qing. Three-dimensional GIS and its key roles in smart city[J]. Journal of Geo-Information Science, 2014, 16(2): 151-157.
- [55] 张改景, 龙惟定. 区域建筑能源规划中资源潜力分析方法[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2010, 42(5): 707-711.
ZHANG Gaijing, LONG Weiding. Regional building energy planning resource potential analysis method[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2010, 42(5): 707-711.
- [56] TWIDELL J, WEIR T. Renewable energy resources[M]. London, UK: Routledge, 2015: 238-266.
- [57] MA W, FANG S, LIU G, et al. Modeling of district load forecasting for distributed energy system[J]. Applied Energy, 2017, 204: 181-205.
- [58] 肖白, 周潮, 穆钢. 空间电力负荷预测方法综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 78-92.
XIAO Bai, ZHOU Chao, MU Gang. Review and prospect of the spatial load forecasting methods[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 78-92.
- [59] PALACIOS-GRACIA E J, MORENO-MUNOZ A, SANTIAGO I, et al. A stochastic modelling and simulation approach to heating and cooling electricity consumption in the residential sector[J]. Energy, 2018, 144: 1080-1091.
- [60] 陈宇, 刘会兰, 栗然, 等. 基于可能度的冷热电联供微网区间优化调度模型[J]. 电测与仪表, 2019, 56(10): 47-55.
CHEN Yu, LIU Huilan, LI Ran, et al. Interval optimal dispatch model of combined cooling, heating and power microgrid based on possibility degree[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2019, 56(10): 47-55.
- [61] 黄子硕, 于航, 彭震伟. 广域网视角下的城市能量系统及其规划[J]. 科学通报, 2018, 63(增刊2): 3047-3058.
HUANG Zishuo, YU Hang, PENG Zhenwei. Urban energy system planning from wide area network perspective[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(Supplement 2): 3047-3058.

作者简介:



黄子硕

黄子硕(1987—),男,河南方城人,助理教授,博士,通信作者,主要研究方向为需求侧供用能综合规划、低碳社区规划(E-mail: huangzishu@tongji.edu.cn);

何桂雄(1986—),男,湖北荆州人,硕士,主要研究方向为综合能源系统优化(E-mail: heguixiong@epri.sgcc.com.cn);

闫华光(1976—),男,山东济宁人,教授级高级工程师,硕士,主要研究方向为需求侧能效提升、综合能源系统优化(E-mail: hgyan@epri.sgcc.com.cn)。

(编辑 李玮)

Overview and prospect of optimization model function for community-scale integrated energy system

HUANG Zishuo¹, HE Guixiong², YAN Huaguang², TANG Yanmei²

(1. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Physical-mathematical model is a basic tool to explore the generation and operation mechanism of community-scale IES(Integrated Energy System). Currently, numerous community-scale IES models have been reported. Combining with the core demand of engineering practice and system operation, the existing models are examined, which is helpful to promote the research of community-scale IES models. The differences of model functions in planning, designing and operating stage of IES are analyzed based on the analysis of the core demand for IES project. On account of the unique functions of IES models in different stages, the modeling size and accuracy of IES models should correspond to its functions. Moreover, a system of multiple models connecting with each other is generally better than a single comprehensive model. The advantages and disadvantages of analytical and numerical optimization models of IES are summarized and compared. Given the practical operation requirement of community-scale IES, the necessity of strong robust operation mode in operating optimization is investigated. Finally, the construction of future IES operation models is prospected.

Key words: multi-energy complement; community-scale integrated energy system; model function; robust operation; overview