

面向可再生能源消纳的多能源系统:述评与展望

杨经纬, 张 宁, 王 毅, 康重庆

(电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 清华大学, 北京市 100084)

摘要:打破不同能源系统之间相互分立的格局,实现多能源系统的集成与协同是解决可再生能源消纳问题的有效途径。首先,分析了多能源系统理论与方法研究框架,在此基础上从基本建模、运行优化、系统规划等多个角度评述了现有的研究并提出相应的思考。然后,将现有研究分为“以电-热耦合为主的区域多能源系统”和“以电-气耦合为主的跨区多能源系统”两个典型研究对象,综述了面向新能源消纳的多能源系统的关键研究点。最后,总结了面向可再生能源消纳的多能源系统关键科学问题,并对多能源系统未来的研究方向做了展望。

关键词:多能源系统;综合能源系统;能源互联网;可再生能源;电-热耦合;电-气耦合

0 引言

推动以可再生能源为主体的绿色、低碳、清洁的能源体系建设是中国乃至全世界大多数国家的战略选择。然而,受可再生能源随机性和间歇性影响,中国的可再生能源消纳问题凸显,且仅依靠挖掘既有电力系统内部的潜力,难以走出可再生能源消纳困境。在中国北方的冬季,传统的电-热分立运行模式严重地制约了热电联产(CHP)机组的发电区间,挤占了风电的接入空间,是造成弃风最主要的原因。电力无法长期有效地存储是可再生能源难以消纳的重要因素之一,如果能利用天然气、热力等系统的惯性将电力转化成其他形式的能源存储,弃风弃光问题必将很大程度上得以改善。而中国当前各能源系统分立运行,相互协调能力弱,严重影响电力系统运行的灵活性,并未真正挖掘出能源系统的潜力。因此,发展多能源系统集成理论与方法,是解决可再生能源消纳问题的有效途径。

广义的多能源系统是指煤炭、天然气、石油、核能、水能、风能、太阳能等多种形式能源的开发、转换、储备、运输、调度、控制、管理、使用等环节所组成的大系统。不同种类的能源在流转的各个环节存在复杂的耦合关系,进而形成了相互关联的有机整体,因此可称为多能源系统。从科学研究来看,煤炭、石油等能源极易存储和运输,而热力、燃气网络传输较

为复杂,且可与电力通过多种方式相互转换,因此学者通常将电力、热力、燃气系统作为多能源(或称为综合能源系统)的研究主体,聚焦三者内部的问题及相互协调优化^[1]。

目前,国内外机构和政府已经在多能源系统集成方面展开了一些前期工作。为应对当下能源危机与低碳发展问题,国际上的专家学者在2014年成立了能源系统集成国际联合研究会,目的是为了了解决能源系统的协调与优化问题,在国际上得到了迅速的发展与认可。美国国家可再生能源实验室于2008年成了多能源系统集成部门,专门针对该方面的问题展开研究。中国也于2015年在《国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》中提出了“互联网+”智慧能源的战略构想,强调了电、热、气等不同形式能源之间的耦合与协调,促进能源系统的清洁高效是构建能源互联网的重要基础^[2]。2017年,首批“多能互补集成优化示范工程”获得发改委和能源局的批准,终端功能一体化系统、风光水火储多能互补系统等23个项目开始建设和推动^[3]。

国内外学者就多能源系统已经开展了详细的研究,包括多能源系统的建模、运行、优化和风险评估等,一些文章也对多能源系统的研究进行了综述。文献[4]聚焦于区域综合能源系统,介绍了其通用建模技术与综合仿真方法。文献[5]介绍了典型区域综合能源系统的结构,并综述了多能源系统稳态分析的相关方法和问题。文献[6]从多能源系统中“低碳”问题出发,指出了多能源系统的环境效益,展望了低碳多能源系统的研究框架。文献[7-8]综述了多能源系统风险评估的研究,从多能源系统元件可

收稿日期:2017-10-02;修回日期:2017-12-04。

上网日期:2018-01-10。

国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(51620105007);国家自然科学基金资助项目(51677096)。

靠性建模、多能源网络健壮性分析等方面介绍了多能源系统耦合风险评估的关键问题与方法。事实上,多能源系统是一个多空间尺度、多时间尺度的复杂系统,既有区域耦合也有跨区协调,既有稳态特性也有动态特性,如何合理规划多能源系统的研究框架和脉络仍然是重要的问题之一。特别是在面向可再生能源消纳的场景下,多能源系统面临的问题可能不再是局部优化,而是广域的多时空协调,因此其建模、运行、规划存在新的问题与挑战。

本文将针对多能源系统消纳可再生能源这一问题对现有研究进行综述并给出对其研究的思考。提出了面向可再生能源消纳的多能源系统研究框架。基于这一框架梳理已有文献,总结该领域研究的重点和难点。此外,本文还总结面向可再生能源消纳的多能源系统面临的关键科学问题和挑战,对多能源系统标准化建模、多能源系统多时间尺度分析方法、多能源系统数据研究等多个方面进行了展望,以期学者未来的研究提供参考。

1 多能源系统的研究框架

多能源系统具有复杂的时空特性,对于不同的时间尺度、空间尺度,多能源系统都有不同的研究对象、研究问题和研究方法。因此,在研究多能源系统时,首先需要指明研究对象的空间尺度及其耦合关系,例如是研究单个元件、多个元件还是多组元件。其次是确定研究问题的时间尺度,例如秒、小时,日乃至多日、年等时间尺度。

在空间尺度上,多能源系统的研究可以遵循“多能源元件-多能源元件集成-多能源网络”这一从简单到复杂的思路,并建立多能源系统的数学物理模型。多能源系统的研究可以在空间上分为“以电-热耦合为主的区域多能源系统”和“以电-气耦合为主的跨区多能源系统”两个主要问题。在时间尺度上,多能源系统的研究可以分为在秒、分钟等短时间尺度上的动态问题,以及在小时、日、月等长时间尺度的稳态问题。前者多用于运行控制层面的研究,而后者在运行层面及规划层面均有涉及。在不同的问题类型和背景下,需要选用适当的模型进行研究。

多能源元件是多能源系统最底层的组件,包括CHP机组、电锅炉、燃气电厂、电转气(P2G)装置等多种耦合元件,是构建多能源系统、多能耦合的物理基础,也是研究工作的第一步。然而,多能源系统中的主体不仅包含热电厂、电锅炉等单个元件,更多的是这些元件的组合,例如一个商业楼宇可能包含了分布式天然气发电装置、分布式光伏装置、电锅炉、热泵等多种元件。因此,我们需要在元件特性的基

础上研究其集成特性,在学术界,多能源元件的集成通常被称为能量枢纽^[9-11]。此外,多能源系统需要能量网络连接元件和能量枢纽,而不同类型的能源网络具有不同的物理特性,数学模型也差异巨大,这也是多能源系统建模的关键问题之一。

尽管多能源元件、能量枢纽和能量网络可组成多能源系统的物理模型,但实际问题很少面面俱到,涉及整个系统的所有细节。事实上我们注意到,热力系统一般为区域系统,与配电网规模相当;燃气系统一般为跨区系统,与输电网规模相当。因此,多能源系统问题可按照“以电-热耦合为主的区域多能源系统”和“以电-气耦合为主的跨区多能源系统”为空间分类标准,研究相应运行与规划问题。

多能源系统还存在多时间尺度问题,即热力、燃气系统的时间常数远远大于电力系统,存在不可忽略的动态特性。因此,多能源系统可根据稳态、动态模型的应用场景分为“以多能源系统规划、评估等应用为主的稳态问题”和“以多能源系统运行、控制等应用为主的动态问题”两大类,对于不同应用场景需要选择适当的模型进行分析。

结合多能源的时空特性,其研究框架可总结为图1。这也是本文评述多能源系统的思路。

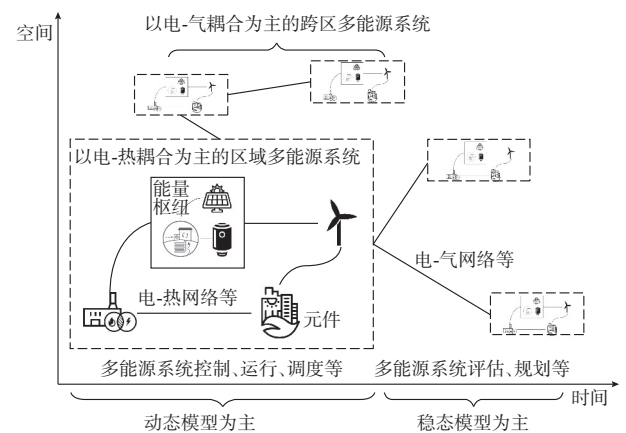


Fig.1 Research frame of multi-energy system

2 多能源系统的数学模型

2.1 多能耦合元件模型

2.1.1 电-热系统关键元件

1) CHP 机组

CHP 机组是指能够同时供应电力与热力两种能源的机组,是电热系统的关键元件之一,也是中国工业供热、居民供热的核心主体。

CHP 机组本质上是利用汽轮机发电后的蒸汽热能,为工业居民用户提供热能,从而提升能源综合

利用效率。根据蒸汽利用方式的不同,CHP 机组一般分为背压式和抽汽式机组两种类型。背压式机组仅利用最后一级汽轮机的排气进行供热,低温低压蒸汽直接进入热网交换器,释放热量后冷凝并回到锅炉加热进入下一循环。在背压机组中,用于供热的蒸汽完全是汽轮机发电后的乏汽,蒸汽比例不可调节,因此发电和供热存在线性依赖关系,一般可以表示为:

$$p_1 = c_m(h_1 - h_0) \quad (1)$$

式中: p_1 为 CHP 机组发电量; h_1 为 CHP 机组供热量; h_0 为蒸汽推动汽轮机做功的热量阈值; c_m 为背压式机组曲线的斜率^[12]。

背压式机组的效率较高,利用了废弃蒸汽的大部分热能。然而由于电-热为刚性依赖关系,机组调节性能较差,在冬季供暖时“以热定电”,大大压缩了可再生能源的消纳空间。

抽汽式机组则打破了背压式机组的线性依赖关系,一定程度上改善了供电供热灵活性。抽汽式机组可以看成一台背压式汽轮机和一台凝汽式汽轮机串联而成,高温高压蒸汽首先通过背压式汽轮机做功,然后部分蒸汽被抽取送入热网交换器,另一部分则送入凝汽式汽轮机继续做功,随后直接进入冷凝系统。由于抽汽量可调,抽汽式机组的运行区间较为灵活。抽汽式机组的运行区间一般可用三组线性约束表示^[6],即

$$\begin{cases} p_1 \leq c_v h_1 + p_{\max} \\ p_1 \geq c_v h_1 + p_{\min} \\ p_1 \geq c_m (h_1 - h_0) \end{cases} \quad (2)$$

式中: p_{\max} 和 p_{\min} 分别为发电量的最大值和最小值; c_v 为凝汽式机组曲线的斜率。

针对抽汽式机组的灵活运行,文献[13]提出了边界点加权平均表征运行区间的方法,指出增加储热装置或电锅炉后,热电厂将在一个非凸区间内运行,并针对此问题提出了分区优化方法。文献[12, 14]分析了配置储热装置后,CHP 机组运行区间的变化情况及变化原理,指出配置储热装置后,CHP 机组的等效运行区间会在式(2)对应的不同曲线段扩大,CHP 机组电热出力更为灵活。

2) 电锅炉和蓄热装置

电锅炉和蓄热装置也是热力系统的重要元件,提供辅助供热和削峰填谷的服务。电锅炉一般利用风电等新能源作为电源,通过电磁感应或电阻方式发热,输出热水或高温蒸汽。电锅炉的数学模型为:

$$h_2 = \eta p_2 \quad \eta < 1 \quad (3)$$

式中: η 为转换系数; p_2 为电锅炉输入电能; h_2 为电锅炉输出热能。

使用电锅炉进行热力系统的控制优化及电力系统的风电消纳是学者研究的重点。文献[9]将电锅炉和热电厂视为一个整体,研究了综合供热的运行区间及灵活性。文献[15-16]研究了电锅炉消纳风电的潜力,对风电供暖的可行性进行了论证。文献[17]研究了电锅炉在二级供热网络中的应用及调峰和启停优化,文献[18]则研究了动态热负荷下电锅炉的比例-积分-微分控制方法。除了传统的调峰电锅炉,部分学者还研究了高压电锅炉的应用潜力。高压电锅炉是一种体积小、调节速度快的高性能锅炉,通常在几十秒内可以完成零负载到满负载的调节。文献[19]认为高压电锅炉系统可以看成是一种在不同时间尺度灵活响应特性的“电力负载”,不但能实现“削峰填谷”,同时还能提供较为复杂的电网频率调节,有助于可再生能源的进一步消纳。目前,德国纽伦堡市就建设了以高压电锅炉和可再生能源为核心的城市供热系统,实现了可再生能源的有效使用。

热力系统的储热形式分为热水储热、熔盐储热、相变储热等多种类型,文献[20]对不同储热形式的优缺点进行了详细的分析。现有的热力系统的储热形式多以热水储热为主。热水储热系统连接在城市热网的高温供水管道与低温回水管道之间,通过调节进水与出水速率来控制热量的存储和释放。热水储热的基本数学原理可以表示为:

$$\frac{dH}{dt} = c\rho Q_{in} T_{in} - c\rho Q_{out} T_{out} - H_{loss} \quad (4)$$

式中: H 为热水罐储热量; Q_{in} (Q_{out}) 和 T_{in} (T_{out}) 分别为进(出)水的流量和温度; H_{loss} 为单位时间的热损失; c 为水的比热容; ρ 为水的密度。

热水罐储热量 H 难以直接计算,需要用近似方法进行估算。文献[14]将储热罐分成了热水层、过渡层、冷水层,分别计算每一层的储热,以此逼近储热罐总储热量。文献[13]考虑了冷热水混合层的温差对流及混合层的体积扩张,建立了更为精细的热水储热模型。

2.1.2 电-气系统关键元件

1) 燃气电厂

燃气电厂通常以天然气为一次能源,通过燃气轮机单循环或者燃气、蒸汽联合循环发电(供热)。燃气电厂是电-气系统中体量最大的耦合元件,也是电-气系统研究的关键环节之一。

为了提高效率,燃气电厂一般采用燃气、蒸汽联合循环发电,其核心组件包括燃气轮机、余热锅炉和蒸汽轮机。燃气轮机将天然气和压缩空气共同注入燃烧室,通过燃烧产生高温燃气膨胀做功,推动透平

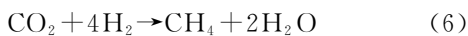
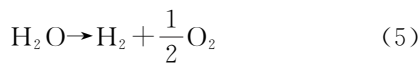
发电。燃气轮机的排气温度很高,一般使用余热锅炉二次利用,余热锅炉加热产生的水蒸气推动蒸汽轮机发电。由于天然气能量的梯级利用,联合循环燃气电厂的发电效率通常能达到60%甚至更高。

燃气电厂比火电厂具有更优越的调节性能和灵活性,被视为减少可再生能源不确定性影响的重要环节之一。但是,联合循环燃气电厂的燃气轮机和蒸汽轮机有单轴、多轴等多种连接方式,也有“一拖一”、“二拖一”等多种组合关系,不同方式下的性能也不尽相同。文献[21]研究了不同布置方式下燃气电厂的灵活性、调节率和可靠性。文献[22]建立了燃气电厂的细化数学模型,考虑了联合循环和单燃气循环两种发电方式及两种状态的切换,指出合理的优化燃气电厂发电模式可在灵活性和发电效率上取得最优平衡。

燃气电厂的污染物排放(氮氧化物、二氧化硫等)也少于火电厂,被认为是一种环境较为友好的传统电源。事实上,燃气电厂的污染物排放与负载水平有很强的相关性。当燃气电厂高负载时,其单位发电的氮氧化物排放浓度很低;当燃气电厂低负载时,其污染物排放浓度很高,不亚于传统火电站。文献[23-24]量化了燃气电厂的污染物排放,建立了燃气电厂污染物排放的数学模型,提出了考虑环境因素的电力优化调度概念。本文所提的燃气电厂的污染物排放是一个不连续的分段函数,在数学上需要做特殊处理。

2) P2G 技术

P2G 技术是将电力能源转化为化学能,以天然气或氢气的方式存储,是电力能源转化为燃气的重要技术,也是未来长期大规模存储电能的非常有前景的方式之一。P2G 技术的核心步骤是电解水,即通过电解槽分解水得到氢气,这一步骤也被称为电制氢。如果要进一步得到天然气,则需要将电解水产生的氢气与外部输入的二氧化碳进行过甲烷化反应。P2G 技术的化学反应式为:



式(5)为电制氢的化学反应步骤;式(6)为甲烷化反应的步骤^[25]。

P2G 技术得到的氢气可用于燃料电池、工业或交通领域,是一种环境友好的功能方式。P2G 技术还可以将电能转化为易于长期存储的天然气,削弱可再生能源间歇性强的影响,为可再生能源提供消纳空间。P2G 技术甚至可以循环利用电厂排放的二氧化碳,作为一种潜在的“碳补集”装置。

各国研究机构和企业都很重视 P2G 技术的潜力,并进行了广泛的试点和试验,例如奥迪公司在德国建设了一组 6 MW 的 P2G 装置,并做了 P2G 技术参与电网调频、氢气直接注入天然气管网等多项尝试,取得了很好的实验效果^[26]。研究人员也对 P2G 技术的建模、控制、应用做了多方面的研究。文献[27]建立了 P2G 技术的动态模型和状态空间模型,为 P2G 技术参与电网调频奠定了基础。文献[28]研究了 P2G 技术-燃料电池串联的运作方式。文献[29]量化了 P2G 技术对于电网的削峰填谷能力,指出 P2G 技术的应用有利于能源系统的低碳运行。

2.2 能量枢纽模型

2.2.1 能量枢纽的概念和数学模型

多能源系统中的主体不仅包含热电厂、电锅炉等单个元件,更多的是这些元件的高一级封装和组合,这些元件互相耦合,连接关系复杂,往往难以分析。事实上,一个系统最关键的是其输入输出特性,即“外端口”特性。对于多能源系统,需要解决的问题就是如何等效内部元件耦合转化关系,建立映射电、气、热输入输出的外端口模型。

为了解决这个问题,学者提出了使用能量枢纽模型,使用一个耦合矩阵来描述多能源的输入输出关系。即

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: P_j 和 L_i 分别为输入、输出的不同形式能量, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$, $j \in \{1, 2, \dots, m\}$; c_{ij} 为耦合因子。

能量枢纽将复杂的多能源元件耦合关系抽象为简单的矩阵,使得后续的计算、优化等可以直接使用该矩阵进行,大大简化了多能源系统的分析流程。

能量枢纽概念最早出现在瑞士的“未来能源愿景”项目中,文献[9]详细地描述了构建能量枢纽的动机与方法。文献[10]综述了几种典型的能量枢纽模型,包括冷热电三联供系统、国家级能源系统等;还介绍了特殊元件的能量枢纽建模方法,包括对于储能设备、需求响应、电动汽车、新能源并网的处理。文献[30]介绍了能量枢纽的应用,以及基于能量枢纽的优化配置方法。文献[31]则另辟蹊径,提出了虚拟能源母线的概念,研究了虚拟能源母线的架构方法,与能量枢纽异曲同工。

2.2.2 能量枢纽耦合矩阵的自动化建模方法

能量枢纽建模的核心问题是耦合矩阵的生成,即如何根据多能源元件特性及其关联关系生成耦合

矩阵。耦合矩阵的生成方法也与多能源系统的计算机建模息息相关,如果可以通过矩阵运算的方式生成耦合矩阵,那么计算机将能自动地构建能量枢纽模型,为科研及实际应用带来巨大的便利。

耦合矩阵的自动生成是能源枢纽研究的难点,现有研究还不多见。文献[32]首次提出了耦合矩阵自动生成的问题,并提出了一种类似电力潮流计算“前推回代”的生成方法;文献[33]将能量枢纽分解成了“输入-存储-转换-存储-输出”这5个串行模块,并首先生成各个模块的输入-输出矩阵,继而相乘得到能量枢纽的耦合矩阵;文献[34]则定义了多能源系统的节点、端口和支路,通过节点-支路矩阵、端口-支路矩阵运算可以自动生成耦合矩阵。

2.3 能源网络模型

2.3.1 电网模型

电力网络是电力系统传输能量的关键环节,是电力系统研究的重要对象之一。对于以交流网为主的电力系统,其模型可分为动态模型和稳态模型。由于热网和气网不存在动态稳定的问题,因此在多能源系统分析的范畴中同样无需考虑电力系统部分的动态特性,只需要使用电力系统的稳态模型。电力系统的稳态模型通常含有的变量如附录A表A1所示。

电力流在交流电网中遵循基尔霍夫第一定律和第二定律,即节点电流平衡和环路电压降为零,在电网支路上满足的支路特性方程为:

$$\begin{aligned} P_{ij} &= (V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij}) g_{ij} - V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (8) \\ Q_{ij} &= -(V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij}) b_{ij} - V_i V_j g_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (9) \end{aligned}$$

式中: V_i 和 V_j 分别为节点 i 和节点 j 的电压; θ_{ij} 为支路 (i, j) 的相角差; P_{ij} 和 Q_{ij} 分别为支路首端的有功功率和无功功率; g_{ij} 为支路电导; b_{ij} 为支路电纳。

虽然电力系统模型已被学者广泛研究,但仍然存在两个关键问题:①电力电子化电力网络的建模问题,在未来高比例新能源接入电网时,大量的逆变器、整流器会对电网的特性产生影响^[35],而统一的潮流控制器、能量路由器等电力电子器件的应用甚至可以打破电力潮流的不可控性,如何对电力电子化电力网络进行合理建模,这一部分现有研究仍不多见;②电力网络模型的非线性问题,在大规模电网乃至多能源系统的分析中,电力网络模型的非线性会对计算、优化造成很大的困难,对于电网的合理近似和线性化显得尤为重要。部分学者对电网模型线性化做了初步的探索,例如文献[36-37]研究交流电网的线性化模型,并在直流潮流方程的基础上研究了电压和无功功率的近似方法;文献[38-39]则研究

了如何在最优潮流问题中使用线性的电网模型并同时考虑非线性的网损。

2.3.2 热网模型

热网是热力系统的重要环节。热网连接热源和用户,将热源产生的热量通过热水、蒸汽等工质传递到用户。热网的本质是管道流体系统,在此系统的基础上,由于工质的散热和传热,形成系统各个环节温度的差别。热网存在热力损耗、传输时延、水泵电耗,这些损耗、时延与热网的运行方式密切相关。而热网的运行方式又一定程度上决定了热力系统的整体效率、热源的运行方式,继而影响电力系统的运行、风电消纳等。因此,建立热网的模型是多能源系统优化的必要环节。

热网模型可分为稳态模型和动态模型,稳态模型用于长时间尺度的效率分析、优化规划等,动态模型则用于短时间尺度的运行和控制。其模型通常含有的变量如附录A表A2所示。

文献[40-41]详细地研究了热网稳态模型,定义了热网基本变量,给出了基本方程。文献[42]则仿照电力系统模型,建立了热阻、热流等概念。总体上,稳态热网模型一般以热媒流量、温度为变量。稳态热网模型同时满足基尔霍夫第一定律和第二定律,即节点流量平衡、零环路压降。其与电力系统模型的不同点在于支路水力方程、支路热力方程和节点工质混合方程,分别为式(10)至式(12)。

$$\pi_i - \pi_j = C_h f_{ij} |f_{ij}| \quad (10)$$

$$T_{ij}^c = T_{ij}^s \exp\left(-\frac{U_h L_h}{\rho f_{ij}}\right) \quad (11)$$

$$\sum T_{ij}^c f_{ij} + \sum T_i f_i = \sum T_{ij}^s f_{ij} \quad (12)$$

式中: π_i 和 π_j 分别为节点 i 和节点 j 的压力; f_{ij} 为支路 (i, j) 的流量; T_{ij}^s 和 T_{ij}^c 分别为支路 (i, j) 首端温度和末端温度; C_h 为与管道特性相关的常数^[40]; U_h 和 L_h 分别为管道的表面积和长度; T_i 为节点 i 注入的温度; f_i 为节点 i 注入的流量。

支路水力方程描述了热力网络的流量传输特性;支路热力方程描述了热力管网工质传输的热损耗;节点工质混合方程则描述了不同支路的工质在节点的混合过程。

需要注意的是,热网的管道流体方程与温度体系方程是解耦的,即热网管道的边界条件可完全确定热网各支路的流速和压力,在此基础上,根据热源温度、热负荷及各支路散热的情况可以求得各支路的首末温度,这是热网模型和电网模型的本质区别。此外,式(10)至式(12)均含有非线性项,这对热网模型的应用带来了一定困难。文献[41]利用已知点信息将式(10)和式(12)进行了线性化,并详细分析了

不同管道长度和热媒温度对热耗的影响,采用近似的方法将式(11)进行了线性化。不过,现有模型线性化均需利用已有运行点信息或迭代方式对热网线性化,尚未见到如直流潮流方程的直接线性化方法,该领域还有待继续探索。

稳态热网模型无法考虑热网传输时延,其假设条件是热网某节点状态发生变化会立刻反映到全网中。实际上,热网传输时延非常明显,典型的城市热网一般为几小时甚至数十小时,与电力系统的时间常数相差甚远。因此,有必要研究热网的动态模型,为热力系统乃至多能源系统的运行调度奠定基础。

动态热网模型与稳态模型的关键不同在于支路热力方程。在动态方程中,支路工质温度是一个关于时间、位置的函数,具体可表示为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} + \alpha T = 0 \quad (13)$$

式中: T 为支路工质温度,是关于时间 t 和空间位置 x 的函数; α 是管道的热损耗系数^[43]。

式(13)是一个时空偏微分方程,难以求解,且与其他部分的代数方程不同,难以统一。为解决这个问题,部分学者提出了一种称为B-Node的方法^[43]。该方法将热网工质流离散为数个“水包”,并根据各个“水包”温度、传输时间的不同,计算节点的温度动态变化。具体模型可参见文献^[44]。

2.3.3 气网模型

天然气系统的运输方式包括燃气网络、船舶、汽车等,其中燃气网络是体量最大、最为重要的运输方式。燃气网络可分为高压跨区输气网和低压区域配气网,其中高压网络一般将燃气从气源输送至燃气电厂或城市门站;而低压网络则作为高压网络的“负荷节点”,从城市门站将燃气输送至各个用户。低压燃气网主要为用户供气,与其他能源系统相关性较小,且模型简单,可视为网络流,仅考虑节点气量平衡;高压燃气网则需为燃气电厂供气,与电力系统运行关系密切。高压燃气网一般为跨区长距离管道,存在传输时延长、管道压力变化大、管道储气大的特点,因此需要详细建模分析。燃气网络同热力网络类似,一样可以分成稳态模型和动态模型。稳态模型一般以流量、压力作为变量如附录A表A3所示。

燃气网络同热力网络类似,一样可以分成稳态模型和动态模型。文献^[45-46]描述了燃气网络的稳态模型。总体上,稳态模型一般以流量、压力作为变量,稳态气网模型同时满足基尔霍夫第一定律和第二定律,即节点流量平衡、零环路压降。其与电力系统模型不同点在于支路流量方程,支路流量与管道两端气压为非线性关系,即

$$\pi_i^2 - \pi_j^2 = C_g f_{ij} |f_{ij}| \quad (14)$$

式中: C_g 为与管道特性相关的常数^[45]。

压缩机是气网中的重要元件,其功能类似于电力系统的变压器,即增加管网气压,可提高管网运输能力。考虑压缩机后,气网的支路流量方程将发生变化。例如假设支路 (i, j) 上 j 节点附近有变比为 r 的压缩机,则式(14)将变为:

$$\pi_i^2 - \frac{\pi_j^2}{r^2} = C_g f_{ij} |f_{ij}| \quad (15)$$

稳态气网模型与稳态热网模型类似,也假设了某节点的状态变化会瞬时反映到全网。事实上,燃气在管道中传输速率很慢,一个节点的变化通常经过数小时才会完全反映到全网,这为其他节点的调整,例如燃气机组的运行方式,提供了额外的优化空间和时间。另外,天然气可压缩,压力越大则密度越高,存储在气网中的天然气也越多。为了反映气网的动态变化过程及气网的能量存储,有必要研究气网的动态模型。

气网动态模型可表示为:

$$\begin{cases} \frac{\partial D}{\partial t} = -C_{g1} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial D^2}{\partial x} = -C_{g2} f |f| \end{cases} \quad (16)$$

式中: D 和 f 分别为管道气压和燃气流量,是关于时间 t 和空间位置 x 的函数; C_{g1} 和 C_{g2} 分别为与管道特性相关的常数^[47-48]。

动态模型与稳态模型关键的不同在于额外的气压时变方程,即式(16)的第1行。式(16)的第2行表征气压降流量的关系。事实上,动态气网模型与稳态模型一脉相承。在式(16)第2行的左右两边对 x 积分,并忽略流量随 x 的变化,可推导至稳态方程,即

$$\begin{aligned} \int dD^2 &= \int C_2 f |f| dx \Rightarrow \\ \pi_i^2 - \pi_j^2 &= C_{g2} L_{ij} f_{ij} |f_{ij}| \Rightarrow \\ \pi_i^2 - \pi_j^2 &= C_g f_{ij} |f_{ij}| \end{aligned} \quad (17)$$

2.3.4 统一能量传导网络模型及多网耦合模型

多能源网络是否可以“同质化”建模是部分学者研究的重要问题之一。即热力、燃气、电力网络是否可以采用通用的数学公式表达,而不采用式(8)至式(15)的公式。文献^[42]对热力系统进行了分析,建立了热阻的概念,尝试采用电路的模型描述热力网络;文献^[49]则从电能、热能等能量传输的基本物理方程入手提出了能量网络基本方程的概念,总结了基于强度量和广延量的广义基尔霍夫方程,认为不同能源网络中强度量与广延量均有具体的对应方

式(例如:电力系统中强度量为电压,广延量为电流)。但是该理论没有考虑到热网中流体流动与温度分布的解耦关系,同时也难以考虑热网中水泵和气网中压缩机等特殊元件的模型。文献[50]在能量枢纽概念的基础上提出了能量传导器的概念,但仍局限于能量网络流模型,即不考虑回路压力、支路特性等方程,仅考虑节点平衡方程。本文认为,电力、热力、燃气模型遵循不同的物理规律,表达形式在本质上是不同的,难以在细节上进行“同质化”。因此在对计算精度要求较高的场合,应使用电-热-气网络各自的特有模型。从另外一个角度,三个网络模型均遵循基尔霍夫第一定律和第二定律,因此可使用网络流模型描述三个网络能量的流动与分配,可应用在规划等精度要求不高的领域。

多能源网络耦合建模及分析也是多能源系统的重要问题之一。以多能源网络耦合模型为基础,通过对不同能源网络模型进行联立可以进行多能源系统综合潮流分析。文献[40]研究了电-热耦合网络模型,给出了电热网络综合潮流分析中牛顿-拉夫逊迭代法中雅可比矩阵的结构,说明了电锅炉、CHP机组等元件对雅可比矩阵的贡献。文献[51]研究了电-气耦合网络模型,指出天然气管道温度变化对天然气管道储气及气流分析均有影响,并提出了考虑天然气管道温度变化的电-气潮流分析模型。文献[52-54]则研究了电-气-热的耦合网络模型,并以此为基础采用牛顿-拉夫逊法进行综合潮流分析,其中文献[52]划分了多能源系统中不同能源网络的节点类型,并详细地研究了综合潮流分析中雅可比矩阵的结构,指出了其中的零元素部分、稀疏部分和非稀疏部分及各个能源网络的贡献。除了确定性的多能源网络耦合建模外,文献[55-56]还研究了多能源网络的概率潮流建模和计算方法,在电力系统概率潮流的概念上进行了延拓。

3 以电-热耦合为主的区域多能源系统优化运行和规划

3.1 基于电热系统灵活运行的可再生能源消纳

CHP机组“以热定电”使系统难以灵活地应对可再生能源的波动性和不确定性,热力系统中可以引入蓄热装置、电锅炉等可以提供灵活性的设备,打破“以热定电”运行约束,通过热力系统的灵活运行为电力系统提供灵活性。具体而言,在CHP机组侧加装集中式储热装置或在用户侧加装分布式储热装置,能够使热负荷在一定的时间范围内转移,可以在电负荷较高时,提高CHP机组供电量与供热量同时蓄热;而在可再生能源出力较大时,降低CHP

机组发电量与供热量。而热负荷主要通过储热系统释放热量来供应,进而提高了可再生能源的消纳空间。在此基础上,增加热泵、集中式或分布式电锅炉,能够在可再生能源出力较大时,利用电加热装置供热,并且与储热装置进行协同,进一步增加了可再生能源的消纳空间。

基于CHP机组、电锅炉、热泵等灵活运行的可再生能源消纳场景可抽象为数学模型,即

$$\begin{cases} \min f(P_{c,t}, H_{c,t}) \\ \text{s.t. } P_{c,t} + W_t = L_{e,t} \\ H_{c,t} + H_{o,t} = L_{h,t} \\ g(P_{c,t}, H_{c,t}, H_{o,t}) \leq 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_{c,t}$ 和 $H_{c,t}$ 分别为 t 时刻CHP机组的发电功率和供热功率; W_t 为风电出力; $H_{o,t}$ 为电锅炉、热泵等元件的热出力; $L_{e,t}$ 为区域电力需求,包括用户、电锅炉和热泵电负荷; $L_{h,t}$ 为区域热力需求。

区域多能源系统运行的目标函数一般为成本最小,也可以是弃风最少、碳排放最少等;约束条件中的 $P_{c,t} + W_t = L_{e,t}$ 表示电力负荷的平衡; $H_{c,t} + H_{o,t} = L_{h,t}$ 表示热力负荷的平衡,用户热力负荷由CHP机组、电锅炉、热泵共同提供; $g(P_{c,t}, H_{c,t}, H_{o,t}) \leq 0$ 表示CHP机组、电锅炉、热泵的运行约束,此约束为非等式约束,描述了CHP机组的可行运行区间,给区域多能源系统的运行创造了灵活的调节空间。

文献[57]建立了结合热泵与储热装置的能源集成优化模型,并通过研究2020年丹麦在50%风电接入率情况下的场景,表明分散式热泵与储热环节对风电的消纳十分有利。文献[58]利用EnergyPLAN仿真分析软件,分析了丹麦城市发展热泵技术的可行性和对风电消纳的价值。文献[15]研究了中国利用电锅炉消纳风电的经济性,分析了风电供暖模式的实际经济效益和系统风电消纳能力。研究表明,相比于“以热定电”的供能方式,采用电锅炉、供热机组的灵活调节,能够为可再生能源的波动性及不确定性留有调节裕度,也能够增强可再生能源的消纳能力。

3.2 考虑热网惯性和储热的可再生能源消纳

供热系统存在较大的热惯性,使其在供热时无需实时满足供需平衡。例如,对于居民供暖或生活热水的供应,仅需要满足热定温度在某一区间内,通过灵活安排CHP机组、电锅炉、热泵的供热,能够在满足设定温度的同时为电力系统提供灵活性。

式(18)描述了区域综合能源系统运行的基本方式,是一个“单时间断面”的模型。事实上,热力系统惯性很大,且有多种蓄热装置,考虑热力系统的时间效应会给区域综合能源系统的运行带来更大的优化

空间。热网惯性和储热的效果反应在模型上都是时序的耦合,因此考虑热网惯性和储热后,区域综合能源系统的优化模型可修改为:

$$\begin{cases} \min f(P_{c,t}, H_{c,t}) \\ \text{s.t. } P_{c,t} + W_t = L_{e,t} \\ H_{c,t} + H_{o,t} + H_{s,t} = L_{h,t} \\ g(P_{c,t}, H_{c,t}, H_{o,t}) \leq 0 \\ h(H_{s,1}, H_{s,2}, \dots, H_{s,T}) \leq 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中: $H_{s,t}$ 为热力系统和储热装置 t 时刻的热出力,数值为正表示供热,数值为负表示储热;约束 $h(H_{s,1}, H_{s,1}, \dots, H_{s,T}) \leq 0$ 为热网和储热装置的时序耦合约束,例如热网的时延特性约束、储热装置的始末状态约束等等。

文献[59]研究了热网储热装置的优化运行方式,指出储热装置可显著提高区域综合能源系统运行可行域,提高风电消纳比例。文献[60]研究了热网惯性对区域风电消纳的影响,研究显示考虑区域热网2~3 h的热力传输时延可进一步优化区域系统运行,提高约2%的风电消纳。文献[16]则研究了建筑物储热和人体舒适度惯性,将其视为虚拟的储热装置,量化了其对于可再生能源消纳的影响。

3.3 基于多能源系统综合需求响应可再生能源消纳

负荷侧的综合能源需求具有一定弹性,用户不仅可以按照价格激励或其他奖励调整用电、用热负荷,还可以在不改变需求的前提下,通过调整能源生产及转换方式,使用户等效地具备需求响应的能力。例如,在电、热、气集成的系统中,微型CHP机组与电锅炉联合实现供电与供热,当电力供需紧张时,可通过提高CHP机组出力、降低电锅炉负荷的方式,降低整个能源系统电力需求。但从用户的角度而言,用户的用电需求与用热需求并没有被压缩。文献[61-62]首次提出了综合需求响应的概念。综合需求响应中,能源消费者不仅仅通过削减能源消费量进行需求响应,还可以通过改变能源消费类型来进行响应。随着多能源系统的广泛应用,包括基础负荷在内的所有能源负荷都可以通过其他形式能源与电能之间的转换来参与需求响应。

式(18)描述了区域综合能源系统运行的基本方式,其潜在假设是“刚性”的用能负荷。事实上,在考虑综合能源需求响应后,用户用能会进行相应变化,区域综合能源系统的优化模型也变化为:

$$\begin{cases} \min f(P_{c,t}, H_{c,t}) \\ \text{s.t. } P_{c,t} + W_t = L_{e,t} + \Delta L_{e,t} \\ H_{c,t} + H_{o,t} = L_{h,t} + \Delta L_{h,t} \\ g(P_{c,t}, H_{c,t}, H_{o,t}) \leq 0 \\ h(\Delta L_{e,t}, \Delta L_{h,t}) \leq 0 \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\Delta L_{e,t}$ 和 $\Delta L_{h,t}$ 分别为电力、热力的主动响应量,可以是简单的数值,也可以是关于某个变量的函数;约束 $h(\Delta L_{e,t}, \Delta L_{h,t}) \leq 0$ 表示电力、热力的主动响应量需满足一定的约束条件,例如元件特性约束、响应量上下限约束等等。

文献[63]分析了CHP机组、电锅炉及光伏发电装置组成的家庭小型供能系统的综合需求响应能力,通过CHP机组和与电锅炉系统通过灵活需求响应能够应对光伏出力的不确定性,考虑综合需求响应后,系统供热运行成本将会上升,但是由于光伏引起的电力不平衡的成本将会降低很多,进而降低整体的成本。文献[64]研究了多能源系统的可移峰负荷的概念,给出了多能源系统移峰潜力评价解析化模型,评估了多能源系统不同移峰深度下的成本及效益。研究表明,多能源系统边际移峰成本随移峰深度的增加而上升。文献[65]建立了多能源系统综合需求响应的随机性模型,考虑了环境温度、热水消耗及电力系统备用成本的不确定性模型,给出了综合能源系统响应系统不平衡量的控制方法。

3.4 面向可再生能源消纳的区域多能源系统规划

提高可再生能源的消纳不仅需要区域综合能源系统灵活运行,还需要在运行前做好区域多能源系统的规划。科学的多能源系统规划可以弥补各能源系统单独规划的不足,充分考虑耦合和互补关系,从而提高资产利用效率,从根本上为可再生能源消纳提供空间。文献[10]指出,区域多能源系统的规划主要解决在何时、何地、建立多少容量、具有何种结构的能量转换单元,各能源系统元件如何连接组合的问题。区域综合能源系统规划的设备包括CHP供电厂、电锅炉、储热装置、P2G装置等,其中以电热元件为主。

区域多能源系统的规划模型包含投资决策0-1变量,是典型的混合整数规划问题。由于可再生能源出力具有不确定性,区域多能源系统的规划往往还要考虑可再生能源处理场景,建立机会约束规划、随机优化、鲁棒优化等模型。

文献[66]建立了区域电热系统的投资规划模型,研究了满足区域电热需求的最优设备组合;文献[67]以电力系统可靠性为基础建立了多能源设备的可靠性模型,并在规划中考虑了多能源设备的可靠性;文献[68]不仅考虑了设备容量选择,还在规划模型中考虑了多能耦合设备的连接关系。该文献还研究了一个区域多能源系统能量转换与存储元件的选择及结构联合优化问题,即多能源系统“从无到有”的规划。

4 以电-气耦合为主的跨区多能源系统优化运行和规划

4.1 考虑供气系统安全性的可再生能源消纳

燃气机组作为一种调节性能强、启停灵活快速的机组,被视为可再生能源消纳的重要手段之一。然而,燃气机组需要从输气管网中抽取天然气作为原料,因此受到气源不确定性的影响和气网安全性的影响。气源不确定性指供气端可能因突发事件中断供气,例如海上油田管道断裂、运输液化天然气的邮轮未能按时抵达港口等等。气网安全性则是指气网的管道压力限制,即压力不能过大以致威胁气网安全,也不能过小以致影响末端配气网的运行。如果气源发生断供或气网出现安全事故,则燃气电厂无法正常运行,不仅会影响可再生能源的消纳,更会威胁电网的安全运行。因此,有必要在电力系统优化运行时考虑供气系统的安全性。

考虑供气系统安全性的可再生能源消纳模型以电力系统本身的运行为主,供气系统仅作为约束条件,不出现在目标函数中,其模型可抽象为:

$$\begin{cases} \min f(P_i^e) \\ \text{s.t.} & g_1(P_i^e, W_i) \leq 0 \\ & g_2(P_i^g, Q_i^g) \leq 0 \\ & g_3(P_i^e, Q_i^g) \leq 0 \end{cases} \quad (21)$$

式中: P_i^e 为燃气机组的发电功率; P_i^g 和 Q_i^g 分别为燃气系统的压力和流量。

式(21)以电力系统运行成本最低为目标,考虑的约束包括电力系统运行约束、风电消纳约束 $g_1(P_i^e, W_i) \leq 0$,燃气系统运行安全约束 $g_2(P_i^g, Q_i^g) \leq 0$,电-气耦合约束 $g_3(P_i^e, Q_i^g) \leq 0$ 。其中,燃气系统运行安全约束包括气源的不确定性、燃气管网模型、节点压力限制等,电-气耦合约束包括燃气电厂的进气量与发电量约束等。

文献[69]研究了气源不确定性的建模,并建立了考虑气源不确定性的电力系统机组组合模型。文献[47]建立了燃气管网的稳态模型,并研究了考虑气网安全性的电力系统经济调度问题,该论文使用连续线性规划法处理了燃气管网约束的非线性,结果显示考虑天然气安全约束可以有效避免天然气管网故障发生,保障电力系统安全。文献[70]则进一步考虑燃气管网的动态特性,精细化地分析了动态与静态约束下电力系统运行可行域的区别。文献[48]使用节点-支路矩阵建立了标准化的燃气管网动态方程,并指出风电的波动性可能进一步加剧燃气管网压力的波动,采用鲁棒优化方法确保电-气系统的安全运行。

4.2 考虑 P2G 技术和储气的可再生能源消纳

考虑供气系统安全性的可再生能源消纳只是单方面地考虑了燃气系统对电力运行的限制,并未考虑燃气系统给电力运行带来的“福利”。事实上,天然气可大规模、长期存储,例如直接压缩存储于大型储气罐,或液化为液化天然气进行存储。通过优化天然气系统的存储行为,可以更好地为燃气电厂提供服务,使其在电力系统重负荷条件下“有气可用”。另外,P2G技术也为可再生能源消纳提供了新的空间。在可再生能源出力较大、无法消纳的时段,可通过P2G装置转换为燃气存储在储气罐内,在必要的时段供给燃气电厂进行发电。

考虑P2G技术和储气装置后,电-气系统问题从单时间断面优化演变为了多时段耦合问题,即将式(21)的 $g_2(P_i^g, Q_i^g) \leq 0$ 约束延拓为多时段约束。电-气耦合也不局限于燃气电厂发电量和进气量的约束,还需要在约束 $g_3(P_i^e, Q_i^g) \leq 0$ 中考虑P2G装置用电量与生产天然气量的关系。

文献[71]采用考虑燃气网输气模型及电力系统最优潮流模型的中长期运行模拟评估了P2G技术对电力系统和燃气系统的影响。结果表明,采用P2G技术能够有效地存储并消纳一部分可再生能源,如果P2G站建立在气网末端,对气网运行的影响是很小的。同时,P2G技术也可以延缓输气网络的翻新,同时能够降低电网及燃气网的阻塞。文献[72]指出目前P2G技术的成本仍然较高,能量转换效率相比其他类型的储能相对较低,仅在可再生能源装机比例很高的情况下才能具有经济性。文献[73]研究了含有P2G技术的微电网系统,指出P2G技术将电力系统中的不确定性转移到了更容易接纳不确定性的供气系统中,可以作为微电网储能的解决方案。

4.3 面向可再生能源消纳的电-气联合规划

电-气系统的联合优化规划有助于从根本上协调两个系统的基础设施建设,充分考虑耦合和互补关系,从而提高能源利用效率,从根本上为可再生能源消纳提供空间。电-气联合规划主要包括设备规划与网络规划两个方面,设备规划包括燃气电厂、P2G装置、气网压缩机的规划,主要解决在何时、何地、建立多大容量的设备;网络规划则指电网-气网的协同规划,主要解决如何协同建设电网和气网,减小网络故障的概率,提高可再生能源的消纳水平。

文献[74]详细描述了电-气协同长期多区域多阶段规划问题,指出该问题是一个多场景多阶段的混合整数规划问题。论文研究了电网、电源、气网、气源的联合规划方法,以巴西电力和燃气系统为例进行了算例分析。研究结果表明在正常负荷水平下

电-气协同规划并没有降低运行费用,但在极端场景下(例如水电故障),电-气协同规划可显著降低运行费用。文献[75]建立了电-气网络联合规划问题,指出气网的非线性是规划问题的难点所在。论文分别将网络流模型、非线性气网模型和近似线性气网模型嵌入了规划问题,并介绍了相应的求解算法。

5 面向可再生能源消纳的多能源系统关键科学技术问题

5.1 多能源系统多时间常数耦合问题

多能源系统各个子系统动态过程的时间常数差异很大。电力系统的时间常数一般为秒级,而热力系统、燃气系统通常为小时级。在这种情况下,电力系统的稳态分析时间尺度对于热力、燃气系统而言是动态过程,而热力、燃气系统的稳态过程又包含了多个电力系统的稳态过程,两者互相耦合。具有不同时间常数的能源系统相互耦合的机理是多能源系统需要解决的关键科学问题之一。另外,热力、燃气系统与电力系统相异的时间常数也为可再生能源的消纳、大规模和长期存储提供了可能,如何利用多能源系统的时间常数差异也是研究者需要聚焦的问题之一。

5.2 多能源系统的经济理论

多能源系统的运行需要受到科学的市场机制和价格理论指导。在电力系统中,等微增率理论给出了发电机煤耗和最优发电功率的关系,节点电价理论则运用价格的概念描述了电力系统网络的约束等等。那么多能源系统及其子系统是否有对应的“等微增率理论”、“节点电价理论”,以描述能源生产成本和能源传输成本?这是多能源系统的关键科学问题之一。

5.3 多能源系统的标准化及自动化建模问题

多能源系统涉及电、气、热等多个系统,不同系统遵循不同的物理规律,有不同的数学模型,且不同的能源系统互相耦合。在这种情况下,需要一套标准化的定义去描述这种复杂耦合关系,提出多能源系统的“节点-导纳矩阵”、“标准支路模型”、“基于矩阵运算的系统分析方法”等等。采用以矩阵为基础的标准化多能源元件、能量枢纽、网络模型及以矩阵运算为基础的多能源系统分析方法是大规模多能源系统计算机分析的基础,也是多能源系统面临的重要技术问题之一。如何采用标准化的建模技术处理多能源系统中的非线性问题,是自动化建模问题中的难点。目前的研究多基于某个典型的多能源系统进行建模,模型可扩展性不强,难以实现计算机自动化的建模和分析。

5.4 多能源系统的分解协调方法

目前大部分文献对多能源系统优化运行和规划问题的研究都采用集中式的优化方法,即将电、气、热模型统一优化。事实上,现实中不同能源系统通常是分散决策的,集中优化并不符合多能源系统实际运行场景。另外我们注意到,不同能源系统之间并非“强耦合”关系,例如热力与电力系统的耦合元件通常只有 CHP 机组、电锅炉、热泵,燃气与电力系统的耦合元件只有燃气电厂、P2G 装置等,这为多能源系统的分解协调提供了可能。那么,是否有可能类比电力系统多区域分解算法,采用多系统分解协调优化多能源系统的运行,从而减少计算压力和计算时间?这也是多能源系统研究需要解决的关键技术问题之一。

6 面向可再生能源消纳的多能源系统研究展望

6.1 多能源系统的等值模型研究

等值是电力系统重要的思想之一,可将复杂系统简单化,例如戴维南等值、诺顿等值等。对于面向可再生能源的多能源系统研究,其主体仍为电力系统,那么是否可以采用等值的思想,将燃气、热力系统等值为电力系统的一个外部约束,简化多能源系统的分析难度。例如燃气、热力系统时间常数较大,有储能的效果,那么是否可以将其等值为电力系统中具有储能效益的“电容”、“电抗”,并看成电力系统的一个外部组件进行分析?这些问题尚未有学者进行深入研究,但作者认为这是多能源系统未来可以挖掘的重要研究点之一。

6.2 多能源系统的多维数据分析

大数据分析技术已应用在电力系统的各个领域,例如负荷预测、拓扑辨识、动态稳定判断等,是现代电力系统分析的重要技术之一。而对于多能源系统,我们同样可以整合各个能源系统的数据,用数据驱动的方法对各个能源系统进行分析。更为重要的是,由于多能耦合的普遍存在,不同能源系统类型的数据一定具有较强的相关性或关联特性,对此深入挖掘或许能带来单个能源系统数据分析不能发现的信息。不过现有文献鲜有对多能源数据问题的研究,也鲜有公开的多能源系统数据集,仍是一块“价值洼地”。

6.3 多能源系统的市场研究

合理的市场机制是促进可再生能源消纳的关键要素之一。对于多能源系统,不同类型能源市场的耦合方式也同样影响多能源系统的运行及可再生能源的消纳。美国的新英格兰州就曾因为电力和燃气

市场日前出清时间的不同,出现了冬季早高峰燃气机组无气可用、无电可发的问题。因此,在多能源系统的发展中,如何设计每个能源市场的机制,如何协调不同类型能源市场的组织^[76],都是值得研究的重要问题。

6.4 利用多能源系统消纳可再生能源的新场景探索

多能源系统为可再生能源的消纳提供了新的可能性,例如前文所述利用电锅炉、热泵等打破“以热定电”,利用P2G技术和储气装置提供可再生能源的长期存储等等。不过上文综述的场景依然有限,如何挖掘多能源系统新的潜力,为可再生能源消纳提供新的场景,这是多能源系统亟待解决的问题之一,也是进一步研究优化运行、规划的基础。

7 结语

在中国可再生能源消纳问题突出的大背景下,发展多能源系统有利于突破电力系统本身的能力瓶颈,从能源的角度给予可再生能源消纳更大的优化空间。本文分析了多能源系统的整体结构和时空特性,给出了多能源系统的研究框架。本文还根据给定的研究框架,从“多能源系统建模”、“以电—热耦合为主的区域多能源系统分析”、“以电—气耦合为主的跨区多能源系统分析”三条主线,综述、总结了已有文献,并给出了本文的思考。除此之外,本文还总结了面向可再生能源的多能源系统分析面临的关键科学问题,并展望了多能源系统几个潜在的研究方向,以期为学者未来的研究提供参考。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 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. DOI: 10.7500/AEPS20150512001.
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. DOI: 10.7500/AEPS20150512001.
- [2] 国务院. 关于积极推进“互联网+”行动的指导意见[EB/OL]. [2017-07-04]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-07/04/content_10002.htm.
- [3] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于推进多能互补集成优化示范工程建设的实施意见[EB/OL]. [2016-07-07]. http://www.nea.gov.cn/2016-07/07/c_135496039.htm.
- [4] 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. DOI: 10.7500/AEPS20141009011.
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. DOI: 10.7500/AEPS20141009011.
- [5] 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): 3292-3305.
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): 3292-3305.
- [6] 程耀华, 张宁, 康重庆, 等. 低碳多能源系统的研究框架及展望[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4060-4069.
CHENG Yaohua, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Research framework and prospects of low-carbon multiple energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4060-4069.
- [7] 丁一, 江艺宝, 宋永华, 等. 能源互联网风险评估研究综述(一): 物理层面[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3806-3817.
DING Yi, JIANG Yibao, SONG Yonghua, et al. Review of risk assessment for energy internet: Part 1 physical level[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3806-3817.
- [8] 江艺宝, 宋永华, 丁一, 等. 能源互联网风险评估研究综述(二): 信息及市场层面[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4023-4034.
JIANG Yibao, SONG Yonghua, DING Yi, et al. Review of risk assessment for energy internet: Part 2 information and market level[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4023-4034.
- [9] GEIDL M, KOEPEL G, FAVRE P, et al. Energy hubs for the future[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 5(1): 24-30.
- [10] 王毅, 张宁, 康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5669-5681.
WANG Yi, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5669-5681.
- [11] 郝然, 艾芊, 朱宇超, 等. 基于能源集线器的区域综合能源系统分层优化调度[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 171-178.
HAO Ran, AI Qian, ZHU Yuchao, et al. Hierarchical optimal dispatch based on energy hub for regional integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 171-178.
- [12] 吕泉, 陈天佑, 王海霞, 等. 配置储热后热电机组调峰能力分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 34-41. DOI: 10.7500/AEPS20130724002.
LYU Quan, CHEN Tianyou, WANG Haixia, et al. Analysis on peak-load regulation ability of cogeneration unit with heat accumulator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 34-41. DOI: 10.7500/AEPS20130724002.
- [13] CHEN X, KANG C, O'MALLEY M, et al. Increasing the flexibility of combined heat and power for wind power integration in China: modelling and implications[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 1848-1857.
- [14] 吕泉, 陈天佑, 王海霞, 等. 含储热的电力系统电热综合调度模型[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 79-85.
LYU Quan, CHEN Tianyou, WANG Haixia, et al. Combined heat and power dispatch model for power system with heat

- accumulator[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(5): 79-85.
- [15] 吕泉, 姜浩, 陈天佑, 等. 基于电锅炉的热电厂消纳风电方案及其国民经济评价[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(1): 6-12. DOI: 10.7500/AEPS201206124.
LYU Quan, JIANG Hao, CHEN Tianyou, et al. Wind power accommodation by combined heat and power plant with electric boiler and its national economic evaluation [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(1): 6-12. DOI: 10.7500/AEPS201206124.
- [16] CHEN X, LU X, MCELROY M B, et al. Synergies of wind power and electrified space heating; case study for Beijing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(3): 2016-24.
- [17] 李佳佳, 胡林献. 基于二级热网电锅炉调峰的消纳弃风方案研究[J]. *电网技术*, 2015, 39(11): 3286-3291.
LI Jiajia, HU Linxian. Research on accommodation scheme of curtailed wind power based on peak-shaving electric boiler in secondary heat supply network[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(11): 3286-3291.
- [18] 路桂明. 基于模糊 PID 控制的电锅炉温度控制系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2007.
- [19] PARAT. High voltage electrode boiler for steam and hot water [EB/OL]. [2017-10-01]. <http://www.parat.no/en/ieh>.
- [20] 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.
- [21] BOYCE M P. *Gas turbine engineering handbook*[M]. London, UK: Palgrave, 2006.
- [22] TROY N, FLYNN D, OMALEY M. Multi-mode operation of combined-cycle gas turbines with increasing wind penetration [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(1): 484-492.
- [23] GENG Z, CHEN Q, XIA Q, et al. Environmental generation scheduling considering air pollution control technologies and weather effects [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 32(1): 127-136.
- [24] GENG Z, CHEN Q, CHEN X, et al. Unit commitment model including detailed modeling of combined cycle gas turbine concerning weather impacts [C]// 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, June 29-July 2, 2015, Eindhoven, Netherlands: 1-6.
- [25] SCHIEBAHN S, GRUBE T, ROBINIUS M, et al. Power to gas: technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(12): 4285-4294.
- [26] BAILERA M, LISBONA P, ROMEO L M, et al. Power to gas projects review: lab, pilot and demo plants for storing renewable energy and CO₂ [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 69: 292-312.
- [27] XING X, LIN J, WAN C, et al. Modelling the dynamic electrical behaviour of high temperature electrolysis for hydrogen production[C]// IEEE Power & Energy General Meeting, July 16-20, 2017, Chicago, USA: 1-6.
- [28] KIRUBAKARAN A, JAIN S, NEMA R K. A review on fuel cell technologies and power electronic interface[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(9): 2430-2440.
- [29] CLEGG S, MANCARELLA P. Integrated electrical and gas network flexibility assessment in low-carbon multi-energy systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(2): 718-731.
- [30] 崔鹏程, 史俊祎, 文福拴, 等. 计及综合需求侧响应的能量枢纽优化配置[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(6): 101-109.
CUI Pengchen, SHI Junwei, WEN Fushuan, et al. Optimal energy hub configuration considering integrated demand response[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 27(6): 101-109.
- [31] 王成山, 洪博文, 郭力, 等. 冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(31): 26-33.
WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li, et al. A general modelling method for optimal dispatch of combined cooling, heating and power microgrid [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(31): 26-33.
- [32] CHICCO G, MANCARELLA P. Matrix modelling of small-scale trigeneration systems and application to operational optimization[J]. *Energy*, 2009, 34(3): 261-273.
- [33] ALMASSALKHI M R, TOWLE A. Enabling city-scale multi-energy optimal dispatch with energy hubs[C]// IEEE Power Systems Computation Conference. June 20-24, 2016, Genoa, Italy: 1-7.
- [34] WANG Y, ZHANG N, KANG C, et al. Standardized matrix modelling of multiple energy systems [J/OL]. *IEEE Transactions on Smart Grid* [2017-09-10]. <http://ieeexplore.ieee.org/document/8006283/>.
- [35] 袁小明, 程时杰, 胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压角动态稳定问题 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(19): 5145-5154.
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(19): 5145-5154.
- [36] YANG J, ZHANG N, KANG C, et al. A state-independent linear power flow model with accurate estimation of voltage magnitude[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 32(5): 3607-3617.
- [37] ABEDI S, FATEMI S M. Introducing a novel DC power flow method with reactive power considerations[C]// IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2015, Denver, USA: 1-1.
- [38] CASTILLO A, LIPKA P, WATSON J P, et al. A successive linear programming approach to solving the IV-ACOPF [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(4): 2752-2763.
- [39] YANG Z, ZHONG H, BOSE A, et al. A linearized OPF model with reactive power and voltage magnitude; a pathway to improve the MW-Only DC OPF [J/OL]. *IEEE Transactions on Power Systems* [2017-09-10]. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7954975/>.
- [40] LIU X, JENKINS N, WU J, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. *Energy Procedia*, 2014, 61:

- 155-159.
- [41] 顾伟,陆帅,王珺,等.多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化[J].中国电机工程学报,2017,37(5):1305-1315.
GU Wei, LU Shuai, WANG Jun, et al. Modelling of the heating network for multi-district integrated energy system and its operation optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1305-1315.
- [42] 戴远航,陈磊,闵勇,等.风电场与含储热的热电联产联合运行的优化调度[J].中国电机工程学报,2017,37(12):3470-3489.
DAI Yuanhang, CHEN Lei, MIN Yong, et al. Optimal dispatch for joint operation of wind farm and combined heat and power plant with thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3470-3489.
- [43] HALLDOR P, HELGE V L, HANS F R, et al. Equivalent models of district heating systems[J/OL]. *Ens Journal*[2017-09-10]. [http://orbit.dtu.dk/en/publications/equivalent-models-of-district-heating-systems\(617cd742-960a-4d44-b7a2-d99620f25965\).html](http://orbit.dtu.dk/en/publications/equivalent-models-of-district-heating-systems(617cd742-960a-4d44-b7a2-d99620f25965).html).
- [44] LI Z, WU W, SHAHIDEPOUR M, et al. Combined heat and power dispatch considering pipeline energy storage of district heating network [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2015, 7(1): 12-22.
- [45] LIU C, SHAHIDEPOUR M, FU Y, et al. Security-constrained unit commitment with natural gas transmission constraints[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, 24(3): 1523-1536.
- [46] SHAHIDEPOUR M, FU Y, WIEDMAN T. Impact of natural gas infrastructure on electric power systems [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2005, 93(5): 1042-1056.
- [47] WONG P, LARSON R. Optimization of natural-gas pipeline systems via dynamic programming[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1971, 13(5): 475-481.
- [48] YANG J, ZHANG N, KANG C, et al. Effect of natural gas flow dynamics in robust generation scheduling under wind uncertainty[J/OL]. *IEEE Transactions on Power Systems* [2017-09-10]. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7995136/>.
- [49] 陈皓勇,文俊中,王增煜,等.能量网络的传递规律与网络方程[J].西安交通大学学报,2014,48(10):66-76.
CHEN Haoyong, WEN Junzhong, WANG Zengyu, et al. Transfer laws and equations of energy networks[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2014, 48(10):66-76.
- [50] ZURICH E. Hybrid energy transmission for multi-energy networks [J/OL]. *Diss Dgnessische Technische Hochschule Eth Zürich* [2017-09-10]. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005698158>.
- [51] MARTINEZ M A, FUERTE E. 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.
- [52] SHABANPOUR H A, SEIFI A R. An integrated steady-state operation assessment of electrical, natural gas, and district heating networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(5): 3636-3647.
- [53] 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.
- [54] 王英瑞,曾博,郭经,等.电-热-气综合能源系统多能流计算方法[J].电网技术,2016,40(10):2942-2950.
WANG Yingrui, ZENG Bo, GUO Jing, et al. Multi-energy flow calculation method for integrated energy system containing electricity, heat and gas [J]. *Power System Technology*, 2016, 40(10): 2942-2950.
- [55] 陈胜,卫志农,孙国强,等.电-气混联综合能源系统概率能量流分析[J].中国电机工程学报,2015,35(24):6331-6340.
CHEN Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Probabilistic energy flow analysis in integrated electricity and natural gas energy systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(24): 6331-6340.
- [56] 孙娟,卫志农,孙国强,等.计及P2H的电-热互联综合能源系统概率能量流分析[J].电力自动化设备,2017,37(6):62-68.
SUN Juan, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Analysis of probabilistic energy flow for integrated electricity-heat energy system with P2H[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(6): 62-68.
- [57] HEDEGAARD K, MATHIESEN B V, LUND H, et al. Wind power integration using individual heat pumps-analysis of different heat storage options [J]. *Energy*, 2012, 47(1): 284-293.
- [58] STERGAARD P A. Wind power integration in Aalborg Municipality using compression heat pumps and geothermal absorption heat pumps[J]. *Energy*, 2013, 49: 502-508.
- [59] 陈磊,徐飞,王晓,等.储热提升风电消纳能力的实施方式及效果分析[J].中国电机工程学报,2015,35(17):4283-4290.
CHEN Lei, XU Fei, WANG Xiao, et al. Implementation and effects of thermal storage in improving wind power accommodation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(17): 4283-4290.
- [60] 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 benefits on wind power accommodation considering heating network constraints[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(14): 3596-3604.
- [61] SHEIKHI A, RAYATI M, BAHRAMIS, et al. Integrated demand side management game in smart energy hubs[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(2): 675-683.
- [62] BAHRAMI S, SHEIKHI A. From demand response in smart grid toward integrated demand response in smart energy hub [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(2): 650-658.
- [63] PATTEEUW D, BRUNINX K, ARTECONI A, et al. Integrated modelling of active demand response with electric heating systems coupled to thermal energy storage systems[J]. *Applied Energy*, 2015, 151: 306-319.
- [64] MANCARELLA P, CHICCO G. Real-time demand response from energy shifting in distributed multi-generation[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, 4(4): 1928-1938.

- [65] GOOD N, KARANGELOS E, NAVARRO E A, et al. Optimization under uncertainty of thermal storage-based flexible demand response with quantification of residential users' discomfort [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2333-2342.
- [66] XU X, JIN X, JIA H, et al. Hierarchical management for integrated community energy systems [J]. Applied Energy, 2015, 160: 231-243.
- [67] SHAHMOHAMMADI A, MORADI D M, GHASEMI H, et al. Optimal design of multicarrier energy systems considering reliability constraints [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 878-886.
- [68] WANG Y, ZHANG N, KANG C, et al. An MILP based optimal configuration planning of energy hub [J/OL]. Applied Energy [2017-09-10]. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.114>.
- [69] ZHAO B, CONEJO A J, SIOSHANSI R. Unit commitment under gas-supply uncertainty and gas-price variability [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2394-2405.
- [70] LIU C, SHAHIDEHPOUR M, WANG J. Coordinated scheduling of electricity and natural gas infrastructures with a transient model for natural gas flow [J]. Chaos, 2011, 21(2): 531
- [71] CLEGG S, MANCARELLA P. Integrated modelling and assessment of the operational impact of power-to-gas (P2G) on electrical and gas transmission networks [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1234-1244.
- [72] VANDEWALLE J, BRUNINX K, D' HAESSELLER W. Effects of large-scale power to gas conversion on the power, gas and carbon sectors and their interactions [J]. Energy Conversion & Management, 2015, 94(7): 28-39.
- [73] 卫志农, 张思德, 孙国强, 等. 计及电转气的电-气互联综合能源系统削峰填谷研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 37(5): 1305-1315.
- WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, et al. Power-to-gas considered peak load shifting research for integrated electricity and natural-gas energy systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 37(5): 1305-1315.
- [74] UNSIHUAY V C, MARANGON L J W, SOUZA A, et al. A model to long-term, multipara, multistage, and integrated expansion planning of electricity and natural gas systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 1154-1168.
- [75] JAMES M C. Gas-Electricity Nexus [EB/OL]. [2017-09-10]. <http://iiesi.org/>.
- [76] 张宁, 王毅, 康重庆, 等. 能源互联网中的区块链技术: 研究框架与典型应用初探 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4011-4022.
- ZHANG Ning, WANG Yi, KANG Chongqing, et al. Blockchain technique in the energy internet: preliminary research framework and typical applications [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4011-4022.

杨经纬(1992—),男,博士研究生,主要研究方向:多能源系统、新能源、电力负荷预测。E-mail: yjw15@mails.tsinghua.edu.cn

张宁(1985—),男,副教授,主要研究方向:新能源、电力系统规划及运行、多能源系统。E-mail: ningzhang@tsinghua.edu.cn

王毅(1992—),男,博士研究生,主要研究方向:大数据、能源互联网、负荷预测。E-mail: wangyi14@mails.tsinghua.edu.cn

康重庆(1969—),男,通信作者,教授,主要研究方向:电力规划与运行、可再生能源、负荷预测、低碳电力技术。E-mail: cqkang@tsinghua.edu.cn

(编辑 鲁尔姣)

Multi-energy System Towards Renewable Energy Accommodation: Review and Prospect

YANG Jingwei, ZHANG Ning, WANG Yi, KANG Chongqing

(State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Breaking down the pattern of mutual separation between different energy systems and realizing the integration and coordination of multi-energy system (MES) is an effective way to solve the problem of renewable energy accommodation. Firstly, the research framework of the MES theory and method towards renewable energy accommodation is put forward. On the basis of the research mentioned above, the existing researches are reviewed and corresponding thinking is proposed from the perspectives of basic modeling, operation optimization and system planning. Next, the existing researches are categorized into two typical research objects which are the electric-thermal coupling distract MES and the electric-gas coupling cross-regional MES. The related key points of the research on MES towards renewable energy accommodation are reviewed and commented. Finally, the key scientific problems towards the renewable energy accommodation are summarized and the future directions of the research on MES is prospected.

This work is supported by the Funds for International Cooperation and Exchange of the National Natural Science Foundation of China (No. 51620105007) and National Natural Science Foundation of China (No. 51677096).

Key words: multi-energy system; integrated energy system; Energy Internet; renewable energy; electric-heat coupling; electric-gas coupling