

能源互联网规划研究综述及展望

别朝红, 王旭, 胡源

(电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学电气工程学院), 陕西省 西安市 710049)

Review and Prospect of Planning of Energy Internet

BIE Zhaohong, WANG Xu, HU Yuan

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (School of Electrical Engineering),
Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: The development of energy utilization technology, the improvement of information communication technology and the deep integration of both techniques have led to the birth of new energy utilization system-energy internet. Multiple energy systems are coordinated optimally by energy internet to accommodate large-scale renewable energy and improve energy utilization efficiency. Planning is the first step for energy internet from theory to engineering practice. Only in the support of advanced and feasible energy internet planning theory, the engineering practice of energy internet can be carried out smoothly. Energy internet was firstly divided into generation-gird-load 3 parts on the basis of existing related research to the structure of energy internet in this paper. Then the load forecast of multiple energy, the model of multi-energy conversion and energy flow model of multi-energy system were illustrated for the need of planning. Based on them, the analysis and investigation of planning for energy internet was reviewed in basic planning model, planning of multi-energy generations, collaborative planning of multi-energy generations and transmissions, planning of multi-energy consumptions and the solutions to planning model. Finally, the potential research topics on planning of energy internet was proposed.

KEY WORDS: energy internet; coupled multiple energy system; energy hub; combined heat and power (CHP); optimal planning; demand response

摘要: 能源利用技术的发展、信息技术的进步以及其深度的融合催生出了新的能源利用体系——能源互联网。能源互联网对多种能源系统进行协调优化, 接纳大规模可再生能源, 并提高能源利用效率。规划是能源互联网从理论到工程实践

的第一步, 只有在先进、合理的能源互联网规划的理论支持下, 能源互联网的工程实践才能有效实施。该文首先基于已有的能源互联网的相关研究, 按照“源-网-荷”的结构对能源互联网进行划分, 其次介绍了规划建模所需的多种能源的负荷预测、描述多能源转化的数学模型和多能流潮流模型。基于此, 从基本的规划模型、能源生产环节的规划、源-网环节的协同规划、能源消费环节的规划、规划模型的求解方法这几个方面对能源互联网的规划进行了分析、探讨。最后对能源互联网的规划的未来研究方向进行了展望。

关键词: 能源互联网; 耦合多能源系统; 能量枢纽; 热电联产; 优化规划; 需求响应

0 引言

人类生产、生活活动对能源有着巨大的需求, 但化石能源的储量有限, 不足以支撑社会的长久发展, 同时大规模化石能源的低效使用对环境造成了巨大的污染。能源危机、环境污染催生了人们对可持续、清洁、高效的能源系统的迫切需求, 近几年, 国内外的专家、学者对电、气、热等多种能源的统筹协调利用进行了深入的研究。随着互联网技术在近 20 年取得的快速发展, 先进的互联网信息通信、控制技术被广泛应用在能源系统中。能源、信息技术的深度融合催生了新的能源利用体系——能源互联网。

2011 年美国学者杰里米·里夫金在著作《第三次工业革命》^[1]中率先提出了能源互联网的概念, 并给出了能源互联网的特征: 以可再生能源+互联网为技术核心, 实现电网中可再生清洁能源、电动汽车的广泛接入, 实现能源的公平交易和高效综合利用。这种借助互联网信息技术改善能源行业的想法一经提出, 就受到了国内外学术界和产业界的广泛关注, 成为了继智能电网后又一前沿发展方向和

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0901900); 国家自然科学基金重点项目(51637008)。

National Key Research and Development Program of China (2016YFB0901900); Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51637008)。

重要课题。

美国国家科学基金早在 2008 年资助了 FREEDM 项目^[2]；同年，德国联邦经济技术部与环境部发起了 E-energy 项目^[3]；日本成立了“数字电网联盟”用互联网的方式优化电力系统的运行^[4]。在国内，经过最初的互联网和能源行业融合改进可行性的探讨，能源互联网作为中国未来能源体系的发展方向获得了广泛认同。国内学者不仅对于能源互联网的基本概念^[5-6]、框架组成元素^[5-8]、涉及的关键技术^[7-8]进行了较为详细的论述，也针对能源互联网的信息技术支持^[9-11]、商业模式^[12]、风险评估^[13-14]、多能源系统的优化运行和规划^[15-17]进行了初步探索，切实推动了中国的能源互联网相关研究的发展。

能源互联网是未来能源系统的发展方向，对能源互联网进行优化规划是能源互联网从理论到工程实践的基础。只有在先进的、合理的能源互联网规划理论的指导下，全面大规模的能源互联网的建设工程才可以顺利实施。现阶段，国内外的能源互联网的众多示范性项目正在如火如荼的建设，这些示范性工程的实施又可以帮助逐步完善规划理论体系，为之后的能源互联网的大规模工程建设奠定理论基础。

考虑到能源互联网元件众多，规模庞大，无法统一规划，本文首先按照“源-网-荷”的结构对能源互联网进行划分，之后简要介绍了能源互联网规划建模的基础：多种能源的负荷预测，适用于多能

源转化的数学模型—能量枢纽^[18]，耦合的多能流潮流模型。基于此，从基本的优化规划模型、能源的生产环节规划、能源系统的源、网环节的协同规划、能源的消费环节规划、规划模型的求解方法这几方面对能源互联网的规划进行了分析讨论。最后本文给出了能源互联网规划的几个未来研究方向。

1 能源互联网的结构划分

能源互联网包含电力、天然气、热等多种能源系统，规模庞大，元件众多，作为整体进行统一优化规划难度过大。为了减小规划难度，提升规划模型的准确性和可行性，本文基于现有能源互联网的框架的相关研究^[5-8]，将能源互联网按照能源的生产环节(源)—能源的传输环节(网)—能源的消费环节(荷)进行划分，由此可得能源互联网的基本架构如图 1 所示。能源互联网包含物理系统和信息系统，通过大数据、云平台等信息技术可以实现能源互联网中各个设备的协同优化运行。信息物理系统的建模较为复杂，在现阶段的规划模型中对信息系统考虑较少，本文的规划模型的讨论主要针对能源互联网的物理系统，能源互联网的信息流相关内容可详见文献^[10-11]，本文不再赘述。

1) 能源生产环节(源)。能源互联网的能源生产环节主要包括各种能源生产单元(火电、水电、光伏、风电等可再生能源，天然气井等)、能源转换设备包括燃气轮机，电制气(power to gas, P2G)设备等、能源存储设备^[19-20](锂电池，液流电池，压缩空气储

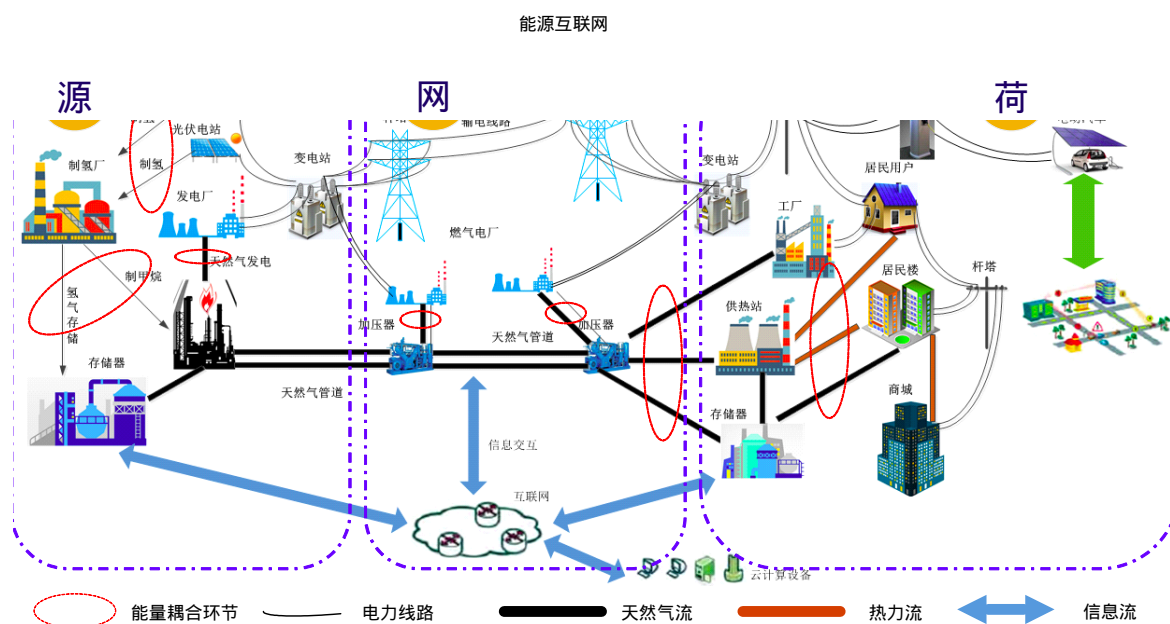


Fig. 1 Basic structure of energy internet

能,抽水蓄能,天然气罐,储热罐等),短距离多能流传输网络。在能源生产环节,通过优化规划,对上述元件合理配置,可以利用天然气、热能的惯性,提升系统的可控性,以平抑可再生能源出力的波动性和间歇性对能源系统的影响,从而在满足用户的多种用能需求的同时,实现大规模可再生能源的消纳和能源的经济生产。

2) 能源传输环节(网)。能源的传输环节主要包括大规模、远距离的电力输送网络、天然气输送网络和少量能源生产单元、终端用户。电力可以远距离、大规模地高速传输,并且传输损耗小。而随着天然气在整个社会能源供应体系中占比的提升,以及天然气网络规模的扩大,天然气网络也可作为远距离能量传输的主要途径。对联合的电-气能源传输网络进行优化规划,可以减少系统投资、运行费用,同时保证能源的远距离、大规模的高效传输。

3) 能源消费环节(荷)。能源的消费环节主要包括小规模的能源生产单元(分布式电源 DG)、能源转换设备例如热电联产机组(combined heat and power, CHP)、能源存储设备(电池、储气罐、储热管道等)、短距离多能流供能网络(配电网、气网、热网等)、电气化交通系统(电动汽车充电设施)、大量终端用户(部分负荷是柔性可调负荷)。电、气经过远距离传输到达城市等能源消费地区,通过 CHP 机组等能源转换设备,电、天然气可以转化为冷、热等多种形式的能量,最终,不同形式的能量通过复杂的短距离供能网络到达用户用能终端。通过对能源转换设备、储能设备、短距离供能网络的合理规划,发挥多能流的互联互济效应,在保证用户多样化用能可靠性的前提下,减小系统投资和运行费用,提升能源的利用效率。

2 能源互联网规划建模的基础

能源互联网的规划是已知规划对象的物理特性和相应的约束条件,选定合适的数学模型描述规划对象的物理特性,求解满足各项指标要求的合适的规划方案。因而明确基础约束条件和建立描述设备运行特性、耦合能量流的数学模型是能源互联网规划建模的基础。规划模型的基础约束条件是用户的电、气、热多种能源的负荷需求。能源互联网的规划所涉及的数学模型主要是多能流的耦合、转化模型和多能流系统的潮流模型。多能流的耦合、转化模型通常采用瑞士苏黎世联邦理工学院提出的能量枢纽模型;适应于规划的多能流潮流模型通常

采用稳态潮流模型,即满足基尔霍夫定律(KCL、KVL)并遵循相应物理特性的代数方程。

2.1 多种能源的负荷预测

多种能源的负荷预测是建立规划模型的基础条件之一,规划的主要目标之一即是通过增加发电机、气井、CHP 等装置或者新建线路、管道以满足用户的多样化用能需求,因而首先需要对规划区域内用户的多种能源的负荷进行预测,从而在规划模型中建立多种能量供应平衡约束。

对于能源生产环节,规划区域内的各种能源资源的分布情况和用户的电、气负荷预测值是能源生产设备的选址、定容的重要依据,发电厂、气井需要根据用户的用能需求增长而合理的规划,从而避免容量浪费,提升系统的经济性;对于能源传输环节,能源需求的预测值决定了是否需要在已有能源传输网络的基础上,进行规划扩展,保证能源的传输,避免阻塞导致的供能不足;对于能源消费环节,用户的电、气、热负荷预测值是 CHP 机组、储气、储热等设备等选址、定容的基础,用户对电、气、热不同比例的需求决定了设备的运行参数。对于能源互联网中用户的负荷预测,可以采用大数据、数据挖掘等新兴方法提升电^[21]、气^[22]、热^[23]负荷预测的精度,并将负荷预测和能源系统的优化规划、运行更好的结合。

文献[24]依据传热学原理,考虑不同因素对建筑负荷的影响,建立了可快速预测典型建筑的冷热负荷的模型。对于用户的负荷预测数据的应用,文献[25]分析了储能设备的容量和用户负荷预测值对供能费用的影响,并通过一个家庭能源系统和 3 个互联的家庭能源系统的实例验证了储能设备的容量和电、气、热负荷的耦合关系。依据大数据等新兴技术,采用神经网络、贝叶斯网络等方法可以较为精确地预测用户的电、热、气负荷^[26]。精准的负荷预测数据是能源互联网各个环节规划建模的基础,有助于提升规划模型的精确性和实用性。

2.2 能量枢纽模型

针对耦合多能源系统的分析建模,瑞士苏黎世联邦理工学院于 2007 年提出了能量枢纽(energy hub, EH)的概念,作为描述多能源系统中能源输入、输出、存储、耦合关系的端口模型^[18]。该模型通过能源输入到负荷输出端口的耦合矩阵^[16,18]来表示电、热、气等多种能源形式之间的转换、存储、运输等关系,如式(1)—(2)所示。基于该模型,国内外

针对能源互联网的物理系统——耦合多能源系统的最优潮流、运行、规划方面都已开展了一系列的探索研究。

$$L = CP \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： L_i 表示耦合矩阵输出的电、气、热等各种形式的能源； P_i 表示输入耦合矩阵的各种形式的能源； c_{ij} 是耦合系数(coupling factor)，表示第*j*种输出能源和第*i*中输入能源的比值。

各种形式的能源在耦合矩阵中从输入到输出主要经过能源分配和能源转换两种形式，能源分配即输入能源按一定比例分配到不同的能源转换设备，能源转换即输入能源通过能源转换设备转换为其他形式的能源，存在一定的转换效率^[16]，即

$$c_{ij} = \eta_{ij} \nu_{ij}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_{11}\nu_{11} & \eta_{12}\nu_{12} & \cdots & \eta_{1n}\nu_{1n} \\ \eta_{21}\nu_{21} & \eta_{22}\nu_{22} & \cdots & \eta_{2n}\nu_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \eta_{n1}\nu_{n1} & \eta_{n2}\nu_{n2} & \cdots & \eta_{nn}\nu_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： η_{ij} 为各种能源的转换系数(efficiency factor)，表示第*i*种能源转换为第*j*种能源的效率； ν_{ij} 为能源分配系数(dispatch factor)，表示第*i*种能源分配到第*j*种能源对应转换设备的系数，需满足：

$$\sum_j \nu_{ij} = 1, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$0 \leq \nu_{ij} \leq 1 \quad (6)$$

耦合矩阵中的分配系数可以通过改变能源转换设备的设定而人为设置，同时转换系数也不是常数，而是能源种类、温度、时间、设备的函数，因而能量枢纽的矩阵建模不是简单的线性代数方程组，不同种类的能源、设备的运行状态，可能导致耦合矩阵存在较多的非线性元素。当考虑储能设备、用户的需求侧响应、电动汽车等因素时，还可以通过在能量枢纽的矩阵表达式中分别加入相应的包含能量存储、需求侧响应耦合因子、电动汽车状态选择函数的矩阵来进行扩展建模^[16]。能量枢纽模型在后文的耦合多能源系统的潮流分析、规划模型的建立中获得了广泛的应用。可以通过选择能量枢纽内部不同的组成元素，设置能量分配、转换系数，添加耦合因子、扩展矩阵等方式建立广义的能

量枢纽模型，以构建更为精确、可行的能源互联网规划模型。能量枢纽在规划建模的应用在后文中详述，这里不再赘述。

2.3 耦合多能源系统的潮流分析

耦合多能源系统的混合潮流是构建能源互联网优化规划模型的另一数学基础模型，因而也获得了国内外学者的广泛关注^[27-33]。目前研究较多的是耦合多能源系统的稳态混合潮流求解。因为电、气、热系统具有不同的时间常数，暂态耦合过程较为复杂，而在规划所采用的稳态潮流中，模型所考虑的时间尺度较大，暂态过程可以忽略。因此，电、气、热系统的潮流都可用代数方程表示，便于计算，也比较贴近实际生产状况。三个系统的主要潮流方程如表1所示，具体内容详见文献[17]，这里不再赘述。

表1 多能源系统的主要潮流方程

Tab. 1 Main energy flow equations of multiple-energy system

多能源系统	电力系统	天然气系统	热力系统
潮流方程		节点气量	节点水流量
		平衡方程	平衡方程
	有功平衡方程	管道气流量	基本回路
	无功平衡方程	Weymouth 方程	水压降方程
		压缩机	供水网络、
		支路方程	回水网络
			平衡方程

文献[27]采用了改进的能量枢纽模型，考虑耦合单元作为平衡节点对于电力网络和天然气网络潮流的影响，给出了区域综合能源系统的完全解耦、部分耦合以及完全耦合3种运行模式，形成了基于顺序求解法的潮流求解算法。文献[28]建立了考虑安全约束的电-气最优潮流，该模型在求解最优潮流时考虑了系统发生*N-1*故障的情况，通过灵敏度分析可快速得到稳定的故障应对方案，避免线路过负荷。

针对互联的多个能量枢纽，文献[29]将每一个能量枢纽看作电源，借鉴经典的电力系统经济调度方法，提出了多个能量枢纽的最优调度方法和稳态潮流模型；文献[30]考虑了不同时间段内能源的节点价格、物理特性和环境效益，构建了经济性最优的通用网络潮流模型。

耦合能源系统的优化运行大都是已知能量枢纽内部的拓扑结构，进行系统的潮流求解，而文献[31-32]则是根据给定时间段内负荷的能源需求、能源价格，寻找最优的耦合矩阵，即先对能量枢纽的结构进行优化，再进行最优潮流计算。耦合能源

系统的混合潮流模型具有高维数、非凸非线性特点，具有较大求解难度，因而一些智能算法被用于求解最优潮流^[33]。

求解耦合多能源系统的混合潮流，首先要分析耦合单元在耦合的各个能源潮流中的作用，建立相应的耦合模型，例如采用能量枢纽(EH)模型；其次仿照电力系统稳态潮流模型，分别根据各个能源系统的物理规律，建立天然气、热力系统的稳态潮流模型；可借鉴交直流混联系统的潮流分析方法，对混合潮流采用交替迭代法或统一迭代法(牛顿法)求解^[17]。最后，根据不同的应用场景的需求，采用不同的求解方法。考虑安全约束，可通过灵敏度分析或进行系统的 $N-1$ 安全校验；多能量枢纽互联，考虑系统经济性，构建经济性最优潮流模型；构建多目标优化的混合潮流，采用智能算法求解。

3 能源互联网的规划模型

对于以大规模可再生能源为主要一次能源的能源互联网，规划时可以分为结构规划和系统规划两部分^[17]。结构规划(能源规划)针对增量配网这种能源的生产、传输、消费都未确定的区域，通过分析规划区域内各种资源的分布和用户的电、气、热等多种能源的需求，考虑经济、技术等因素，在宏观层面上协调“源-网-荷”环节的规划，确定各个环节规划模型的多种能源供需平衡、设备建设年限等系统规划建模必须的基础输入信息。文献[34-35]对于常用的能源规划模型进行了综述，给出了能源规划的基本框架，总结了能源-经济-环境模型、能源系统长期前景规划模型、可再生电力混合优化模型等结构规划模型的现状。

系统规划立足于系统运行，依据规划区域内已有的多能源系统，规划增加的具体设备的选型、选址、定容和多能源网络的扩展等，是结构规划的具体体现。而本文对于能源互联网优化规划的探讨主要是针对系统规划，对于各环节的规划模型如表 2 所示。

能源的生产环节的主要任务是接纳大规模的可再生能源，通过电力系统分别和天然气系统、热力系统的耦合，利用天然气、热能易于存储的特性，将负荷低谷期过剩的风电、光伏电量转化为天然气、热进行存储，满足用户的多种用能需求。能源的传输环节，大规模电网、天然气网相耦合，能源传输网的规划需要考虑大型能源生产基地和负荷中心的地理位置，尤其是大规模的可再生能源生产

表 2 能源互联网各个环节的规划模型
Tab. 2 Planning models of different sub-systems of energy internet

能源互联网不同环节	能源生产环节规划	能源传输环节的源、网协同规划	能源消费环节规划
环节任务	接纳大规模的 可再生能源	最大化新能源消 纳的前提下， 保证能源高效的 远距离传输	为用户提供 高可靠性、高效的 多样化能源供应
具体分类	电-热联合能源 生产规划 电-气联合能源 生产规划	不同应用场景的 电-气联合 系统的源-网 协同规划	电动汽车充电站的 规划 区域级的 多能源系统的规划 能源微网的规划
基础约束条件	能源生产单元建 设年限约束 能源需求约束 生产设备的 出力约束等	能源生产单元建 设年限约束 线路建设约束 电、气潮流 平衡约束 节点、支路的 功率、压力约束	能源转换设备 建设约束 设备投资约束 电、气、热潮流的 平衡约束 能源转换设备 功率约束
应用影响因素	供能可靠性 电-热互联互济 电-气互联互济	供能可靠性 系统运行费用 电-气互联互济 网络拓扑约束	供能可靠性 需求侧响应 系统运行费用 电-热-气 互联、互济 网络拓扑约束

基地的分布。同时风电场、光伏电站的选址也要考虑其接入能源传输网络的难易，因而对于大规模能源传输网络的规划，需进行源、网环节的协同规划以保证可再生能源的消纳和能源的高效远距离传输。能源的消费环节通过多能源的协调转换、存储为用户提供高可靠性、高效的多样化能源供应，以提升系统整体的经济性。能源消费环节的规划主要包括多能源系统的规划和电动汽车充电站的规划。多能源系统的规划按规模大小又可以分为区域级的多能源系统的规划和能源微网的规划。

3.1 基本的优化规划模型

能源互联网的能源生产环节的规划模型，源、网环节协同规划的模型，能源的消费环节的规划模型具有一定的相同点，它们共同的基本规划模型如式(7)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T f(I_{i,j,t}, A_{i,j,t}) \\ \text{s.t.} \quad g(I_{i,j,t}, A_{i,j,t}) \leq 0 \\ \quad \quad h(I_{i,j,t}, A_{i,j,t}) \leq ED \\ \quad \quad k(I_{i,j,t}, A_{i,j,t}) \leq EENS \\ \quad \quad m(I_{i,j,t}, A_{i,j,t}) \leq CE \end{array} \right. \quad (7)$$

式中决策变量包括设备是否投建的 0-1 变量 I 和设备容量大小的连续变量 A ; ED 是能源需求上限, EENS 是系统供能不足上限, CE 是系统碳排放量上限。变量 t, i 分别代表规划的时间和设备的序号; 变量 j 代表规划设备所属的能源系统的种类; 0, 1, 2 分别代表设备属于电力、天然气、热力系统; T 是规划的总年限, N 是设备的总数量。

目标函数 $f(I_{ij,t}, A_{ij,t})$ 可以设定为能源互联网的经济性最优, 即各个环节的建设投资和运行费用之和最小。约束条件中 $g(I_{ij,t}, A_{ij,t}) \leq 0$ 是各种设备的建设施工约束, 包括投资约束、容量约束、最早投入年限约束等。 $h(I_{ij,t}, A_{ij,t}) \leq ED$ 是系统的运行约束, 包括多能源系统的潮流方程, 设备的功率上下限约束、支路功率、管道压强约束等。 $k(I_{ij,t}, A_{ij,t}) \leq EENS$ 是供能可靠性约束, 保证系统具有较高的可靠性; $m(I_{ij,t}, A_{ij,t}) \leq CE$ 是系统的碳排放量约束, 保证系统运行在清洁、高效的状态。

对于具体某个应用场景下的规划模型, 可以在基础的规划模型上对目标函数进行相应的修改, 增设描述影响因素的约束条件, 详细内容如下文。

3.2 能源生产环节规划

能源生产环节规划的任务是在满足用户的多种用能需求和达到各种技术经济指标的条件下, 充分考虑各种形式能源的耦合和物理特性的互补, 确定在何时、何地兴建何种类型和何种规模的能源生产设备和能源转换、存储设备, 使规划期内能源互联网能接纳大规模可再生能源并且具有较好的经济效益。在能源互联网中, 具有大容量储能设备的热力系统、天然气系统通过热电联供(CHP)机组、电转气、气转电等能量转换设备和电力系统互联耦合。相比于电力系统, 气、热系统都具有较大的惯性和时间常数, 具有良好的可控性和可调性。大容量的储热、储气设备使得电力系统能够在较大的时间尺度和空间范围内平抑可再生能源的间歇性和波动性对能源系统的影响^[8,36], 进而提升系统的可再生能源的消纳能力。

3.2.1 电-热联合能源生产规划

对于电-热联合的能源生产环节的规划, 首先需要充分考虑电和热的互补性, 在电力系统、热力系统的潮流约束的基础上, 建立合理的电-热混合潮流模型。在此基础上, 分析锅炉、CHP 机组的出力特性, 结合传统的发电机模型, 建立热源模型和相应的设备输出功率约束, 从而建立电-热联合系统的混合整数规划模型。

文献[37]用有向图描述热力系统网络拓扑, 分别建立了水力、热力支路特性方程和网络平衡方程, 在此基础上建立了考虑热力网络约束及火电机组启停的电热能源集成系统运行优化模型, 并利用该模型研究了电热协调运行方式对风电消纳的促进作用。文献[38]针对多区域 CCHP 系统之间的环状热网, 建立了考虑节点流量平衡、热能-流量约束及热损平衡约束的热网模型并结合 CCHP 系统能量平衡约束, 建立了多区域系统的容量协同优化配置的混合整数线性规划模型。供热管网、建筑围护结构天然具有良好的储热能力, 文献[39]提出用冬季大发的风电来产热代替城市中的小锅炉为居民供暖, 同时利用居民建筑的良好蓄热能力进行需求侧响应进而提升风电消纳能力。国内外关于电-热联合的能源生产的研究还处于起步阶段, 文献[36]对电-热联合能源生产系统的优化规划提出了相应的研究展望: 掌握电-热联合系统的特性并进行数学描述; 研究储热装置与电源、电/热负荷间的匹配条件和机理; 研究不同应用场景下各种设备的特性、容量要求。

3.2.2 电-气联合能源生产规划

天然气存储方式多样, 主要存储形式为地下储气库存储、压缩天然气存储和管道及管道束存储, 可分别用于季度、月度以及短期的供气平衡^[20]。电转气(power to gas, P2G)技术主要包括电解水制氢气和萨巴蒂埃(Sabatier)反应将氢气和二氧化碳合成甲烷两个过程。在电-气联合的能源生产系统中, 通过电转气技术可以在风电大发时, 将多余的风电制成甲烷存储在储气罐中, 从而可以实现能量的长期、广域的存储^[40-42]。文献[43]构建了包含 CHP 机组和 P2G 装置的综合能源系统的非线性模型并进行线性化处理, 以该模型为基础对系统进行优化规划, 同时对规划方案的可靠性和电转气厂站消纳可再生能源的效益进行了评估。

对于电-气联合能源生产系统, 目前研究的热点在于通过机组组合提升系统的经济性, 而这也是能源生产环节规划的基础, 在合理的机组组合模型的基础上, 才能进行能源生产设备的选址、定容规划。考虑到风功率预测的不确定性, 文献[44]采用了 3 种运行规划策略: 确定性, 两状态随机规划和多状态的随机规划策略, 通过燃气轮机耦合电-气系统, 保证联合系统的经济运行。在能量枢纽模型的基础上, 能源输入端为电、气, CHP 机组为能源转换设备, 输出为电、热。文献[45]考虑了不同能

源的价格,得到经济最优的机组组合方案。文献[46]考虑了输电线路、输气管道的能源输送能力,建立了考虑系统安全约束的机组组合模型。针对电-气两个系统的耦合,文献[46-48]采用了拉格朗日松弛将模型解耦并转而求解原问题的对偶问题的优化解,并采用了线性化、加入罚函数、动态规划对子问题进行求解。

我国的东北、西北地区,存在大规模的可再生能源,但由于输电线路、冬季火电机组的供暖任务等因素的限制,存在大量的弃风、弃光现象。我国的天然气需求量很大,也有大规模的天然气传输网络,可通过在大型风电、光伏基地建设 P2G 装置,将弃风、弃光转化为天然气,通过天然气管网传输;同时,弃风、弃光的电量也可在冬季通过电锅炉为居民供暖,满足用户的多种用能需求,提升系统整体经济性。由于对大容量储热、储气设备的物理特性以及 P2G 装置建模的相关研究仍然较少,这导致对包含大规模可再生能源的电-热、电-气联合能源生产系统的规划模型的研究还处于起步阶段。为了逐步完善能源生产环节的优化规划理论,一方面需要对储能装置、能源转化装置等关键设备构建合理的数学模型,另一方面也需要对多能流的互补特性、不同的应用场景进行深入研究。

3.3 源、网协同规划

能源的远距离传输主要以电力网络和天然气网络为主,两个网络互连耦合,将能源从源侧向远端负荷大规模的传输。可再生能源的地理分布较为分散,风电厂、光伏电站和 P2G 厂,需要根据已有电力传输网络进行合理的选址,便于能源的传输,而燃气电厂也要根据天然气网进行规划,才能保证气源。所以电-气联合系统的传输环节不能单一规划,需要进行源、网的协同规划。

对于源、网环节的协调规划,首先要对源侧、负荷侧的多能源系统进行等效,将多能源的生产等效为气源和电源(传统电源、可再生能源),将负荷等效为气负荷和电负荷,将模型简化为电-气联合系统。当在系统中加入 CHP 机组时,则负荷等效为电、气、热负荷。即系统等价为源侧生产电、气,能源传输网络为电力网络和天然气网络,负荷为电、气、热负荷的多能流系统。

3.3.1 源、网协同规划模型、框架

对于上述的能源系统,基本规划模型和式(7)类似,目标函数为系统经济性最优,即能源系统的建设、运行费用最小,同时还需要考虑能源传输网

络的运行费用,用户的供能不足造成的损失和系统碳排放的费用。主要约束有设备投资建设约束、系统运行约束、供能可靠性约束、碳排放约束。和能源生产环节规划的主要不同是重点考虑系统的运行约束,需要考虑电力、天然气、热力系统的混合潮流,相应的还有构建电力支路功率,天然气、供热支路压强约束等能源传输网络运行约束。

以电-气联合系统为主的能源互联网的源、网环节协同规划的流程图如图 2 所示。该规划模型可以解耦成一个主问题和若干子问题,主问题是系统的结构优化,即对能源生产单元(可再生能源电站、燃气电厂)、能源转换设备(P2G)、能源存储设备(储气、储电)的选址、定容进行优化和对能源传输网络(电网、气网)的线路扩建优化。

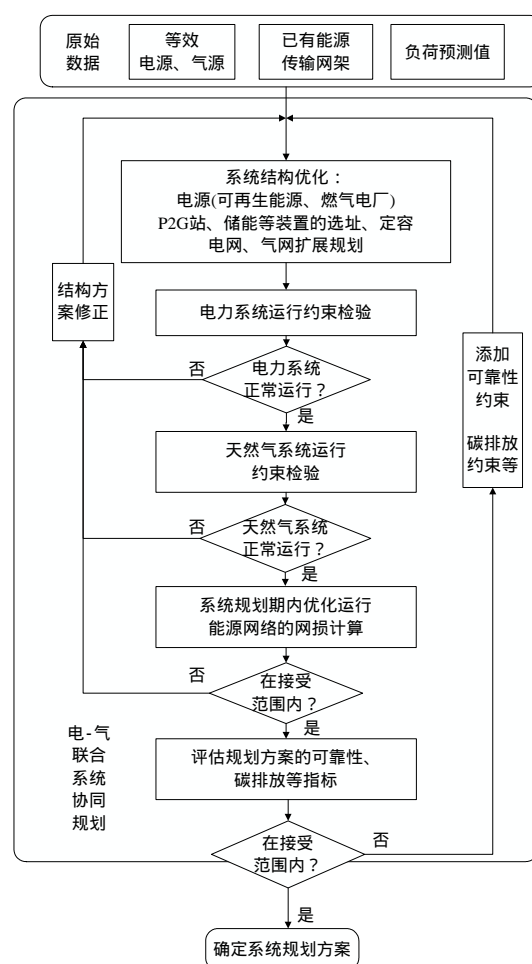


图 2 源、网环节协同规划流程图

Fig. 2 Flowchart of generation and transmission planning

第一个子问题是典型日或规划年每日的优化运行。根据主问题得到系统的结构,检验该结构的电-气联合系统的运行约束条件;当系统可正常运行时,求解系统的最优混合潮流,计算电网、气网的能源传输网络的运行费用;如果满足运行约束且能

源传输的运行费用在一个较小的范围,可进行下一个子问题的求解,否则回归主问题,重新生成系统的结构优化方案。运行费用的可接受范围并无固定值,需要根据系统的实际运行方式设定。

第二个子问题是可靠性、碳排放校验,根据第一个子问题的系统优化运行状态评估系统的可靠性、碳排放、能源效率。如果某项指标超出可接受范围,则在系统的结构优化主问题中添加相应的约束条件或罚函数,再进行新的系统结构优化,如果达标,则得到了源、网协同规划的一个可行方案。同样,碳排放、可靠性、能源效率的可接受范围都需要根据系统的多种运行方式设定。

3.3.2 不同应用场景的规划模型

基于最优潮流的计算,文献[49-58]构建了电-气联合能源系统的优化规划模型,包括长期规划、短期规划,分别重点考虑了系统供能可靠性、CO₂排放、政策影响等因素。因为规划模型的目标函数是系统建设、运行经济性最优,因而需要对各种费用进行较为细致的建模。文献[49-50]细致的考虑了系统供能不足的损失和污染物排放费用;文献[51]加入了能量枢纽的收益量化并考虑了建设分布式电源减小排放带来的政策激励。文献[52]考虑了发电公司、天然气传输公司等不同的市场参与方的互动,将规划目标设定为减小碳排放指标的收益最大化,并采用决策分析规划模型的不确定性,以此实现了能源生产的低碳化。

电-气联合系统的规划通常需要考虑多建设周期,分期建设的效益。文献[53]根据预测的负荷曲线,提出了多期,多地区,多状态的电-气联合系统规划方法,模型更加贴近实际生产。文献[54]提出了包含电源规划、输电网规划、天然气网络多期规划框架,并通过伊朗的实际电网、气网的建设方案验证了所提规划框架的实际效用。

对于电-气联合系统的互联规划,文献[55]通过选取能源流通最小的最小割集来分析网络潮流和计算多能量枢纽的负荷转运能力,从候选线路中选取费用最小的互联线路,得到满足系统的可靠性约束的经济性最优网络架构。对于互联系统的可靠性,文献[56]建立了网络出现 $N-1$ 故障时的切负荷最小的混合整数线性规划模型,并将缺电损失作为罚函数添加在目标函数中。文献[57]将规划模型解耦为满足典型日运行约束的长期规划和每年的可靠性评估两个问题,在典型日运行中还考虑了用户的需求侧、电源的各种状态,规划方案进行年度可

靠性检验,并根据可靠性约束添加相应的费用到目标函数中,反复迭代获取满足可靠性约束的规划方案。文献[58]考虑了政策影响、经济效益、环境效益,由此得到了美国的长期远距离的能源传输网络的规划框架。

电-气联合系统的规划,基本是以系统投资、运行的经济性最优为目标函数,重点考虑多能源系统的最优混合潮流,再根据规划需要,分别设置可靠性、碳排放等问题边界,构建迭代子模块,每次迭代后在主模块中设置相应的约束或罚函数,保证规划方案满足可靠性、投资成本等问题边界,最后经过多次协调迭代获得满足约束的规划方案^[17]。我国的电、气主要产地都在北方,北方也有大规模的电网、天然气网,通过在关键节点建设燃气轮机、P2G 等装置将两个网络耦合形成的电-气联合系统,可以在接纳大规模可再生能源的情况下,实现能源的高效、远距离、大容量的传输。

3.4 能源消费环节规划

在能源的消费环节,用户的参与度获得提升,用户的积极参与可以帮助实现系统的灵活可控。用户的参与主要体现在两方面:1) 用户能够选择不同形式的能源达成同样的目标,用户可以根据能源价格、供给情况选择不同种类的能源,即用户通过需求响应来匹配能源的生产侧,这种供给、生产双边的多能互补增加了系统的灵活性。例如,在用电高峰阶段,能源供给商能够实现利用燃料电池发电,利用负荷低谷储存的热量供暖,从而缓解用电压力。2) 电动汽车车载电池可看作是巨大的分布式储能网络。如果能对车载电池进行有效利用,则可以对系统实现削峰填谷的作用,但如果对充电站规划不当,大量电动汽车的无序充电行为可能会增大系统峰荷,恶化电能质量。能源互联网中其他的用户参与方式的建模难度较大,较为精细的用户参与方式的建模会使得规划模型过于复杂,难以求解,因而本文对用户的参与主要考虑需求侧响应和电动汽车充电行为。其他的用户参与行为可根据实际情况进行合理的建模,添加到规划模型中。

能源的消费主要集中在城市地区,城市的多能源系统按照规模可划分为区域级的多能源系统和能源微网。区域级的多能源系统以大片居民区,商业区或工业园区为单位,包含 CHP 机组等能源转换装备、储能装置和多能源供应网络。能源微网以居民楼、医院为单位,主要包含一套冷热电联供装置和小型储能设施。因而能源消费侧的规划主要包

括电动汽车充电站规划模型，区域级的多能源系统规划模型，能源微网的规划模型，如图 3 所示。

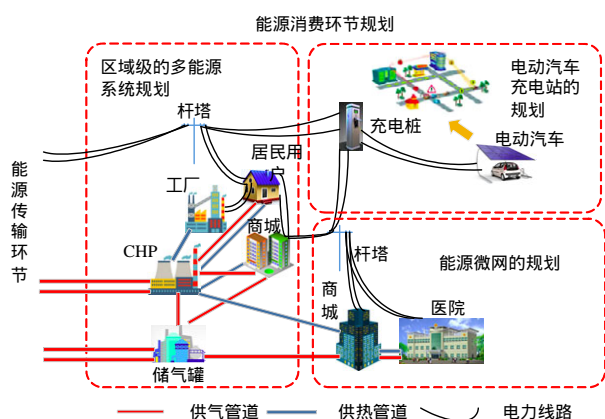


图 3 能源消费环节的规划模型

Fig. 3 Planning models of energy consumption section

3.4.1 电动汽车充电站规划

对于电动汽车充电站的规划，首先需要分析电动汽车接入对电源发展、电网运行的影响，建立电动汽车各个状态的数学模型。文献[59]认为对充电设施进行规划时，需要充分考虑用户的驾驶行为、充电行为和交通信息，通过充电设施的规划对电动汽车充电负荷的时间和空间分布造成有利于系统运行的影响。而随着电力市场的发展，电动汽车充电站的电池作为大容量的储能设备，也可以作为备用容量参与辅助服务市场^[60]。通过将电动汽车的状态简化分类为行驶、充电、加油、提供辅助服务 4 个状态，并建立相应的随机过程进行模拟，电动汽车也可以建立能量枢纽模型^[60-61]。对于电动汽车充电的调度，文献[62]提出了分层次解耦调度的方法，上层对电源和电动汽车充电站以经济性最优为目标进行联合调度，下层根据上层的调度为每个电动汽车设定在特定时段的充、放电策略。

电动汽车充电站是电气交通系统的耦合关键点，规划模型主要考虑的约束有路网结构、配电网结构、充电站容量约束、充电等待时长，目标函数可以设定为充电站、配电网投资最小，系统运行费用最小，充电站俘获的交通流量最大。而对于充电站的定容，可以采用排队论原理考虑服务的电动汽车数量进行优化。文献[63]提出了考虑充电站布局优化的配电网规划模型，不仅考虑了配电网的安全运行约束，还考虑了配电网的辐射状约束，通过合理分配充电需求，来降低配网投资和运行成本。文献[64]在目标函数中加入了用户在充电路程中的损耗成本，并通过加权 Voronoi 图划分充电站服务范围，利用排队论进行充电站的容量优化配置，兼顾

了电力公司和电动汽车用户的双方利益。文献[65-67]构建以投资成本和系统运行费用之和最小、充电站截获的交通流量最大为目标的配电系统与电动汽车充电网络最优运行的多目标优化模型。

在我国的大城市“北上广深”中电动汽车已具有一定的规模，对电动汽车充电站的合理规划和对电动汽车充电行为的优化调度，既可以影响城市的交通流，又可以对城市用电负荷起到削峰填谷的作用。但在实际生活中，交通系统和电力系统存在着复杂的交互影响，目前的研究还处于起步阶段。电动汽车充电行为和交通流的交互影响，路网的物质流运输行为的建模，大量电动汽车的车载电池的储能效应都是影响充电站规划的重要因素，值得进行更加深入的研究。

3.4.2 区域级的多能源系统的规划建模

对于区域级的多能源系统，规划模型主要考虑 CHP 机组、储能装置的选址、定容和多种能源的供应网络的建设、扩展。文献[68-74]中提出的城市耦合多能流配网的规划流程如图 4 所示。

该规划流程也是分主问题、子问题模块化迭代优化。主问题的优化是对区域级的多能源系统进行结构优化，根据规划区域内电、热、气的负荷预测值和已有的多能流供能网络，对 CHP 机组，储热、储气、储电等设备选址、定容，并对配套的配电网、天然气管网、热水管网进行线路、管道的扩建。

在得到系统的结构优化方案后，进行系统的运行校验。首先需要检验多能流配网的拓扑是否满足结构约束，例如配电网需要保持辐射状的结构，天然气管网、热网不能出现孤岛。其次考虑系统的混合潮流等运行约束，检验该规划方案的多能流系统是否能正常运行。之后，根据多能流系统的最优潮流，计算多能流潮流的运行费用。因为能源消费环节的多能流最优潮流容易受到价格型需求侧响应的影响，用户根据能源的价格可能会改变能源的消费策略，影响多能流系统的潮流。因而计算规划方案的运行费用时，考虑用户的价格型需求侧响应，设置系统不同的典型运行方式并分别计算运行费用，保证能源传输的运行费用在可行区间内。上述 3 个检验，如果有一个不满足，则重新进行系统的结构优化，生成新的规划方案。在第一个子问题的基础上，根据规划方案的多能流潮流，评估系统的可靠性、碳排放等指标。如果超出系统的可接受范围，则在系统结构优化中增加相应的可靠性、碳排放约束或相应的罚函数，重新进行系统的结构规划。投资建

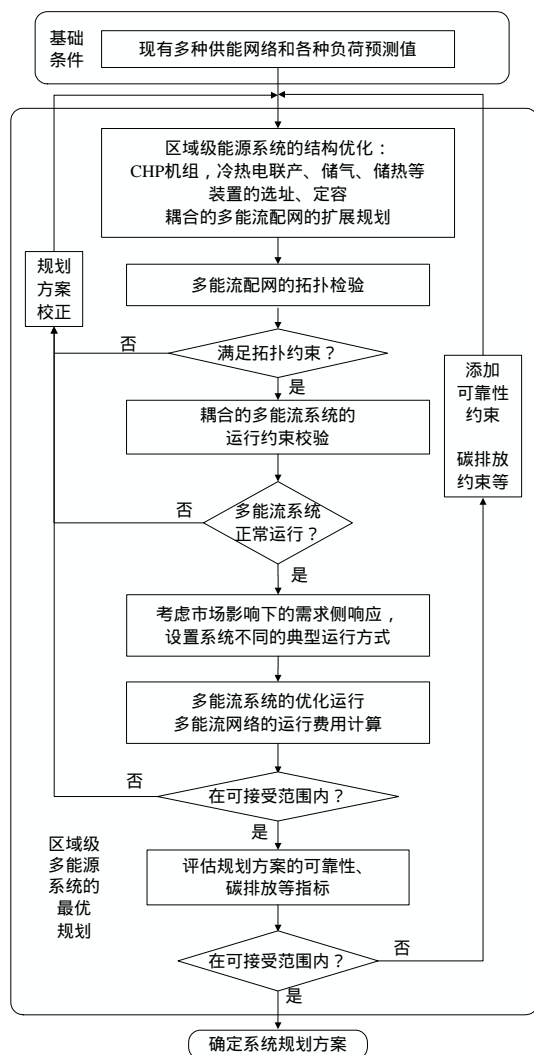


图4 区域级多能源系统规划流程图

Fig. 4 Flowchart of multiple energy distribution network planning

设主问题和运行子问题反复迭代直到满足约束，得到系统的可行规划方案。

对于区域级的多能源系统的能量枢纽的构造，文献[68-69]考虑了能源的价格和负荷的需求因素，通过比较不同 CHP 和配套设备的收益/花费比来确定能量枢纽的组成。文献[70]对 CHP 机组和天然气配网联合优化规划，保证电力和热能供应的最大化来满足用户的需求。文献[71]考虑通过小型燃气轮机将电、气配网耦合，通过对小型燃气轮机的选址、定容，将气网、配电网作为一个整体进行规划，以减小系统的总投资。文献[72]将负荷场景划分为供热、供冷和转换区域，并考虑了负荷波动、转移带来的供能可靠性问题。文献[73]采用两阶段规划模型，在第一阶段，采用多目标遗传算法进行系统的结构优化，第二阶段，用混合整数规划方法求解系统最优运行问题。文献[74]提出了一套完整的综合能源站优化规划方法，先根据能源转换、存储设备

的类型建立包含所有候选项的基本架构，以此为基础，考虑运行约束，以经济和环保为目标函数，进行设备容量优化，最后采用模糊理想决策方法实现设计方案的决策。

区域级的多能源系统的规划，既需要考虑 CHP 机组、储能设备等装置的选址、定容，也需要规划相应的电、气、热配网。因而，首先需要建立 CHP 机组、储能设备的功率转化模型，通常采用能量枢纽模型，可根据不同的需求进行不同的配置。其次，将 CHP 机组等装置作为耦合元件，以电、气、热混合最优潮流为基础，设置不同的场景，建立不同的规划模型，以适应实际情况。东部的城市区域对电、气、热都有巨大需求，以往的分供系统各自运行，为满足用户的用能需求，都存在设备容量冗余较大、运行费用较高、用能高峰能源供应压力大等问题。在大型工业园区、广域的居民区部署 CHP 机组、储气、储热等装置，构建多能源系统，可以充分发挥多能源的互济作用。电、气均可通过转化满足用户的多种用能需求，气、热的存储也可应对负荷高峰，提升能源的供应能力。同时，在规划时考虑多能源的转化互济效应，可以减小设备的容量冗余，用户也可根据能源价格选择能源，系统的整体经济性获得提升，多能源的协同利用也提升了能源的利用效率、供应的可靠性。

3.4.3 能源微网的规划建模

在以城市为主的能源互联网消费环节，个体的能源消费行为可能存在显著差异，因而有必要考虑以居民楼为单位的能源微网的规划。文献[75]基于生命周期分析法设计了一种集成太阳能利用和内燃机驱动传统联供系统的太阳能冷热电三联供系统，并以北京市一综合办公楼进行实例分析，结果表明太阳能联供系统的综合性能要优于传统分供系统。文献[76]的规划模型主要对 CHP、热锅炉、储热装置等设备定容，也对一个医院进行了实例分析，结果同样表明和传统分供系统相比，统一规划可以减小投资。

对于小型冷热电联供系统的规划，文献[77]针对“多准则调整方法”，在算例中考虑了伊朗的5种主要气候，并将燃料消耗、能源效率、网架价值、污染物排放等因素作为约束，得到了各种气候下的规划方案。文献[78]在规划设备容量时也对系统的运行状态优化，并对系统的运行状态进行追踪，检验规划的精度。文献[79]采用了三级协同整体优化方法，第一级求解最优设备选型，第二级求解最优

设备容量，第三级求解最优运行。

多个能源微网也可以互联协调运行，文献[80-81]的规划方案考虑了多个能源微网分别独立运行和协调运行的情况，文献[80]只考虑了微网的电力互联，而文献[81]则基于能源路由器考虑了多能流协同互补和多路由器协调互济。

对于我国东部地区的商业中心、大型公用建筑如医院，电、气、热多种能源的需求较大，通过构建以冷热电联供装置为主的能源微网，可有效提升用能的经济性。这类能源微网的规划主要是对冷热电联供设备选型和定容。以能源微网的冷、热、电负荷预测为基础，根据能源价格的变化和用户可能参与的价格型需求侧响应，设置几种不同的典型运行方式，以系统的优化运行为基础进行设备的选型和定容。当多个能源微网可以互联协调运行时，还需要考虑多能源路由器的协调互济作用。

3.5 能源互联网规划模型的求解方法

能源互联网的规划模型既需要根据风机、光伏、CHP、储能设备等装置的运行特性建立各自的数学模型，也需要构建电、热、气多能流最优潮流，因而规划模型具有高维数、非凸非线性的特点，具有很大的求解难度。同时，规划模型也可能被设置为多目标优化。针对这些难点，不同的文献根据各自模型的特点，采取了相应的模型简化方法和求解算法，主要有：1) 对部分非线性约束条件线性化以建立混合整数线性规划模型；2) 对规划模型进行连续变量、整数变量解耦，将大规模问题分解，分模块交替迭代求解；3) 利用智能算法求解规划模型中的多目标问题。

对部分表达式复杂而只是给出变量的上、下限约束的非线性约束条件，可用简单的上、下限来限制变量。文献[32]将电-气联合系统中的部分等式和不等式约束分别线性化，例如用功率、压强上下限来表征电路、天然气、热力支路特性。对一些表达式相对简单的等式方程，可采用一些线性化等效的方法。文献[82-83]对天然气潮流约束中的气压二次项等非线性约束采用了增量分段线性化，从而将原模型转化为一个大规模混合整数线性优化问题，提高了求解效率和精度。

对于变量的解耦和分离，文献[46-48]采用了拉格朗日松弛将模型解耦并转而求解原问题的对偶问题的优化解，对于子问题中的整数变量和非线性网络约束，分别采用了二次惩罚项线性化，区域坐标下降法和动态规划进行简化，并将对应子问题的

结果反馈到主问题，经过主问题、子问题反复迭代获得优化规划方案。文献[49-50]采用 Benders 分解的方法将整数变量和连续变量分离到不同的迭代子问题中。对于规划模型的分模块迭代求解，文献[73]建立了两阶段规划模型，在第一阶段规划，用多目标遗传算法——带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-)对系统进行结构优化；在第二阶段，用混合整数线性规划模型求解系统最优运行问题。文献[79]则将优化规划分成了三级：最优设备选型，最优设备定容，最优运行状态。

对于混合整数规划模型，因为模型中存在较多非线性约束，同时也可能是多目标规划问题，使用传统的优化算法求解难度大，随着计算技术的发展，人工智能算法获得了广泛使用。文献[33]采用了多智能体遗传算法将多能源系统的最优潮流分解为传统的各个能源系统的最优潮流进行求解。对于多目标优化问题的求解，文献[65-66,73]采用了修改过交叉和变异遗传算子的快速非支配排序遗传算法(NSGA-)，文献[67]确定归一化后各目标的合理权重，将多目标优化问题转化为单目标优化问题，从而使用改进的二进制粒子群优化算法。文献[79]也采用了离散粒子群算法分别对三级规划目标进行求解。

能源互联网中的规划模型根据不同的应用场景设置具有不同的求解难点，因而需要根据物理模型的特点，将求解方法进行有效的结合，3 种方法的应用场景如表 3 所示。

表 3 常用模型简化或求解方法

Tab. 3 General simplified or solving methods

模型简化或求解方法	约束线性化	变量解耦 分模块求解	智能算法
应用场景	潮流模型中 非线性方程	模型含整数 变量和连续变量 具有模块化 特征的问题	大规模 非线性问题 多目标 优化问题
目的	建立混合整数 线性规划模型	分模块迭代 求解问题	获取大规模问题、多 目标问题的可行解

4 能源互联网规划的研究展望

在能源生产环节规划，源、网协同规划，能源消费环节规划都面临着如表 4 所示的挑战，如何有效的应对这些问题是能源互联网规划研究的重点。

4.1 可再生能源和能源需求的不确定性建模

在能源生产侧，可再生能源机组的出力存在不确定性，因而对可再生能源功率预测也存在不确定

表 4 能源互联网规划的研究挑战

Tab. 4 Research challenges of planning of energy internet

研究挑战	能源生产	源、网协同规划	能源消费
	环节规划		环节规划
不确定性 建模	可再生能源	可再生能源	用户的需求
	功率预测	功率预测	侧响应行为
			电动汽车充电行为
多时间常数的 建模	电、热的耦合过程		
	电、气的耦合过程		
可靠性约束	新设备的 可靠性建模 (如 P2G 电站)	电-气系统的 互济效应	电-气-热多 能系统的互 济效应
	模型的求解 大规模的高维, 非凸非线性的数学模型的求解		
能源价格 影响	不同能源生产计划	单一能源需求的增长	能源消费量
	的不确定性变化	可能造成网络阻塞	的不确定性

性^[44];在能源消费侧,随着能源价格的波动,用户对能源的消费也会变化,同时用户参与需求侧响应的积极性也和能源价格、政策有关,电动汽车的充电行为也是随机的,这都导致用户对能源需求的不确定性^[84-85]。针对规划模型中存在的 uncertainty 问题,首先需要明确不确定性的来源,对不确定性的特征进行分析,采用概率论、序列运算等数学工具进行建模,再考虑通过蒙特卡洛模拟等方法分析这些不确定性对规划模型的影响^[84-85]。如何平抑可再生能源的随机性和仿真能源需求的变化是能源互联网生产环节、消费环节规划建模的难点。

4.2 考虑多时间常数的系统建模

能源互联网中,不同能源系统的暂态过程持续时间不同,电能需要瞬时平衡,而气、热系统的暂态过程相对缓慢,以分钟、小时计,在研究耦合系统的能源互联、转换时,需要考虑不同能源系统的时间常数,文献[86]考虑电、热系统不同的时间常数,将两个系统的耦合过程划分为 4 个阶段,每一个都是准稳态模型,并基于此建立了区域级的电-热系统的准稳态潮流模型。

在对耦合多能源系统的最优潮流进行分析时,目前基本以各个设备的稳态模型为基础,考虑能源转换效率等因素,但因为各个系统的暂态过程持续时间不同,各个设备的动态过程对多能源系统潮流的影响还需进一步研究。同时,热、天然气具有较大惯性,易于存储,气、热储能设备增加了系统的时间尺度和空间维度的可控性,如何利用热、气系统的惯性来平抑可再生能源的波动性的影响是能源生产环节规划的一个亟待解决的问题。

4.3 多能源系统的可靠性约束

能源互联网的规划模型中,供能可靠性是重要的约束条件,规划的目标往往是在保证可靠性的前提下追求经济性。如何评估能源互联网中各个环节中各种类型的设备的可靠性,并建立相应的约束条件或可靠性检验迭代子模块也是研究重点。按照以往的经验,需要以系统中的大规模可再生能源、储能设备、能源转换设备等新元件的可靠性模型为基础,考虑多种能源的互联耦合,评估各种能源的互联互济效应^[87-88]。运用可靠性 $N-1$ 安全约束模型^[56]、随机生产模拟检验规划方案的可靠性^[73],在目标函数添加供能不足的罚函数^[57]等方式来体现供能可靠性的影响,从而在系统经济性和供能可靠性间找到一个合适的平衡点。

4.4 大规模系统的建模和规划模型求解

能源互联网包含众多能源子系统,元件众多,规模庞大,对系统进行统一规划是难以实现的。需要根据能源互联网各个环节的特征进行合理的规划建模。规划模型往往具有高维数,非凸非线性的特点,设计合理的优化算法又是一个难点。需要对模型进行解耦分解,降低问题规模;对约束条件进行合理线性化,从而使用已有数学方法,通过子系统的相互迭代实现问题的求解。当规划模型为多目标时,也可以采用智能算法进行求解。

4.5 能源价格的影响分析

在能源互联网规划中需要考虑一体化多能源关联市场的影响,能源互联网中不同系统、不同环节都存在多种多样的参与者,各个参与者的市场参与模式和习惯也不同,参与者会因为能源价格的波动而做出不同的决策,进而造成能源生产、消费的不确定性^[52]。针对这种不确定性,应对方法有:用蒙特卡洛法模拟用户因能源价格变动而发起的需求侧响应;用灵敏度分析能源价格波动对系统运行费用的影响^[89];运用博弈论、纳什均衡等理论对用户行为建模^[90]等。能源价格波动,用户需求侧响应,运营商运营机制的影响是能源消费侧的规划建模所需要重点考虑的。

5 结论

能源互联网以可再生能源为主要一次能源,通过多种能源系统的协调优化运行,从能源的生产、传输、消费各个环节提升效率,为用户提供高可靠性、高效、清洁的多样化能源供应。能源互联网的规划研究是能源互联网从理论到实践的核心科学

问题,是能源互联网工程实践的基础。但能源互联网系统庞大,元件众多,因而无法作为整体统一规划,本文首先将能源互联网按“源-网-荷”的结构进行划分,以便规划建模。其次,能源互联网的规划需要明确规划建模的边界条件并选定相应的数学模型。因而本文也对规划建模的基础:多种能源的负荷预测、能量转换耦合的数学模型-能量枢纽,耦合多能源系统的混合潮流分析进行了简要介绍。

以此为基础,先建立能源互联网的基础规划模型,再根据各环节不同的主要任务和所含元件,分别考虑不同的因素建立规划模型。对于能源的生产环节的规划,主要任务为大规模可再生能源的消纳,通过规划建立电-热、电-气联合能源生产系统,利用气、热系统的较大惯性、易于存储平抑可再生能源波动性和间歇性的影响;对于以能源传输环节为主的源、网环节的协同规划,考虑多阶段规划周期、供能可靠性、CO₂排放、政策影响、能源价格等因素,建立电-气联合系统的规划模型,以实现大规模可再生能源接入情况下能源的高效传输;对于能源的消费环节的规划,分别建立电动汽车充电站规划模型、区域级多能源系统的规划模型、能源微网的规划模型,以充分发挥多能源系统的互联互通作用并考虑用户的参与,设置不同的系统运行方式,得到满足用户对多样化、高可靠性、高效能源供应需求的规划方案。对复杂模型采取合理的线性化;对大规模系统的优化采用分解协调;通过耦合环节将子问题联系在一起,采用合适的智能算法求解多目标优化,这三种方法的结合可有效求解上述规划模型。

最后,本文认为上述能源互联网“源-网-荷”三个环节的规划模型,在不确定性分析、多时间常数的系统建模、多能源系统的可靠性分析、大规模系统的建模和求解以及能源市场的影响这 5 方面尚有许多需要重点研究的内容,这 5 方面的研究对于完善能源互联网的规划理论体系具有重要意义。目前,国内外对于能源互联网的研究正在如火如荼的进行,所以希望本文能对我国在能源互联网规划方面的研究提供一定的参考。

参考文献

- [1] Rifkin J .The third industrial revolution how lateral power is transforming energy , the economy , and the world [M] . New York : Palgrave MacMillan , 2011 : 24-71 .
- [2] Huang A Q , Crow M L , Heydt G T , et al . The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system :the energy internet[J] .Proceedings of the IEEE , 2011 , 99(1) : 133-148 .
- [3] Block C , Bomarius F , Bretschneider P , et al . Internet of energy -ICT for energy markets of the future[R] . 2010 .
- [4] Takahashi R , Tashiro K , Hikihara T . Router for power packet distribution network : design and experimental verification[J] . IEEE Transactions on Smart Grid , 2015 , 6(2) : 618-626 .
- [5] 孙宏斌,郭庆来,潘昭光.能源互联网:理念,构架与前沿展望[J].电力系统自动化,2015,39(19):1-8.
Sun Hongbin , Guo Qinglai , Pan Zhaoguang . Energy internet : concept , architecture and frontier outlook [J] .Automation of Electric Power Systems ,2015 ,39(19) : 1-8(in Chinese) .
- [6] 董朝阳,赵俊华,文福拴,等.从智能电网到能源互联网:基本概念与研究框架[J].电力系统自动化,2014,38(15):1-11.
Dong Zhaoyang ,Zhao Junhua ,Wen Fushuan ,et al .From smart grid to energy internet : basic concept and research framework[J] . Automation of Electric Power Systems , 2014 , 38(15) : 1-11(in Chinese) .
- [7] 马钊,周孝信,尚宇炜,等.能源互联网概念、关键技术及发展模式探索[J].电网技术,2015,39(11):3014-3022.
Ma Zhao , Zhou Xiaoxin , Shang Yuwei , et al . Exploring the concept , key technologies and development model of energy internet[J] . Power System Technology , 2015 , 39(11) : 3014-3022(in Chinese) .
- [8] 曾鸣,杨雍琦,刘敦楠,等.能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J].电网技术,2016,40(1):114-124.
Zeng Ming ,Yang Yongqi ,Liu Dunnan ,et al .“Generation-grid-load-storage” coordinative optimal operation mode of energy internet and key technologies[J] . Power System Technology , 2016 , 40(1) : 114-124(in Chinese) .
- [9] 王继业,郭经红,曹军威,等.能源互联网信息通信关键技术综述[J].智能电网,2015,3(6):473-485.
Wang Jiye ,Guo Jinghong ,Cao Junwei ,et al .Review on information and communication key technologies of energy internet[J] . Smart Grid , 2015 , 3(6) : 473-485(in Chinese) .
- [10] 孙秋野,滕菲,张化光,等.能源互联网动态协调优化控制体系构建[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3667-3677.
Sun Qiuye ,Teng Fei ,Zhang Huaguang ,et al .Construction of dynamic coordinated optimization control system for

- energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3667-3677(in Chinese).
- [11] 王继业, 孟坤, 曹军威, 等. 能源互联网信息技术研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2015, 52(5): 1109-1126. Wang Jiye, Meng Kun, Cao Junwei, et al. Information technology for energy internet: a survey[J]. Journal of Computer Research and Development, 2015, 52(5): 1109-1126(in Chinese).
- [12] 陈启鑫, 刘敦楠, 林今, 等. 能源互联网的商业模式与市场机制(一)[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3050-3056. Chen Qixin, Liu Dunnan, Lin Jin, et al. Business models and market mechanisms of energy internet(1)[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3050-3056(in Chinese).
- [13] 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): 3806-3816. 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): 3806-3816(in Chinese).
- [14] 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): 4023-4033. Jiang Yibao, Song Yonghua, Ding Yi, et al. Review of risk assessment for energy internet, part II: information and market level[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4023-4033(in Chinese).
- [15] 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(in Chinese).
- [16] 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(in Chinese).
- [17] 邵成成, 王锡凡, 王秀丽, 等. 多能源系统分析规划初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3817-3828. Shao Chengcheng, Wang Xifan, Wang Xiuli, et al. Probe into analysis and planning of multi-energy Systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3817-3828(in Chinese).
- [18] Geidl M, Koeppl G, Favre-Perrod P, et al. Energy hubs for the future[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(1): 24-30.
- [19] 荆平, 徐桂芝, 赵波, 等. 面向全球能源互联网的大容量储能技术[J]. 智能电网, 2015, 3(6): 486-492. Jing Ping, Xu Guizhi, Zhao Bo, et al. Large-scale energy storage technology for global energy internet[J]. Smart Grid, 2015, 3(6): 486-492(in Chinese).
- [20] 张友波, 郭越岭, 王连敏, 等. 天然气储存方式技术经济比较分析[J]. 天然气技术, 2007, 1(3): 44-48. Zhang Youbo, Guo Yueling, Wang Lianmin, et al. A technical-economic comparative analysis of nature gas storage methodology[J]. Natural Gas Technology, 2007, 1(3): 44-48(in Chinese).
- [21] 王德文, 孙志伟. 电力用户侧大数据分析并行负荷预测[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 527-537. Wang Dewen, Sun Zhiwei. Big data analysis and parallel load forecasting of electric power user side [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 527-537(in Chinese).
- [22] Soldo B. Forecasting natural gas consumption[J]. Applied Energy, 2012, 92: 26-37.
- [23] Sajjadi S, Shamshirband S, Alizamir M, et al. Extreme learning machine for prediction of heat load in district heating systems[J]. Energy and Buildings, 2016, 122: 222-227.
- [24] 陈飞翔, 胥建群, 王晨杨, 等. 能源互联网系统用户侧冷热负荷预测模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3678-3684. Chen Feixiang, Xu Jianqun, Wang Chenyang, et al. Research on Building cooling and heating load prediction model on user's side in energy internet system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3678-3684(in Chinese).
- [25] Adamek F, Arnold M, Andersson G. On decisive storage parameters for minimizing energy supply costs in multicarrier energy systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(1): 102-109.
- [26] 曹军威, 袁仲达, 明阳阳, 等. 能源互联网大数据分析技术综述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(11): 1-12. Cao Junwei, Yuan Zhongda, Ming Yangyang, et al. Survey of big data analysis technology for energy internet [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(11): 1-12(in Chinese).
- [27] 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 (in Chinese).
- [28] Correa-Posada C M, Sánchez-Martin P. Security-constrained optimal power and natural-gas flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1780-1787.
- [29] Geidl M, Andersson G. Optimal power flow of multiple energy carriers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 145-155.
- [30] Quelhas A, Gil E, McCalley J D, et al. A multiperiod generalized network flow model of the U. S. integrated energy system: Part I—model description[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(2): 829-836.
- [31] Geidl M, Andersson G. Operational and structural optimization of multi-carrier energy systems[J]. European Transactions on Electrical Power, 2006, 16(5): 463-477.
- [32] Shahmohammadi A, Dalvand M M, Ghazizadeh M S, et al. Energy hubs' structural and operational linear optimization with energy storage elements[C]//2011 2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS). Sharjah: IEEE, 2011: 1-6.
- [33] Moeini-Aghaie M, Abbaspour A, Fotuhi-Firuzabad M, et al. A decomposed solution to multiple-energy carriers optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 707-716.
- [34] 吉平, 周孝信, 宋云亭, 等. 区域可再生能源规划模型述评与展望[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2071-2079.
- Ji Ping, Zhou Xiaoxin, Song Yunting, et al. Review and prospect of regional renewable energy planning models[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2071-2079(in Chinese).
- [35] 刘贞, 张希良, 高虎, 等. 区域可再生能源规划基本框架研究[J]. 中国能源, 2010, 32(2): 38-41.
- Liu Zhen, Zhang Xiliang, Gao Hu, et al. Research on basic framework of regional renewable energy planning[J]. Energy of China, 2010, 32(2): 38-41(in Chinese).
- [36] 徐飞, 闵勇, 陈磊, 等. 包含大容量储热的电-热联合系统[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5063-5072.
- Xu Fei, Min Yong, Chen Lei, et al. Combined electricity-heat operation system containing large capacity thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5063-5072(in Chinese).
- [37] 顾泽鹏, 康重庆, 陈新宇, 等. 考虑热网约束的电热能源集成系统运行优化及其风电消纳效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3596-3604.
- Gu Zepeng, Kang Chongqing, Chen Xinyu, et al. Operation optimization of integrated power and heat energy systems and the benefit on wind power accommodation considering heating network constraints[J]. Proceedings of CSEE, 2015, 35(14): 3596-3604(in Chinese).
- [38] 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(in Chinese).
- [39] Yang Yulong, Wu Kai, Long Hongyu, et al. Integrated electricity and heating demand-side management for wind power integration in China[J]. Energy, 2014, 78: 235-246.
- [40] Gahleitner G. Hydrogen from renewable electricity: an international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(5): 2039-2061.
- [41] 王一家, 董朝阳, 徐岩, 等. 利用电转气技术实现可再生能源的大规模存储与传输[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3586-3595.
- Wang Yijia, Dong Zhaoyang, Xu Yan, et al. Enabling large-scale energy storage and renewable energy grid connectivity: a power-to-gas approach[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3586-3595(in Chinese).
- [42] 李杨, 刘伟佳, 赵俊华, 等. 含电转气的电-气-热系统协同调度与消纳风电效益分析[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3680-3688.
- Li Yang, Liu Weijia, Zhao Junhua, et al. Optimal dispatch of combined electricity-gas-heat energy systems with power-to-gas devices and benefit analysis of wind power accommodation[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3680-3688(in Chinese).
- [43] 黄国日, 刘伟佳, 文福拴, 等. 具有电转气装置的电-气混联综合能源系统的协同规划[J]. 电力建设, 2016, 37(9): 1-13.
- Huang Guori, Liu Weijia, Wen Fushuan, et al. Collaborative planning of integrated electricity and natural gas energy systems with power-to-gas stations[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(9): 1-13(in Chinese).
- [44] Qadrdan M, Wu J Z, Jenkins N, et al. Operating strategies for a GB integrated gas and electricity network

- considering the uncertainty in wind power forecasts[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(1): 128-138.
- [45] Ramirez-Elizondo L M, Paap G C. Unit commitment in multiple energy carrier systems[C]//2009 North American Power Symposium (NAPS). Starkville, MS, USA: IEEE, 2009: 1-6.
- [46] Liu Cong, Shahidehpour M, Fu Yong, et al. Security-constrained unit commitment with natural gas transmission constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1523-1536.
- [47] Liu C, Shahidehpour M, Wang J. Application of augmented Lagrangian relaxation to coordinated scheduling of interdependent hydrothermal power and natural gas systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(12): 1314-1325.
- [48] Unsihuay C, Marangon-Lima J W, de Souza A C Z. Short-term operation planning of integrated hydrothermal and natural gas systems[C]//2007 IEEE Lausanne Power Tech. Lausanne: IEEE, 2007: 1410-1416.
- [49] Zhang Xiaping, Shahidehpour M, Alabdulwahab A, et al. Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2302-2311.
- [50] Zhang Xiaping, Shahidehpour M, Alabdulwahab A S, et al. Security-constrained co-optimization planning of electricity and natural gas transportation infrastructures[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 2984-2993.
- [51] Salimi M, Ghasemi H, Adelpour M, et al. Optimal planning of energy hubs in interconnected energy systems: a case study for natural gas and electricity[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(8): 695-707.
- [52] Qiu Jing, Dong Zhaoyang, Zhao Junhua, et al. Low carbon oriented expansion planning of integrated gas and power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2): 1035-1046.
- [53] Unsihuay-Vila C, Marangon-Lima J W, De Souza A C Z, et al. A model to long-term, multiarea, multistage, and integrated expansion planning of electricity and natural gas systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 1154-1168.
- [54] Barati F, Seifi H, Sepasian M S, et al. Multi-period integrated framework of generation, transmission, and natural gas grid expansion planning for large-scale systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2527-2537.
- [55] Zhang X P, Che L, Shahidehpour M, et al. Reliability-based optimal planning of electricity and natural gas interconnections for multiple energy hubs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1658-1667.
- [56] Hu Y, Bie Z H, Ding T, et al. An NSGA-II based multi-objective optimization for combined gas and electricity network expansion planning[J]. Applied Energy, 2016, 167: 280-293.
- [57] Aghaei J, Amjady N, Baharvandi A, et al. Generation and transmission expansion planning: MILP-based probabilistic model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1592-1601.
- [58] McCalley J, Krishnan V, Gkritza K, et al. Planning for the long haul: investment strategies for national energy and transportation infrastructures[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2013, 11(5): 24-35.
- [59] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1-10. Hu Zechun, Song Yonghua, Xu Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10(in Chinese).
- [60] Yazdani-Damavandi M, Moghaddam M P, Haghifam M R, et al. Modeling operational behavior of plug-in electric vehicles' parking lot in multienergy systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 124-135.
- [61] Galus M D, Andersson G. Power system considerations of plug-in hybrid electric vehicles based on a multi energy carrier model[C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting. Calgary, AB: IEEE, 2009: 1-8.
- [62] Yao W F, Zhao J H, Wen F S, et al. A hierarchical decomposition approach for coordinated dispatch of plug-in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2768-2778.
- [63] 杜爱虎, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑电动汽车充电站布局优化的配电网规划[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 35-42. Du Aihu, Hu Zechun, Song Yonghua, et al. Distribution network planning considering layout optimization of electric vehicle charging stations[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 35-42(in Chinese).
- [64] 葛少云, 冯亮, 刘洪, 等. 考虑车流信息与配电网容量约束的充电站规划[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 582-589. Ge Shaoyun, Feng Liang, Liu Hong, et al. Planning of charging stations considering traffic flow and capacity constraints of distribution network[J]. Power System

- Technology, 2013, 37(3): 582-589(in Chinese).
- [65] Yao W F, Zhao J H, Wen F S, et al. A multi-objective collaborative planning strategy for integrated power distribution and electric vehicle charging systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1811-1821.
- [66] 姚伟锋, 赵俊华, 文福拴, 等. 配电系统与电动汽车充电网络的协调规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 10-18.
- Yao Weifeng, Zhao Junhua, Wen Fushuan, et al. Coordinated planning for power distribution system and electric vehicle charging infrastructures [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 10-18(in Chinese).
- [67] 王辉, 王贵斌, 赵俊华, 等. 考虑交通网络流量的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 63-69, 98.
- Wang Hui, Wang Guibin, Zhao Junhua, et al. Optimal planning for electric vehicle charging stations considering traffic network flows[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 63-69, 98(in Chinese).
- [68] Sheikhi A, Ranjbar A M, Safe F. A novel method to determine the best size of CHP for an energy hub system [C]//2011 2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS). Sharjah: IEEE, 2011: 1-7.
- [69] Sheikhi A, Rayati M, Ranjbar A M. Energy Hub optimal sizing in the smart grid: machine learning approach [C]//2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). Washington, DC: IEEE, 2015: 1-5.
- [70] Zhang X J, Karady G G, Ariaratnam S T. Optimal allocation of CHP-based distributed generation on urban energy distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(1): 246-253.
- [71] Saldarriaga C A, Hincapie R A, Salazar H. A holistic approach for planning natural gas and electricity distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4052-4063.
- [72] Shen Xinwei, Han Yingduo, Zhu Shouzheng, et al. Comprehensive power-supply planning for active distribution system considering cooling, heating and power load balance[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(4): 485-493.
- [73] Guo Li, Liu Wenjian, Cai Jiejun, et al. A two-stage optimal planning and design method for combined cooling, heat and power microgrid system[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 74: 433-445.
- [74] 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): 2934-2941.
- Guan Lin, Chen Peng, Tang Zongshun, et al. Integrated energy station design considering cold and heat storage [J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2934-2941(in Chinese).
- [75] 荆有印, 白鹤, 张建良. 太阳能冷热电联供系统的多目标优化设计与运行策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(20): 82-87.
- Jing Youyin, Bai He, Zhang Jianliang. Multi-objective optimization design and operation strategy analysis of a solar combined cooling heating and power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(20): 82-87 (in Chinese).
- [76] Bahrami S, Safe F. A financial approach to evaluate an optimized combined cooling, heat and power system [J]. Energy and Power Engineering, 2013, 5(5): 352-362.
- [77] Ebrahimi M, Keshavarz A. Sizing the prime mover of a residential micro-combined cooling heating and power (CCHP) system by multi-criteria sizing method for different climates[J]. Energy, 2013, 54: 291-301.
- [78] Jayasekara S, Halgamuge S K, Attalage R A, et al. Optimum sizing and tracking of combined cooling heating and power systems for bulk energy consumers [J]. Applied Energy, 2014, 118: 124-34.
- [79] 赵峰, 张承慧, 孙波, 等. 冷热电联供系统的三级协同整体优化设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3785-3793.
- Zhao Feng, Zhang Chenghui, Sun Bo, et al. Three-stage collaborative global optimization design method of combined cooling heating and power[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3785-3793(in Chinese).
- [80] Wouters C, Fraga E S, James A M. An energy integrated multi-micro-grid MILP (mixed-integer linear programming) approach for residential distributed energy system planning-A South Australian case-study [J]. Energy, 2015, 85: 30-44.
- [81] 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(in Chinese).
- [82] Khodaei A, Shahidehpour M, Wu L, et al. Coordination of short-term operation constraints in multi-area expansion planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2242-2250.

- [83] 胡源, 别朝红, 李更丰, 等. 天然气网络和电源、电网联合规划的方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 45-54.
- Hu Yuan, Bie Zhaohong, Li Gengfeng, et al. Integrated planning of natural gas network and composite power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 45-54(in Chinese).
- [84] Kienzle F, Ahcin P, Andersson G. Valuing investments in multi-energy conversion, storage, and demand-side management systems under uncertainty[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(2): 194-202.
- [85] Pazouki S, Haghifam M R, Moser A. Uncertainty modeling in optimal operation of energy hub in presence of wind, storage and demand response[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 61: 335-345.
- [86] 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.
- [87] Navarro-Espinosa A, Mancarella P. Probabilistic modeling and assessment of the impact of electric heat pumps on low voltage distribution networks[J]. Applied Energy, 2014, 127: 249-266.
- [88] Clegg S, Mancarella P. Integrated modeling 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.
- [89] Pazouki S, Haghifam M R, Pazouki S. Short term economical scheduling in an energy hub by renewable and demand response[C]//2013 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS). Istanbul: IEEE, 2013: 1-6.
- [90] Sheikhi A, Rayati M, Bahrami S, et al. Integrated demand side management game in smart energy hubs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 675-683.



别朝红

收稿日期: 2017-06-06。

作者简介:

别朝红(1971), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统规划与可靠性评估、新能源消纳等, zhbic@mail.xjtu.edu.cn。

王旭(1994), 男, 博士研究生, 主要研究方向为能源互联网规划, wangxu12@stu.xjtu.edu.cn。

胡源(1988), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统规划, huyuan23@stu.xjtu.edu.cn。

(责任编辑 乔宝榆)

Review and Prospect of Planning of Energy Internet

BIE Zhaohong, WANG Xu, HU Yuan

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

KEY WORDS: energy internet; coupled multiple energy system; energy hub; combined heat and power (CHP); optimal planning; demand response

To improve the efficiency of energy utilization and accommodate large-scale renewable energy, the Energy Internet has been proposed by the integration of advanced energy technology and information & communication technology. Planning theory is the foundation of engineering practice of Energy Internet. For the Energy Internet is a huge system consisting of a large amounts of components, Energy Internet is divided into “generation-grid-load” three parts to establish suitable planning model. Fig 1 illustrates the division of Energy Internet and the main components of each part.

In terms of modeling the Energy Internet, energy hub describes the conversion and coupling links of multiple energy. Meanwhile, the precise load forecast of electricity, gas and heat and the multiple energy flow analysis lay the basis of the planning model. Based on them, the energy planning can be carried out for three parts of Energy Internet to determine the location and the capacity of components.

For the generation part, the planning model of combined gas and electricity generation system is set up by taking the following constraints:

- 1)Energy generation and energy demand balance;
- 2)Energy supply reliability and emissions of carbon;

- 3)Investment and construction of components;
- 4)Operation characteristics of different components.

The planning model of grid part is always formulated with the company of generation part because of the complementary benefit of two parts. This aspect focuses on the investment of components and operation cost of the system while considering different influencing factors. So the operation constraints are added to the upper constraints. To solve the complicate problem, a decomposed framework is always adopted to coordinate the iterations of individual sub-problems.

While in the load part, the battery of large amounts of electric vehicle may play an important role in coordinating the operation of power system following the schedule. For the planning model of multiple energy system of the size of district or large building, the demand response and the influence of energy price should be taken into consideration. To simulate the operation process of regional Energy Internet, the operation constraints are supposed to be added based on a variety of scenes. The linearization method, the intelligent algorithms and the decomposed framework are widely used to simplify and solve the complicate mathematical model.

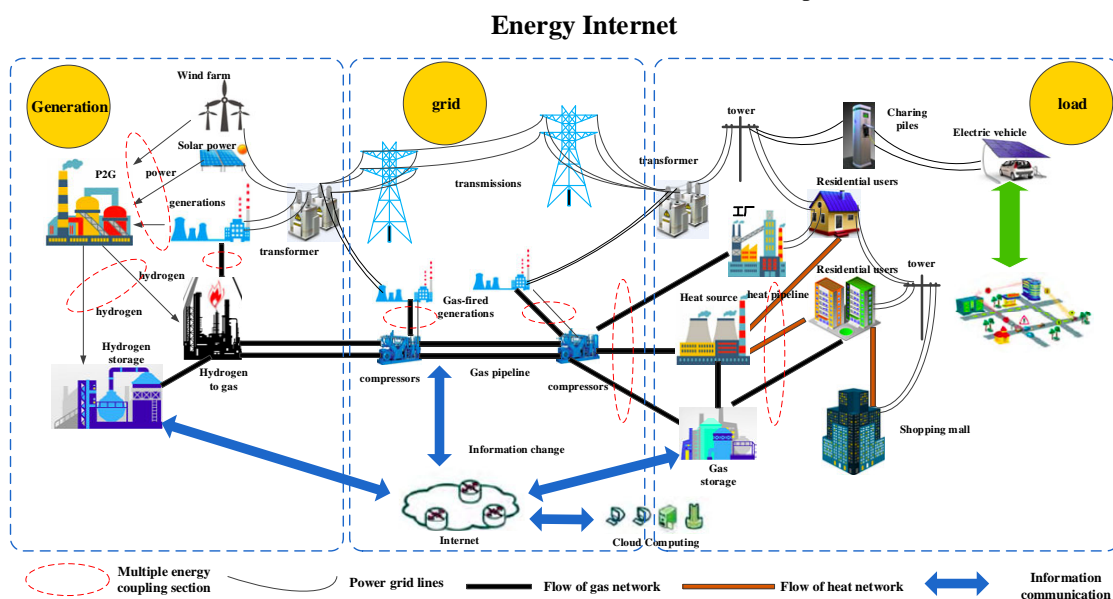


Fig 1 Basic structure of energy internet