

电力-天然气耦合系统建模与规划运行研究综述

乔铮, 郭庆来, 孙宏斌*

(清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084)

Research Survey on the Modeling, Planning and Operational Analysis of Electricity-Natural Gas Coupling System

QIAO Zheng, GUO Qinglai, SUN Hongbin*

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

Abstract: With the widespread application of gas-fired units and the rapid development of power-to-gas (P2G) technology, the interaction between power systems and natural gas systems is becoming more intimate. The electricity-natural gas coupling system is described as the close coupling of two energy systems. In addition to the separate operating characteristics and security constraints of the two energy systems, the coupling system presents new characteristics and constraints due to the interaction between the constituent systems. Therefore, new analyses and control methods are urgently needed. In this article, the current research on the perspective of modeling and simulation, optimal planning, and operational analysis (optimal dispatching and security assessment) of electricity-natural gas coupling systems is summarized; the current domestic and foreign scholars' exploration of the electricity-natural gas coupling market is outlined; and finally, the limitations of current research and future research directions are discussed.

Keywords: electricity-natural gas coupling system; modeling and simulation; optimal planning; optimal dispatching; security evaluation; market exploration

摘要: 随着燃气机组的广泛应用和电转气技术的快速发展, 电力系统与天然气系统之间的互动日益密切, 电力-天然气耦合系统是在该背景下形成的用于描述两个能源系统紧密耦合的系统形式。该耦合系统除了具有两个能源系统分别的运行特性和安全约束外, 还因系统间的耦合互动产生了新的特点和约束, 亟需新的分析和控制方法, 近年来已经获得了国内外众多专家学者的关注和深入研究。文章从电力-天然气耦合系统的建模仿真、优化规划、运行分析(优化调度、安全

评估)的角度对当前的主要研究成果进行了综述, 同时总结了目前国内外学者对耦合市场的探索, 最终对当前研究的不足和未来的研究方向进行了探讨。

关键词: 电力-天然气耦合系统; 建模仿真; 优化规划; 优化调度; 安全评估; 市场探索

0 引言

在世界能源清洁低碳转型的大背景下, 燃气发电因具有机组结构紧凑、启停灵活、可靠性高、效率高且污染排放量低等优势, 未来几十年仍将在发电类型中占有重要位置。同时, 由于工业、居民以及交通领域对天然气需求的快速增长, IEA、艾森克美孚等多家机构据预测, 至2040年, 世界天然气需求仍将保持1.4%~1.9%的年均增长^[1]。

当前中国电源结构仍然以煤炭和水力发电为主, 但随着间歇性可再生能源发电占比不断攀升, 天然气发电因其良好的灵活性和可靠性, 使其装机量和发电量比重也将有所上升。《电力发展“十三五”规划(2016—2020年)》提出将推广应用分布式气电, 重点发展冷热电多能联供, 到2020年全国天然气发电容量达到1.1亿kW以上^[2]。在中国的一些重负荷中心城市, 燃气机组的应用已经极具规模, 以北京为例, 目前燃气机组的装机已经占市内总发电装机的90%以上。

电力系统的运行安全与天然气系统的供气可靠性息息相关。近年来, 因燃气管网运行压力过低导致部分燃气机组跳机的现象在世界各地的电网数次发生。2017年8月中国台湾由于天然气系统阀门误操作导致多台燃气机组跳机, 引起连锁故障导致全台逾半用户

基金项目: 国家自然科学基金委项目(51537006, 51621065)。

National Natural Science Foundation of China (51537006, 51621065).

断电。2011年2月美国西南部由于极度寒冷天气导致耗气量和耗电量剧增, 多处燃气系统设备故障, 燃气管网运行压力骤降, 导致多台燃气机组被迫停机或运行能力下降, 减少可用发电能力达29.7 GW, 尖峰时刻130万用户停电。

另一方面, 随着风电和光伏发电装机容量的快速增长, 其出力的随机性和不确定性给电力系统的运行安全带来了巨大影响, 为了保障系统的稳定运行, 风光发电消纳问题凸显。电转气 (power-to-gas, P2G) 作为有效解决弃风和弃光问题、同时可支撑日益增涨的天然气负荷需求的重要技术, 近年来获得了越来越多的关注和快速的发展。P2G设备利用水和二氧化碳将无法利用和存储的可再生能源发电转化为天然气, 利用现有成熟的天然气系统基础设施作为巨大的储能设施, 在电力系统与天然气系统间搭建了新的桥梁, 将两者的规划和运行进一步联系起来。

在世界范围内, 天然气系统与电力系统的耦合程度正在逐步提高, 单独系统的规划运行策略和研究分析方法已无法满足安全性、经济性的分析需求。目前各国已有很多专家学者投入到电力-天然气耦合系统的规划及运行研究中, 并形成了大量的研究成果, 也有一些文献对这些成果的部分内容进行了综述。文献[3]主要从安全的角度对电-气互联综合能源系统进行了研究综述, 重点放在安全评估、可靠性分析、韧性分析以及预防控制、矫正控制方面, 对耦合系统的优化规划和优化调度未有涉及。文献[4]则主要对P2G技术在电-气耦合系统中的应用进行了综述, 总结了

P2G技术的特点、P2G设备分别在电力系统和天然气系统中参与运行的模型、P2G设备参与电-气耦合系统运行优化的场景和优化模型及方法, 并展望了P2G技术的应用前景。本文期望从更基础的角度更全面地对当前耦合系统的规划与运行研究进行综述。由于建模与仿真是系统分析的基础, 因此本文首先从当前耦合系统建模和联合仿真的研究切入, 对当前的模型和方法进行了总结和对比; 随后以此为基础, 综述当前国内外学者在优化规划和运行分析方面的各项研究成果; 最后对目前电-气耦合市场方面的探索和尝试进行了简要介绍, 以期后续电-气耦合系统的研究提供思路和启发。

1 电力-天然气耦合系统建模及仿真

1.1 电力-天然气耦合系统的典型形态

图1展示了典型的电力-天然气耦合系统组成及结构。电力系统主要包括电源、变压器、输电线、负荷等。而天然气系统的组成与电力系统类似, 包括气源、压缩机、输气管网及负荷。两个系统通过一些耦合元件 (如燃气发电机组、冷热电联产机组、P2G设备等) 紧密地耦合在一起。

其耦合关系主要分为3个方面: 首先, 天然气作为电力系统发电的一次能源, 直接影响着电力系统的电能供给, 电力系统电源中的燃气机组可视为天然气系统的重要负荷; 其次, 随着间歇性可再生能源的快速增长, 为了消纳更多的可再生能源, P2G技术将

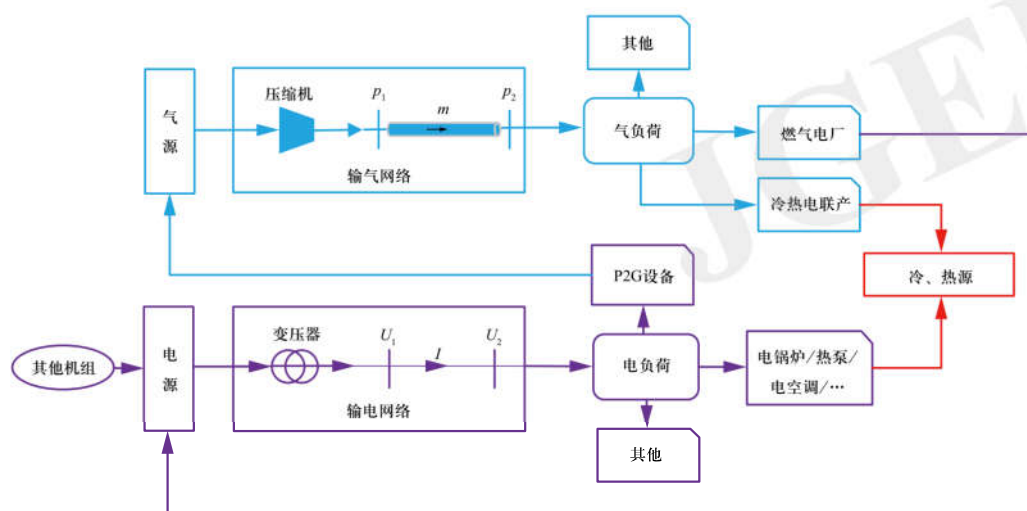


图1 典型电力-天然气耦合系统

Fig. 1 Typical electricity-natural gas coupling system

多余的电力能源转化为天然气能源,该技术主要由德国、荷兰、英国、西班牙等国掌握,目前已有超过50个示范项目建成^[5];最后,冷热电联产机组、电锅炉/电空调/热泵等设备近年来获得了广泛应用,冷/热源的能量既可以来源于天然气,也可以来源于电力,使得两个系统在负荷侧联系起来。除此之外,电力系统与天然气系统在信息、地理及市场方面也存在多种多样的耦合,本文在建模中重点关注其物理耦合。

1.2 独立能源系统模型

在传统的电力系统和天然气系统领域,其各自的建模与分析方法已经相对成熟,并已获得了广泛应用。电力系统主要由潮流模型表示,遵循电磁学定律,主要变量有各节点的电压幅值和相角、各节点注入功率及线路有功/无功潮流等,已有一套成熟完整的网络分析方法^[6-7]。天然气系统则由一组动态偏微分方程描述,遵循流体力学定律,主要变量有压力、流量、密度等,同时推导出了稳态计算中更加常用的水力方程^[8-9]。

电力系统与天然气系统虽然遵循不同的学科理论,支路传输特性各异,如稳态计算中电网支路满足欧姆定律,而天然气管道支路满足Weymouth等水力方程等,但也具有一定的共性特征,主要表现为拓扑约束和广义基尔霍夫定律。拓扑约束描述了系统抽象的网络连接关系,可以用图或矩阵的方式表达。矩阵一般称为关联矩阵,常见的有节点-支路关联矩阵、基本回路-支路关联矩阵、基本割集-支路关联矩阵等,其定义可详见参考文献[7]和[10]。广义基尔霍夫定律常用于系统的稳态能流分析,表示了能量连续性和能量守恒性质。两个系统的特性对比总结如表1所示。

表1 电力与天然气系统的比较

Table 1 Comparison of electricity with natural gas systems

	电力系统	天然气系统
描述	电能在线中传输	天然气在管道中传输
传输速度	光速	<声速
覆盖范围	大	大
理论基础	电磁学理论	流体力学理论
变量	电压 U 电流 I	气压 p 流量(质量流量 m 、体积流量 Q)
支路方程	欧姆定律	水力方程

1.3 电力-天然气耦合系统模型

就设备层而言,涉及到电力系统与天然气系统两种能量形式转换的耦合设备主要有多种燃气机组及P2G机组等,其设备/元件的建模已经非常成熟^[11-12]。近几年来,随着微网的发展,多种能量形式的综合利用迅速增加,诸多专家学者在系统层次上建立了多种相应的数学模型,其建模的精度也在不断提高。

苏黎世联邦理工学院Göran Andersson教授最早提出了能源集线器(energy hub)和能源互通器(energy interconnector)的概念^[13-14]。Energy hub是一种用于描述多种能量之间转换、耦合关系的输入-输出端口模型,是对多种实际设备及其耦合关系的抽象建模。目前该模型已在优化设计、最优潮流、优化调度等不同方面获得了广泛的应用,并在应用中逐渐发展出了扩展energy hub模型^[15-16]。但它仅仅描述了多能源系统中一个节点或等效节点的能量转换,无法描述节点间互联互通的网络关系。Energy interconnector则是一种用于描述电能、化学能和热能等多种能源形式“同路”长距离柔性传输的模型。文献[17]验证了天然气与电力联合远距离输送方案的可行性,电力采用超导电缆输送,而液化天然气作为高温超导电缆的冷却工质,分析结果表明联合输送的效率显著提高,具有较大节能潜力。

Energy hub与energy interconnector模型共同组成了多能源耦合系统的主要架构。这些模型是对耦合建模的有益尝试,但对实际系统进行了较大简化,仅仅描述了多种能源环节的静态传递与转换关系,较难考虑能源转换环节的非线性或动态等特性。

为了进一步考虑多能流的网络关系,能量流、网络流等模型得到了应用。文献[18-19]使用网络流模型对美国全国的煤、天然气和电力网络进行了分析。王成山教授2013年提出了一种基于母线模型的通用微网多能流系统建模方法^[20]。文献[21]探讨了以能源路由器为核心交换装置的能源互联网模型。这些模型大多对多能流网络进行了线性化处理,可以应用在规划、评估、初步优化等许多方面,尤其是在大规模系统和强不确定性系统中可以简化分析,但并没有考虑不同网络的具体特性约束,没有体现电磁学、流体力学等约束,难以适用于精度要求高的在线能量管理中。

近几年考虑物理网络约束的联合建模开始出现。文献[22]研究了电网与天然气耦合运行时的稳态多能流计算,文献[23-24]研究了电、热、气联合稳态多能

流计算, 而文献[25]则研究了考虑风电不确定性的电、气的区间能流问题。电力系统与天然气系统传输特性存在差异, 如何高效求解耦合能流仍然是一个挑战。目前的研究大多采用稳态模型, 虽然有一些研究在天然气系统中引入了Linepack的概念以表征管道的储气特性, 依然无法精确描述流体网络的动态过程和分布参数特性, 尤其在具有显著多时间尺度特性的电力-天然气耦合系统中, 分析结果误差明显, 因此考虑多时间尺度特性的建模方法有待进一步的研究。

1.4 电力-天然气耦合仿真

单独能源系统的仿真软件已经相对比较成熟, 如电力系统PSASP、PSCAD/EMTDC、PSD-BPA及天然气系统TGNET、BENTLEY、SYNERGI等, 已在系统实际运行中获得了广泛的应用, 但尚未有能够实现两个系统联合仿真的成熟商业软件或平台。

荷兰格罗宁根大学Pambour率先在该方面做出了尝试^[26-27]。文献[26]提出了一种基于Matlab的综合仿真模型, 反映了系统在中断扰动下的短时动态响应, 并考虑了中断后的级联效应, 短时动态认为天然气系统动态对电力系统影响较小, 因此在模型中主要考虑了电力系统的AC潮流模型及天然气系统的稳态水力方程。文献[27]发布了第一个可以实现两个系统单一时间帧仿真的软件, 该仿真软件考虑了天然气管道的动态方程、电力系统传输的AC潮流模型以及主要的设备(包括压缩机、储气装置等), 主要针对系统中可能出现的扰动或故障, 分析其受到扰动后的动态过程, 并已开发了相应的图形界面, 但其仿真的精度和效率仍有待进一步验证。文献[28]应用二阶锥松弛提出了一种基于凸优化的电-气耦合系统稳态/瞬态仿真工具, 该方法相比于牛顿法而言收敛性更好, 但仿真时间较长, 适应于牛顿法无法获得收敛解的情况, 目前瞬态计算无法实现双向气流的仿真。文献[29]基于Matlab/Simulink仿真软件搭建了包含电力网络、天然气网络和耦合环节的终端能源系统仿真平台, 并通过仿真分析了微电网动态过程对天然气网络的影响。

总之, 目前已有的比较成熟的仿真软件主要是针对耦合元件(如多种燃气机组等), 而对电力系统与天然气系统的联合仿真仍处在探索阶段, 尚未有通过测试被工业界或学术界广泛接受或认定的成熟商业软件。如何在同一平台上搭建两大系统的联合仿真或通过某种协议及接口实现不同平台上两大系统仿真信息的交互将是未来亟待解决的难题。

2 电力-天然气耦合系统优化规划

能源系统规划主要指在规划期间投建资源的最佳设备组合、容量、位置和投资时间。传统的规划通常仅考虑一种能源形式的最优配置策略, 而不考虑不同能源间的相互作用。随着电力系统与天然气系统之间的相互依赖性增强, 传统的规划方法难以有效地协同两种类型的能源基础设施。同时, 耦合系统的优化规划可以充分利用两类能源在时间、空间上的不同特性, 提高各自的自由度, 给能源系统的改进带来巨大的机会。近年来, 电力-天然气耦合系统的协同规划问题受到了世界各国的关注。例如, 2009年, 澳大利亚合并了对电力系统和天然气系统的监管, 并成立了对两个系统进行统一规划与管理的国家能源市场运营机构(Australian energy market operator, AEMO)^[30]。

从研究建模的角度出发, 虽然各个文献中采用的模型不同, 有些采用了Linepack的模型来考虑管道内储气量的影响^[31-32], 有些则在energy hub模型的基础上对电、气系统的扩展和设备选择进行了优化规划^[33-34], 文献[35]增强了对天然气系统组件的建模, 特别的考虑了压缩机双向输送能力和压缩比对天然气消耗的影响, 但总体而言, 目前大多文献仍然以稳态潮流模型为主。这是因为在规划问题中, 优化的周期往往较长, 在较长的时间尺度下, 即使是慢动态的天然气网络也足以达到稳态平衡状态, 稳态潮流模型已足以满足规划精度的要求。

从可用资源及实际需求的角度出发, 各个文献针对不同的场景, 充分挖掘其互补特性, 从而降低系统投入及运行成本。文献[36]利用天然气储气配合水力发电提高电力供应的可靠性, 同时利用电力负荷、天然气负荷以及丰水枯水期预测结果合理规划天然气的储存容量, 以有效地进行季节性套利, 降低整个规划期的运行成本, 这种模型主要应用于巴西等水力发电占比很高的国家或地区。文献[37]针对具有大量分布式天然气机组的电力系统进行耦合优化规划, 将分布机组作为系统的内生变量可以有效地降低成本。文献[38]考虑了风电装机量较大的地区, P2G设备的位置及容量优化配置问题。文献[39]同样针对可再生能源快速发展的现状, 采用基于关联传播聚类的场景削减法处理不确定性, 提出了包含燃气机组与P2G机组在内的电-气耦合系统规划模型。文献[40]重点针对液态天然气(liquefied natural gas, LNG)及储气设备的容量及位置优化建立了规划模型。还有一些文献进一步考虑了负荷与可再生能源的不确定

性^[41-42]、电力市场与天然气市场^[32, 43-44]、系统故障^[45-46]以及需求响应^[32, 47]等因素的影响。

另外,就规划目标而言,大部分规划是以系统扩建投资和运行成本最低作为优化目标的,但仍有一些研究根据不同的需求将低碳、系统可靠性、弃风量等指标加入到优化目标中。文献[31]通过一定的转化将碳排指标和可靠性指标转化为成本,将其与系统的运行成本之和作为总的成本函数,规划的目标是使总收益比最高,最终建立了混合整数非线性优化模型并采用模糊粒子群算法进行求解。文献[33]以能量枢纽模型为基础提出了互联能量枢纽的优化规划框架,除投资和运行成本外,还特别地考虑安装分布式发电以减少排放的激励政策以及基于组件可用性的能源供应可

靠性。文献[48]将用电能量不足的期望值与单位失负荷价值的乘积作为可靠性成本,以其与投资成本、运行成本之和为目标,以尽可能满足规划期内电-气的负荷增长需求,并采用Benders分解的方法求解该混合整数非线性优化问题。文献[49]特别考虑了失负荷惩罚成本和弃风惩罚成本,同时分析了P2G机组对风电消纳的促进作用。

总之,电力-天然气耦合系统的优化规划需针对具体地区的具体场景进行分析,中国目前在耦合规划研究中较为缺乏实际数据的支持,而考虑电力网络与天然气网络的双向互动,达到各方利益最大化,并尽可能减少大量间歇性可再生能源发电带来的影响将是未来耦合规划的重要问题。

表2 电力-天然气耦合系统优化规划模型对比

Table 2 Comparison of optimal planning model for the electricity-natural gas coupling system

文献序号	[31]	[32]	[33]	[34]	[35]	[36]	[37]	[38]	[39]	[40]	[41]	[42]	[43]	[44]	[45]	[46]	[47]	[48]	[49]
规划资源	储气	√	√	×	×	×	√	×	×	√	√	×	×	×	×	√	×	×	×
	燃气机组	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	输电线路	√	√	×	×	√	√	√	×	√	√	√	√	×	√	√	√	√	√
	输气管道	√	√	×	×	√	√	√	×	√	√	√	√	×	√	√	√	√	√
	P2G机组	×	×	×	×	√	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×	×	×	√
规划目标	经济	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	低碳	√	×	√	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×	×	×	√
	可靠	√	√	√	×	×	×	×	√	√	×	×	√	×	×	×	×	√	√
影响因素	风电容量	×	×	×	√	√	×	×	√	×	√	×	×	×	√	×	×	√	√
	不确定性	√	√	√	√	√	×	×	×	√	×	√	√	√	×	×	√	×	×
	能源市场	√	√	√	×	×	×	×	×	×	×	√	√	×	×	×	×	×	×
	系统故障	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×	×	√	√	×	×	×
	负荷响应	×	√	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	√	×	×	√	×	×

3 电力-天然气耦合系统运行分析

3.1 电力-天然气耦合系统优化调度

传统的调度运行中,电力系统与天然气系统相互独立,数据与调度指令不存在交互。但随着两个系统间的物理耦合越来越密切,在信息层面上实现信息共享,进行统一的优化调度有利于提升能源综合利用的效率,降低整体运行成本。

与电力系统优化类似,电力-天然气耦合系统的优化调度从调度周期可以分为长期调度(月前、周前)、日前调度和日内调度,不同调度周期中考虑的调度资

源有所不同。就长期调度而言,其考虑的主要是运行中影响时间较长的因素。例如,文献[50]研究了在风电渗透率逐渐升高、燃气负荷不断增加的趋势下,天然气系统的年度最优检修计划。文献[51]针对LNG供应的特殊性,考虑其供应可靠性提出了多日前运行计划策略。文献[52]通过在目标函数中引入商业风险的方式研究了天然气不同合同协议的最佳组合。文献[53]则考虑了天然气储气与水力发电配合的年度发电计划。

日前调度是目前研究最广泛、受关注最多的主题,其主要考虑的约束是机组组合(unit commitment, UC)和一些机组操作模式的选择等。文献[54]在UC

模型中特别的考虑了燃料可切换机组，具有燃料切换能力的发电机组可以对冲天然气价格的波动，从而有效的提升电力系统的经济性。文献[55]提出了一种考虑负荷响应的随机日前调度模型。文献[56]则考虑天然气储气及天然气合同的可调能力提出了一种安全约束下的鲁棒UC模型。文献[57]提出了一种日前随机调度模型以平稳风电的多变性。文献[58]则分析了不同压缩机操作模式对调度策略和经济性的影响，给日前压缩机的操作模式选择提供了指导和建议。文献[59]在日前调度中采用预测置信区间来表征电力负荷和可再生能源的不确定性，以避免对不同可再生能源基础设施的随机特性进行详细建模。文献[60]采用机会约束规划理论描述多个风电场出力随机性对调度决策的影响，并通过多风电场等效随机输出样本矩阵将概率约束转化为确定约束参与日前调度决策模型中。文献[61]为提高日前调度的精准度，采用预测箱对可再生能源的历史数据进行统计，通过递归估计协方差矩阵刻画风电和光伏的时间相关性，生成多场景，并通过同步回代消除法削减场景以降低求解难度。

日内调度主要针对日内的扰动如系统故障或风电波动等场景下的调度策略调整。在日内调度策略中往往会考虑天然气的动态特性和管道储气特性，使其分析结果更贴合实际。文献[62]研究了价格响应的可控负荷调度及故障后的运行策略。文献[63-64]考虑了日内市场价格变化的影响。文献[65]采用概率预测模型描述风电的不确定性出力，在日前提出一种多阶段随机优化模型，在日内随着风电不确定性的观测与识别而实时修改经济调度决策。文献[66]基于区间优化方法提出了一种考虑负荷响应和风电不确定性的协调运行策略。文献[67]通过获取大量不确定参数的历史数据，采用数据驱动，建立范数约束条件约束不确定概率分布集合，从而制定最恶劣概率分布下的鲁棒决策方案。文献[68]在终端负荷侧引入基于价格的需求响应和基于激励的需求响应以调节用户用电行为，同时考虑鲁棒随机优化理论建立了考虑可再生能源日不确定性的虚拟电厂随机调度优化模型。文献[55]通过价格灵敏度负载曲线来描述负荷对市场价格的关系，从而建立了日内价格市场响应的调度策略。文献[69]考虑管道的慢动态特性分析了燃气电厂储气设备的日内优化策略。实际上，由于天然气机组的快启特性，在一定程度上，天然气机组也可以在日内实现机组组合调度，则日前调度中提出的许多模型与算法也可以应用到日内调度中。图2总结了不同调度周期中

一般考虑的调度资源。

就优化调度的目标而言，虽然大部分专家主要针对耦合系统运行的经济性展开了研究，仍然有相当一部分的研究关注了系统耦合运行给能源系统的环境效益和可靠性方面带来的优势。文献[70]引入碳交易机制综合考虑能源系统发电成本与碳交易成本，提出了一种低碳经济运行的模型，分析了碳交易价格和天然气价格对耦合系统运行的影响。文献[71]同时考虑了系统运行的经济性、安全性和可靠性提出了一种可以防止级联故障的调度模型。文献[72]同时考虑了城镇的发电成本、碳排成本以及城镇与多能产业园区间联络线交互成本，建立了低碳经济的双层优化模型。文献[73]以运行成本和碳排成本最低为目标实现氢能-天然气混合储能的优化调度，证明了其在不同风电渗透率下的经济性和环保性。

耦合系统的优化调度模型往往是非常复杂的非凸非线性混合整数优化模型，已有一些学者针对不同模型提出了一些算法，如二阶锥松弛法、交替方向乘子(alternating direction method of multipliers, ADMM)算法及其改进算法(I-ADMM)、列约束生成(column and constraint generation, CCG)算法等。文献[59]提出了一种新的二阶锥松弛的方法解决因天然气系统Weymouth公式带来的非凸问题，将原鲁棒非凸模型转化为一个可解的混合整数二次锥规划问题。文献[74]分别将电力系统与天然气系统的非凸最优潮流模型松弛为凸二次规划模型后，采用ADMM算法协调这两个分解的子问题。文献[75]进一步改善了ADMM算法的收敛性能，提出了I-ADMM的协调算法。文献[56]和[67]分别采用二阶锥松弛法和分段线性法将原模型分解为两阶段鲁棒凸优化模型，并通过CCG算法迭代求解。文献[72]以序列二次规划法结合原始-对偶路径跟踪内点法求解了所提的非线性、多维度双层组合优化

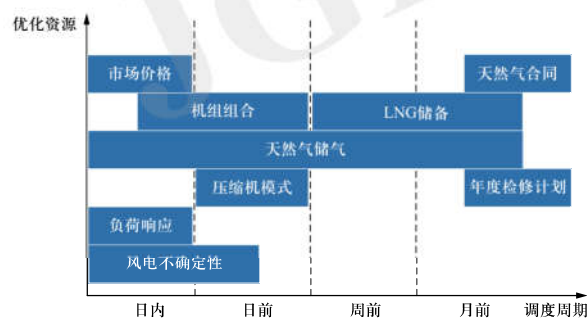


图2 不同调度周期的优化资源

Fig. 2 A summary of optimized resources for different scheduling periods

模型。总之，目前非凸优化问题的求解方法主要以松弛法和分解法为主，但如何有效、高效地求解这些大规模复杂模型仍然是未来研究的难题和重要方向。

3.2 电力-天然气耦合系统安全分析与控制

3.2.1 电力-天然气耦合系统安全评估

安全是系统运行最基本的要求，系统在运行过程中会受到各种扰动的影响，包括元件故障、发电（如风电）变化、负荷变化等。耦合系统相比与单个能源系统，出现了新的运行特性和安全约束，同时带来了系统间故障连锁的风险。为了保障系统的安全运行，使其在绝大部分扰动下仍然可以持续的供给能量，需要对系统的运行状态进行安全评估，定位安全薄弱点，为运行人员提供警告，并指导下一步的工作。

目前耦合系统的安全分析方面的研究较少，只形成了一些初步的成果，这些成果主要表现在系统间的相互作用机理研究、可靠性分析以及风险分析等。文献[76]通过安全约束机组分析了电-气之间的依赖性。文献[77]则分析了英国电-气耦合系统的脆弱性。文献[78]建立了用于电力系统可靠性分析的天然气管网模型，该模型考虑了天然气系统与电力系统的区别，采用高阶模型进行电力系统可靠性分析。文献[79]提出了一些适应于耦合系统的风险指标。文献[80]基于灵敏度方法计算计及电-气互联能源系统安全约束的可用输电能力。文献[81]在此基础上进一步考虑了不确定性的影响。文献[82]借鉴电力系统运行状态分类和预想故障分析的方法，提出了初步的静态分析方法，主要分析了天然气系统故障对电力系统运行安全性的影响。文献[83]基于连续能流法提出了考虑电-气耦合系统静态安全约束的电力系统供电能力的评估方法。文献[84]通过重复求解能量流的方法提出了耦合系统安全域的计算方法。同时，在风电等可再生能源快速发展的背景下，有一些文献考虑间歇性能源的不确定性提出了耦合系统的风险指标等^[85]。文献[86]将系统扰动处理成系统规定点的攻击，并采用经济性指标分析了最佳保护设备的配置策略，其本质是寻找系统的薄弱点，也可以算作安全评估的范畴。

目前电力-天然气耦合系统的安全评估已经得到国内外愈来愈多学者的关注和重视，并形成了一些初步的研究成果，但当前的研究仍然非常基础和分散，大多数以电力系统的安全分析方法为基础，较少考虑天然气系统的特性及耦合系统的新特点，主要以静态分析为主，并未针对耦合系统的特点形成适应于耦合

系统的完整安全评估框架和理论方法。

表 3 电力系统与电力-天然气耦合系统安全分析对比

Table 3 Comparison of security analysis of power system with electricity-natural gas coupling system

电力系统安全分析	电力-天然气耦合系统安全分析
潮流分析	耦合能流分析
系统内故障传播机理	系统内及系统间故障传播机理
电力系统预想故障定义	电力系统、天然气系统及耦合元件预想故障定义
区域电网等值	系统等值
系统运行状态定义 (基本与时间无关)	系统运行状态定义 (与时间相关)
故障严重程度(与故障前后系统运行状态有关)	故障严重程度(与故障前后系统运行状态及时间有关)

3.2.2 电力-天然气耦合系统安全控制

当系统出现（潜在）安全问题时，即系统处于预警状态、紧急状态、待恢复状态时，需要进行安全控制，消除安全隐患，提高系统安全性。多能流系统相比于电力系统，除了具有新的模型和安全约束外，也需研究新的控制手段，需要尽快展开耦合系统的安全控制研究。

当前电-气耦合系统的安全控制尚缺乏明确的定义和架构，主要研究集中在最优潮流方面。文献[87-88]提出了求解电力-天然气耦合网络最优潮流的模型和方法，将其建模为非线性优化问题，同时包括了电网、气网的网络模型和安全约束。文献[88]还考虑了预想故障，使用线性灵敏度分析故障后的状态。文献[89]提出了基于可变状态的线性energy hub模型，利用多维分段线性化方法，将电-气最优潮流转换为混合整数线性规划（mixed-integer linear programming, MILP）模型，从而可以使用已有的求解工具进行求解。文献[90]研究了分布式多能流的最优潮流问题，分别使用了分解-协调方法、多代理遗传算法（multi-agent genetic algorithm, MAGA）。文献[66]考虑储气设备的动态特性，提出了分布式预测控制模型。目前这些研究都是基于稳态的潮流模型，通过调节发电机、气源、压缩机等设备，实现目标最优的控制策略。

电力-天然气耦合系统的安全控制仍然处于初步阶段，以最优潮流的研究为主，尚未有考虑耦合系统故障或扰动后动态过程的预防控制或紧急控制方法的研究。此外，现有最优潮流对不确定性的研究也较为缺乏，难以适应可再生能源比例不断升高的未来能源发展趋势。

4 电力-天然气耦合系统市场探索

天然气是电力系统发电的重要燃料之一,同时,在负荷层面上电力需求与天然气需求在一定程度上可以相互转化。电力市场与天然气市场息息相关,天然气生产商的战略布局可能对电力系统的运行乃至电力市场的发展产生重要的影响^[91]。

当前电力系统与天然气系统的市场耦合研究大致可以分为两种。一种是研究独立的电力市场与天然气市场之间的相互作用。文献[32]考虑了电力市场与天然气市场调度时间线的不匹配、市场不确定性等问题,构建了混合非线性的耦合扩建模型。文献[63]分析了市场价格信息对电力系统运行的影响,并提出了收益冲突下的最优协调调度策略。文献[92]研究了不同的时间和空间级别的信息传递对独立运营的电力系统与天然气系统运行商的价格、运营成本以及决策的影响。文献[93]提出了一种新的能源共享方案,通过聚合器利用用户的共享资源实现调峰和负载平衡。文献[94]确定了电力市场与天然气市场之间的协调参数,并研究了他们对耦合系统运行和调度的影响。文献[95]将天然气系统的故障加入基于日前电力市场清算算法的中期调度模型,量化了其对电价、机组组合和调度以及能源组合的影响。文献[96]建立了联合市场框架,通过合理定价稀缺资源,在满足需求的同时更有效地配置资源,并考虑可再生能源带来的不确定性提出了日前市场清算的框架。

另一种是研究在综合能源市场背景下,主要市场参与者参与市场调节,以实现自身利益最大化。文献[97]提出了一种多领导-双跟随者的结构来模拟电力市场与天然气市场的相互作用,并探索了该模型在网络拥塞和市场集成中对市场效率和分配效果的影响。文献[98]研究了战略攻击行为驱动下的电-气耦合市场均衡问题,各市场参与主体考虑市场出清过程,努力实现自身利润最大化。文献[64]指出燃气机组作为调峰机组时,可能引起输气管网压力的波动,导致影响天然气系统的市场价格,进而影响电力系统的调度策略和市场电价。文献[91]提出了一种寡头投资模型用于评价天然气生产商的市場力量以及气对具有竞争性结构的电力市场的影响,描述了不同市场参与者之间的相互依赖关系。文献[99]从市场的角度建立了耦合系统运行优化的模型,考虑燃气采购、燃气容量合同以及可再生能源带来的不确定性等,分析了竞争激烈的电力市场中燃气电厂的最优运行问题。

此外,还有一些文献讨论了耦合系统中的定价问题,如在市场不确定性下天然气供应合同的灵活定价^[100]、考虑输气价格影响的输气管网收费方法^[101]以及考虑电-气综合需求响应及天然气-发电-供电三方的价格联动的峰谷分时定价方法^[102]等。

虽然由于政策和行业壁垒,建立完善的电力-天然气综合能源市场在未来较长时间内可能仍然无法完成,但研究电力市场与天然气市场的互动和相互影响,通过市场信息引导能源传输和用户响应,对于保证能源的供应可靠性和经济性具有非常重要的意义,并且必然成为未来的发展趋势和研究热点。

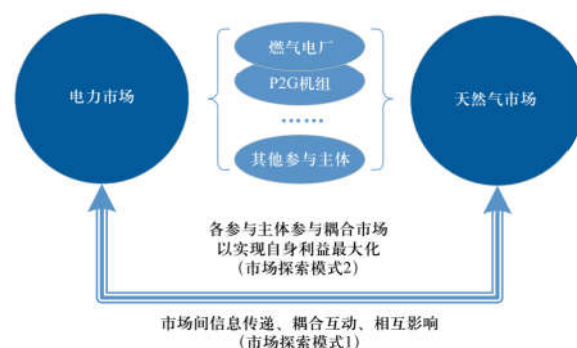


图3 耦合市场主要探索模式小结

Fig. 3 A Summary on the main exploration of the coupled market

5 总结

本文从电力-天然气耦合系统的建模与仿真、优化规划、系统运行以及市场探索等角度综述了各国专家学者的研究及实践成果。总体而言,稳态建模的研究比较充分,且已经形成了较为通用的能流求解方法,但是描述流体网络动态过程和分布参数特性的动态建模仍然有待进一步的研究,而扰动后的动态仿真虽已有部分研究,其精确度、效率以及适用规模均未得到验证。优化规划与优化调度的研究目前大多面向具体场景,而如何在安全约束下充分利用不同能源系统的特性,挖掘能源互补效应的优势是未来研究的重要课题,同时,复杂优化模型的高效求解方法也是亟待解决的难题。安全评估与控制方面已有一些研究基础,但当前的研究主要以静态分析和最优潮流为主,尚未形成考虑耦合系统多时间尺度动态响应特点的安全评估与控制完整框架和理论。综合能源市场的研究仍然处在初步探索阶段,如何建立完善公平的市场机制,调节电力市场与天然气市场的运行,实现能源的最优配置将成为未来研究的重点。

参考文献

- [1] International Energy Agency. World Energy Outlook [R]. Paris:IEA, 2019.
- [2] 国家发展和改革委员会. 电力发展“十三五”规划(2016—2020年) [R]. 2017.
- [3] 陈胜, 卫志农, 孙国强, 等. 电-气互联综合能源系统安全分析与优化控制研究综述[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 3-11.
CHEN Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Review on security analysis and optimal control of electricity-gas integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 3-11(in Chinese).
- [4] 窦迅, 赵文浩, 郎伊紫禾, 等. 计及电转气技术的天然气-电力耦合系统运行研究综述[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 165-173.
DOU Xun, ZHAO Wenhao, LANG Yizihe, et al. A review of operation of natural gas-electricity coupling system considering power-to-gas technology[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 165-173(in Chinese).
- [5] EVELOY V, GEBREEGZIABHER T. A review of projected power-to-gas deployment scenarios[J]. Energies, 2018, 11(7): 1824.
- [6] WOOD A J, WOLLENBERG B. Power generation operation and control: 2nd edition[J]. Fuel and Energy Abstracts, 1996, 37(3): 195.
- [7] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [8] 张勇. 燃气管网的稳态分析与模拟[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2009.
- [9] 段常贵. 燃气输配[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [10] 张义斌. 天然气-电力混合系统分析方法研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [11] 沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司. 燃气轮机原理、结构与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [12] LEHNER M, TICHLER R, STEINMÜLLER H, et al. Power-to-gas: technology and business models[M]. Cham: Springer International Publishing, 2014.
- [13] GEIDL M. Integrated modeling and optimization of multi-carrier energy systems[D]. ETH Zurich, 2007.
- [14] GEIDL M, KOEPEL G, FAVRE-PERROD P, et al. Energy hubs for the future[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(1): 24-30.
- [15] GEIDL M, ANDERSSON G. Optimal power flow of multiple energy carriers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 145-155.
- [16] 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.
- [17] 张杨, 厉彦忠, 谭宏博, 等. 天然气与电力长距离联合高效输送的可行性研究[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(9): 1-7.
ZHANG Yang, LI Yanzhong, TAN Hongbo, et al. Efficient long-distance energy transmission conception[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(9): 1-7(in Chinese).
- [18] QUELHAS A, GIL E, MCCALLEY J D, et al. A multiperiod generalized network flow model of the US integrated energy system: part I: model description[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(2): 829-836.[LinkOut]
- [19] QUELHAS A, MCCALLEY J D. A multiperiod generalized network flow model of the US integrated energy system: part II: simulation results[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(2): 837-844.
- [20] 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 modeling method for optimal dispatch of combined cooling, heating and power microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 26-33(in Chinese).
- [21] 曹军威, 孟坤, 王继业, 等. 能源互联网与能源路由器[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(6): 714-727.
CAO Junwei, MENG Kun, WANG Jiye, et al. An energy Internet and energy routers[J]. Scientia Sinica(Informationis), 2014, 44(6): 714-727(in Chinese).
- [22] MARTINEZ-MARES A, FUERTE-ESQUIVEL C R. A unified gas and power flow analysis in natural gas and electricity coupled networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2156-2166.
- [23] LIU X Z, MANCARELLA P. Modelling, assessment and Sankey diagrams of integrated electricity-heat-gas networks in multi-vector district energy systems[J]. Applied Energy, 2016, 167: 336-352.
- [24] 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).
- [25] QIAO Z, GUO Q L, SUN H B, et al. An interval gas flow analysis in natural gas and electricity coupled networks considering the uncertainty of wind power[J]. Applied Energy, 2017, 201: 343-353.
- [26] ERDENER B C, PAMBOUR K A, LAVIN R B, et al. An integrated simulation model for analysing electricity and gas systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 61: 410-420.
- [27] PAMBOUR K A, CAKIR ERDENER B, BOLADO-LAVIN R, et al. SAInt - A novel quasi-dynamic model for assessing security of supply in coupled gas and electricity transmission networks[J]. Applied Energy, 2017, 203: 829-857.
- [28] CHEN S, WEI Z N, SUN G Q, et al. Steady state and transient simulation for electricity-gas integrated energy systems by using convex optimisation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(9): 2199-2206.
- [29] 常晓勇, 王玉婷, 陈福锋, 等. 电力-天然气综合能源系统建模与仿真[J]. 浙江电力, 2018, 37(7): 13-18.

- CHANG Xiaoyong, WANG Yuting, CHEN Fufeng, et al. Modeling and simulation of electric power-natural gas integrated energy system[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(7): 13-18(in Chinese).
- [30] 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).
- [31] QIU J, DONG Z Y, ZHAO J H, et al. Low carbon oriented expansion planning of integrated gas and power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2): 1035-1046.
- [32] WANG D X, QIU J, MENG K, et al. Coordinated expansion co-planning of integrated gas and power systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(3): 314-325.
- [33] SALIMI M, ADELPOUR M, VAEZ-ZADEH S, 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.
- [34] PAN G S, GU W, ZHOU S Y, et al. Synchronously decentralized adaptive robust planning method for multi-stakeholder integrated energy systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019: 1.
- [35] SALDARRIAGA-CORTÉS C, SALAZAR H, MORENO R, et al. Stochastic planning of electricity and gas networks: an asynchronous column generation approach[J]. Applied Energy, 2019, 233/234: 1065-1077.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] ZENG Q, FANG J, CHEN Z, et al. A multistage coordinative optimization for siting and sizing P2G plants in an integrated electricity and natural gas system[C]//2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), April 4-8, 2016. Leuven, Belgium. IEEE, 2016: 1-6.
- [39] ZHOU H S, ZHENG J H, LI Z G, et al. Multi-stage contingency-constrained co-planning for electricity-gas systems interconnected with gas-fired units and power-to-gas plants using iterative Benders decomposition[J]. Energy, 2019, 180: 689-701.
- [40] CHAUDRY M, JENKINS N, QARDAN M, et al. Combined gas and electricity network expansion planning[J]. Applied Energy, 2014, 113: 1171-1187.
- [41] SALDARRIAGA C A, HINCAPIE R A, SALAZAR H. An integrated expansion planning model of electric and natural gas distribution systems considering demand uncertainty[C]//2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2015. Denver, CO, USA. IEEE, 2015.
- [42] 仇知, 王蓓蓓, 贲树俊, 等. 计及不确定性的区域综合能源系统双层优化配置规划模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 176-185. QIU Zhi, WANG Beibei, BEN Shujun, et al. Bi-level optimal configuration planning model of regional integrated energy system considering uncertainties[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 176-185(in Chinese).
- [43] QIU J, DONG Z Y, ZHAO J H, et al. Multi-stage flexible expansion Co-planning under uncertainties in a combined electricity and gas market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 2119-2129.
- [44] ZAHEDI RAD V, TORABI S A, SHAKOURI G H. Joint electricity generation and transmission expansion planning under integrated gas and power system[J]. Energy, 2019, 167: 523-537.
- [45] CHAUDRY M, SKEA J, WANG X, et al. Modelling UK energy system response to natural gas supply infrastructure failures[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2012, 226(4): 501-513.
- [46] 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, 2014, 30(5): 2527-2537, 2015.
- [47] KHALIGH V, ANVARI-MOGHADDAM A. Stochastic expansion planning of gas and electricity networks: a decentralized-based approach[J]. Energy, 2019, 186: 115889.
- [48] 张睿, 黄国日, 文福拴, 等. 电力-天然气集成能源系统的统一规划模型与Benders解耦方法[J]. 电力建设, 2017, 38(7): 67-76. ZHANG Rui, HUANG Guori, WEN Fushuan, et al. Unified planning model of integrated electric power and natural gas energy systems based on benders decomposition[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(7): 67-76(in Chinese).
- [49] 刘天琪, 曾红, 何川, 等. 考虑电转气设备和风电场协同扩建的气电互联综合能源系统规划[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 144-151. LIU Tianqi, ZENG Hong, HE Chuan, et al. Planning of integrated gas and electricity system considering coordinated expansion of power-to-gas facilities and wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 144-151(in Chinese).
- [50] BASLIS C, BISKAS P, BAKIRTZIS A. Impact of natural gas supply, renewable penetration and demand trends on power system maintenance[C]//2013 IEEE Grenoble Conference, June 16-20, 2013. Grenoble, France. New York, USA: IEEE, 2013.
- [51] 刘沁哲, 陈启鑫, 卢恩, 等. 考虑液化天然气供应风险的气电联合系统运行分析[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2831-2837. LIU Qinzhe, CHEN Qixin, LU En, et al. Operation analysis for combined gas and electricity system considering the risk of LNG supply[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2831-2837(in Chinese).
- [52] SAHIN C, LI Z Y, SHAHIDEHPUR M, et al. Impact of

- natural gas system on risk-constrained midterm hydrothermal scheduling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 520-531.
- [53] KAMALINIA S, WU L, SHAHIDEHPOUR M. Stochastic midterm coordination of hydro and natural gas flexibilities for wind energy integration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(4): 1070-1079.
- [54] LI T, EREMA M, SHAHIDEHPOUR M. Interdependency of natural gas network and power system security[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(4): 1817-1824.
- [55] ZHANG X P, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A, et al. Hourly electricity demand response in the stochastic day-ahead scheduling of coordinated electricity and natural gas networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 592-601.
- [56] HE Y B, SHAHIDEHPOUR M, LI Z Y, et al. Robust constrained operation of integrated electricity-natural gas system considering distributed natural gas storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(3): 1061-1071.
- [57] ALABDULWAHAB A, ABUSORRAH A, ZHANG X P, et al. Coordination of interdependent natural gas and electricity infrastructures for firming the variability of wind energy in stochastic day-ahead scheduling[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(2): 606-615.
- [58] ZLOTNIK A, ROALD L, BACKHAUS S, et al. Control policies for operational coordination of electric power and natural gas transmission systems[C]//2016 American Control Conference (ACC), July 6-8, 2016. Boston, MA, USA. IEEE, 2016.
- [59] LIU F, BIE Z H, WANG X. Day-ahead dispatch of integrated electricity and natural gas system considering reserve scheduling and renewable uncertainties[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(2): 646-658.
- [60] 吴刚, 刘俊勇, 向月, 等. 计及中长期合同电量分解和风电不确定性的电-气综合能源系统日前优化调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 39(8): 246-253.
- WU Gang, LIU Junyong, XIANG Yue, et al. Day-ahead optimal scheduling of integrated electricity and natural gas system with medium-and long-term electricity contract decomposition and wind power uncertainties[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 246-253(in Chinese).
- [61] 王静, 徐箭, 廖思阳, 等. 计及新能源出力不确定性的电气综合能源系统协同优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 2-15.
- WANG Jing, XU Jian, LIAO Siyang, et al. Coordinated optimization of integrated electricity-gas energy system considering uncertainty of renewable energy output[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 2-15(in Chinese).
- [62] GOROOHI SARDOU I, KHODAYAR M E, AMELI M T. Coordinated operation of natural gas and electricity networks with microgrid aggregators[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 199-210.
- [63] ZHENG J H, WU Q H, JING Z X. Coordinated scheduling strategy to optimize conflicting benefits for daily operation of integrated electricity and gas networks[J]. Applied Energy, 2017, 192: 370-381.
- [64] ZLOTNIK A, ROALD L, BACKHAUS S, et al. Coordinated scheduling for interdependent electric power and natural gas infrastructures[C]//2017 IEEE Manchester PowerTech, June 18-22, 2017. Manchester, United Kingdom. New York, USA: IEEE, 2017.
- [65] 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.
- [66] BAI L Q, LI F X, CUI H T, et al. Interval optimization based operating strategy for gas-electricity integrated energy systems considering demand response and wind uncertainty[J]. Applied Energy, 2016, 167: 270-279.
- [67] 税月, 刘俊勇, 高红均, 等. 考虑风电不确定性的电气能源系统两阶段分布鲁棒协同调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 43-50.
- SHUI Yue, LIU Junyong, GAO Hongjun, et al. Two-stage distributed robust cooperative dispatch for integrated electricity and natural gas energy systems considering uncertainty of wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 43-50(in Chinese).
- [68] TAN Z F, FAN W, LI H F, et al. Dispatching optimization model of gas-electricity virtual power plant considering uncertainty based on robust stochastic optimization theory[J]. Journal of Cleaner Production, 2019: 119106.
- [69] QIAO Z, GUO Q L, SUN H B, et al. Multi-time period optimized configuration and scheduling of gas storage in gas-fired power plants[J]. Applied Energy, 2018, 226: 924-934.
- [70] 卫志农, 张思德, 孙国强, 等. 基于碳交易机制的电-气互联综合能源系统低碳经济运行[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 9-16.
- WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, et al. Carbon trading based low-carbon economic operation for integrated electricity and natural gas energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 9-16(in Chinese).
- [71] CORREA-POSADA C M, SÁNCHEZ-MARTÍN P, LUMBRERAS S. Security-constrained model for integrated power and natural-gas system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(3): 326-336.
- [72] 顾海飞, 喻洁, 李扬, 等. 环境约束下含多能园区的新型城镇双层组合优化经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2019, DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.190015.
- GU Haifei, YU Jie, LI Yang, et al. Bi-level joint optimization economic dispatch of new-type town with multi-energy parks under environmental constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.190015.
- [73] 刘继春, 周春燕, 高红均, 等. 考虑氢能-天然气混合储能能的电-气综合能源微网日前经济调度优化[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 170-179.
- LIU Jichun, ZHOU Chunyan, GAO Hongjun, et al. A day-ahead economic dispatch optimization model of integrated electricity-natural gas system considering hydrogen-gas energy

- storage system in microgrid[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(1): 170-179(in Chinese).
- [74] WANG C, WEI, WANG J H, et al. Convex optimization based distributed optimal gas-power flow calculation[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(3): 1145-1156.
- [75] HE Y B, YAN M Y, SHAHIDEHPOUR M, et al. Decentralized optimization of multi-area electricity-natural gas flows based on cone reformulation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(4): 4531-4542.
- [76] LI T, EREMIA M, SHAHIDEHPOUR M. Interdependency of natural gas network and power system security[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, 23(4): 1817-1824.
- [77] QADRDAN M, CHAUDRY M, WU J Z. Vulnerability analysis of the integrated energy infrastructure[C]// *Proceedings of the Universities Power Engineering Conference*, 2009.
- [78] MUNOZ J, JIMENEZ-REDONDO N, PEREZ-RUIZ J, et al. Natural gas network modeling for power systems reliability studies[C]//2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, Bologna, Italy. IEEE, 2003.
- [79] DIAGOUPIS T D, DIALYNAS E N, DAOUTIS L G. Reliability assessment of natural gas transmission systems and their impact on the operational performance of electric power systems[C]//8th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MEDPOWER 2012), Cagliari, Italy. Institution of Engineering and Technology, 2012.
- [80] 孙国强, 陈胜, 郑玉平, 等. 计及电-气互联能源系统安全约束的可用输电能力计算[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(23): 26-32.
SUN Guoqiang, CHEN Sheng, ZHENG Yuping, et al. Available transfer capability calculation considering electricity and natural gas coupled energy system security constraints[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(23): 26-32, 42(in Chinese).
- [81] WEI Z N, CHEN S, SUN G Q, et al. Probabilistic available transfer capability calculation considering static security constraints and uncertainties of electricity-gas integrated energy systems[J]. *Applied Energy*, 2016, 167: 305-316.
- [82] 潘昭光, 孙宏斌, 郭庆来. 面向能源互联网的多能流静态安全分析方法[J]. *电网技术*, 2016, 40(6): 1627-1634.
PAN Zhaoguang, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Energy Internet oriented static security analysis method for multi-energy flow[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(6): 1627-1634(in Chinese).
- [83] 骆柏峰, 穆云飞, 何伟, 等. 计及静态安全约束的电-气耦合综合能源系统供电能力评估方法[J]. *全球能源互联网*, 2019, 2(5): 433-440.
LUO Bofeng, MU Yunfei, HE Wei, et al. Load supply capability assessment method for integrated electricity-gas system considering static security constraints[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2019, 2(5): 433-440(in Chinese).
- [84] CHEN S, WEI Z N, SUN G Q, et al. Steady-state security regions of electricity-gas integrated energy systems[C]//2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), July 17-21, 2016. Boston, MA, USA. IEEE, 2016.
- [85] SAHIN C, SHAHIDEHPOUR M, ERKMEN I. Generation risk assessment in volatile conditions with wind, hydro, and natural gas units[J]. *Applied Energy*, 2012, 96: 4-11.[LinkOut]
- [86] WANG C, WEI, WANG J H, et al. Robust defense strategy for gas-electric systems against malicious attacks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(4): 2953-2965.
- [87] AN S, LI Q, GEDRA T W. Natural gas and electricity optimal power flow[C]//2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (IEEE Cat. No.03CH37495), Dallas, TX, USA. IEEE, 2003.
- [88] CORREA-POSADA C M, SANCHEZ-MARTIN P. Security-constrained optimal power and natural-gas flow[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(4): 1780-1787.
- [89] SHAO C C, WANG X F, SHAHIDEHPOUR M, et al. An MILP-based optimal power flow in multicarrier energy systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(1): 239-248.
- [90] ARNOLD M, ANDERSSON G O. Decomposed Electricity and Natural Gas Optimal Power Flow[C]. Glasgow, Scotland, 2008.
- [91] SPIECKER S. Modeling market power by natural gas producers and its impact on the power system[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(4): 3737-3746.
- [92] CHEN S, CONEJO A J, SIOSHANSI R, et al. Operational equilibria of electric and natural gas systems with limited information interchange[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019: 1.
- [93] WANG J X, ZHONG H W, WU C Y, et al. Incentivizing distributed energy resource aggregation in energy and capacity markets: an energy sharing scheme and mechanism design[J]. *Applied Energy*, 2019, 252: 113471.
- [94] ORDOUDIS C, PINSON P, MORALES J M. An integrated market for electricity and natural gas systems with stochastic power producers[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 272(2): 642-654.
- [95] DIAGOUPIS T D, ANDRIANESIS P E, DIALYNAS E N. A planning approach for reducing the impact of natural gas network on electricity markets[J]. *Applied Energy*, 2016, 175: 189-198.
- [96] CHEN R Z, WANG J H, SUN H B. Clearing and pricing for coordinated gas and electricity day-ahead markets considering wind power uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(3): 2496-2508.[LinkOut]
- [97] CHEN S, CONEJO A J, SIOSHANSI R, et al. Equilibria in electricity and natural gas markets with strategic offers and bids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019: 1.
- [98] WANG C, WEI, WANG J H, et al. Strategic offering and equilibrium in coupled gas and electricity markets[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(1): 290-306.
- [99] DUENAS P, LEUNG T, GIL M, et al. Gas-electricity coordination in competitive markets under renewable energy uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015,

30(1): 123-131.

- [100] STREET A, BARROSO L A, CHABAR R, et al. Pricing flexible natural gas supply contracts under uncertainty in hydrothermal markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1009-1017.
- [101] MORAIS M S, MARANGON L J W. Natural gas network pricing and its influence on electricity and gas markets[C]//2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, Bologna, Italy, 2003.
- [102] 张新鹤, 黄伟, 刘铠诚, 等. 基于综合需求响应的气-电联合分时定价优化模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(4): 91-98.
- ZHANG Xinhe, HUANG Wei, LIU Kaicheng, et al. Optimal combined gas-electricity time-of-use pricing model based on integrated demand response[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2019, 31(4): 91-98(in Chinese).

收稿日期: 2019-10-18; 修回日期: 2019-11-30。



乔铮

作者简介:

乔铮 (1993), 女, 博士生, 研究方向为综合能源系统, 多能流耦合, 电力-天然气耦合系统建模、优化与安全分析, E-mail: qiaomuzi@163.com。

郭庆来 (1979), 男, 副教授, 博士生导师, IEEE Fellow, 研究方向为能源互联网, 智能电网, 电力系统运行与控制, E-mail: guoqinglai@tsinghua.edu.cn。

孙宏斌 (1969), 男, 教授, 博士生导师, IEEE Fellow, 教育部长江学者, 研究方向为能源互联网、智能电网, 电力系统运行与控制。通信作者, E-mail: shb@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 张鹏)

“电力系统低碳发展的目标、战略及技术选择”专题征稿启事

随着全球气候变化与人类工业活动的关系逐步被证实, 气候变化已成为人类可持续发展面临的核心挑战, 减少人类工业活动所产生温室气体排放的呼声愈演愈烈。作为能源与排放密集型行业, 电力系统的低碳发展是应对气候变化的重要举措和核心手段, 通过发输配用各环节的协同, 在发电侧实现清洁替代、用户侧实现电能替代, 促进电力系统整体低碳转型。为最大化电力系统低碳发展效益, 需要从体制机制、市场环境、规划运营、技术应用等各个层面突破, 需要电力系统内外跨领域的充分交流与协作, 推动电力行业可持续发展。

在此背景下, 本刊特邀香港中文大学(深圳)赵俊华副教授、清华大学张宁副教授、国网电力科学研究院有限公司黄杰博士担任“电力系统低碳发展的目标、战略及技术选择”专题特邀主编, 希望借此与广大学者共同研究探讨电力系统低碳发展相关体制机制、市场环境、规划运营、技术应用等相关方面问题。真诚欢迎国内外专家学者和科研人员积极投稿。

“电力系统低碳发展的目标、战略及技术选择”首期专题拟于2020年7月出版, 投稿截止日期2020年3月31日。

专题征稿范围(包括但不限于)

- 1) 电力系统低碳发展研究方法及路径
- 2) 电力系统减碳技术评价方法
- 3) 发电系统碳捕捉与封存等碳移除技术
- 4) 综合能源系统碳排放建模及规划技术
- 5) 消纳极高比例可再生能源的源网荷技术选择与评价
- 6) 100%可再生能源电力系统技术经济可行性
- 7) 碳市场及其与电力市场交互机理及机制
- 8) 碳金融市场的理论与发展路径