

DOI: 10.7667/PSPC161274

以省为实体的区域能源互联网内涵框架及发展方向分析

孙可¹, 吴臻^{1,2}, 尚楠³, 段光⁴, 张利军², 包铭磊³, 刘翰林³,
丁一³, 范娟娟⁴, 沈梁¹

(1. 国网浙江省电力公司, 浙江 杭州 310027; 2. 国网浙江省电力公司经研院, 浙江 杭州 310027;
3. 浙江大学电气学院, 浙江 杭州 310027; 4. 浙江华云信息科技有限公司, 浙江 杭州 310027)

摘要: 随着数据处理分析技术等网络技术大范围的更新, 能源领域得到了更高层次的发展和提升, 并以此为契机, 出现了“能源互联网”概念。当前对于较理想的能源互联网, 其概念、机制、构建及内涵领域的研究较为丰富, 而对于如何从当前传统电力系统过渡到能源互联网的发展建设方向、如何通过建设能源互联网解决当下能源行业问题的研究相对较少。因此, 从实际出发, 首先阐述了以省为实体的区域能源互联网的内涵框架, 其次介绍目前浙江省能源发展的现状, 并总结当前浙江省存在的突出问题, 包括系统调峰问题、可靠性问题及市场机制缺乏等。针对上述问题, 进一步提出当前浙江省发展区域能源互联网的重点与发展方向并提出相应的关键支撑技术, 以期为区域能源互联网建设提供一些参考。

关键词: 区域能源互联网; 发展建设方向; 关键支撑技术; 能源解决方案

Provincial regional Energy Internet framework and development tendency analysis

SUN Ke¹, WU Zhen^{1,2}, SHANG Nan³, DUAN Guang⁴, ZHANG Lijun², BAO Minglei³,
LIU Hanlin³, DING Yi³, FAN Juanjuan⁴, SHEN Liang¹

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310027, China; 2. State Grid Zhejiang Economic Research Institute, Hangzhou 310027, China; 3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
4. Zhejiang Huayun Information Technology Co., Ltd., Hangzhou 310027, China)

Abstract: With the great development of network technologies, such as data processing and analysis, the field of energy has seen an improvement in a higher level in recent years, thereupon the concept of Energy Internet. At present, there are a variety of researches in the concept, mechanism, construction and connotation of the internet of energy. However, how to realize the transition from the traditional power system to the Energy Internet is still a tough issue for researchers. Few researches on how to solve the current energy industry problems through the construction of Energy Internet have been studied. Therefore, motivated by the reality, this paper introduces the framework of regional Energy Internet in the provincial level first. Then the current situation of energy development in Zhejiang Province is described. Moreover, several key issues existing in Zhejiang province are summarized, including the demand peaking shaving, reliability and market-mechanism. Furthermore, in light of the above analysis, this paper puts forward the direction, key points and the corresponding key technologies in the development of regional Energy Internet in Zhejiang Province. The proposed framework is a reference for the construction of regional Energy Internet.

Key words: regional Energy Internet; construction direction; corresponding key technologies; energy solutions

0 引言

随着化石能源的大量开采以及消费, 能源危机、环境污染的双重压力促使人们转变现有能源消耗利用模式, 并开始尝试多种形式能源的清洁高效利用, “能源互联网”这一概念应运而生。能源互联网为

实现电、热、气综合管理与经济调度的综合能源系统, 其具备能源生产、输送、分配、转换、存储、消费各环节于一体的特征, 可以平衡环境、发展、能源利用效率等多方面需求, 提升能源配置效率, 为能源综合利用提供解决方案^[1]。引导传统电力系统向综合能源系统方向转型, 是实现能源结构优化、能

源体制转型的关键途径。

能源互联网吸引了世界各国的关注，国外对于能源互联网的研究与实践早已开展。美国著名学者杰里米·里夫金前瞻性地提出了能源互联网的概念及其特征^[2]，并阐述了未来能源互联网的主要特征和发展趋势。美国北卡罗来纳州立大学的FREEDM实验室设计了未来能源互联网的雏形^[3]。2000年德国开始推动能源互联网示范项目，涵盖了“综合调节大规模风力发电与供热需求”、“可再生能源联合循环利用”等多方面内容，具有典型性和代表性^[4]。丹麦于博恩霍尔姆岛(Bornholm Island)实施的Fast Track试点项目为丹麦2013年“欧盟智能生态电网”(EcoGrid EU)项目的重要组成部分^[5]，为构建能源互联网提供了一个良好的样本。

国内学者对于能源互联网的框架结构以及内涵也展开了探索。有学者指出，充分考虑电、热、气等不同形式能源之间的耦合为构建能源互联网的基础^[6-9]。文献[10]研究了以电力系统为核心的能源互联网基本概念和研究框架；文献[11]提出了能源

互联网的理念、架构和前沿展望；文献[12]阐述了能源互联网的结构设计及拓扑模型；文献[13]给出了一种基于城市水平的能源互联网功能体系设计方案。

通过上述介绍可以看出，对较为理想的能源互联网的整体框架、基本概念、系统组成、集成方案、机制以及内涵，当前学术界和工程界开展了较为丰富的研究。然而对当前能源互联网的建设方向，如何通过建设能源互联网解决当前能源行业问题，如何从当前传统电力系统过渡到能源互联网的发展方向鲜有论述。在此本文提出“以省为实体的区域能源互联网”概念，以浙江省为实例，给出当前“供给—输送—需求”，即“生产—网络—用户”三个方面的能源行业问题，给出了如何通过发展区域能源互联网解决上述问题的解决方案，明确了浙江省区域能源互联网的发展建设方向，同时阐述了发展区域能源互联网的关键支撑技术。图1为区域能源互联网内涵框架示意图。

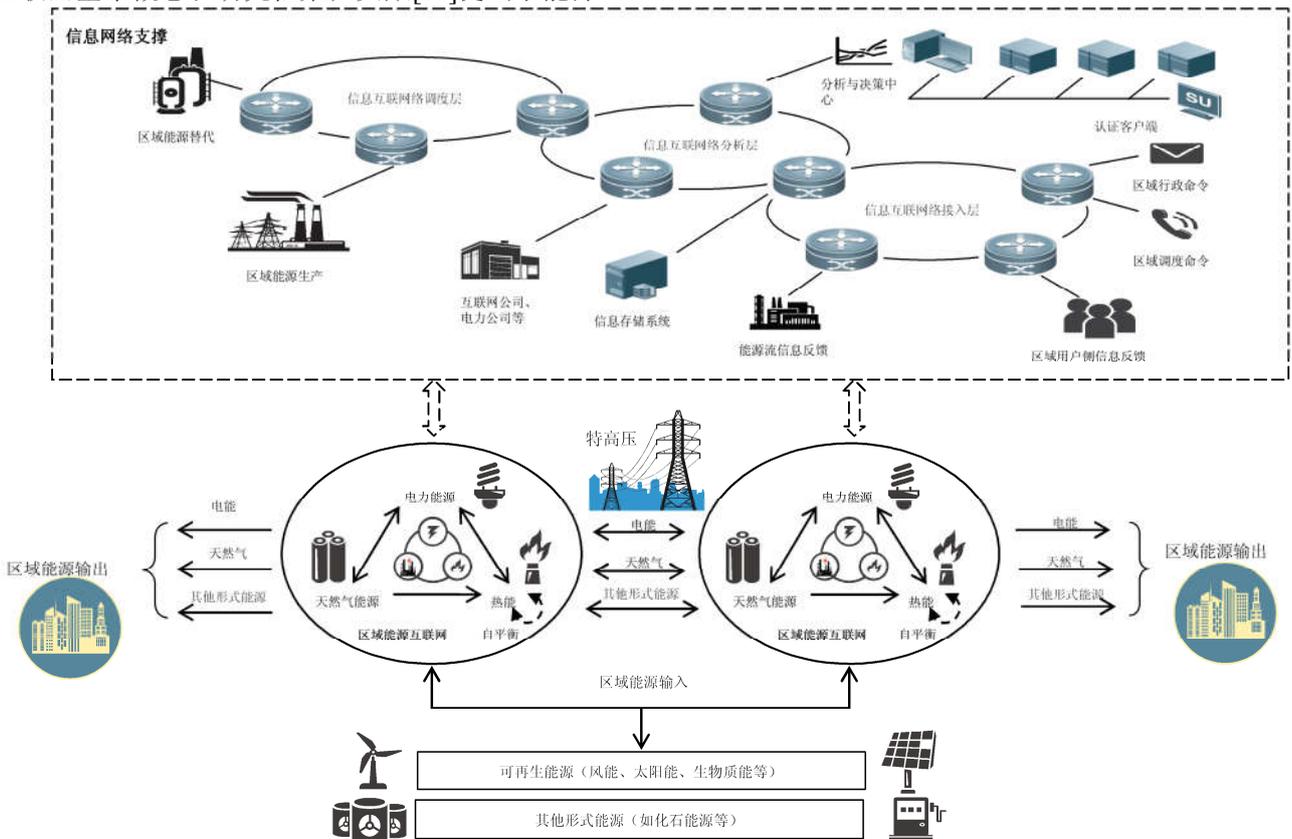


图1 区域能源互联网内涵框架示意图

Fig. 1 Framework of regional Energy Internet

1 区域能源互联网内涵框架

作为当前新兴事物的区域能源互联网，其内涵

和框架与能源互联网相似性和差异性并存。相比园区能源互联网、微网等小型局域能源互联网以及大范围能源“骨干网”，区域能源互联网是以省为实体，以

智能电网为基础,具备特高压网架结构,省级区域内部具备多重能源高效消纳功能,将区域内部电、气、热能源网络生产、传输、存储、消费综合有机互联,以解决当前以省为实体的内部综合能源配置问题。

区域能源互联网内部组成有区域能源生产输入网络、以电力网络为核心的多能源耦合网络和热能自消纳能源流动网络、区域内部负荷侧能源输出网络,区域间具有特高压传输网络,区域能源互联网顶层配套综合信息网络。由此可见,区域能源互联网有以下几大基本内涵:

1) 支持包括特高压电力传输网架的跨区域能源双边流动;

2) 能够实现区域内部能源(电、热、气)高效消纳与供需平衡;

3) 能够实现区域内部热能、天然气资源、电能等不同能源形式的高效多元转化;

4) 具有通过顶层信息网络实现反馈调度的功能。

以省为实体为调度单元的区域能源互联网,其具有内部能源替代和外部能源输出的双重特性,其调度方案应在省级水平层次上制定调度计划。同时区域能源互联网具有内部能源高效配置的特点。考虑到省内的能源结构复杂性和省内的能源需求状况,对省级区域内部能源传输需求进行规划,得出区域能源供应的最优配置;通过分析区域能源互联网用户侧负荷需求,剖析负荷需求变更或增长,对用户能源消费结构给出决策支撑,实现综合经济效益水平最优。高效的多元能源之间相互转化也是区域能源互联网的内涵之一。利用最近出现的电转气技术(P2G)^[14],热电联产技术(CHP)^[15]可以将热能、天然气等能源为电能提供备用,从而从省级系统层次上提升可靠性,为当下电力网络调峰问题、备用问题、辅助服务问题提供解决方案。

2 当前浙江省能源生产—网络—用户现状及发展问题分析

区域能源互联网的发展应当充分结合浙江省能源现状,重点解决当前浙江能源发展的突出问题。根据能源的生产和消费规律,能源流动可分为供给、传输和需求3个方面,也即生产—网路—用户3部分,接下来就上述的3个方面重点介绍浙江省能源发展的现状。

浙江省能源种类丰富,能源消费结构趋低碳化,可再生能源发展迅速。2015年,煤炭、油品、天然气、水核风电及其他能源消费量占全省一次能

源消费总量的比重分别为52.4%、22.4%、4.9%、20.3%。二次能源消费以电能为主,浙江发电装机8158万kW,其中煤电装机容量4606万kW,水、核、风、光、气等清洁能源电力装机容量3337万kW。

在能源供给水平方面,浙江省能源相对匮乏,天然气等一次能源几乎全部依靠外省调入,外来电比例较高。目前,浙江省天然气的主要气源包括西气东输一线、二线、东海气、川气和进口LNG,形成多气源供应天然气的格局。外来电主要包括溪洛渡水电、秦山核电、安徽煤电等,约占2015年浙江省全社会用电量的30%。未来浙江将继续发展风电、光伏等清洁能源和分布式能源,分散利用与集中开发并举,构建可再生能源的综合利用基地,推动多能结构互补。表1为浙江省装机容量情况。

表1 浙江省装机容量情况

装机类型	2012	2013	2014	2015	2016
常规水电/万kW	676	678	688	688	688
抽水蓄能/万kW	308	308	308	308	458
煤电/万kW	3678	3688	4168.5	4408.5	4550.5
核电/万kW	439.6	439.6	657.4	782.4	782.4
风电/万kW	39.7	44.6	59.6	74.6	135.6
光伏/万kW	1.2	18	24	30	35.2
其他/万kW	511	499	499	499	499
装机总计/万kW	6170	6484	7454.8	7840.8	8199

在能源传输水平方面,随着能源跨区域协调优化需求的增加,浙江各类能源传输网络发展迅速,达到输配电网络较为成熟,天然气网络已初步构建的格局。电网方面,浙江电网形成以电源基地及特高压站为支撑,500kV电网为主干,220kV电网为基础,110kV及以下电网为补充的网架结构合理、交直流互备、水火电互济、东西互供、南北贯通的坚强电网。天然气网络方面,累计建成省级天然气管道1053km、城市管网27456km,管道通达7个设区市44个县(市、区),初步形成“多气源、一管网”的天然气管网。未来,浙江省将继续统筹各类能源发展,构建电网、气网和热网互为补充的供能网络,实现电网灵活智能、气网覆盖全省、工业园区集中供热的目标。

在能源需求水平方面,浙江人均经济、能源消费水平较高,终端能源消费以电能为主,电能占终端能源消费比重约为60%,2015年浙江省全社会用电量3016.78亿kWh,其中工业用电占50%以上。受空调负荷的增长和夏季极端天气频发等因素的影

响,浙江省用电负荷的一个显著特点是峰谷差很大,电网调峰问题较突出。此外,浙江分布式电源发展迅速,推出了光伏扶贫、渔光互补等项目,引导农村用户自我建设分布式发电设备,满足自身的能源需求,优化能源结构。图2为浙江省天然气网特高压电网建设现状。

当前浙江省能源生产—网络—用户主要在能源调峰、系统可靠性以及市场机制等方面存在问题。



图2 浙江省天然气网特高压电网建设现状
Fig. 2 Status of the extra-high voltage power grid construction in Zhejiang Province

(1) 系统调峰问题

存在电力负荷结构、可再生能源消纳锐化浙江省调峰的问题。随着可再生能源比重的增大,调峰调频问题将日趋严重,如何保证可再生能源全额收购与电网的安全运行成为必须面对的问题。与此同时,电力负荷结构性问题凸显。每年大量新增的空调负荷使得电力峰谷差加剧,电网调峰压力加大,为满足供电的可靠性,电网需要投入大量设备满足夏季高峰负荷的需要,但是该类设备在春季大量闲置,设备利用率较低,经济性较差。

(2) 系统可靠性问题

外来能源、具备波动性的风电和特高压馈入影响能源系统可靠性,能源安全问题突出。根据统计,华东电网时常发生直流特高压换向失败的现象,其产生的有功、无功冲击将给电网带来诸多问题,使得受端网络的频率稳定、电压稳定问题逐渐突出^[16]。2015年,华东电网某条特高压直流发生双极闭锁事故,瞬时功率损失高达5400 MW,使得华东电网的

频率跌至49.56 Hz。与此同时,大规模外来电入浙导致省内机组发电量被压缩,系统内机组的可调出力范围被大大压缩,电网的可调度空间大大减小。一旦交易无法执行,可能会造成发电侧与用电侧的电力电量无法匹配,电网存在巨大的安全隐患。

(3) 市场机制问题

市场机制尚不健全,辅助服务激励机制尚不完善。目前,浙江电力、天然气等能源仍以政府计划管理为主,价格调节机制滞后于供需关系的变化,缺乏市场化的定价机制来合理引导行业发展。当下的辅助服务激励机制有一定缺陷,当能源网络发生特高压闭锁、新能源波动等问题时,目前最常见的做法是让煤电机组、天然气机组提供事故备用和自动频率控制等辅助服务,然而辅助服务定价机制的不完善使得许多机组不愿意提供辅助服务。据统计,上述华东电网事故期间,仅有20%的机组调频性能是满足要求的,大部分机组都没有提供。

3 以浙江省为例,分析区域能源互联网发展方向及关键支撑技术

3.1 基于浙江省现状的区域能源互联网发展方向

根据浙江省当前多重能源发展不平衡、调峰问题突出、当前电网稳定性存在隐患、市场机制不完善等问题,通过发展区域能源互联网,在省为实体区域内能够达成省级内部能源系统优化协调、缓解可再生能源接入和负荷结构差异性导致的峰谷差问题,提升能源系统可靠性,综合提升能源配置效率。

针对浙江省当前省内电力调峰能力不足问题,随着小型风电、建筑光伏、燃气热电三联供等分布式电源、电动汽车充电设施投入浙江省,考量到浙江省煤水核各类电源并存、风光可再生能源比例逐步提升以及外来电大量接入状态,通过建设区域能源互联网,通过电力—天然气耦合组件,借助电转氢等多能源耦合技术实现省内电、气等多重能源之间交互转化,将天然气高质量能量用于发电,低质量能量用于供暖供冷,多余能量用于储存和省内管网传输,充分应用于以省为范畴的分布式综合能源系统。通过电—热耦合组件,借助热电联产、热泵、浸入式加热器等电热耦合技术、建设省级热力管道网络等方式实现热能为电能提供备用,有助于转变用户侧负荷形态及在高峰时刻消纳用户侧尖峰负荷。

考量浙江省外来能源、特高压大量馈入现状对综合系统可靠性的影响,建设区域能源互联网,为能源利用提供多种选择。当用电高峰时期,电力负

荷可选择其他类能源种类,在能接受的效益范畴内达成替代效果,即多重能源能为单一能源从效益上提供备用,有效缓解能源使用尖峰导致的系统不稳定问题。与此同时,对于可能出现的单一能源侧供需失衡问题,多能源可作为替代以弥补差额,从而保障系统稳定运行。综上,区域能源互联网的建设能够提升整个省级区域内部能源系统运行的可靠性。

建设区域能源互联网,于省级范畴内有助于解决辅助服务问题,提升系统综合经济效益;当前浙江省内区域经济发展具备不平衡特性,不同类别、不同规模用户具备差异较大的能源消费结构及能源消费水平,而当前浙江省能源集团市场集中度较高,市场力较大。针对此问题,区域能源供应商能够从种类和数量上平衡省内多重能源消费差异,与此同时通过多能源邻近消纳和有序规划能够降低能源省内远距离输送成本。从市场层面考虑,建设区域能源互联网能够有效丰富能源供应商种类,推动能源市场竞争,丰富辅助服务供应商能源结构与数量,从电、热、气等行业开展能源替代和能源补充从而综合提升经济效益。

因此基于区域能源互联网内涵框架及特征优势,可从完善物理结构及基础建设、市场机制设计两方面着手,建设浙江省级层次的区域能源互联网。

一方面,从物理层结构设计和基础设施建设层面建设浙江省区域能源互联网。因地制宜完善相关基础设施建设,在天然气管道入口、工业园区等地建热电联产机组,在光伏、风电等新能源发电机组、特高压电网入口等地区附近利用P2G技术实现电网与天然气网的互联。供热网络在热电联产机组附近投入建设,配合空调、热泵等电取暖设备满足小范围用户的供热需求,在此基础上,合理配置热电联产的建设地点,逐步将多个小范围供热网络整合为区域供热大网,由此实现热网、电网与天然气网之间的耦合。

另一方面,建设浙江省区域能源互联网的同时,应配套进行市场机制设计。区域能源互联网代表着一种新的经济形态,结合浙江省民营经济发达和互联网经济活跃的特点,加快推进电能替代和清洁替代,实现化石能源利用向清洁能源利用的转变。建立能够反映市场价值、反映运行成本的多能源价格机制,鼓励用户侧能源消费结构丰富化,增加用户能源种类水平选择方案;同时,发挥产业结构升级的优势,建立燃气辅助市场、电力辅助服务市场、碳交易市场等重要能源市场。完善辅助服务机制,

合理核定辅助服务定价,激励多能源机组参与电能辅助服务,缓解辅助服务问题。

3.2 建设区域能源互联网的关键支撑技术

从当前系统运行现状出发,可从以下几个方面入手开展区域能源互联网研究:(1)包含多重具备不稳定性新能源馈入的能源流潮流分析;(2)基于复杂网络的综合性多能源系统健壮性分析及耦合风险评估;(3)多目标优化的能源互联网络综合经济性分析。区域能源互联网支撑技术主要包括多能源综合网络建模关键技术、综合能源调度的最优潮流技术以及区域能源互联网综合运营技术。

3.2.1 多能源综合网络建模关键技术

区域能源互联网的发展演变路径,不仅仅需要单纯考虑多能互济、能源梯级利用等目标,同样,区域多重能源网络也并非能够通过简单类比当前电力系统网络精确模拟。因此需从省级区域关键能源组件出发,进行多能耦合新元件建模,突破单一能源限制,寻求多能源网络间的更切合省级区域内能源分布现状的网络耦合方法。在新能源元件建模方面,文献[17]从产能侧新元件、用能侧新元件、储能侧新元件以及转化侧新元件四类角度对多能耦合元件可靠性建模进行了阐述;文献[18]对风光水火电源出力进行了分析,提出了合理的配置方案;在网络模型建立方面,文献[19]提出了一种多能源系统耦合思路:电气系统自身以及与电气耦合不紧密的系统可采用相似理论仿真模拟,而与电气系统耦合密切影响显著的系统直接通过样机进行效用分析;文献[20]从具体层面提出可将天然气管道动态处理为代数约束或一阶滞后环节;文献[21]建立燃气轮机燃料误差信号与入口压力控制关系,从而建立电力系统与天然气系统耦合关联;文献[22]也对多能源综合耦合系统中的天然气管网约束进行了考量;对于将热力网络耦合进综合能源网络,文献[23]提出可采用简化一阶等值热力学参数模型以及状态队列控制模型,通过需求侧响应技术平滑联络线功率波动;文献[24]以热电联产单元为基础,对电力水力热力潮流综合问题进行了多种方法的建模分析比较。

在电力—天然气网络耦合关系层次上,文献[25]将天然气运输限制作为约束,对电力系统进行可靠性分析;文献[26]基于传统电力系统对具备波动性和随机性的风电进行了考量;文献[27]提出了一种能够预估风电出力的机器学习算法,为区域能源互联网调度计划的制定提供了参考;文献[28]给出了理想化的多能源混合综合性能源互联网的概念与框架;文献[29]基于天然气—电力混合系统动态模型,

阐述了两者的互动过程。此外，文献[30]综合考虑风电、天然气和水电，对机组组合给出了自己的见解；文献[31]对风电馈入的发电系统区域稳定性控

制给出了控制方案；文献[32-37]以能源集线器(Energy hub)为核心，分析了电/气/热系统的耦合关系和协同优化过程。图3为电网和天然气网耦合示意图。

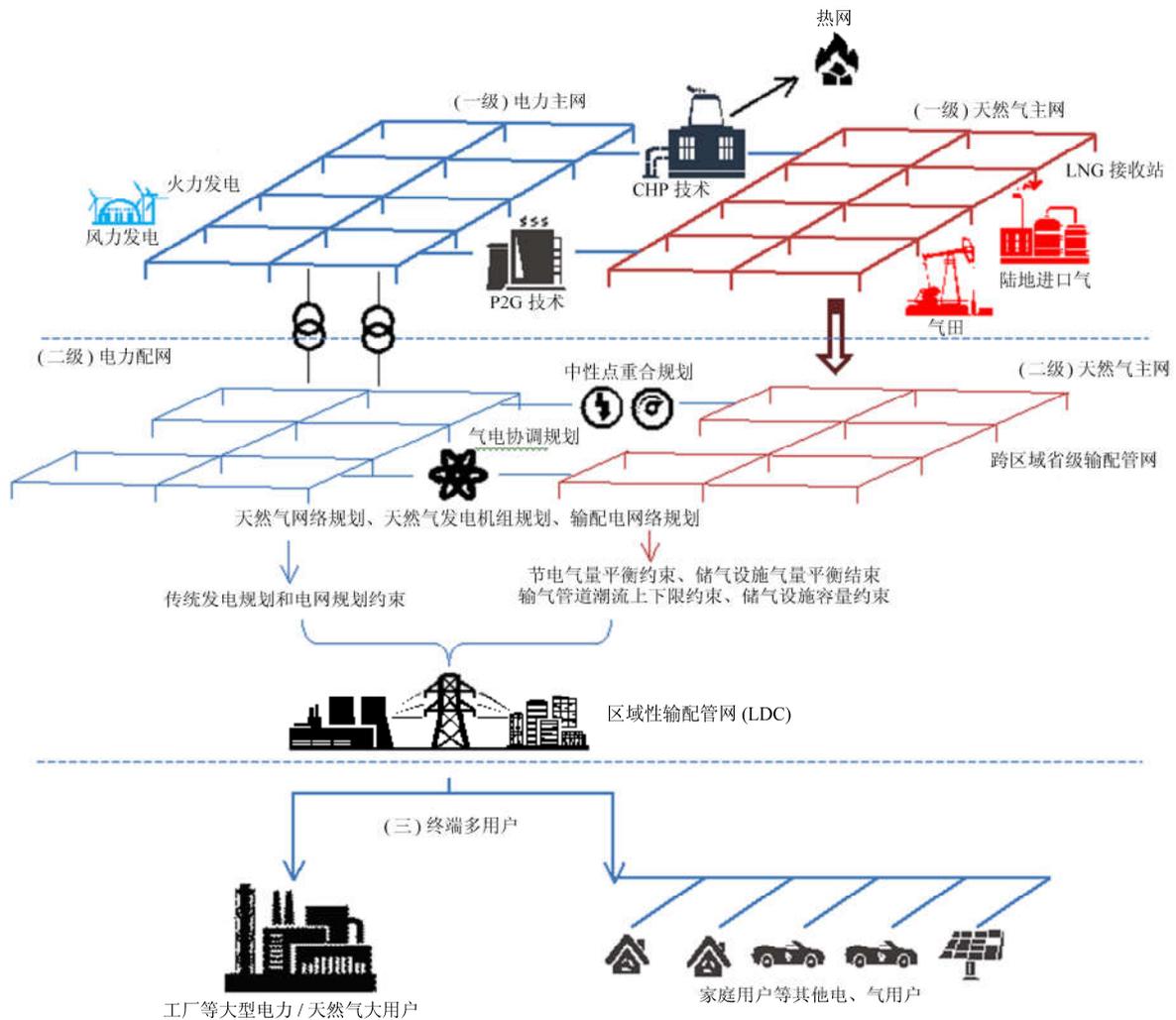


图3 电网和天然气网耦合示意图

Fig. 3 Schematic diagram of connection between grid and gas networks

事实上在建设区域能源互联网进程中，需要在传统电力网络、热力网络建设的基础上，考量下述限制条件：(1) 省级区域天然气管网分布、天然气储量分布、管道输送过程及相应流体力学原理；(2) 省级区域内部耗热用户类别及比例、地理位置分布、热量耗散原理与热力学定律；(3) 省级区域内储气装置投入对当前系统可靠性的影响。

3.2.2 综合能源调度最优潮流调度技术

区域能源互联网为在省级区域内部实现不同能源种类之间的互补，即通过综合能源优化潮流提高能源整体利用效率，保障供能系统安全性、经济

性和灵活性。文献[38]提出从宏观层面和微观层面两个方面设计了能源资源协调规划技术，文献[39]提出了一种兼顾正常运行综合调度及出现大扰动时的紧急功率控制调度的双模式优化控制方案。文献[40]提出了微观层次上的冷热负荷预测模型，文献[41]提出了宏观层次上的风光气储互补发电，这些为综合能源潮流分析从负荷层面和生产层面均提供了支持。文献[42]给出了一种利用供热网络提高机组调峰调频能力的方案和控制方法，文献[43]阐述了电热能源集成系统运行优化策略，文献[44]对物联网与能源网络协调优化进行了分析，这些文献为

上述提出的问题给出了一定的参考。

区域能源互联网的经济效益可以等效于一个优化问题。以电、热、气三者为核心的综合能源调度最优经济性分析,本质上为多能源系统最优潮流问题。多能源系统混合优化目标,可以认定为电、热、气三者经济成本之和最低。

$$\begin{aligned} \text{Min Total}(F)_{\text{gas+heat+elec}} = & \\ & \sum_{t=1}^{n_t} \left(\sum_{a=1}^{NQ} SP_t Q_{a,t}^{\text{Supp}} + \sum_{k=1}^{NL} SP_t dLP_{k,t} + \sum_{s=1}^{NS} (-Q_{s,t} IC_{s,t} + Q_{s,t} WC_{s,t}) \right) + \\ & \sum_{b=1}^{NDG} C_b Q_{b,t}^{\text{GasShed}} + \sum_{i=1}^{NG} C_{i,t} P_{i,t}^{\text{Gen}} + \sum_{j=1}^{NDE} C_j P_{j,t}^{\text{ElecShed}} + \\ & \sum_{c=1}^{NH} SH_t R_{c,t}^{\text{Supp}} + \sum_{d=1}^{NHL} SH_t dLH_{d,t} e^{-\tau t} + \sum_{e=1}^{NCH} C_e R_{c,t} \end{aligned}$$

其中: NQ 为天然气供应点; NL 为天然气输送管道; NS 为储气装置; NGG 为燃气负荷节点; NG 为发电厂个数; NGE 为电能负荷节点; NH 为热量供应点; NHL 为输热管道; NGH 为热能转换装置; SP_t 为 t 时刻的天然气供应价格(¥/m³); $Q_{a,t}^{\text{Supp}}$ 为 t 时刻天然气供应流量(m³/h); $dLP_{k,t}$ 为 t 时刻管道 k 天然气存储量(m³/h); $Q_{s,t}$ 为天然气存储设备在 t 时刻的气体存储量, 设注入为负, 输出为正(m³/h); $IC_{s,t}$ 为天然气注入存储设备时成本(¥/m³); $WC_{s,t}$ 为天然气存储设备输出天然气成本(¥/m³); C_b 为天然气消耗节点 b 天然气使用成本(¥/m³); $Q_{b,t}^{\text{GasShed}}$ 为天然气消耗节点 b 在 t 时刻的天然气使用量(m³/h); $C_{i,t}$ 为发电机 i 在 t 时刻的发电成本(¥/MWh); $P_{i,t}^{\text{Gen}}$ 为发电机 i 在 t 时刻的发电量(MWh); C_j 为电力负荷节点 j 的用电成本(¥/MWh); $P_{j,t}^{\text{ElecShed}}$ 为电力负荷节点 j 在 t 时刻的用电量(¥/MWh); SH_t 为供热机组在 t 时刻的供热价格(¥/GJ); $R_{c,t}^{\text{Supp}}$ 为供热机组 c 在 t 时刻的供热量(GJ); $dLH_{d,t} e^{-\tau t}$ 为输热管道在 t 时刻的输送热量, 其中 τ 为耗散系数(GJ); C_e 为热能转换装置输送热量成本(¥/GJ); $R_{c,t}$ 为热能转换装置供热量(GJ)。

综合能源网络建模和调度过程,不仅需要考量发电机组成本,输电成本,也需考虑天然气机组运行成本、输气成本、热能机组转化成本、热量耗散损耗等问题。平衡能源利用效率,寻求能源经济性、可持续性、系统运行状态之间的最佳调度方案。

3.2.3 区域能源互联网综合运营技术

建设区域能源互联网的重要内在驱动力之一在于,核定多能源价格、辅助服务分摊和共享机制等运营模式的设计,科学、高效的运营技术为支撑

区域能源互联网发展的关键技术。当前英国基础设施转换研究会(ITRC)、加拿大未来城市能源综合系统质量协会(QUEST)针对社会生活相关综合能源、交通、水、废弃物等进行探讨,尝试建立适应良好能源发展的基础设施综合结构^[45-46],针对多重能源系统的效益评估、运营机制、相关政策支持等提出观点,建立了综合能源经济模型以及通用均衡宏观经济模型。文献[47]针对风力发电机、光伏系统、微型燃气轮机、储能系统以及负荷组成的微电网提出多目标评判法,对其经济性指标进行了研究。文献[48]在能源互联网框架下提出虚拟电力系统概念并阐述了其运营模式与综合运营方法。

科学分析区域能源互联网建设的收益性,分析多能源转换对当前省级区域能源结构影响,针对省级区域内部多能源自身价格差,合理核定多能源价格,保障价格反映能源调度价值、能源市场价值以及多能源市场供需关系;从辅助服务能源提供者出发,鼓励多能源参与辅助服务调度,以热能为例,按照热电转化、热气转化等能源转移比合理分摊辅助服务,建立省级标准与相应评价体系。

4 结论

本文从省级能源结构出发,阐述传统电力系统过渡到区域能源互联网的发展进程和演进方向。提出以省为实体的区域能源互联网,阐述了发展区域能源互联网的支撑技术,从概念上丰富了能源互联网的内涵,为省级能源消纳、能源利用、能源分配和未来能源网络建设提供发展建议。建设和发展区域能源互联网可促进清洁能源利用,增强多重能源间耦合程度,有助于省级区域能源行业产业技术升级和结构调整,提高新能源渗透率,为系统调峰问题、可靠性问题、市场机制等问题提供解决方案,全方位推动电力系统发展与演变。

参考文献

- [1] 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.
- [2] RIFKIN J. The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world[M]. New York: Palgrave MacMillan, 2011
- [3] 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]. Proceeding of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.

- [4] 王叶子, 王喜文. 德国版智能电网“E-Energy”[J]. 物联网技术, 2011(5): 3-5.
WANG Yezi, WANG Xiwen. German version of smart grid "E-Energy" [J]. Networking Technology, 2011(5): 3-5.
- [5] MAEGAARD P, 张玥(编译). 丹麦分布式能源发展之路[J]. 风能, 2015(1): 38-42.
MAEGAARD P, ZHANG Yue (compiler). Danish distributed energy development path[J]. Wind Energy, 2015(1): 38-42.
- [6] 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.
- [7] DAI Yiru, WANG Jian. Modeling and optimization of integrated energy system considering synergy among energy, material and emission elements[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(2): 265-272.
- [8] 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.
- [9] ALSTONE P, GERSHENSON D, KAMMEN D M. Decentralized energy systems for clean electricity access[J]. Nature Climate Change, 2015, 5: 305-314.
- [10] 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: automation, basic concepts and research framework of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11.
- [11] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 1-8.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang. Energy internet: concept, architecture and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8.
- [12] 赵海, 蔡巍, 王进法, 等. 能源互联网架构设计与拓扑模型[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 30-36.
ZHAO Hai, CAI Wei, WANG Jinfa, et al. Energy internet architecture design and topological model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 30-36.
- [13] 黄仁乐, 蒲天骄, 刘克文, 等. 城市能源互联网功能体系及应用方案设计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 26-33.
HUANG Renle, PU Tianjiao, LIU Kewen, et al. The city energy Internet function system and application of automation, design of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 26-33.
- [14] 陈建华, 吴文传, 张伯明, 等. 消纳大规模风电的热电联产机组滚动调度策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(24): 21-27.
CHEN Jianhua, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. The cogeneration unit for accommodating large scale wind power rolling scheduling strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(24): 21-27.
- [15] 李佳. 利用塞贝克效应将热能直接转换为电能[J]. 电能技术, 2004(12): 34-34.
LI Jia. Converting thermal energy directly into electricity based on the Seebeck effect[J]. Power Technology, 2004 (12): 34-34.
- [16] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.
LI Mingjie. Characteristic analysis and operation control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.
- [17] 丁一, 江艺宝. 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. Review of risk assessment for energy internet, part I: physical level[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3806-3816.
- [18] 韩柳. 风光水火联合运行电网的电源出力特性及相关性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 91-98.
HAN Liu. Power source's output characteristics and relevance in wind-solar-hydro-thermal power system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 91-98.
- [19] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207.
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Study on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.
- [20] 王伟亮. 能源互联网背景下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. 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.
- [21] XU X, JIA Hongjie, CHIANG H D, et al. Dynamic modeling and interaction of hybrid natural gas and electricity supply system in microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1212-1221.
- [22] LI Tao, EREMIYA M, SHAHIDEHPOUR M. Interdependency of natural gas network and power system security[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(4): 1817-1824.
- [23] WANG Dan, FAN Menghua, JIA Hongjie. User comfort constraint demand response for residential thermostatically-controlled loads and efficient power plant modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2071-2077.
- [24] LIU Xuezhong, WU Jianzhong, JENKINS N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. Applied Energy, 2015, 162: 1238-1250.
- [25] 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.
- [26] ALABDULWAHAB A, ABUSORRAH A, ZHANG X, 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.
- [27] LI Zhi, YE Lin, ZHAO Yongning, et al. Short-term wind power prediction based on extreme learning machine with error correction[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8.
- [28] WU Jiandong. The development of smart energy network is the cornerstone of building the new energy structure in twenty-first century[N]. Oriental Morning Post, 2010-08-09(A24).
- [29] XU X, JIA H, CHIANG H D, et al. Dynamic modeling and interaction of hybrid natural gas and electricity supply system in microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1212-1221.
- [30] KAMALINIA S, WU L, SHAHIDEHPOUR M. Stochastic midterm coordination of hydro and natural gas flexibilities for wind energy integration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 5(4): 1070-1079.
- [31] 姚亮. 风-火互补发电系统区域频率控制的策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 46-52.
- YAO Liang. Research on area frequency control strategy of wind-fire hybrid power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 46-52.
- [32] GEIDL M, ANDERSSON G. Optimal power flow of multiple energy carriers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 145-155.
- [33] WANG Fei, NIU Ming, TONG Yuliang. Application of multiagent system in energy hub[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(11): 28-32.
- [34] SHARIF A, ALMANSOORI A, FOWLER M, et al. Design of an energy hub based on natural gas and renewable energy sources[J]. International Journal of Energy Research, 2014, 38(3): 363-373.
- [35] 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.
- [36] ZHANG X, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A. Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2302-2311.
- [37] XU X, JIA H, WANG D, et al. Hierarchical energy management system for multi-source multi-product microgrids[J]. Renewable Energy, 2015, 78: 621-630.
- [38] 曾鸣. 能源互联网背景下新能源电力系统运营模式及关键技术初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 681-691.
- ZENG Ming. The preliminary research for key operation mode and technologies of electrical power system with renewable energy sources under energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 681-691.
- [39] ZHOU Zhichao, WANG Chengshan, JIAO Bingqi, et al. Optimal control of wind/biomass/diesel/battery standalone microgrid system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3605-3615.
- [40] 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.
- [41] XIONG Yan, WU Jiekang, WANG Qiang, et al. An optimization coordination model and solution for combined cooling, heating and electric power systems with complimentary generation of wind, PV, gas and energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3616-3625.
- [42] DENG Tuoyu, TIAN Liang, LIU Jizhen. A control method of heat supply units for improving frequency control and peak load regulation ability with thermal storage in heat supply net[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3626-3633.
- [43] 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 the CSEE, 2015, 35(14): 3596-3604.
- [44] SHROUF F, MIRAGLIOTTA G. Energy management based on internet of things: practices and framework for adoption in production management[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 100: 235-246.
- [45] Infrastructure transitions research consortium (ITRC) [EB/OL]. [2014-10-09]. <http://www.itrc.org.uk/>
- [46] MK Jaccard & Associates Inc. The capacity for integrated community energy solutions policies to reduce urban green house gas emissions[R]. Vancouver, Canada: Mk Jaccard & Associates Corporation, 2010.
- [47] 田梁玉. 基于多目标评判法的微电网经济性指标研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 122-127.
- TIAN Liangyu. Economic indicators research of microgrid based on multi-objective evaluation method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 122-127.
- [48] ZHANG Xiaoping, LI Jianing, FU Hao. Distribution power & energy internet: from virtual power plants to virtual power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3532-3540.

收稿日期: 2016-08-11; 修回日期: 2016-11-25

作者简介:

孙可(1980-), 男, 博士, 主要研究方向为电网规划、输变电工程可研、能源互联网;

吴臻(1972-), 男, 高级工程师, 研究方向为电网运行管理、能源互联网;

丁一(1978-), 男, 通信作者, 博士生导师, 主要研究方向是为智能电网和复杂系统可靠性分析。E-mail: yiding@zju.edu.cn

(编辑 姜新丽)