

基于多能互补的综合能源系统多场景规划案例分析

程林¹, 张靖¹, 黄仁乐², 王存平², 田浩¹

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 2. 国网北京市电力公司, 北京 100031)

摘要: 综合能源系统存在冷热电气多种能源形式、多方利益主体、差异化用能需求等特点, 如何统筹协调多种能源互补特性, 通过源-网-荷-储各环节灵活配置, 实现可再生能源就地消纳, 提升系统综合能效, 是综合能源规划所面临的关键问题。结合北方某园区综合能源系统规划实例, 对多场景规划理念进行了探讨, 分别对能源需求预测分析、综合能源站子系统规划场景设计、建设时序及多能互补协同效益等规划环节进行了深入的分析, 可为相关区域综合能源系统规划项目提供参考。

关键词: 综合能源系统; 多能互补; 规划场景; 协同效益; 规划

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.06.037

0 引言

随着国民经济迅速发展, 我国以化石能源为主的能源消费体系带来了日益严重的环境问题(雾霾、温室气体等)。例如, 北京“十二五”规划^[1]中设定了全市空气质量达到二级和好于二级的天数的比例达到80%的目标, 而实际上在情况最好的2015年空气质量^[2]好于二级的天数仅有186天, 占全年天数的比例为51%。因此大力发展清洁能源与可再生能源成为我国乃至世界能源可持续发展的普遍共识。

依据中国能源发展战略, 到2050年可再生能源发电比重将达到85%以上, 其中风电与光伏之和占比将达到63%^[3]。但是以风光为代表的可再生能源利用面临严重的弃风、弃光的局面, 以2015年为例, 全国弃风电量达到 3.39×10^{10} kW·h, 弃风率为15%, 弃风损失约170亿元^[4]。能源系统缺乏灵活性是导致弃风、弃光的主要原因, 风电、光伏出力的随机波动性, 降低了能源系统灵活性的供给, 增加了系统灵活性需求; 另一方面, 热电机组提升了系统综合效率, 但是降低了整体能源系统的调节能力, 成为导致三北地区能源系统灵活性不足的一个主要因素。以园区为代表的区域级能源系统呈现用能密度大、负荷利用小时数高、可再生能源比例增加、产用能形式多样化等特点, 是促进可再生能源大规模就地消纳、提高能源综合利用效率、实现节能减排目标的有效实施途径。我国目前拥有国家级、省级等各类开发区近2000个, 是推进区域综合系统发展最急需也是最佳的切入点, 具备广阔的发展前景和机遇。

传统能源系统的规划仅仅面对单一能源系统, 如电、气、热(冷), 人为地割裂了各能源系统的资源

优化配置, 降低了整体能源利用效率。针对这个现象, 在解决大规模可再生能源消纳的背景下, 研究人员提出了综合能源系统协同规划的理念, 即将电、气、热(冷)等多种类型能源系统有机耦合, 提供一个多种能源综合利用的物理平台, 充分发挥不同能源形式的互补特性和协同效应, 在更大范围内实现能源系统资源优化配置, 提升系统灵活性, 提高可再生能源消纳能力和系统综合能效。在区域级综合能源系统产业发展方面, 国外应用相关理论和技术成果, 已建成了一些示范工程。美国能源部提出了构建用户侧综合能源系统的发展计划^[5], 启动了Chevron Energy、ecoENERGY等多个示范建设。德国政府2009年启动了E-Energy计划^[6], 通过运用需求响应、智能调度、储能等技术, 依托电力市场互动激励, 消纳高比例可再生能源, 并建立了6个示范区。日本NEDO建立了智能工业园区示范工程, 将电力、燃气、供热/供冷等多种能源系统有机结合, 通过多能源协调调度, 提升企业能效、满足用户多种能源梯级利用^[7]。国内也已陆续建立了部分综合能源利用的示范工程, 例如, 蒙东微电网接入试点工程、浙江南鹿岛和鹿西岛的海岛配用电系统工程、河北科技园区光储热一体化示范工程等。这些实践在风光储互补、微电网运行控制等领域具有示范作用。

在规划层面当前研究已取得初步进展。国外针对电力、天然气及供热(冷)系统源-网-荷-储的联合规划研究分为2类: 第一类研究建模过于简化, 导致规划结果严重偏离实际^[8-9]; 第二类研究偏向于针对复杂系统的精确建模, 导致模型复杂, 采取智能算法求解无法保证达到全局最优解^[10-12], 在示范项目建设运营中侧重于利用市场化手段进行能源调配, 但缺乏对区域综合能源系统统筹建设、优化运行的研究^[5-7]。国内已有研究侧重于电力系统单一供电系统专项规划与优化配置, 对综合能源系统的协调开发与

收稿日期: 2017-03-21; 修回日期: 2017-04-27

基金项目: 国家电网公司科技项目(52020116000P)

Project supported by the Scientific and Technology Project of State Grid Corporation of China(52020116000P)

整体效益考虑不足,尚缺乏多种能源产供用系统性的统筹规划和集成解决方案,并且综合能源系统联合规划研究近年来刚刚起步,研究更侧重于概念、理念与基础理论^[13-16],距离工程实际应用尚有一段差距。因此,现有理论与技术亟需探索既符合国情又符合产业发展趋势的区域综合能源系统规划方法,促进区域清洁能源就地消纳与综合能源的利用。

本文基于多能互补的综合能源系统规划思想,结合我国北方某园区规划实例,针对综合能源系统需求进行深入分析,阐述了包括多场景规划的核心规划理念,对区域级综合能源系统规划设计思路和方法进行实践,为未来区域综合能源系统的建设提供借鉴。

1 项目概况

该园区位于京津冀区域的核心腹地,建设规模 50 km²,分为东西 2 个片区,园区规划产业用地比例不高于 40%,居住和公共服务用地比例不高于 20%,市政基础设施及绿化用地比例不低于 40%。园区定位包括服务保障、保税商贸、对外交往、健康休闲四大主导功能。

园区目前供热主要为分散燃煤供热。周边现状:无可利用的热源(燃气锅炉房、热电厂等)。供电现状:已有 500 kV 变电站 1 座,规划再建 500 kV 变电站 1 座、220 kV 变电站 2 座和 110 kV 变电站 3 座作为区域电源点。燃气管道现状:已有 DN 500 mm 次高压供气管道作为该区域近期气源,规划再建双路次高压天然气管及高压调压站,出次高压、中压管线为园区供气能源。

该区域有很丰富的太阳能资源、浅层地热资源、中深层地热资源、污水余热资源及天然气资源,为光伏、中/浅层地源热泵、污水源热泵及冷热电三联供等技术应用提供了必要的条件,为多种能源的协同应用及可再生能源的推广应用提供了基础保障。园区地处太阳能辐射资源 II 类地区,是太阳能资源很丰富的地带,年总辐射量为 1400~1750 kW·h/m²,全年光照时数为 2700 h,年太阳辐射总量为 5680 MJ/m²,特别是 5、6 月份光照时间长,在屋顶分布式光伏发电方面有优势;园区浅层地热资源静态储量为 3.37×10¹³ kJ,适合用埋管式地热泵,实现建筑物的供暖与制冷;园区地处华北地热带,已开凿地热井 3 处,水温一般为 40~70 ℃,水量约 900 m³/d,可用于供暖以及生活热水;园区共有 2 座污水处理厂,污水处理能力为 2.8×10⁵ m³/d,为污水源热泵技术应用提供了基础热源。

2 综合能源系统规划核心理念

综合能源系统是由电力系统、天然气系统和供热(冷)系统构成的大规模复杂系统,包含规模庞大、性能各异的能源利用和转换设备,同时在供能与用能侧

存在大量形式各异电、气、热(冷)耦合形式。因此,综合能源系统规划在数学上属于混合整数非线性寻优,与传统单一能源系统的规划相比,在求解规模、时间尺度、控制变量等方面将更加复杂,其中综合能源系统不确定性问题的处理是规划的关键问题。

综合能源系统规划面临的首要问题是供用能的不确定性。在供能侧,可再生能源的出力受到自然资源、气象条件的影响,具有随机性和波动性,因此在综合能源规划中不仅要考虑中长期时间尺度上可再生能源资源总量,还需考虑短时间尺度上的概率分布特性;再者,随着能源技术的发展,可再生能源可利用总量及开发成本的变化直接影响可再生能源装机增值趋势,为中长期综合能源系统规划带来了不确定性因素;最后,还需考虑政策、市场、经济等外部因素对能源系统投资产生的影响。在用能侧,存在地区差异化的用能需求,包括各种类型用户的用能需求结构,外部环境如能源价格、气象条件所带来的冷/热/电用能需求总量的不确定性。

基于地区负荷需求和资源禀赋因地制宜地构建规划场景,综合考虑系统不同运行阶段特征,将不确定性影响因素进行边界化处理,并在此基础上,利用多场景优化方法有效降低规划问题复杂度。规划场景在综合能源系统规划中的应用贯穿始终,具体包括:通过引入规划场景,基于负荷及风光资源的日特性和年特性,针对规划场景进行分析,计算时序出力曲线与负荷曲线,提高对可再生能源装机增幅和出力、冷/热/电用能需求的预测精度;基于规划场景,分析综合能源系统内各种设备和环节的变工况特性,以获取系统不同工作模式下的约束条件;考虑规划场景进行系统分层协同规划以及规划结果的评估校验,全面评估规划方案的可行性与合理性,改善规划方案的适用性。

3 能源需求特性与负荷场景分析

本项目能源需求包括冷、热、电 3 种负荷需求形式。利用空间负荷预测方法,根据不同用地性质预测能源需求,至饱和年园区最大电力负荷为 1398 MW,最大热负荷为 2068 MW,最大冷负荷为 1699 MW。为了深入了解负荷特性,在园区峰值负荷需求预测结果的基础上,结合园区商业及公共服务、居民及仓储物流 3 种用地性质的负荷特性曲线,进一步拟合出园区冷热典型日电负荷曲线和年负荷曲线。其中典型日电负荷曲线拟合结果如图 1 所示。

针对上述典型日电负荷曲线,结合项目负荷分布,商业与公共服务类负荷占峰值负荷的 78%,其用能特性也决定了整体园区的负荷需求,即负荷高峰从 08:00 持续到 18:00。用电设备主要包括照明、空调、电梯等,根据项目深入调研,本项目空调负荷在

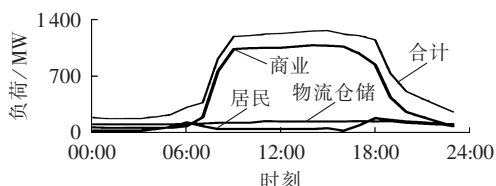


图 1 园区典型日电力负荷曲线

Fig.1 Regional power loads of typical day

商业服务类负荷中约占 30%，具有柔性可调能力。

在此基础上进一步分析不同场景下的负荷曲线，提高负荷预测精度。例如，在夏季晴天模式下园区电力负荷为 1398 MW；夏季阴天模式下，由于空调负荷的下降，导致电力负荷变为晴天模式电力负荷减去空调负荷，按照冷负荷与电负荷 4:1 的关系，即 1 kW 冷负荷需要 0.25 kW 的电负荷提供，夏季阴天用能场景下电力负荷峰值将下降至 973 MW。不同场景下的电力负荷曲线如图 2 所示。

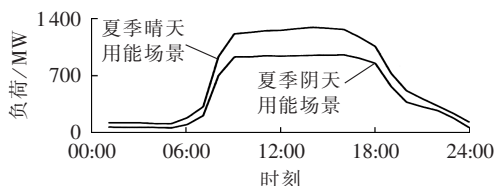


图 2 不同场景下的电力负荷曲线

Fig.2 Power load curves of different scenarios

4 基于多能互补的综合能源系统建设方案

本项目规划方案以投资费用最小、综合效益最大化为目标，考虑系统能量与容量平衡、用户差异化供电可靠性要求、可再生能源占比、综合能效等要求，重点解决能源耦合节点设备的配置，实现区域资源的有效配置。园区综合能源系统规划原则主要包括：基于多场景设计因地制宜地开展综合能源站子系统灵活建设；合理选择能源开发利用技术，挖掘系统灵活性资源与能效提升环节；充分利用电力、天然气、供热(冷)系统多能互补特性，提高系统协同效益。

根据园区开发及招商引资计划，结合负荷冷热电需求和资源禀赋，本项目规划设计了 4 类供用能场景，灵活建设共计 13 座综合能源站子系统并给出项目建设时序，应对不确定性的负荷增长，避免超前投资及资产闲置，同时规划设计支持子系统间互联互通的供能网络形态，实现能源系统供给与需求平衡。下面针对本项目中 4 类规划场景设计与能源利用技术选择、区域综合能源子系统建设时序及多能互补的能源系统协同效益进行说明。

4.1 规划场景设计与能源利用技术选择

4.1.1 大型集中式区域综合能源站

结合园区 4 个 110 kV 变电站建设时序，就近接入高比例分布式光伏发电系统，利用集中式燃气轮机热电联产与光储一体化充电站，作为区域综合能源子

系统可调控手段，实现综合能源系统冷热电高效运行及可再生能源就地消纳。项目组成如图 3 所示，包括 110 kV 变电站、燃气轮机、燃气锅炉、余热锅炉、分布式光伏和充电站。

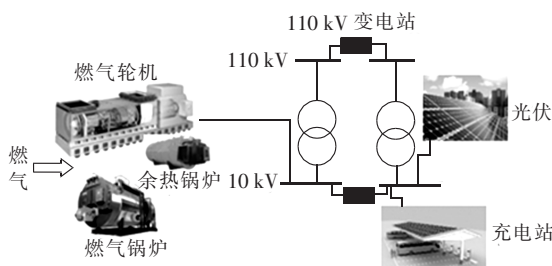


图 3 大型集中式区域综合能源站规划场景设计

Fig.3 Scenario design of centralized regional multi-energy station planning

4.1.2 小规模区域综合能源站

结合园区 10 kV 开关站建设布局，就近接入小规模分布式光伏发电系统，利用燃气内燃机、热泵及能源梯级利用提升局部能源子系统综合能效，同时通过区域柔性负荷、相变储热等灵活资源调控提高系统经济性。项目组成如图 4 所示，包括 10 kV 开关站、燃气内燃机、溴化锂制冷、相变储热、分布式光伏及热泵系统。

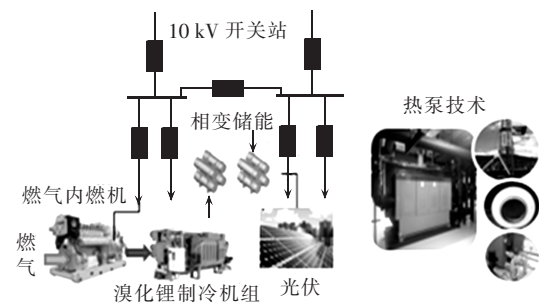


图 4 小规模区域综合能源站规划场景设计

Fig.4 Scenario design of small regional multi-energy station planning

4.1.3 高可靠供能区域综合能源站

针对园区数据中心、医院等高可靠用能负荷需求，配置燃气内燃机、分布式光伏、空气源热泵结合余热回收等供能系统，提高高强度负荷用能经济性，同时通过区域柔性负荷、冷热电联供、电储能等多能流调控手段提高系统供电可靠性。项目组成如图 5 所示，包括燃气内燃机、溴化锂制冷、UPS 电储能、分布式光伏、热泵和柔性负荷。

4.1.4 大型公共设施区域综合能源站

针对园区内大型商业设施、停车场等公共服务类负荷发展建设，配置燃气内燃机、溴化锂制冷机组等能源设施满足绿色用能需求，同时利用电池梯次利用、低压柔直系统、光储一体化充电站协同解决充电设施、停车场智能管理、分时租赁等模式创新。项目组成如图 6 所示，包括 10 kV 开关站、燃气内燃机、

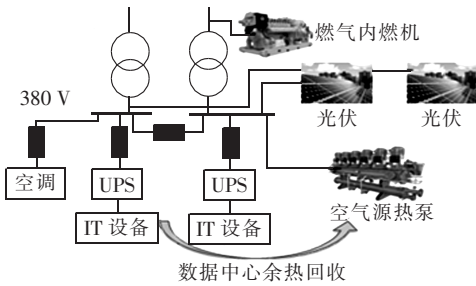


图 5 高可靠供能区域综合能源站规划场景设计
Fig.5 Scenario design of high-reliable regional multi-energy station planning

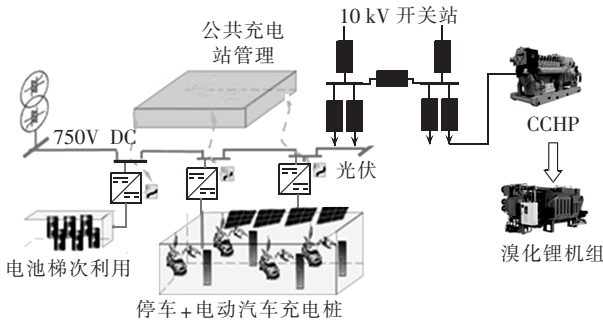


图 6 大型公共设施区域综合能源站规划场景设计
Fig.6 Scenario design of large regional multi-energy station planning for republic facilities

溴化锂制冷、电池梯次利用、柔性低压直流、光储一体化充电站。

4.2 区域综合能源子系统建设时序

区域综合能源系统规划解决产用能设备及供能网络的选址定容,同时还要给出项目建设时序,避免超前投资及资产闲置。项目建设时序主要根据园区开发及招商引资计划,结合负荷增长需求和区域电网、燃气管网等相关城市规划建设进度,进行同步实施。这里针对本项目东部片区项目建设加以说明。

东部片区负荷增长情况如图 7 所示,依据园区控制性城市规划和园区招商引资情况,2017 年已有部分负荷开工建设,其中包括 1 号综合能源站附近的

5 MW 数据中心、2 号能源站周边的商用写字楼集群和 3 号能源站周边的健康休闲产业区。部分用户已与园区签订入驻意向书,计划 2018 年入驻的主要包括 4 号综合能源站周边的大型商贸企业、5 号综合能源站周边的大型会议商贸中心和 6 号综合能源站周边的物流仓储企业;计划 2019 年建设的用户包括分布于 2 号、4 号、5 号综合能源站附近的部分商住两用建筑及 7 号能源站所在位置的大型物流仓储企业。图中空白部分园区已有用地规划,仍处于招商引资阶段,属于不确定的新增负荷。针对外部资源建设,片区北部已布属 DN 500 mm 次高压供气管道,5 号综合能源站处在建 110 kV 变电站 1 座。

根据东部片区负荷增长和需求结构,结合外部资源在园区的布局,区域综合能源子系统建设时序如图 7 带箭头实线所示。其中 2017 年为了满足在建数据中心用户用能需求,建设高可靠供能区域综合能源站,同时建设 2 号与 3 号小规模区域综合能源站,其中 2 号能源站系统容量配置需考虑 2018 年周边居民负荷增长的需求;随着 2018 年负荷增长,开展 4 号大型公共设施区域综合能源站、5 号大型集中式区域综合能源站和 6 号小规模区域综合能源站的建设,其中 4 号能源站容量配置需满足 2019 年大型商贸企业负荷需求,5 号能源站建设不仅需满足 2019 年周边居民负荷增长,同时还需考虑东部区域系统的整体容量与能源平衡;2019 年针对大型物流仓储企业的入驻建设 6 号和 7 号小规模区域综合能源站,由于仓储行业的用能总量较小,其屋顶分布式光伏系统的消纳将依靠区域 10 kV 供电网络外送至 4 号与 5 号能源站,实现子系统之间的能源互补互济。

4.3 多能互补的能源系统协同效益

4.3.1 电网交换功率削峰填谷效益

针对园区资源优化配置,基于场景分析运用运行模拟仿真,评估园区综合能源系统与电网的交换功率,验证基于多能互补的多场景资源配置所带来的削峰填谷的效果。晴天场景各种能源供能情况如图 8 所示。晴天场景通常气温较高,有供冷需求,电力最大负荷为 1398 MW,同时晴天场景太阳能发电出力大。晴天场景时主要由光伏、三联供等技术供电,

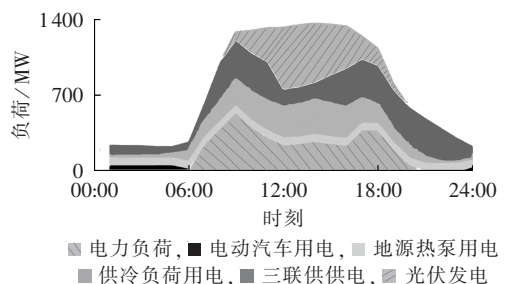


图 8 夏季晴天场景各种能源供能时序曲线
Fig.8 Energy supply curves of clear day in summer

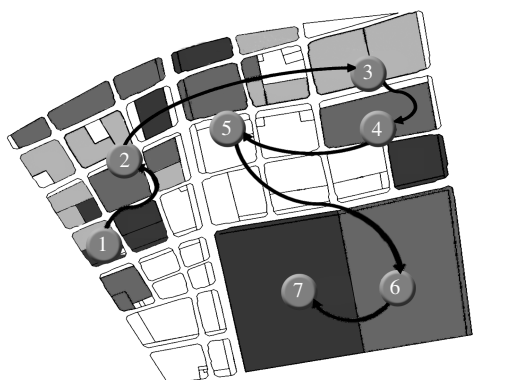


图 7 东部片区综合能源子系统建设时序
Fig.7 Construction schedule of eastern regional multi-energy subsystem

由电网公司供电最大负荷为 535 MW, 减少了 863 MW。

阴天场景各种能源供能情况如图 9 所示。阴天场景通常气温较低, 一般没有供冷负荷需求, 电力大负荷为 1086 MW, 同时阴天场景没有太阳能发电出力。阴天场景时主要由三联供等技术供电, 由电网公司供电大负荷为 686 MW, 减少了 400 MW。

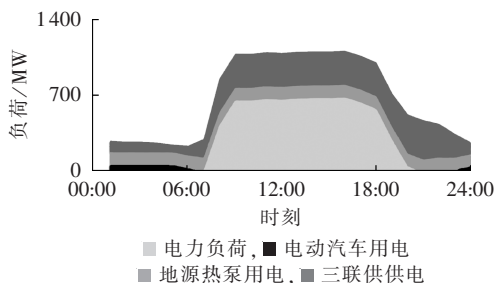


图 9 夏季阴天场景各种能源供能时序曲线

Fig.9 Energy supply curves of cloudy day in summer

4.3.2 区域综合能源系统能源利用效率

为了提高区域综合能源系统的整体利用效率, 在规划阶段需深入调研各类供能技术能效范围并进行排序, 优先选用高能效的供能技术。本项目涉及的供能技术中, 现有冷热电联供(CCHP)效率可达 70% 以上, 本地可再生能源电能仅考虑传输损耗效率可达 90% 以上, 热泵效率可达 300%~500%。因此在规划方案的设计中通过提高能效的 3 类措施确保园区设计能效大于 50%, 具体包括: 通过分布式储能装置增加本地分布式光伏的消纳, 减少外送电力需求; 对全年冷热电负荷预测分析, 确定适宜的单机容量和台数配置, 确保 CCHP 余热的利用, 提高 CCHP 系统综合能效; 通过供能分区合理划分和冷热水网络拓扑结构优化, 提高供能管网负载率, 降低输送能耗。

本项目设计能效计算为年度冷热电负荷总输出比年度一次能源总输入, 其中年负荷总量考虑了不同负荷类型、用能种类、容量和年利用小时数, 计算公式为负荷容量×年利用小时数; 总输出的计算考虑了不同供能设备不同一次能源的输入, 计算公式为装机容量×年利用小时数×折合为一次能源系数。本项目综合能效如图 10 所示, 设计值达到 65.13%。

4.3.3 项目建设规模与社会经济效益

园区全社会总用电量为 $5.187 \times 10^9 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 总用热量为 $2.895 \times 10^9 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。其中, 规划光伏铺设面积为 $4.0335 \times 10^6 \text{ m}^2$, 装机容量为 573 MW; 规划电动汽车 3.36×10^4 辆, 电动汽车充电桩 1.555×10^5 个, 充换电站 4 座; 新建浅层地源热泵为 161 MW, 污水源热泵为 87.5 MW, 配置电储能容量为 $52 \text{ MW} \cdot \text{h}$, 相变储能结合热泵、三联供系统等综合配置; 新建 13 座综合能源站, 规划冷热电三联供 365 MW; 规划中深层中低温地热井站, 供热规模为 375 MW; 规划 110 kV

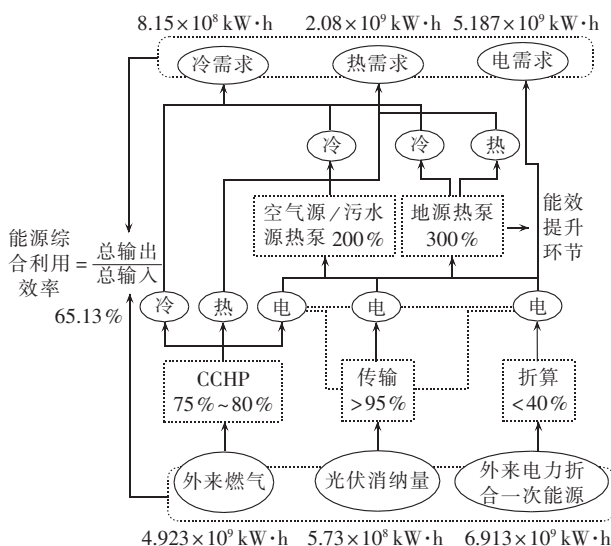


图 10 综合能源系统设计能效测算

Fig.10 Calculation of design energy efficiency of multi-energy system

变电站 13 座, 总容量为 2150 MW。

建设投资 113.31 亿元, 年盈利 13.65 亿元, 投资总资产收益率为 12.05%, 每年将节省煤炭 $1.3895 \times 10^6 \text{ t/a}$, 减少碳粉尘、二氧化碳、二氧化硫和氮氧化物分别为 $1.806 \times 10^5 \text{ t/a}$ 、 $1.232870 \times 10^8 \text{ t/a}$ 、 $2.37 \times 10^4 \text{ t/a}$ 和 $1.38 \times 10^4 \text{ t/a}$ 。

其中太阳能光伏发电、中深层地源热泵供热和浅层地源热泵供热属于可再生能源, 可再生能源装机占大负荷的 32%, 可再生能源渗透率达 24.5%; 分布式光伏年发电量为 $5.7276 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 分布式光伏装机占大电力负荷的 41%, 光伏发电渗透率达 11%; 中深层地源热泵年供热量为 $1.08 \times 10^9 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 浅层地源热泵年供热量为 $3.24 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 地源热泵装机占大热力负荷的 25.9%, 地源热泵供热渗透率达 48%。

5 结论

电力、天然气、热(冷)系统的差异性, 给综合能源系统多能源耦合的规划提出了巨大挑战, 如何充分利用多种能源的互补特性, 通过典型规划场景确定规划边界, 挖掘源-网-荷-储等各个环节能效提升资源, 提升可再生能源的消纳能力, 是综合能源系统规划的关键问题。本文通过我国北方某园区的规划实例, 结合多场景规划理念, 针对区域能源需求精细化分析、综合能源子系统规划、区域能源系统建设时序及多能互补协同效益等规划环节进行了分析, 强调了依据区域冷热电需求和资源禀赋, 合理选择能源开发技术, 构建体现地方差异性的规划场景, 通过局部自平衡的资源优化配置和供能网络实现子系统间的互补互济的规划路径。相比传统能源系统分产分供的形式, 综合能源系统在可再生能源利用、能效提升、削峰填谷及经济性方面释放出新的价值空间,

为区域低碳、绿色的能源发展提供了可持续发展的技术支持,显示出综合能源系统的优势。

参考文献:

- [1] 北京市国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要[EB/OL]. (2011-03-28)[2017-03-01]. <http://zhengwu.beijing.gov.cn/ghxx/sewgh/t11-76552.htm>.
- [2] 2015年北京市环境状况公报[EB/OL]. (2016-01-01)[2017-03-01]. http://www.bjepb.gov.cn/2015zt_jsxl/index.html.
- [3] 中国2050年高比例可再生能源发展情景暨途径研究[EB/OL]. (2015-04-20)[2017-03-01]. <http://www.efchina.org/Reports-zh/china-2050-high-renewable-energy-penetration-scenario-and-roadmap-study-zh>.
- [4] 2015年风电产业发展情况[EB/OL]. (2016-02-02)[2017-03-01]. http://www.nea.gov.cn/2016-02/02/c_135066586.htm.
- [5] SMITH M,TON D. Key connections:the U.S. department of energy's microgrid initiative[J]. IEEE Power & Energy Magazine,2013,11(4):22-27.
- [6] E-Energy model region[EB/OL]. (2016-06-28)[2017-03-01]. <http://www.digi-tale-technologien.de/>.
- [7] NAKANISHI H. Japan's approaches to smart community[EB/OL]. (2014-10-09)[2017-03-01]. <http://www.ieee-smartgridcomm.org/2010/down-loads/Keynotes/nist.pdf>.
- [8] UNSHUAY C,MARANGON-LIMA J W,DE SOUZA A C Z. Integrated power generation and natural gas expansion planning[C]// Power Tech,2007 IEEE Lausanne. [S.l.]:IEEE,2007:1404-1409.
- [9] UNSHUAY 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.
- [10] 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.
- [11] CHAUDRY M,JENKINS N,QADRAN M,et al. Combined gas and electricity network expansion planning[J]. Applied Energy,2014,113(6):1171-1187.
- [12] SALDARRIAGA C A,HINCAPIÉ 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.

- [13] 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.
- [14] 程林,刘琛,朱守真,等. 基于多能协同策略的能源互联网研究[J]. 电网技术,2016,40(1):132-138.
CHENG Lin,LIU Chen,ZHU Shouzheng,et al. Study of micro energy internet based on multi-energy interconnected strategy[J]. Power System Technology,2016,40(1):132-138.
- [15] 常焱,程林,李洪涛,等. 基于半正定松弛最优潮流的主动配电网多源协调优化控制[J]. 电网技术,2016,40(8):2416-2422.
CHANG Yao,CHENG Lin,LI Hongtao,et al. Distribution system optimal power flow with various controllable sources based on semi-definite relaxation[J]. Power System Technology,2016,40(8):2416-2422.
- [16] 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. Design of hierarchy and functions of regional energy internet and its demonstration applications[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(9):26-33.

作者简介:



程林

程林(1973—),男,北京人,副教授,博士研究生导师,主要从事电力系统可靠性、主动配电网与电力系统规划方向的研究工作(E-mail:chenglin@mail.tsinghua.edu.cn);

张靖(1971—),女,北京人,副研究员,硕士,主要研究方向为综合能源系统规划、主动配电网系统控制分析(E-mail:zhangjing1@mail.tsinghua.edu.cn);

黄仁乐(1963—),男,北京人,教授级高级工程师,主要研究方向为电力系统自动化、智能电网关键技术和主动配电网(E-mail:h979@sohu.com)。

Case analysis of multi-scenario planning based on multi-energy complementation for integrated energy system

CHENG Lin¹,ZHANG Jing¹,HUANG Renle²,WANG Cunping²,TIAN Hao¹

(1. Department of Electrical Engineering,Tsinghua University,Beijing 100084,China;

2. State Grid Beijing Electric Power Company,Beijing 100031,China)

Abstract: The integrated energy system has several particular features:multiple energy source types,such as electric power,natural gas,heat(cool) and so on,multiple interest groups,various energy demands,etc.,and the key problem of its planning is how to make the overall cooperation of multi-energy complementation for the flexible configuration of different sections,such as source,grid,load,storage and so on,to promote the local accommodation of renewable energies and enhance the comprehensive energy efficiency of system. With a practical multi-energy system planning for a region in northern China as an example,the concept of multi-scenario planning is discussed and several planning sections are deeply analyzed;the prediction and analysis of energy demands,the scenario design of multi-energy station subsystem planning,the construction schedule and the synergetic benefit of multi-energy complementation,which provides reference for the similar regional multi-energy system planning.

Key words: integrated energy system; multi-energy complementation; planning scenario; synergetic benefit; planning