

多能协同综合能源系统示范工程现状与展望

彭克, 张聪, 徐丙垠, 陈羽, 赵学深

(山东理工大学 电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000)

摘要: 综合能源系统集成供电、供热和供气等系统, 充分发掘了各个能源系统的潜力, 成为当今能源系统发展的主要方向。总结了国内外综合能源系统示范工程的现状, 分析了国内外示范工程的实践经验。国外的成功案例表明, 政策支持是发展综合能源系统的基础, 多能协调控制是实现能源协同互补的关键技术, 有利于能源的高效利用与可再生能源的大规模消纳。进一步通过国内外示范工程在政策及技术等方面的对比, 结合我国目前的能源现状, 给出了我国发展综合能源系统的建议。

关键词: 综合能源系统; 可再生能源; 多能协同; 示范工程

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.06.001

0 引言

能源是人类赖以生存和发展的基础, 能源技术变革和创新也关系到社会的进步和发展^[1]。社会发展对能源需求量的急剧增加导致化石能源使用过度, 并由此引发了一系列的环境污染和能源问题。目前智能电网这一策略已在世界很多国家逐步实现, 欧洲地区的智能电网建设取得了显著的成效, 我国在智能电网方面也有很大的突破。但是随着智能电网建设的逐步推进, 工业界与学术界都已意识到目前的技术体系下能源利用仍然存在一系列诟病, 诸如可再生能源不能大规模有效消纳、能源利用率不高、安全性及可靠性较低等^[2]。

为了解决能源问题, 美国早在 2001 年就提出了综合能源系统发展计划, 目标是促进分布式能源和热电联供技术的推广应用以及提高清洁能源使用比重。欧盟在第七研发框架(FP7)中对优质能源网络、能效和节能提出了新的要求^[3-6]; 提高欧洲电力和天然气输配系统网络(特别是欧洲能源市场整合背景下)的效率、安全可靠性及质量; 提高能源利用效率, 促进各产业进一步节能。本文主要总结了国内外综合能源系统的相关示范项目情况, 对目前综合能源系统发展做了介绍, 分析了国内外示范工程的实践经验, 并对我国综合能源系统的发展提出了建议。

1 综合能源系统的概念与特点

综合能源系统是下一代智能的能源系统, 使得能源系统的能量生产、传输、存储和使用有了系统化、集成化和精细化的运行和管理^[7-8]。综合能源系统是能源互联网的重要物理载体, 是实现多能源互补、能源梯级利用等技术的关键, 区域综合能源系统

是综合能源系统在地域上和功能上实现的具体体现, 根据地理因素和能源特性, 能源系统可分为跨区域级、区域级和用户级。

综合能源系统可以实现各种能源的协同优化, 利用各个能源系统之间在时空上的耦合机制, 一方面实现能源的互补, 提高可再生能源的利用率, 从而减少对化石能源的利用; 另一方面实现了能源梯级利用, 从而提高了能源的综合利用水平^[5-7]。

以分布式冷热电联供(DES/CCHP)为代表的系统在我国已经得到示范应用, 其将电力系统、供气系统、供热系统和供冷系统通过相关的信息通信建立对应的耦合关系, 典型结构如图 1 所示。多能耦合和互动是综合能源系统典型的物理特征^[1,8-14]。

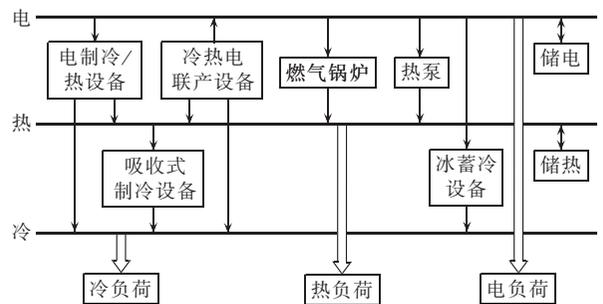


图 1 典型综合能源系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of typical integrated energy system

综合能源系统可以实现不同能源形式之间的转换, 如可以将过剩电能转化为易于储存的氢能等其他能源形式, 从而实现可再生能源的高效利用与大规模消纳, 从根本上对能源结构进行调整, 促进可持续发展。此外, 由于各个能源系统之间的互联, 所以当某个能源系统出现故障时, 其他的能源系统通过获取相应信息^[15], 利用能源之间的转换供给弥补故障时的供能缺额, 为能源系统在紧急情况下的协调控制提供了更为丰富的手段, 从而实现整个综合系统的稳定与可靠运行。

收稿日期: 2017-01-22; 修回日期: 2017-04-11
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0901300)
Project supported by the National Key R&D Program of China (2016YFB0901300)

2 国外示范工程介绍

2.1 欧盟 ELECTRA 示范项目

ELECTRA 示范项目为实现大规模可再生能源的充分利用,着眼于 2030 年欧洲智能电网的稳定运行,针对不同规模、不同电压等级的电网,从运行控制、储能技术、电力市场机制等多个方面展开研究。项目组涵盖了 RSE、AIT 等 20 多个欧洲研究机构,整体研究思路是以分层分布式的控制策略代替传统的集中控制,提出以“网元(cell)互联”的概念协调各种分布式能源的接入与就地平衡^[16-17],如图 2 所示。网元定义为包含主动负荷、分布式能源与储能单元的既定区域。

在运行控制方面,该项目利用网元互联构成的网络实现分层分布式控制。在中压网络层面,侧重电压与频率的控制;在用户层面,根据建筑物冷热电负荷规律、数量以及供能设备运行情况实现不同系统运行方案的切换,优化冷热电三联供系统的部件匹配和参数匹配,达到不同运行工况的多目标优化。在储能技术方面,针对不同容量及不同时间尺度的控制策略进行了划分,通过需求侧管理实现储能与分布式能源的综合优化、削峰填谷等。电力市场机制作为上述技术研究的基础,制定合适的激励机制以促进新技术的应用。

2.2 欧盟 E-DeMa 项目

E-DeMa 是欧盟智能电网计划的项目之一,用户可以通过对各时段电价差值的了解,达到节约用电的预期效果。项目重点在于建设具有高渗透率的分布式能源社区,将用户、能源供应商、能源销售商、设

备运营商等多个角色整合到一个系统中,并进行虚拟的能源交易,交易内容包括电量和备用容量等。该项目共有 700 个用户参与,其中 13 个用户安装了微型热电联产装置。

E-DeMa 项目通过智能能源路由器实现对能源的传输、分配、管理和控制等,如图 3 所示,既可以实现用电智能监控和需求响应,也可以调度分布式能源供给电网或社区其他用户^[18-19]。智能能源路由器可以由智能电表和逆变器等组合而成,根据电厂发电和用户负荷情况,从而选取最优传输路径来传输能量。对于接收到的能量,能源路由器都会重新计算网络承载和用户侧负荷变化情况,重新分配物理地址,对其传输发送。对于结构复杂的网络,使用能源路由器可以提高能源系统的整体效率,保障系统安全与稳定。

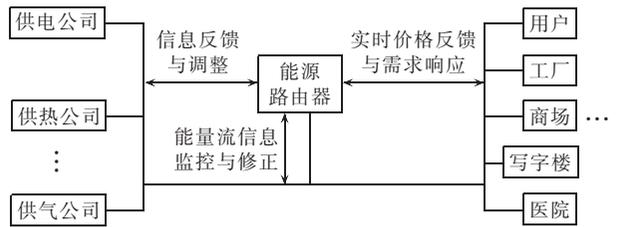


图 3 能源路由器应用模型

Fig.3 Energy router application model

2.3 英国曼彻斯特示范工程

曼彻斯特每年在能源上的消耗都要超过 2 亿英镑,尤其是在电力消耗和家庭取暖方面。在曼彻斯特,可再生能源仅占 3%,而大部分能源仍采用传统的化石燃料,其中电网损失的能量为 5%~10%^[20]。

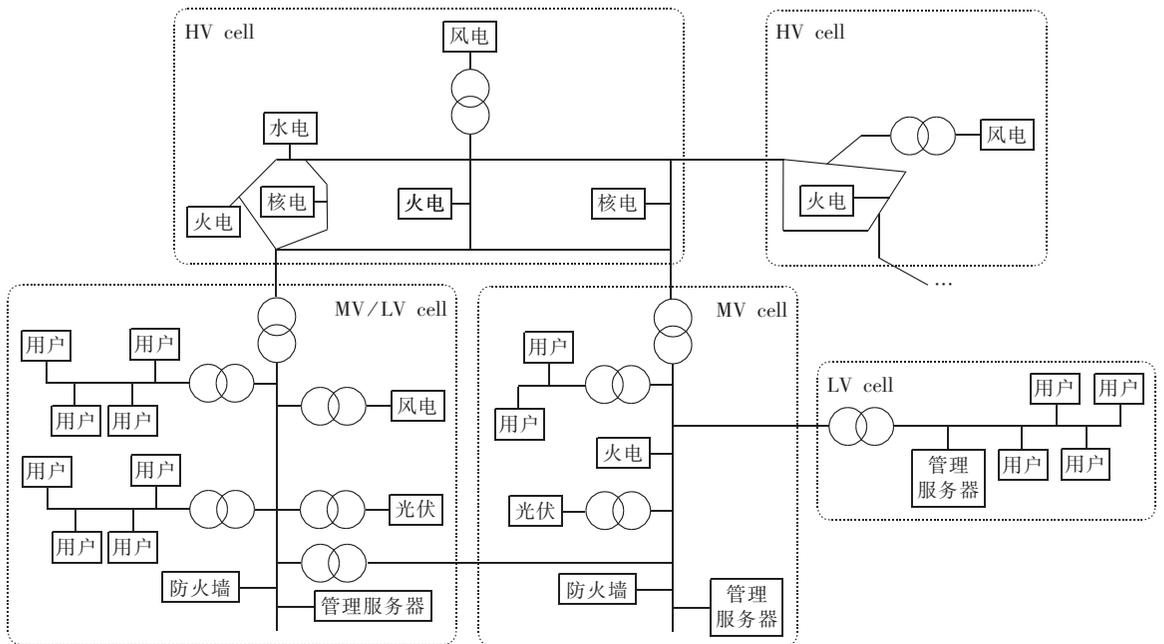


图 2 网元互联示意图

Fig.2 Schematic diagram of cell interconnection

为了解决能源问题,曼彻斯特大学做了综合能源系统规划和运行方法的研究,集成用户监控终端,开发了综合能源电/热/气/水系统与用户交互平台,并在曼彻斯特得到成功应用。该交互平台从能源利用模式、能源节约策略和需求响应 3 个方面对曼彻斯特能源系统进行了整合^[20-21],如图 4 所示。

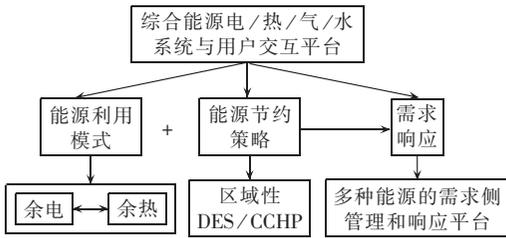


图 4 曼彻斯特能源策略

Fig.4 Manchester energy strategy

能源利用模式上,主要解决了能源的阶梯利用问题,利用能源之间的转换,例如余热与余电的转换利用,实现了能源的高效利用;能源节约策略上,通过区域性分布式冷热电联供技术,实现了能源之间的综合协调;需求响应方面,通过集成用户监控终端采集底层数据信息,利用多种能源的需求侧管理和响应平台,并结合能源利用模式和能源节约策略,调整能源负荷的运行状态,控制峰谷差值大小,实现削峰填谷。上述 3 个方面的技术的应用在一定程度上缓解了曼彻斯特的能源问题。

2.4 德国朗根费尔德示范工程

能源转型是德国的重大工业工程之一并计划在 2050 年前实现,计划在可再生能源的利用、多种能源综合利用和化石能源高效利用方面取得显著的成效^[22]。虽然可再生能源发电现已占德国发电总量的 25% 以上,但因为廉价煤炭的用量不断增加,德国的 CO₂ 排放量实际上还在增加,所以能源问题亟待解决。

针对此类突出问题,欧盟分布式能源实验室在分布式能源并网控制与管理与智能通信与量测等方面做了深入的研究,并针对德国出现的这一典型能源问题,开发了社区能源管理系统,并在德国朗根费尔德得到应用示范,如图 5 所示。该系统主要是以智能社区为理论背景,智能社区综合利用了现代信息通信、自动控制和量测技术等,旨在为用户提供优质用电服务,同时满足分布式电源和电动汽车等新能源技术的使用。朗根费尔德所应用的社区能源管理系统在智能社区这一概念的基础上增加了交互平台,使用户能够参与整个能源系统,这与 2.3 节中提到的曼彻斯特综合能源系统交互平台^[20-21]是类似的。该系统分为 3 种工作模式:用户用能成本最低模式、新能源最大消纳模式和电网支撑模式^[21]。

用户用能成本最低模式在满足电网安全稳定运

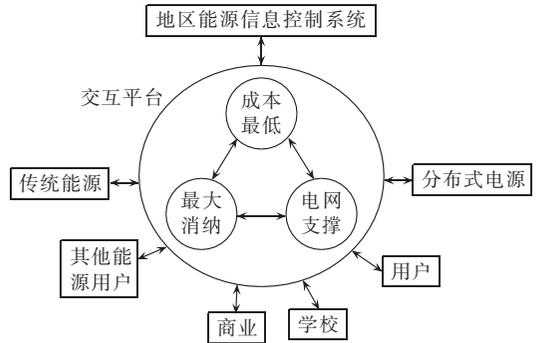


图 5 朗根费尔德综合能源系统

Fig.5 Integrated energy system of Langenfeld

行的基本要求下,实现社区内用户能源利用量的最小化;新能源最大消纳模式也是在满足电网安全稳定运行的基本要求下,实现分布式能源就地消纳最大化,即实现社区能源的低碳化和自给自足;电网支撑模式是电网在需要社区提供能量支撑(如峰谷差较大等)情况下运行,对电网起到可靠的支撑,优化电网的运行效率,提高电网安全性。

2.5 日本柏叶智慧城市

日本的能源匮乏,因此日本是最早开展综合能源系统研究的亚洲国家。智慧城市理念倡导在各行各业中充分利用新一代信息技术,进一步推动信息技术和工业技术的结合^[23]。

目前在柏叶已经实现了区域能源管理一体化,柏叶智慧城市运用了区域能源管理系统(AEMS),整个区域的能源信息被集中起来进行统一处理,把简单的节约能源发展成为能源循环与能源储备^[23]。另外,区域还设置了备用蓄电池设备,容量约为普通备用蓄电池的 3000 倍。其在电力充裕时或用电低谷期可储存电能,用电高峰期供应给写字楼,节假日供应给商业场所,以及在紧急情况发生时优先供电给用户住宅区使用等,有效地将电力提供给需求侧。

AEMS 作为柏叶智慧城能源系统的核心,还与楼宇能源管理系统(BEMS)和家庭能源管理系统(HEMS)进行信息交换^[24],如图 6 所示。从服务和满足家庭、社区需求出发,通过使用各种现代技术减少家庭、社会的能源消费开支,提高能源资源的利用效

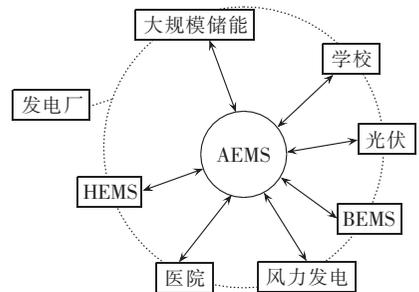


图 6 柏叶智慧城市能源系统

Fig.6 Multi-energy system of Cypress wisdom city

率。重点通过可再生能源的开发和利用,推广能源资源需求的智能化、可视化管理。比如通过用电量、燃气、用水量的可视化图像或数字表达提醒人们节约使用;利用太阳能、甲烷气体、地源热泵发电,开发储存转换系统供应家庭生活应急用电;通过智能交通管理系统帮助人们选择更节能的出行方式等。

在柏叶智慧城市,除利用可再生能源与蓄电池实现能源的自产自消与二氧化碳排放量的大幅度削减外,还致力于积极研发能源创新技术。能源创新技术从如何利用二氧化碳角度出发,是一种将二氧化碳转化为新能源的技术,即在太阳光、新型催化剂、常温常压等反应条件下,二氧化碳可以与水反应转化为甲烷和乙烯,这种新型能源技术能够实现碳排放量减半。

2.6 加拿大耶洛奈夫镇示范项目

耶洛奈夫镇人口约为 2 万,以旅游业为主,周边水域较大,全年采暖期较长(200 d 左右)。该镇存在的问题主要如下:没有较为完善的市政热网系统,忽视用能效率,未充分利用当地可再生能源,居民节能意识薄弱等。

耶洛奈夫镇借助 ICES(Integrated Community Energy Solutions)技术,结合综合能源系统概念,对小镇的能源系统进行了改造。如图 7 所示,小镇从自身的优势和问题出发,充分利用了可再生能源。

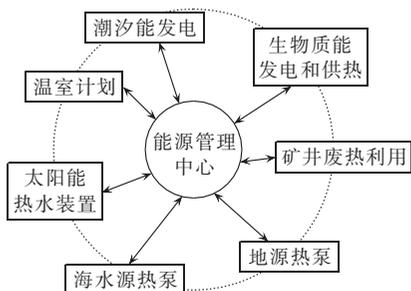


图 7 耶洛奈夫镇能源系统

Fig.7 Multi-energy system of Yellowknife town

当地工业、商业和农业等利用能源管理中心,将各种能源综合管理和利用。利用余热、废热和地热等,减少废物排放,加大对废物的回收再利用。以供热为例,小镇供热系统在传统的供热系统基础上,还增加了地源热泵、水电供热、太阳能热风系统、被动式太阳能供暖等,这在很大程度上提高了能源的利用效率和可再生能源的利用率^[25-26]。

3 国内示范工程介绍

3.1 北京延庆县主动配电网

延庆县拥有丰富的可再生资源,而且拥有我国最大的微电网示范集群,可再生能源渗透率极高,这为主动配电网示范工程的建设提供了有利条件。

图 8 为延庆县示范工程的能源分层控制策略示意图。其中,延庆县配电网改造采取了分区供电的方式,直流配电可以增大电缆传输容量,同时可以将直流负荷区直流母线连入交流负荷区直流接入点,实现互相支持^[27-28]。

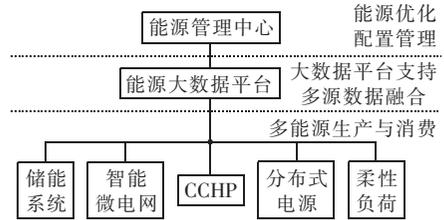


图 8 延庆县能源结构

Fig.8 Energy structure of Yanqing County

整个能源系统支持分布式电源的灵活安全接入,提升了能量传输网络的优化配置能力和分布式能源的消纳能力,提高了用户的电能质量和供电可靠性以及配电网设备利用效率。同时,利用用户侧可控资源的响应能力,通过多种能源协同控制,平抑新能源波动,实现了示范区高渗透率分布式新能源的充分消纳,构建起基于能源大数据平台的能源管理中心。通过“区域自治,全局优化”实现了能量的分层分级平衡,同时利用大数据技术,实现了对分布式能源预测、用户用能行为分析等功能。

3.2 上海迪士尼度假区示范

上海迪士尼度假区是全球首个采用分布式电源技术的度假园区。上海迪士尼应用了 GE 的分布式能源技术,如图 9 所示,提供冷、热、电和压缩空气四联供:天然气燃烧发电,然后将废热分三部分,一部分转化为蒸汽,为园区中的娱乐设施提供动力支持,一部分用于水加热,提供给厨房和酒店等,最后一部分废热为化学反应制冷提供反应条件,实现制冷^[29-30]。

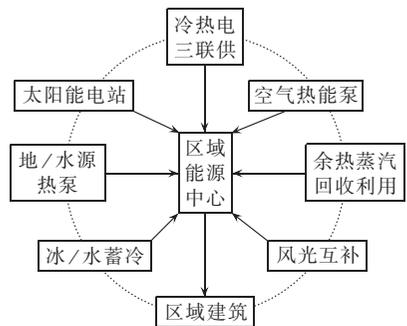


图 9 景区能源系统结构

Fig.9 Energy system structure of scenic area

由于采用了能源梯度利用模式,有效降低能源损耗,最大限度对能源利用,一次能源利用率达 80% 以上,相比于传统模式,资源利用效率得到很大的提升。

该项目采用能源站集中控制系统与用户侧能源管理系统有效集成,保证站内各系统始终处于高效运行状态;使用了大温差制冷技术,降低了系统的整体能耗,提高了设备效率;采用了冷热调峰设备满足了用户侧不同时段的能源需求,同时通过多种储能技术的低谷收集高峰释放,提高整个系统的能源利用效率^[29]。以高效、环保、节能的方式集中向园区供电,改善了区域用电方式,保护了核心区电网的安全运行。同时,在区域电网发生故障时,项目的黑启动功能可以确保能源系统区域内用户的用能安全^[29],避免过分依赖区域外的能源供应,可在关键时刻对区域能源网络起到较强的支撑作用。

3.3 天津中新生态城示范项目

天津中新生态城示范项目中,以微网的形式实现了冷/热/电高效利用,具有了综合能源的雏形。生态城是一个有综合需求的能源供应场所,能源系统集成多种能源输入、多种产品输出及多种能源转换单元^[31-33]。生态城各能源供应比例如下:可再生能源占 16.22%,其中太阳能占 2.33%,风力占 6.84%,地热+热泵占 7.05%;余热占 4.05%,其中电厂余热(循环水余热)占 3.60%,沼气(垃圾及污泥)占 0.45%;清洁能源占 79.53%,其中分布式能源(冷热电三联供)占 0.24%,燃气占 8.82%,电厂蒸汽占 17.97%,城市电网占 52.50%。通过电、冷、热能等相关环节的密切配合,实现能源的梯阶高效利用。图 10 为中新生态城的能源供给方式。

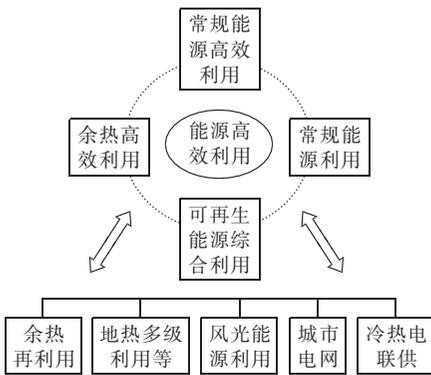


图 10 中新生态城能源供给方式

Fig.10 Energy supply mode of China-Singapore eco-city

天津生态城是中国和新加坡两国政府合作的旗舰项目,在能源利用上具有以下特点。

a. 以能源站为核心,由停车场光伏发电系统、新增储能系统、以天然气为燃料的冷/热/电联供系统构成 10kV 能源微网,实现冷/热/电的梯阶高效利用。

该系统实现了不同分布式电源的优势互补,有助于分布式电源的优化利用;灵活的运行模式保障服务中心和能源站部分重要负荷的不间断电力供

应。对用户而言,广泛使用微网可以在一定程度上降低电价,最大限度地获得经济效益。

b. 以动漫园 4 栋楼的光伏发电系统为基础,分别组建 4 个独立的光储微网系统,提高光伏的利用率,同时可以提高重要负荷的供电可靠性。

利用光伏发电系统和储能系统构成简单结构的微网系统,用于动漫园区 4 栋大厦,避免了光伏发电系统被切除的现象发生,实现了可再生能源的最大化利用;灵活的运行模式,提高了用户侧的供电可靠性;用户可利用峰谷电价差运行于微网模式。

3.4 崇明岛示范工程

国网上海市电力公司和国电南瑞科技股份有限公司承建了以大规模可再生能源利用为特征的综合示范工程。项目以建设“零碳输入的智能国际生态岛”为目标,研究崇明岛智能电网整体集成的解决方案^[34]。

崇明岛具有丰富的可再生能源,主要包括风能、太阳能、生物质能、潮汐能、地热能等,具有低碳、绿色、可持续发展的良好生态优势。崇明岛能源管理模式如图 11 所示,该示范项目将实现岛内绿色能源平稳接入电网和分层分区就地消纳、供电智能可靠、服务智能互动、能效智能管理,达到经济可行性和模式可复制性的多能协同示范作用。

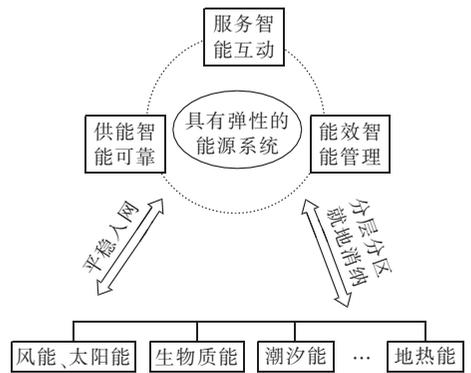


图 11 崇明岛能源管理模式

Fig.11 Energy supply mode of Chongming island

该示范工程实现了多种可再生分布式电源的安全并网和就地消纳;通过构建灵活且具有弹性的智能用电系统,实现了工业、商业、环岛电动汽车供电体系和生态农业等,同时也实现了用户层与电网的友好交互,充分发掘了可再生能源的潜力。该项目率先完成了首套兆瓦级钠硫储能电站的工程化应用,国内首次实现了配网层独立运行风电场和兆瓦级集装箱式储能系统的联合优化运行示范工程。崇明生态岛将中国的生态文明理念运用于不同层次的生态建设中,构建出了适合本土发展的创新模式,该示范工程实践证明了多能协同可以有效促进环境和经济协调发展,其建设理念和成功经验为我国发展

建设生态文明发挥了良好的示范作用。

4 我国综合能源系统发展建议

纵观全球综合能源发展动态,通过上述国内外示范工程的对比分析,可以得到以下结论:

a. 在综合能源系统建设与发展上,无论国内与国外示范工程,通常将可再生能源的消纳以及能源的高效利用作为目标,以解决化石能源的枯竭危机;

b. 多种能源之间的协调优化与控制是实现上述目标的关键技术,因此在各个示范工程的建设中,通常以能源管理中心或者平台来实现能源的管控,规模较大的系统甚至以分层分区的形式进行管理,以实现区域内多种能源的协调优化运行;

c. 冷/热/电/气等能源转化协调的关键设备通常采用微型燃气轮机,形成局域的冷/热/电联供系统,通过能源管理中心制定冷/热/电的联合优化策略。

因此,很多国家已将能源技术的突破作为科技革命和产业革命的突破口,在政策上鼓励发展新型能源技术,在能源利用上抢先占领制高点,这方面欧洲已经处于领先地位,通过与国外示范工程对比,可以发现我国在以下几个方面仍然存在着差距。

a. 能源政策方面。目前综合能源系统的建设与运行费用相对于传统电力系统费用较高,因此需要国家给予政策性的补贴以激励用户进行投资建设,国外在储能、天然气等方面的政策补贴已经相对完善,而我国仅在光伏、风电等新能源方面有相应补贴政策,天然气等补贴政策仅在上海等城市有初步的政策出台。

b. 互动机制方面。综合能源系统中多能协调互补通常需要与用户互动实现,因此制定合适的互动机制如需求响应机制等,激励用户参与是非常重要的手段,这方面由于国外的电力市场机制已经非常成熟,因此在大多数示范工程中都考虑了互动平台或者是互动机制的实施,而目前我国由于政策等各方面原因,需求响应等互动机制在实际工程中难以实施,仅在个别省份(如江苏等地)有相关示范。

c. 能源协调技术方面。目前我国多能协调技术主要依赖于局域的冷热电联供系统,与其他形式的热能、冷能,诸如冰/水蓄冷、热泵等能源输出相对独立,从全局层面看,冷/热/电仍然相对隔离,而且能源管控通常以微网的形式实现,规模相对较小。而国外示范工程则进一步探索了新的能源协调技术与装备,诸如能源路由器的使用,从全局层面上实现不同能源的协调优化。

未来我国要完成 2020 年非化石能源占一次能源消费的 15% 和 2030 年非化石能源占一次能源消

费的 20% 的目标^[35-36],需要在综合能源领域不断探索。总结以上国内外相关示范工程的经验,我国综合能源系统的发展可以得到以下启示。

a. 完善能源政策体系。目前可再生能源产业发展对政策的依赖度比较高,受政策影响程度很大,同时能源价格和税收制度没有为可再生能源建立公平的市场竞争环境,因此可再生能源产业的可持续发展受到了制约。因此需要进一步完善支持可再生能源发展的价格、财税等优惠政策,以促进能源综合利用。

b. 多元化利用可再生能源。通过促进可再生能源应用成本的降低,积极引导太阳能、风能、地热能、生物质能等多元化可再生能源的充分利用,不断探索新型能源技术,诸如太阳能热电/热水/空调等,形成系统化的综合能源技术体系。

c. 协调化石能源的开发和利用。化石能源在未来很长时间内仍然是整个能源结构的基础,因此严格化石能源开发和利用是能源技术创新的基础。按照统筹规划、有效利用的思路,着力推进化石能源高效率利用将是近期能源发展的重要方向。

d. 建立区域能源管理中心。能源管理中心是实现能源综合利用与节能减排的重要策略,将各种能源在一定区域集中管理,可以实现各能源之间的优势互补,有效地控制各能量流,实现能量定量传递到负荷侧,同时可以实现不同运行模式的切换,丰富能源系统的运行模式。

e. 健全需求响应机制。需求响应是充分发挥综合能源系统效用的一个有效措施,同时也是提高整个能源供应市场的稳定水平和运行效率的重要对策。良好的需求响应机制可以为需求侧管理创造更好的条件,同时可以充分发挥需求响应的效益,形成良性循环。

f. 推进新型能源设备研发。综合能源系统的稳定可靠运行需要新型能源设备作为支撑,需要研发诸如能源路由器等新型能源管理设备,实现多能量流的监测与控制,保证能源的质量与稳定传输。

5 结语

综合能源系统的主要特点是多能协同和优势互补,从而实现能源的分级利用和循环利用。面对当前的能源和环境形势,为实现我国能源的绿色发展、循环发展和可持续发展,需要积极寻求新的能源发展道路。本文介绍了目前国内外的部分典型示范工程,各个综合能源示范工程的成功实践表明综合能源系统是解决我国未来能源问题的有效途径,但其是一个长期的、复杂的、不断更新的系统性工程,因此需不断借鉴国外的先进工程经验,探索出适合我

国发展的综合能源技术与产业体系。

参考文献:

- [1] 吴建中. 欧洲综合能源系统发展的驱动与现状[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 1-7.
WU Jianzhong. Drivers and state-of-the-art of integrated energy systems in Europe[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 1-7.
- [2] 孙宏斌, 潘昭光, 郭庆来, 等. 多能流能量管理研究: 挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 1-8.
SUN Hongbin, PAN Zhaoguang, GUO Qinglai, et al. Energy management for multi-energy flow challenges and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 1-8.
- [3] BEUZEKOM I V, MAZAIRAC L A J, GIBESCU M, et al. Optimal design and operation of an integrated multi-energy system for smart cities[C]//IEEE International Energy Conference. Leuven, Belgium: IEEE, 2016: 1-7.
- [4] 欧盟第七研发框架计划(FP7)[EB/OL]. (2010-11-25)[2017-01-22]. <http://wenku.baidu.com/link?url=30Pk9fP3gtW9jNywKmSJ-IMBHew15fb2Cn2d4qFm0BL3cOl5e2pUAP63pZhKcBSl88Lq4ttFb2-e-Xt0k9lCyW4srxLaIMHF5KlikelskdRr8C>.
- [5] ZHANG X, 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.
- [6] Seventh Framework Programme(FP7)[EB/OL]. (2015-10-22)[2017-01-22]. <http://tees.openrepository.com/tees/bitstream/10149/133-050/5/133050.pdf>.
- [7] 付学谦, 孙宏斌, 郭庆来, 等. 能源互联网供能质量综合评估[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 1-7.
FU Xueqian, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. Comprehensive evaluation of energy quality for energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 1-7.
- [8] 张勇军, 陈泽兴, 蔡泽祥, 等. 新一代信息能源系统: 能源互联网[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 1-7.
ZHANG Yongjun, CHEN Zexing, CAI Zexiang, et al. New generation of cyber-energy system: energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 1-7.
- [9] EDGHILL J, MCGREGOR D. The case of Barbados: the role of electric vehicles in creating a sustainable and integrated energy system for small island states[C]//Hybrid and Electric Vehicles Conference. London, UK: IET, 2014: 1-7.
- [10] GOMES R M F, SOUSA J B, PEREIRA F L. Modeling and control of the IES project ROV[C]//European Control Conference. Cambridge, UK: [s.n.], 2003: 3424-3429.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 于波, 孙恒楠, 项添春, 等. 综合能源系统规划设计方法[J]. 电力建设, 2016, 37(2): 78-84.
YU Bo, SUN Hengnan, XIANG Tianchun, et al. Planning design method of integrated energy system[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(2): 78-84.
- [14] 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.
- [15] SHEIKH S, MALAKOOTI B. Integrated energy systems with multiobjective[C]//Energytech. Tel-Aviv, Israel: IEEE, 2011: 1-5.
- [16] MERINO J, RODRIGUEZ J, CAERTS C, et al. Scenarios and requirements for the operation of the 2030+ electricity network[C]//Cired-international Conference on Electricity Distribution. Lyon, France: [s.n.], 2015: 1329-1333.
- [17] MARTIN L, RADAELLI L, BRUNNER H, et al. ELECTRA IRP approach to voltage and frequency control for future power systems with high DER penetration[C]//Cired-international Conference on Electricity Distribution. Lyon, France: [s.n.], 2015: 1357-1360.
- [18] SMART ENERGY MADE IN GEMANY I E-DeMa[EB/OL]. (2014-01-02)[2017-01-22]. <http://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Factsheets/factsheet-e-dema.pdf?blob=publicationFile&v=2>.
- [19] E-Energy[EB/OL]. (2014-12-05)[2017-01-22]. http://www.digitale-technologien.de/DT/Navigation/DE/Service/Abgelaufene_Programme/E-Energy/e-energy.html/.
- [20] 侯孚睿, 王秀丽, 锁涛, 等. 英国电力容量市场设计及其对中国电力市场改革的启示[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(24): 1-7.
HOU Furui, WANG Xiuli, SUO Tao, et al. Capacity market design in the United Kingdom and revelation to China's electricity market reform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(24): 1-7.
- [21] 时珊珊, 苏义荣, 改传跃. 智能社区低碳能源管理系统方案研究[J]. 华东电力, 2014, 42(12): 2918-2921.
SHI Shanshan, SU Yirong, GAI Chuanyue. Scheme for low-carbon energy management system in intelligent community[J]. East China Electric Power, 2014, 42(12): 2918-2921.
- [22] 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.
- [23] 千叶县柏叶新城[EB/OL]. (2016-07-18)[2017-01-22]. http://wenku.baidu.com/link?url=Anu6DH25HH7xLlu2kvgxaqljgbcwHh-NUx_vcQC1IRa20cWDYUhNxCKkpK5d-P3nLXjLHW_ewgvr0Q_mqJoMABwTmclEURzYyWYZWUiydz5_.
- [24] WANG J J, FU C, YANG K, et al. Reliability and availability analysis of redundant BChP(Building Cooling, Heating and Power) system[J]. Energy, 2013, 61(4): 531-540.
- [25] GRID2030[EB/OL]. (2011-07-29)[2017-01-22]. https://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/Electric_Vision_Document.pdf.
- [26] WEIS T M, ILLINCA A. Assessing the potential for a wind power incentive for remote villages in Canada[J]. Energy Policy, 2010,

- 38(10):5504-5511
- [27] 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.
- [28] 黄仁乐,程林,李洪涛. 交直流混合主动配电网关键技术研究[J]. 电力建设,2015,36(1):46-51.
HUANG Renle,CHENG Lin,LI Hongtao. Research on key technology of AC/DC hybrid active distribution network[J]. Electric Power Construction,2015,36(1):46-51.
- [29] 金成生,刘稳坚,邱尚青. 微电网技术在上海迪士尼 110 kV 智慧变电站中的应用[J]. 华东电力,2014,42(5):1027-1030.
JIN Chengsheng,LIU Wenjian,QIU Shangqing. Application of microgrid technology in Shanghai Disney 110 kV intelligent substation[J]. East China Electric Power,2014,42(5):1027-1030.
- [30] 上海迪士尼引进分布式能源技术[EB/OL]. (2015-11-07)[2017-01-22]. <http://www.china-epc.org/meiti/2015-07-15/7618.html>.
- [31] 中新天津生态城能源规划[EB/OL]. (2008-04-01)[2017-01-22]. <http://wenku.baidu.com/view/8af98849cf84b9d528ea7ae6.html?from=search>.
- [32] 李琼. 天津中新生态城动漫园三联供能源系统优化分析[D]. 天津:天津大学,2012.
LI Qiong. Energy system optimization and analysis of cartoon and comics park in Tianjin Sino-Singapore ecocity [D]. Tianjin: Tianjin University,2012.
- [33] 吴俊杰,马秀琴,黄超,等. 天津中新生态城绿色建筑评价体系及节能效益研究[J]. 河北工业大学学报,2011,40(4):42-45.
WU Junjie,MA Xiuqin,HUANG Chao,et al. Green building evaluation system and energy efficiency for Sino-Singaporean Tianjin eco-city[J]. Journal of Hebei University of Technology,2011,40(4):42-45.
- [34] 郭茹,杨海真. 崇明生态岛可再生能源产业发展路径[J]. 同济大学学报(自然科学版),2012,40(8):1204-1209.
GUO Ru,YANG Haizhen. Roadmap of renewable energy industry development in Chongming Ecoisland[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2012,40(8):1204-1209.
- [35] 电力发展“十三五”规划(2016—2020年)[EB/OL]. (2016-12-26)[2017-01-22]. <http://www.cec.org.cn/d/file/yaowenkuaidi/2016-12-26/41f185eae1301b0b82e16aa2a920e8fc.pdf>.
- [36] 能源发展“十三五”规划[EB/OL]. (2016-12-16)[2017-01-22]. <http://www.sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201612/W020161216659579-206185.pdf>.

作者简介:



彭克

彭克(1983—),男,山东淄博人,讲师,博士,主要研究方向为分布式发电系统仿真、智能配电网等(**E-mail**:pkbest@tju.edu.cn);

张聪(1992—),男,山东淄博人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为综合能源系统(**E-mail**:choolla@live.com);

徐丙垠(1961—),男,山东滕州人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为智能配电网与配电自动化(**E-mail**:xuby@vip.163.com);

陈羽(1974—),男,江苏溧阳人,副教授,博士,主要研究方向为智能配电网通信与自动化技术(**E-mail**:chenyukhl@hotmail.com);

赵学深(1991—),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要研究方向为智能配电网(**E-mail**:sduatdqzxs@163.com)。

Status and prospect of pilot projects of integrated energy system with multi-energy collaboration

PENG Ke,ZHANG Cong,XU Bingyin,CHEN Yu,ZHAO Xueshen

(College of Electrical and Electronic Engineering,Shandong University of Technology,Zibo 255000,China)

Abstract: Being the main direction of energy system development,the integrated energy system consisting of power supply,heating supply,gas supply,and so on fully exploits the potentials of different energy systems. The status of its pilot projects,domestic and abroad,is summarized and their practical experiences are analyzed. The successful cases of abroad projects show that,the policy support is the basis of its development and the multi-energy coordinated control is the key technology of multi-energy complementation for the efficient utilization of energy and the large-scale accommodation of renewable energy. Comparison between domestic and abroad pilot projects is further carried out in the aspects of policy and technology. Combined with the present situation of China's energy,suggestions about the domestic development of integrated energy system are given.

Key words: integrated energy system; renewable energy resources; multi-energy collaboration; pilot project