

需求侧智慧能源系统关键技术分析

王成山¹, 王丹¹, 李立涅², 贾宏杰¹, 王伟亮¹

(1. 天津大学智能电网教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 华南理工大学电力学院广东省绿色能源技术重点实验室, 广州 510640)

摘要: 需求侧智慧能源系统作为能源互联网的重要组成部分, 是未来能源系统的重要组织形式, 对实现可再生能源分布式就地消纳, 提升终端能源利用效率等具有重要意义。本文探讨了需求侧智慧能源系统的构成特点, 列举了与需求侧智慧能源系统能源生产、传输、分配、转换、存储、消费等环节相关的设备与技术, 分析了需求侧智慧能源系统的产业发展模式。最后, 进一步针对需求侧智慧能源系统的发展前景, 分实验示范阶段、应用推广阶段以及普遍应用、完全市场化阶段进行了阐述。

关键词: 智慧能源系统; 关键技术; 发展模式; 发展前景

中图分类号: TK01 **文献标识码:** A

Key Technology Analysis of Demand-Side Smart Energy System

Wang Chengshan¹, Wang Dan¹, Li Licheng², Jia Hongjie¹, Wang Weiliang¹

(1. Key Laboratory of Intelligent Power Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Green Energy Technology of Guangdong Province, School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: As an important part of the Energy Internet, the demand-side smart energy system is an important form of energy system in the future. It is of great significance for realizing the distributed local consumption of renewable energy and improving the efficiency of terminal energy utilization. This paper discusses the characteristics of the demand-side smart energy system, listing the key equipment and technologies related to energy production, transmission, distribution, conversion, storage, and consumption of the demand-side energy system, as well as analyzing the industrial development model. Finally, the development prospects of the demand-side smart energy system are further elaborated in the stages of experimental demonstration, application promotion, general application and complete marketization.

Keywords: smart energy system; key technologies; development model; development prospect

收稿日期: 2018-06-10; 修回日期: 2018-06-20

通讯作者: 王丹, 天津大学, 副教授, 主要研究方向为综合能源电力系统、智能配用电技术和分布式发电与微网技术;

E-mail: wangdantjuee@tju.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国能源技术革命的技术方向和体系战略研究”(2015-ZD-09); 国家重点研发计划项目(2018YFB0905000)

本刊网址: www.engsci.cn

一、前言

能源是人类社会生存的基础,由于石油、煤炭等化石燃料是不可再生能源,并且在在使用过程中会造成环境污染,因此提高能源利用率、增加可再生能源的使用已成为解决当前能源问题和环境问题的必然选择。打破各个能源系统之间单独设计、单独运行的运营模式,对不同的能源系统进行统一优化设计、协调优化运行,构建统一的能源系统,是促进能源领域变革、解决能源问题的有效手段 [1~3]。

在能源问题和环境问题日益突出的压力下,各种能源系统新技术的研究受到了高度关注。美国于 2007 年颁布了能源独立和安全法,智能电网被列入美国国家战略,目标是基于新型信息技术建设安全可靠、投资低、效能高和能够灵活应变的智能电力系统;2009 年加拿大国会通过了能够推动新型能源网发展相关研究的报告,未来将构建能够覆盖加拿大全境的新型社区能源网络,以实现 2050 年温室气体的减排目标和解决能源问题;欧洲是最早提出综合能源系统的地区,多能源协调优化的研究在欧盟第五框架中被置于显著位置,在欧盟第六框架和第七框架中,能源网和多能源协调优化的研究工作得到深化,实施了智能能源(intelligent energy)、泛欧网络(trans-European networks)和微网与多微网(microgrids and more microgrids)等项目;2011 年,德国在经济与技术部和环保部的领导下,每年投入 3 亿欧元,从能源供应链和产业链的角度实施对多能源系统网络的优化。

近年来,我国对“互联网+智慧能源”相关技术的发展给予了高度重视。2015 年 7 月发布了《国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》,把“互联网+智慧能源”列为重点行动领域之一 [4]。在全国“十三五”能源规划工作座谈会中强调,“十三五”期间,要着力推进能源系统优化,实施电力和天然气调峰能力提升、分布式能源和智能电网发展、“互联网+智慧能源”等行动计划,显著提高能源系统的智能化水平和运行效率。2015 年 4 月,国家能源局组织召开能源互联网会议,提出制定“能源互联网行动计划”。国内相关研究机构和制造商正加紧探索智慧能源系统或能源互联网技术的研究与实践,并取得了一系列成果。

智慧能源系统的核心都是希望通过先进能源技术的应用,提高能源的利用效率和清洁化水平,满足多元化的能源供应需求。本文针对需求侧智慧能源系统的特点、关键设备和技术、产业发展模式、发展前景等方面进行了介绍和展望。

二、需求侧智慧能源系统的特点

需求侧智慧能源系统属于局域能源系统,是通过区域或用户能源的生产、传输、分配、转换、存储、消费等环节进行有机协调与优化后所形成的能源产供销一体化系统。它是多种能源互联互通的新型能源系统,将电、热、冷、气等各种能源通过各类能源转换器实现物理上的连接与交互,是多种能源高度耦合的能源资源利用和能量循环系统 [1~3]。具体来说:①区域级智慧能源系统由区域智能配电系统、中低压天然气系统、供热/冷/水系统等供能网络耦合互连组成,起到能源传输、分配、转换、平衡的“承上启下”作用,能源系统之间存在较强耦合关系;②用户级智慧能源系统以用户智能用电系统、分布式/集中式供热系统、供水系统、储能系统等耦合而成,不同类型能源间存在深度耦合关系,用户级智慧能源系统又可称为微能源网,区域级智慧能源系统内可含有众多的微能源网。

三、需求侧智慧能源系统关键设备与技术

需求侧智慧能源系统的构成形态,如图 1 所示。

(一) 关键设备

1. 分布式发电设备

分布式发电设备一般指容量较小的分散布置在用户附近的发电设备,包括微型燃汽轮机、燃料电池、可再生能源发电系统(如风机和光伏)等 [5]。一般具有效率高、体积小、污染少、运行维护简单等特点。

2. 能源存储设备

能源存储设备不仅包含储电系统(如电池储能、超级电容器储能、压缩空气储能、飞轮储能等) [6],还包含储热、储气等设施。储气技术主要有储气罐储气、管道储气等,而储热技术包括显热存储、相变储热、化学反应热存储等 [7]。未来天然气固态

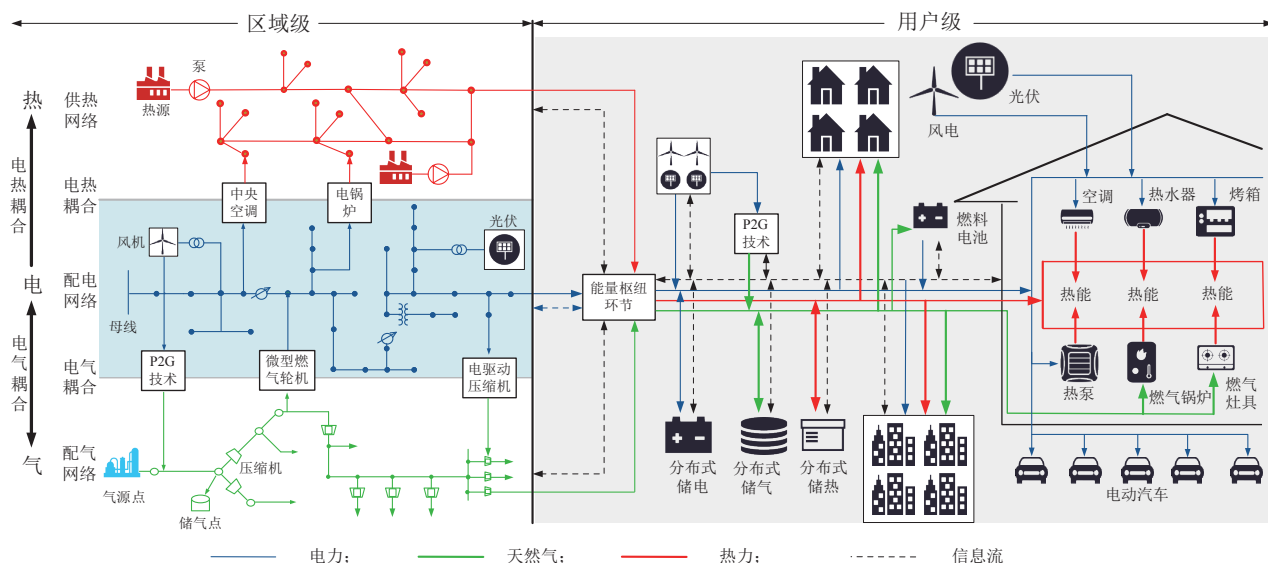


图1 需求侧智慧能源系统的构成形态

储存技术、地下储热技术等新型存储技术将会推动天然气和热能存储的发展。

3. 能源转化设备

不同能源系统之间需要能源转换设备，使得电、气、热等能量可以在彼此之间相互转化，增加可选的能源供给方式，提高能源供给的经济性、可靠性。具体能源转换方式主要有：电-气之间转化、电-热之间转化、气-热之间转化等。需求侧智慧能源系统中的能量存储和转化示意图，如图2所示。

电-气之间转化技术包括电力-氢气转化技术（power to gas, P2G）、微型燃气轮机、燃料电池等。P2G电转气设备是在电负荷低谷或可再生能源出力

高峰期利用富余的电能电解水制氢气的设备，氢气可以储存或输送，在用户端可以通过燃料电池利用氢气发电和冷/热供应。

电-热转化技术设备主要是指电热水器、空调等，正处在研究阶段的基于热耦合效应的新型电池是新兴的电-热转化设备，它能利用低温热量进行发电。

燃气锅炉是天然气系统与热力系统的重要转化设备，能够将天然气中的化学能转化为热量，向用户供热。

4. 能源输配设备

传统的电力、热力和天然气输配都通过彼此独立的系统进行。为提高能源输配效率，实现多种能

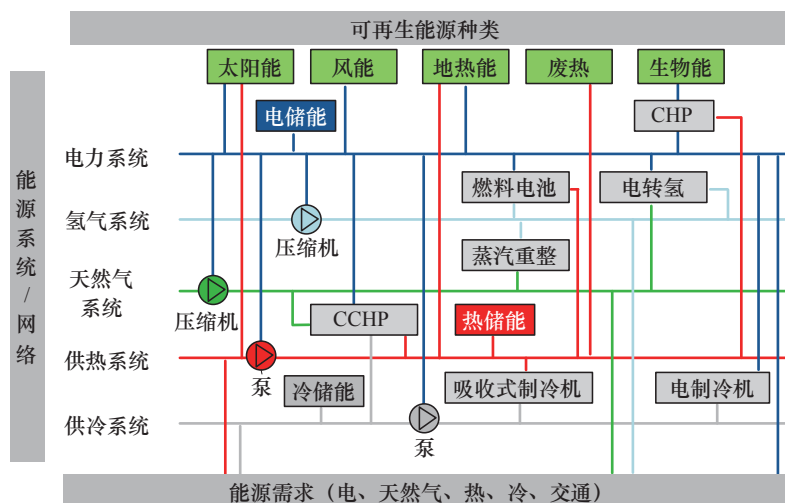


图2 需求侧智慧能源系统中的能量存储和转化

注：CCHP为冷热电三联供；CHP为热电联供。

源的协同输配,提出了能源互联器与能源集线器[8]概念。

能源互联器将电能、化学能和热能在同一装置中进行长距离传输,包含一个中空的电导体,电导体外侧有天然气等化学物质,原理如图3所示[8]。电导体中产生的热损失被部分地存储在传输介质中,这种热量可以在线路的末端被回收;气流也起到冷却电导体的作用。其特点是:①适用于多种能源的互联互通,有较强通用性;②简化了能源网络和能源终端设施的布局,为终端多种能源耦合组件的能量来源提供便捷。

能源集线器是典型的能源分配设备,一种典型形式如图4所示[8]。其特点是:①多种能源的输入输出关系可通过耦合矩阵进行标准化描述;②可针对不同的应用场景,构建模块化的物理系统,实现复杂耦合系统的标准化配置和管理。

5. 智能计量设备

(1) 智能计量表

智能计量表具备远程/本地通信、双向计量、多种价格计费、实时数据交互、能量质量监测、远程断供、与用户互动、自动抄读等功能[9]。以智

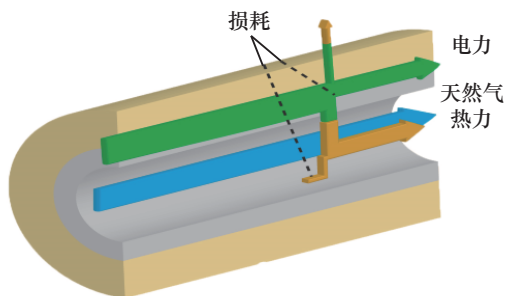


图3 能源互联器的典型布局

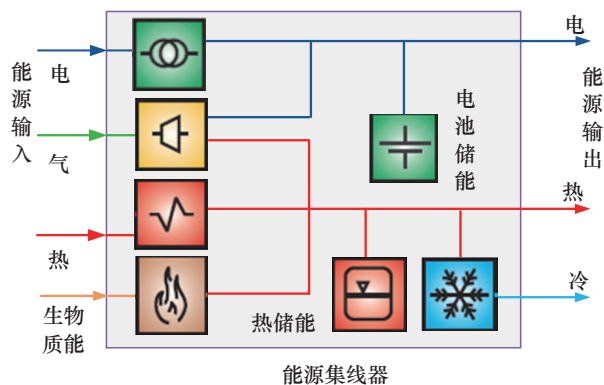


图4 能源集线器示例

能电表为基础构建的智能计量系统能够满足分布式电源与负荷运行管理、电力市场交易、电网调度等方面的要求。

(2) 智能传感器

传统传感器已形成一套成熟的理论和技术,如电感式传感器和压电式传感器等。而一些新型传感技术,如光纤传感器、电荷耦合元件(CCD)传感器等,近些年发展较快,多数技术指标优于传统的传感器,体积小、功能强,具备耐高压、抗电磁干扰等优点,具有广泛的应用前景。

(二) 关键技术

智慧能源系统的关键技术包括规划设计技术、信息保障技术、运行优化技术、弹性强化技术、用户侧资源优化利用技术等。

1. 智慧能源系统规划设计技术

规划设计目标是在满足差异化用户供能可靠性要求的前提下,科学地配置分布式能源类型及容量,设计能源配送网络拓扑结构等。核心技术包括优化规划设计方法、综合评价指标体系及规划设计支持系统[10,11]。在考虑电/气/冷/热负荷的用户需求差异性和时空分布特性的基础上,充分挖掘和利用不同能源间的互补替代能力,是区域级智慧能源系统规划设计的主要工作。区域级智慧能源系统规划设计需要考虑各种时空场景下系统调控策略,以获取系统更为全面的运行场景信息;需充分研究系统内不同环节和设备在不同场景下的特性,以获取不同运行模式下的运行约束;在统一考虑系统设计方案的能源利用效率、安全性、用户舒适性、经济性和社会效益等因素基础上,建立系统优化设计模型;在考虑全生命周期设计理念的基础上,综合系统不同运行阶段特征,采用多场景协同优化分析方法实现问题的求解。

2. 智慧能源系统信息保障技术

智慧能源系统中能量流动链的信息流是相互联通的,不同层级能源系统间的信息通信与态势感知技术、互联信息保障技术是海量数据环境下系统经济运行的重要基础[12]。信息保障技术旨在实现系统各环节之间的高效信息通信与交互共享,实现从产能到用能的全过程实时信息采集、传输与存储。随着能源物联网技术和信息物理系统技术的发展,信息网将与物理能源网实现深度融合,从而为系统

提供更加信息化、数字化、透明化的运行环境。多源信息融合的系统态势感知技术旨在利用同步量测、负荷特性、运行状态、预测及风险评估等信息，实现系统的主动控制、管理、服务，是智慧能源系统运行状态优化和其他高级应用的基础。

3. 智慧能源系统运行优化技术

智慧能源系统中各种能源耦合度高，通过不同能源的互补和梯级利用，能够实现系统能效的提升，运行优化控制技术是实现这一目标的关键。对智慧能源系统进行运行优化需要考虑多种约束条件，在多种目标间寻求平衡，如图5所示。运行优化过程实际是对多种能源的综合调度过程，与电力系统中的机组组合优化和优化调度类似，不同之处在于需要考虑的目标函数和约束条件更为复杂[13,14]。在运行优化时，需要平衡多种利益关系、考虑更多因素的影响，例如需要平衡系统运行的经济性与安全性之间的矛盾；需要平衡

能源可持续性、能源利用效率和用能经济性之间的矛盾等。

4. 智慧能源系统弹性强化技术

智慧能源系统是一个高维、多时间尺度、高度非线性和随机性的复杂动力系统，其弹性主要指系统对高风险、小概率扰动事件的抵御能力，强调在面临无法避免的扰动时能有效利用各种资源灵活应对，维持尽可能高的运行水平，并迅速恢复系统性能[15,16]。反映系统弹性特征的指标包含鲁棒性、冗余性、有源性和敏捷性等方面[17,18]。鲁棒性描述系统承受外界扰动或压力的能力；冗余性描述系统中备用设备或系统在灾害中的可用性；有源性描述投入资源维持系统关键功能的能力；敏捷性描述系统快速恢复关键功能、减小能源损失的能力。智慧能源系统是提高能源供应弹性的重要举措。借助微型燃气轮机、燃料电池等多样化的能源接入与转化装置，在外部供电系统发生故障时能够快速生产

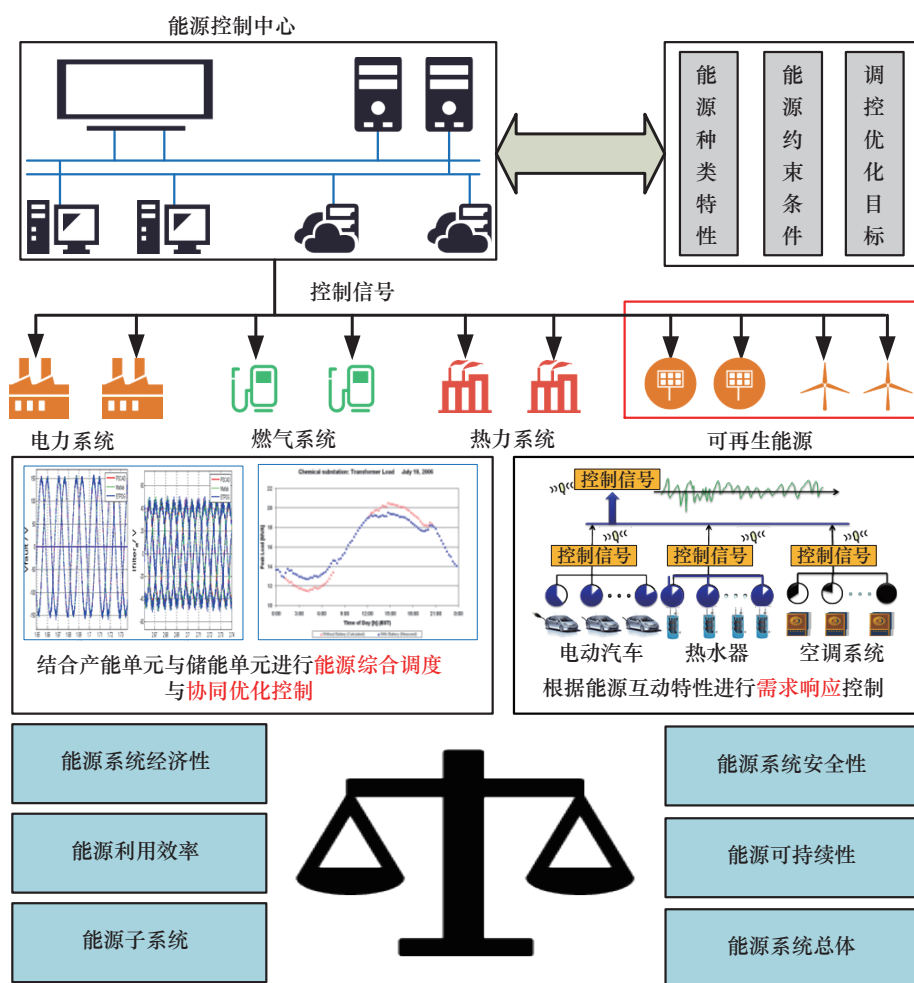


图5 智慧能源系统能量优化与控制

电能，与其他分布式电源互为支撑，大大提升了紧急情况下的供电恢复能力。当供热、供气等其他能量环节出现问题时，也能够由电制热、电解制氢等装置实现从电能到其他能源形式的快速转化，提升系统紧急情况下的能源供应保障能力。

5. 用户侧资源优化利用技术

传统的用户侧资源利用技术主要是指电负荷的需求侧管理，它建立在用户可调电负荷基础上，有一定的局限性。在智慧能源系统中，用户侧资源优化利用技术对用户侧不同能源系统统一进行管理，可有效提高能源的综合利用水平，节约用户用能成本 [19~21]，这需要通过用户侧综合资源优化管理系统来实现。一个家庭用户资源优化管理系统，如图 6 所示，智能能源集线器允许用户监视并控制所用能源设备，具有自优化功能，在充分利用不同能源的供应特性、价格特性和耦合特性的基础上，用户可以通过转移或改变其消费能源种类和数量来参与需求侧管理计划。

四、产业发展模式

近年来，我国政府对能源领域的重视程度和支持力度不断提升，大力提倡在需求侧建立以可再生

能源为主体的发、配、储、用一体化智慧能源系统。在管理方法上按照互联网理念，运用先进的互联网信息技术，实现能源生产和使用的智能化，相关产业快速发展，具体体现在下述几个方面。

(一) 能源结构

能源供应环节将逐步具备绿色环保、节约高效、安全可靠的特征 [22,23]，多元发展的能源结构和多轮驱动的能源供应体系；分布式能源将快速发展。屋顶光伏、电动汽车等各类单一容量小、总体数量大的分布式资源在地域上具有分散的特性，能够就地收集、存储和利用这些资源的需求侧智慧能源系统是高效、便捷利用这些资源的有效途径。

(二) 技术属性

信息技术和信息化的管理模式将在需求侧智慧能源系统体系中不断深化发展。这包括两层含义：首先，信息技术是实现智慧能源系统的前提。深化发展信息技术，电流、电压、气压、流量、温度等各类传感器和嵌入式数据采集器的大量、广泛应用是基础，实时、可靠的通信网络是媒介，高效、智能的控制算法是核心 [24]。只有在这一基础上，智慧能源系统才能有效整合能源生产数据、运行数据、

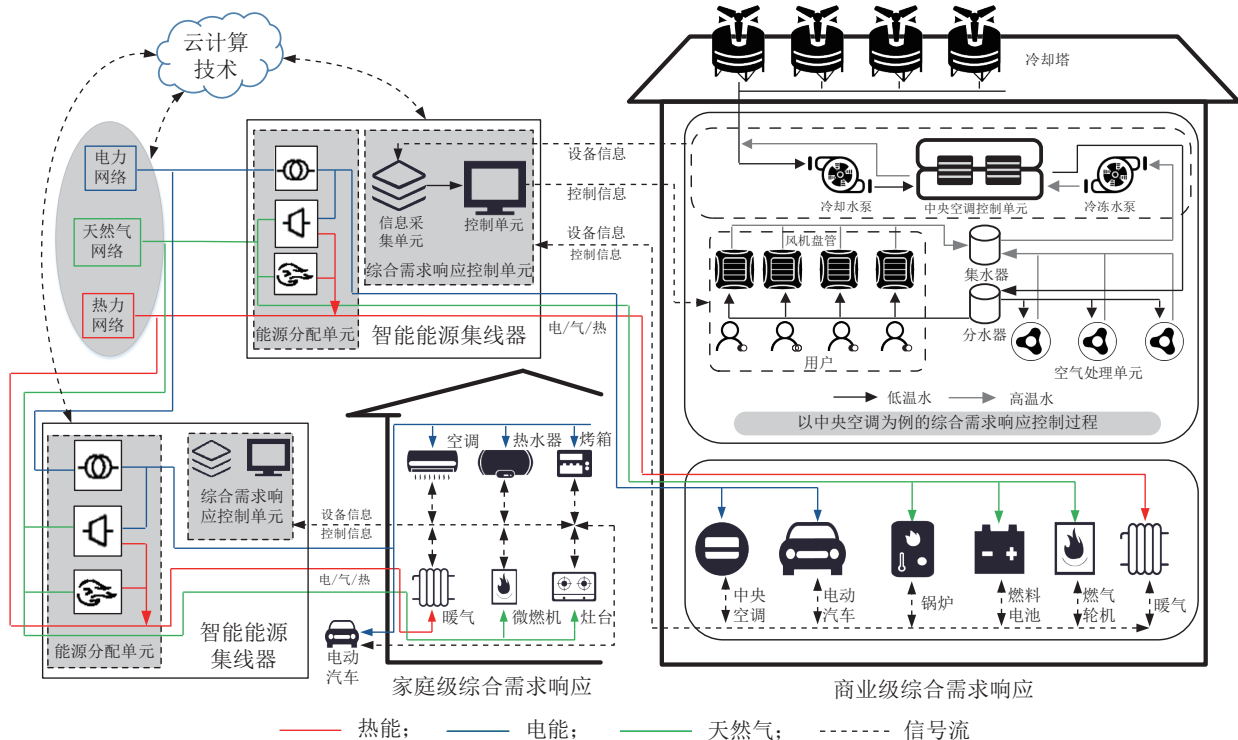


图 6 用户资源优化管理系统

用户需求数据、市场数据及其他各类数据,实现能源优化利用的目标。其次,能量的“信息化管理”模式,是智慧能源系统实时平衡供需、优化能源应用的有效途径[25,26]。例如为应对分布式电源和各类负荷在能量生产和使用环节所具有的间歇性和随机性,储能装置是关键的能量缓冲单元。从信息论的角度理解,引入储能实际上是将能量在调配过程中从连续量转变为离散量,这一转变使得智慧能源系统可以按照信息互联网管控信息流的机制对离散化的能量流进行调度。

(三) 市场形态

相关产业的技术将使商业模式有望实现重大突破和创新[27]。参与主体更多、进入门槛更低、方式更为灵活的模式创新将不断产生。以互联网为载体,能够将能源系统中分散化的用户、差异化的能源、多元化的商业主体紧密联系起来,扩大市场成员的交互范围与频度,降低交易成本,显著提高市场成员参与能源交易的便利性与存在感。多种能源形式的融合和互联网精神的渗透必将催生一个竞争充分、多边对等、主动参与的全新能源系统生态。创新需求侧智慧能源系统商业模式,鼓励采取电网、燃气、热力公司控股或参股等方式组建综合能源服务公司从事市场化供能、售能等业务,积极推行合同能源管理、综合节能服务等市场化机制[28~30],加快构建基于互联网的智慧用能信息化服务平台,可为用户提供开放共享、灵活智能的综合能源供应及增值服务。

五、发展前景

预计到2030年,智慧能源系统相关技术及其应用将基本成熟,并全面实现商业化。其发展路线如下:

实验示范阶段。当前,智慧能源系统相关技术大多处于起步探索阶段,并逐渐向实用化转变,各种仿真实验系统及示范工程初步建立。随着智慧能源系统相关研究的进一步发展,智慧能源系统工程示范逐渐成熟并开始向社会推广。在此阶段,智慧能源系统的关键技术逐渐成熟,能够应用于一些实际商业化运行的项目。市场上的公司广泛掌握关键核心技术,技术壁垒降低。国家和

政府仍需要对项目进行初期投资或者相关补贴,来刺激市场投资者对智慧能源系统进行投资与经营。

应用推广阶段。2020—2025年,为我国需求侧智慧能源系统市场化蓬勃发展的阶段。在此阶段,智慧能源系统的设备制造、优化控制、规划设计等核心技术逐渐成熟,能够基本满足实际项目的需求,并且各项技术在实际项目中得到很好的验证和利用。国家对于促进智慧能源系统发展的政策已相对完善,市场活力增强,应当更多鼓励和发展合同能源管理型以及自用型智慧能源系统建设。

普遍应用、完全市场化阶段。2025—2030年,需求侧智慧能源系统的关键技术研发成熟,我国智慧能源系统高度市场化,除供能公司之外,大批独立运营商甚至个人选择投资区域和用户级智慧能源系统,且市场对价格的调整已可以基于成本定价,价格合理、竞争充分,需求侧智慧能源系统成为全社会普遍采用的能源供应模式。

六、结语

智慧能源系统代表着未来能源领域的发展方向,是能源互联网发展的基础,相关技术已成为世界各国能源领域的关注热点。本文主要从需求侧智慧能源系统的特点、关键技术、产业发展模式以及发展前景等方面进行了相关分析与探讨。随着关键设备与能源存储、转换、传输等新技术的快速发展,智慧能源系统通过多能互补融合与梯级利用,可显著提高能源综合利用效率以及可再生能源消纳能力,改善资产利用率水平与能源供给灵活性,改变能源生产与消费模式,带动诸多新兴能源市场以及相关产业发展,将成为实现我国能源转型、节能减排与可持续发展目标的关键。

参考文献

- [1] 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 H J, Wang D, Xu X D, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.
- [2] 王成山,王丹,周越.智能配电系统架构分析及技术挑战[J].电力系统自动化,2015,39(9):2-9.
Wang C S, Wang D, Zhou Y. Framework analysis and technical challenges to smart distribution system [J]. Automation of Electric

- Power Systems, 2015, 39(9): 2–9.
- [3] 余晓丹, 徐宪东, 陈硕翼, 等. 综合能源系统与能源互联网综述 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 1–13.
Yu X D, Xu X D, Chen S Y, et al. A brief review to integrated energy system and energy internet [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 1–13.
- [4] 李立涅, 张勇军, 陈泽兴, 等. 智能电网与能源网融合的模式及其发展前景 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 1–9.
Li L C, Zhang Y J, Chen Z X, et al. Merger between smart grid and energy-net: Mode and development prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 1–9.
- [5] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10–14.
Wang C S, Li P. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10–14.
- [6] 袁小明, 程时杰, 文劲宇. 储能技术在解决大规模风电并网问题中的应用前景分析 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 14–18.
Yuan X M, Cheng S J, Wen J Y. Prospects analysis of energy storage application in grid integration of large-scale wind power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 14–18.
- [7] 王承民, 孙伟卿, 衣涛, 等. 智能电网中储能技术应用规划及其效益评估方法综述 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 33–41.
Wang C M, Sun W Q, Yi T, et al. Review on energy storage application planning and benefit evaluation methods in smart grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 33–41.
- [8] Geidl M, Koeppl G, Favre-Perrod P, et al. Energy hubs for the future [J]. Power & Energy Magazine IEEE, 2007, 5(1): 24–30.
- [9] 张钦, 王锡凡, 王建学, 等. 电力市场下需求响应研究综述 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 97–106.
Zhang Q, Wang X F, Wang J X, et al. Survey of demand response research in deregulated electricity markets [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 97–106.
- [10] 徐玉琴, 李雪冬, 张继刚, 等. 考虑分布式发电的配电网规划问题的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 87–91.
Xu Y Q, Li X D, Zhang J G, et al. Research on distribution network planning considering DGs [J]. Power System Protection & Control, 2011, 39(1): 87–91.
- [11] 杨胜春, 汤必强, 姚建国, 等. 基于态势感知的电网自动智能调度架构及关键技术 [J]. 电网技术, 2014, 38(1): 33–39.
Yang S C, Tang B Q, Yao J G, et al. Architecture and key technologies for situational awareness based automatic intelligent dispatching of power grid [J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 33–39.
- [12] 徐茹枝, 王宇飞. 面向电力信息网络的安全态势感知研究 [J]. 电网技术, 2013, 37(1): 53–57.
Xu R Z, Wang Y F. A study on electric power information network-oriented security situation awareness [J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 53–57.
- [13] 郭建成, 钱静, 陈光, 等. 智能配电网调度控制系统技术方案 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 206–212.
Guo J C, Qian J, Chen G, et al. Technical scheme of smart distribution grid dispatching and control systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 206–212.
- [14] 陈星莺, 陈楷, 刘健, 等. 配电网智能调度模式及关键技术 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 22–26.
Chen X Y, Chen K, Liu J, et al. A distribution network intelligent dispatching mode and its key techniques [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 22–26.
- [15] 刘伟, 郭志忠. 配电网安全性指标的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 85–90.
Liu W, Guo Z Z. Research on security indices of distribution networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 85–90.
- [16] 刘健, 徐精求, 董海鹏. 配电网静态安全分析 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(17): 26–30.
Liu J, Xu J Q, Dong H P. Security analysis of distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(17): 26–30.
- [17] 林伯强, 姚昕, 刘希颖. 节能和碳排放约束下的中国能源结构战略调整 [J]. 中国社会科学, 2010 (1): 58–71.
Lin B Q, Yao X, Liu X Y. The strategic adjustment of China's energy use structure in the context of energy-saving and carbon emission-reducing initiatives [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010 (1): 58–71.
- [18] 刘全根. 国家能源结构调整的战略选择 [J]. 地球科学进展, 2000, 15(2): 154–164.
Liu Q G. Strategic choice for national adjustment of energy structure [J]. Advances in Earth Science, 2000, 15(2): 154–164.
- [19] 姚建国, 杨胜春, 王珂, 等. 平衡风功率波动的需求响应调度框架与策略设计 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 85–92.
Yao J G, Yang S C, Wang K, et al. Framework and strategy design of demand response scheduling for balancing wind power fluctuation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 85–92.
- [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 C S, Hong B W, Guo L, 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.
- [21] 吴雄, 王秀丽, 王建学, 等. 微网经济调度问题的混合整数规划方法 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 1–8.
Wu X, Wang X L, Wang J X, et al. Economic generation scheduling of a microgrid using mixed integer linear programming [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 1–8.
- [22] 田世明, 梁文鹏, 张东霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3482–3494.
Tian S M, Luan W P, Zhang D X, et al. Technical forms and key technologies on energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3482–3494.
- [23] 谢国辉, 李琼慧. 全球能源互联网技术创新重点领域及关键技术 [J]. 中国电力, 2016, 49(3): 18–23.
Xie G H, Li Q H. Important fields and key technologies of innovation for global energy interconnection [J]. Electric Power, 2016, 49(3): 18–23.
- [24] 查亚兵, 张涛, 黄卓, 等. 能源互联网关键技术分析 [J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(6): 702–713.
Zha Y B, Zhang T, Huang Z, et al. Analysis of energy internet key technologies [J]. Scientia Sinica (Informationis), 2014, 44(6): 702–713.
- [25] 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 (19): 1–8.
Sun H B, Guo Q L, Pan Z G. Energy internet: Concept, architecture and frontier outlook [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015 (19): 1–8.

- [26] 刘敦楠, 曾鸣, 黄仁乐, 等. 能源互联网的商业模式与市场机制(二)[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3057–3063.
Liu D N, Zeng M, Huang R L, et al. Business models and market mechanisms of E-Net (2) [J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3057–3063.
- [27] 江艺宝, 宋永华, 丁一, 等. 能源互联网风险评估研究综述(二)——信息及市场层面[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4023–4033.
Jiang Y B, Song Y H, Ding Y, et al. Review of risk assessment for energy internet part II: Information and market level [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4023–4033.
- [28] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光, 等. 能源互联网: 驱动力、评述与展望[J]. 电网技术, 2015 (11): 3005–3013.
Sun H B, Guo Q L, Pan Z G, et al. Energy internet: Driving force, review and outlook [J]. Power System Technology, 2015 (11): 3005–3013.
- [29] Jentsch M, Trost T, Sterner M. Optimal use of power-to-gas energy storage systems in an 85% renewable energy scenario [J]. Energy Procedia, 2014, 46: 254–261.
- [30] Ahern E P, Deane P, Persson T, et al. A perspective on the potential role of renewable gas in a smart energy island system [J]. Renewable Energy, 2015, 78: 648–656.