

能源互联网环境下的多能需求响应技术

黄 豫¹,邵 冲¹,郝 洁²,柴明哲²,高赐威²,陈 涛²

(1. 南方电网 能源发展研究院,广州 510530;2. 东南大学 电气工程学院,南京 210096)

Multi-energy demand response technology in energy Internet environment

HUANG Yu¹, SHAO Chong¹, HAO Jie², CHAI Mingzhe², GAO Ciwei², CHEN Tao²

(1. Energy Development Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510530, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

摘要:提升清洁能源特别是可再生能源在终端的消费比例,及实现多种能源类型的综合互补配置,是能源互联网的发展趋势。能源互联网环境下,对需求响应的要求也从传统方式过渡到多能综合需求响应。首先概述了国内外能源互联网的发展及相关项目与政策;其次,对常用的需求响应技术如自动需求响应技术、储能技术、信息与通信技术、电力计量技术、智能控制技术、负荷聚合技术等进行了梳理介绍与分析。着重分析了能源互联网环境下的自动需求响应技术、储能技术、信息与通信技术的发展重点,其中信息物理系统与接口标准是自动需求响应技术的关键,储能技术的重点是降低成本,信息与通信技术侧重于区块链及5G等新技术的应用。最后,总结各需求响应技术未来的发展方向及面对的问题,并提出促进多能需求响应技术发展建议。

关键词:能源互联网;源荷互动;需求响应;自动需求响应技术;储能技术;信息与通信技术

Abstract: Increasing the proportion of clean energy, especially renewable energy in power consumption terminals, and achieving a comprehensive complementary configuration of multiple energy types is the future development trend of the energy Internet. The requirements of energy Internet for demand response have changed from the traditional way to multi-energy comprehensive demand response. Firstly, the development of the energy Internet at home and abroad is outlined, as well as the energy Internet promotion projects and policies. Then, the commonly used demand response technologies such as automatic demand response technology, energy storage technology, information and communication technology, power metering technology, intelligent control technology, and load aggregation technology are introduced and analyzed. The focus is on the development of automatic demand response technology, energy storage technology, and information and communication technology in the energy Internet environment. Among them, information physical systems and interface standards are the key to automatic demand response technology, and energy storage technology focuses on reducing costs, and ICT focuses on the application of new technologies such as blockchain and 5G. Finally, the future development direction of each demand response technology and the problems it faces are summarized, and suggestions are made to promote the development of multi-energy demand response technology.

Key words: energy Internet; power-load interaction; demand response; automatic demand response technology; energy storage technology; information and communication technology

0 引言

我国是能源生产及消费大国,能源的发展借助科技与产业革命进入到升级转型期。能源产业与互联网深度融合,多种能源互补发展,能源互联网以能源为主体、互联网为手段推动绿色清洁发展满足电力需求^[1],特别是促进可再生能源消纳问题。

近年来,包括中国在内的一些国家对能源互联

网的概念与发展模式及特征^[2]、实施环境及技术要求有较多研究^[3],针对清洁能源、分布式电源、智能电网及互联开展了储能技术、信息通信技术、电网技术、电源技术、能源转型分析及源网荷储联合优化技术等方面的研究,为能源互联网的发展奠定了技术及实施基础。

各类能源最终都在消费端实现其利用价值,长期以来消费端对于用能没有选择权。借助能源互联网,电、冷、热、气等多能互补使用,拓宽消费端用能选择权,加强各能源体系间耦合程度,进而推动了生产端的能源互联互通,打破了不同能源体系间垄断壁垒,提升了能源服务。电力需求响应通过电力消费端与电能生产端互动,有效平衡电力供需^[4],给予电力消费端一定的用电选择权。而能源互联

收稿日期:2020-05-21;修回日期:2020-06-27

基金项目:南方电网能源发展研究院科技项目(EDRI-GH-KJXM-2019-101)

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Energy Development Research Institute(No.EDRI-GH-KJXM-2019-101)

网环境下的多能需求响应,能源消费端根据电价机制或激励机制,改变其使用能源的方式,从而实现能源供需调整。

目前对需求响应技术的研究一方面较多研究了电力需求响应机制,基于电价型的需求响应技术是用户被动态电价引导,出于经济性而改变用电方式,其定价机制包括分时电价^[5]、尖峰电价^[6]、实时电价^[7]等。基于激励型的需求响应技术是指用户根据设定的惩罚奖励机制出于经济效益最优而改变用电方式,传统的负荷控制方式主要有可中断负荷^[8]、直接负荷控制^[9]等,目前多个省份采取了用户侧通过需求侧竞价方式参与需求响应,逐渐向市场方式过渡。对于多能需求响应的研究主要集中在建模及优化分析方面,文献[10]分析了自动需求响应技术在能源互联网中的应用及相关问题,文献[11]研究了电热互联的优化调度,文献[12]研究了冷热电联供的互补优化,文献[13]利用深度学习模型研究多能系统运行策略,文献[14]通过柔性负控技术提升用户参与需求响应意愿,文献[15]研究了采用储能系统弥补分布式光伏出力波动的优化问题,文献[16]从价格机制的角度研究源荷互动的多能系统。本文通过对较为前沿的自动需求响应技术、储能技术、信息与通信技术、电力计量技术、智能控制技术、负荷聚合技术等在多能领域的应用和发展进行梳理,为需求响应的支撑技术研究工作提供参考,促进需求响应工作顺利进行。

1 能源互联网的发展

能源互联网作为能源交易载体,由包括电力网和其它种类能源网络构成,将分散在各处的多种能源通过网架送至消费端。在能源互联网的概念中,能源不仅指传统的化石能源也包括新能源,一次能源与二次能源的相互耦合。互联网不仅指能源流通的物理渠道,也包含打通多元能源参与主体及消费终端间连接的信息通道,体现能源流与信息流的联合,通过信息网的数据挖掘支撑能源网的调度。能源互联网支持各类能源作为商品通过互联网平台进行交易及分配的业务,最终达到资源优化配置能力强、绿色低碳、安全可靠的目的。

在欧美地区,能源互联网开展得比较早,并通过不同的项目进行研究。美国的the Future Renewable Electric Energy Delivery and Management System项目,开展配电网的能源互联探索;欧盟的Future Internet For Smart Energy项目,构建了以信息通信技术为基础的智能能源系统;德国开展了E-Energy项目,能分

析负荷的需求响应潜力,推动能源高效利用;瑞士的Vision of Future Energy Networks项目侧重于多能传输系统及分布式能源的转换和存储^[17]。

2016年国家发改委及国家能源局的相关部门发布了《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》,提出能源互联网是推动我国能源革命的重要战略支撑。近年来,能源互联网以促进可再生能源消纳推动能源产业变革,借助互联网平台拓宽能源服务领域。

在多种能源互联的大背景下,除了本身必备的物联网技术及能源网关技术等要求外,在智能电网环境下开展需求响应,对需求响应技术及其实际应用也提出了新的要求。

2 多能需求响应技术

随着能源互联网的发展,可以将冷、热、电等多种能源纳入需求响应范围内,即多能需求响应。多能需求响应技术可以利用冷、热、电等不同能源的产能、用能需求在时间以及空间上的特性差异,实现多能互补。也意味着当用户改变对某一种或多种能源的需求时将会影响到另一种能源的供求关系。基于此,用户可对不同能源的需求进行调整,同样可以达到相同的削峰填谷、缓解用能紧张的效果,实现多元用户的多能需求响应。

多能需求响应可以充分考虑多能系统的耦合关系,利用不同能源的时空互补特性,相比传统的需求响应方案可以进一步充分挖掘用户的需求响应潜力,提升响应资源能力,优化用户的用能结构。并且相比传统的需求响应策略,能够使得用户侧的损失更小,同时能够减少能源网的调度费用,提升用电安全性与稳定性,有利于实现能源网与用户的双赢,提高多元化用户参与需求响应的积极性。用户侧综合能源系统的互动模型如图1所示。

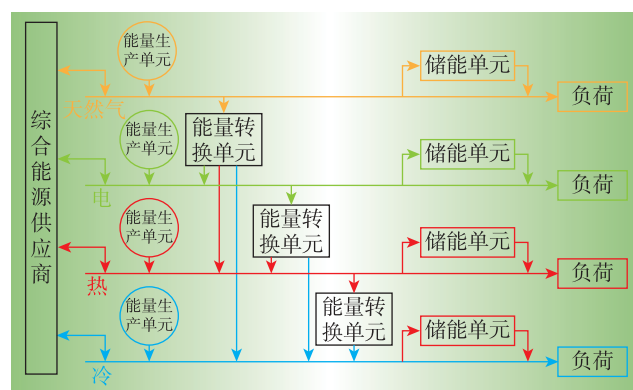


图1 用户综合能源系统的互动模型

Fig. 1 Interactive model of user integrated energy system

而实现能源互联网下的多能需求响应需要众多技术作为支撑:储能技术可以解耦能量的生产和消耗,在多能需求响应中用户侧的电、热、冷系统的耦合程度很高,储能技术的支撑尤为重要;负荷聚合技术可以将中小用户的需求响应资源聚合起来参与多能需求响应;多能需求响应下的信息与通信技术能够支撑交易及结算过程;电力计量技术可以准确计量采集和存储多能需求响应技术下的用户数据;智能控制技术可以实现多能需求响应技术下的能源协调控制;自动需求响应技术可以完全不依赖人工操作,靠信号触发需求响应实施程序自动调度负荷等等。具体的相关技术介绍如下。

2.1 自动需求响应技术

自动需求响应技术是在智能电网的基础上,靠信号触发需求响应实施程序自动调度负荷,而完全不依赖人工操作。随着多能需求响应的发展,自动需求响应技术需要拓展到多能领域,自动需求响应应当包括参与多能需求响应用户端数据采集、传输、分析形成可调资源库,当出现高电价或需要维护电网稳定性时向用户端能量管理系统发送触发信号,当接收到触发信号后按照预先制定的负荷设备与分布式电源设备控制逻辑方案,实施需求响应完成削峰填谷,并将信息反馈至自动需求响应服务器,触发条件及执行逻辑均可预定,如果需要修改则将新的策略重新写入控制程序。

国外自动需求响应技术已开展了系统框架、运行模型及机制等研究,日本已经试验验证自动需求响应技术的可行性。国内在这方面刚刚起步,江苏、上海、山东已展开相关研究。

信息物理系统(cyber physical systems, CPS)能够支撑网荷间信息交互,支持多能需求响应用户侧设备接入被主动识别的功能,能使网荷侧信息快速达到协调共享。目前江苏、上海已建立 CPS 并融合了实时仿真平台,更全面的功能有待进一步开发。另一关键技术是网荷接口标准,国际上网荷通信较为主流的协议标准为美国的 OpenADR2.0,国内目前已发布行业标准《DL/T 1867—2018 电力需求响应系统信息交换规范》,有助于统一和规范设备通信接口,提高需求响应效率。

自动需求响应不同于传统的需求响应,特别是在自动化程度及对触发响应时间方面,二者的不同如表 1 所示。

其它各种能源的供需平衡的实时性远不如电能,自动需求响应从时效性方面来说主要在电力领域中发挥作用。而对于可靠性、自动化等方面来说,多种能源的自动需求响应也有其发展的必要性。

表 1 自动需求响应与传统需求响应对比

Table 1 Comparison between automatic demand response and traditional demand response

比较项目	自动需求响应	传统需求响应
自动化程度	高	低
信息反馈	实时双向传导	有延迟的单向传导
运行模式	在自动需求响应平台,多用户参与	电网公司实施,政府监管
用户激励	在市场中通过竞价得到激励	给与一定资金补偿或电费抵扣
支撑技术	智能终端、双向通信技术、能量管理系统、电力量测和评估技术	电力量测和评估技术、负控技术

2.2 储能技术

储能技术是指借助某种储能介质将能量储存,提高能源消费在时间上的灵活性的技术。电池储能属于电化学储能技术,因电化学储能不受地理环境限制、响应快、能够批量生产等特点,发展空间更为广阔。国内以磷酸铁锂电池为主,随着锂电池成本下降,锂电池的发展潜力巨大。钠硫电池在国外广泛用于负荷平衡,国内已有示范项目运营。电动汽车、充电桩等储能资源可实现源荷双向互动,是目前电能转移最好的控制方式,是非常优质的需求响应资源。储能资源低谷时段充电,高峰时段供电,能平衡电网峰谷负荷,对持有者来说能利用峰谷价差盈利。

随着用户的能源需求越来越多元化、综合化,电、热、冷系统的耦合程度日益加深,用户侧的储能配置亟需考虑电热冷储能系统的综合配置,使其可以为多能需求响应作支撑。

抽水蓄能、飞轮储能、压缩空气储能等属于物理储能技术,其中抽水蓄能技术最成熟、机组使用寿命长,利用电能与重力势能之间的能量转换,能够大规模存储电能,十分适合用来调峰。电容储能技术是利用超级电容器将电能储存在电场中,目前国内由于成本太高,市场占有率比较低。储热技术主要是靠储热材料的升温或相变来贮存和释放热能,经常与其他能源互补使用。冰蓄冷技术利用低谷电制冰蓄冷,在空调负荷高峰时冰融水供冷,能够调节峰谷负荷。

电容储能与飞轮储能的放电时间短但系统功率小,抽水蓄能与压缩空气储能系统的功率大但放电时间长,锂电池、钠硫电池系统的功率和放电时间范围较广。每种技术各有其优缺点,在目前的储能市场中仍保持多种技术共存的发展格局,未来高安全性、低成本、长寿命、易回收等相关技术的发展是储能领域的共同追求。

2.3 信息与通信技术

在多能需求响应中,用户端除了原有的可调节负荷外,另外会配置储能、电动汽车等分布式能源,具有源荷双向调节功能。

与传统的信息技术相比,区块链技术通过智能合约及加密手段等技术,记录所有交互信息并进行可靠共享,适应分散的多元能源系统结构。在用户端的能量管理系统中,通过区块链技术收录可交易的需求响应资源特征及风、光、储等能源市场的价格信号,能够在减少信息传递的同时促进资源整合,其强大的查询与统计功能通过大数据技术实现更高级的管理服务。P2P的去中心化交易方式也能够降低需求响应交易准入门槛,从而提高参与主体的多元性和积极性。已有研究表明分布式电源与用电设备信息传递后,整个需求响应过程能够实现自动交易和结算^[18]。

目前5G技术以其高可靠、低延迟、高网速、大容量以及能够可靠支撑大规模数据信息交互的特点,开启了互联网通信加控制的新时代,为能源的传输分配带来了创新的解决方案。在多能需求响应中,用户设备侧安装的终端,可通过5G技术通信,将设备数据发送到管理中心主站或者云端,并将云端的下发指令传输到终端。国网青岛供电局联合华为与中国电信开发建成的5G智慧电网试验网项目,一期工程已于2020年7月交付投产,是目前国内5G技术在电力系统中应用的尝试。

通信标准的统一制定,不仅能提升需求响应终端设备的兼容性,而且也有利于需求响应项目的推广。目前全国智能电网用户接口标准化技术委员会(SAC/TC 549)承担着标准体系建设工作,于2014年启动电力需求响应标准体系制定,相应的国家标准、行业标准等都在统筹制定中。较早使用的OpenADR标准因涉及付费授权与网络安全等问题,在行业标准《DL/T 1867—2018电力需求响应系统信息交换规范》发布后,将逐步被取代。

2.4 能源计量技术

区别于传统的需求响应,多能需求响应使用计量技术采集存储并分析多元用户端数据时,对采集数据的及时性、有效性和传输数据的快速性、可靠性要求更高。

在电力领域电力计量技术采集存储并分析用户端数据,采集数据的及时性、有效性和传输数据的快速性、可靠性关系着需求响应结果认定的精确度。量测体系实现网荷信息互动,为需求响应提供硬件支持,是部署需求响应的技术前提。我国从2019年起正式实施国家标准《GB/T 37016—2018

电力用户需求侧响应节约电力测量与验证技术要求》,该标准规定了参与需求响应的用户节约电力的测量与验证方案等。在多能领域的需求响应测量和验证技术还有待发展。

电力计量在应用中坚持稳定、成熟的技术路线,随着自控技术与通信技术的发展而不断进步,在应用中更高效安全,自动化智能化程度更高。

2.5 智能控制技术

多能需求响应需要对多种能源进行协调控制。智能控制技术是指在无人干涉情况下,具有一定的自主驱动实现目标控制的技术,是控制理论的高级发展阶段。自动控制技术在使用时,在设备控制中内置算法,被触发时实现控制功能,常用的算法有模糊控制、遗传算法、神经网络算法等。

目前在能量管理系统、智能电器及电网友好型设备等方面应用广泛,以满足智能电网及需求响应的要求。发展最快的是家庭能量管理系统,将整个家庭的电器连接成一个局部网,可实现远方遥控功能。此外,对分布式电源如储能、光伏、电动汽车等的协调控制也是智能控制的重要研究内容。

2.6 负荷聚合技术

区别于传统的需求响应,多能需求响应的负荷聚合对小容量的居民和商业用户的电、热、冷等多种能源进行聚合,其数量庞大但单个容量小,参与需求响应意愿较强且对社会经济影响小,但参与途径不畅,而负荷聚合技术将数量庞大且分散的中小用户的可调负荷与分布式能源,运用数学方法进行整合,形成具有一定规模的资源库,从而参与需求响应项目。

目前虽然负荷聚合技术方法较多,其中对于负荷的建模不易,建模的好坏直接影响聚合的效果。另外聚合结果多为总体资源潜力水平,分解至用户的方案不唯一。

3 多能需求响应技术发展方向与挑战

(1) 自动需求响应技术使电网运行更可靠稳定和经济,其发展以来通信技术、接口标准等一系列技术都在不断地进步,目前虽然受限于需求响应的运行机制限制及自动化的发展水平,但在未来是需求响应功能优化升级的大方向,从提升自动化水平和可靠性水平考虑,自动需求响应也可推广至多能系统。

(2) 储能技术虽然存在高成本、有技术瓶颈等问题,但近年来成本降低和性能提升较快,未来储能技术将在多能需求响应领域扮演更重要的角色。

(3) 区块链技术在多能交易研究方面较大的应用前景,鉴于其对于分布式交易的重要支撑作用,可以预期其在多能交易方面将提供重要的技术支持。特别是在5G通信的普及和应用下,区块链将成为需求响应商业模式的基础应用技术。

(4) 在智能控制技术方面,未来将配合自动需求响应,依托人工智能算法,实现对于用户用能特性的准确感知和精准控制,提升多能需求响应品质。

(5) 负荷聚合商是规模化需求侧资源应用的关键主体,通过准确把握负荷特性,将单个散布的需求侧资源聚合为体量客观的需求侧单元参与批发市场应用,可探索云储能、共享储能、虚拟电厂、虚拟能源站等多种商业模式,实现负荷聚合在多能领域的应用和发展。

4 结束语

电、热、气等多元能源的综合配置将提高能源利用效率,本文从能源互联网下多能需求响应的角度,介绍了多能需求响应视角下的自动需求响应技术、储能技术、信息与通信技术、电力计量技术、智能控制技术、负荷聚合技术的发展与应用,并对各技术的发展方向及面对的问题进行了总结分析。随着未来多能需求响应被广泛地接受,其发展空间将不断扩大,更深入地研究相关支撑技术也将变得越来越重要。▶

参考文献:

- [1] 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 Chaoyang, 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.
- [2] 邓建玲.能源互联网的概念及发展模式[J].电力自动化设备,2016,36(3):1-5.
DENG Jianling. Concept of energy Internet and its development modes[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 1-5.
- [3] 别朝红,王旭,胡源.能源互联网规划研究综述及展望[J].中国电机工程学报,2017,37(22):6 445-6 462.
BIE Zhaohong, WANG Xu, HU Yuan. Review and prospect of planning of energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6 445-6 462.
- [4] 杨旭英,周明,李庚银.智能电网下需求响应机理分析与建模综述[J].电网技术,2016,40(1):220-226.
YANG Xuying, ZHOU Ming, LI Gengyin. Survey on demand response mechanism and modeling in smart grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 220-226.
- [5] 宁艺飞,陈星莺,颜庆国,等.分时电价下大用户概率响应建模研究[J].电力需求侧管理,2017,19(1):22-28.
NING Yifei, CHEN Xingying, YAN Qingguo, et al. Research on modeling of large users probability response based on TOU price[J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(1): 22-28.
- [6] 周明,殷毓灿,黄越辉,等.考虑用户响应的动态尖峰电价及其博弈求解方法[J].电网技术,2016,40(11):3 348-3 354.
ZHOU Ming, YIN Yucan, HUANG Yuehui, et al. Dynamic critical peak price and its gaming approach considering customers' response[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3 348-3 354.
- [7] 李彪,万灿,赵健,等.基于实时电价的产消者综合响应模型[J].电力系统自动化,2019,43(7):81-90.
LI Biao, WAN Can, ZHAO Jian, et al. Real-time electricity price based integrated response model for prosumers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 81-90.
- [8] 张峰,李新家.源网荷互动终端可中断负荷选择与接入调试方法探讨[J].电力需求侧管理,2017,19(6):33-36.
ZHANG Feng, LI Xinjia. The discussion of the methods about selecting and inputting for testing interruptible load mechanism in power grid interactive terminal facilities[J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(6): 33-36.
- [9] 朱翰超,马蕊,孙聪,等.计及直接负荷控制的商业建筑型微电网优化运行方法[J].电力需求侧管理,2019,21(1):32-36.
ZHU Hanchao, MA Rui, SUN Cong, et al. Optimal operation method of commercial building microgrid considering direct load control[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(1): 32-36.
- [10] 曾鸣,韩旭,孙静惠,等.能源互联网背景下自动需求响应关键问题及展望[J].电力建设,2017,38(2):21-27.
ZENG Ming, HAN Xu, SUN Jinghui, et al. Key issues and prospects of automated demand response under energy Internet background[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(2): 21-27.
- [11] 李楠,黄礼玲,张海宁,等.考虑多能需求响应的电热互联系统协同调度优化模型[J].数学的实践与认识,2020,50(5):142-154.
LI Nan, HUANG Liling, ZHANG Haining, et al. Collaborative scheduling optimization model for electric-heat interconnect systems considering multiple demand response[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2020, 50(5): 142-154.
- [12] 胡兰丹,刘东,闫丽霞,等.考虑需求响应的CCHP多能互补优化策略[J].南方电网技术,2016,10(12):75-81.
HU Landan, LIU Dong, YAN Lixia, et al. Optimal multi-energy complementary strategy for CCHP considering demand response[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(12): 75-81.
- [13] 李澍.基于能源互联网的多能源统一建模分析[D].成都:电子科技大学,2018.
LI Shu. Unified modeling and analysis of multi-energy based on energy internet[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [14] 郑文明,钱宇轩,毛科伟,等.自适应多场景的单用户柔性负控效果评价算法[J].电力需求侧管理,2019,21(3):32-36.
ZHENG Wenming, QIAN Yuxuan, MAO Kewei, et al. Adaptive multi-scene single-user flexible load control effect evaluation algorithm[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(3): 32-36.
- [15] 杜行.计及需求响应技术的分布式光伏储能系统的优化研究[D].北京:中国地质大学,2019.
DU Xing. Research on the optimization of distributed photovoltaic energy storage system considering demand response[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.

(下转第18页)