

灵活互动的智能用电展望与思考

李 扬¹, 王蓓蓓¹, 李方兴²

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏省南京市 210096;

2. 田纳西大学电气工程与计算机科学系, 田纳西州诺克斯维尔市 TN 37996, 美国)

摘要: 智能用电作为智能电网的重要环节, 实现了电网和用户的灵活双向互动, 给用电模式带来了巨大变化。文中旨在总结智能用电的关键内容, 梳理智能用电的相关理论、技术和机制, 分析智能用电的现状和趋势, 探讨未来的研究方向, 为推动智能用电发展提供借鉴和参考。首先从需求响应相关理论研究入手, 研究需求侧资源的响应机理, 探讨优化配置需求侧资源的途径; 其次, 分析智能用电灵活互动技术的实现, 促进理论模型的工程应用; 进而总结智能用电的商业运行模式, 分析外部环境、政策配置、技术标准化等对智能用电的影响; 最后讨论了智能用电在促进系统绿色运行和新技术融合等方面的延伸应用。

关键词: 智能用电; 需求响应; 双向互动; 商业模式

0 引言

传统电力系统, 作为人类到目前为止构建的最庞大、复杂的系统, 诞生至今已历经百年, 并一直朝着实现更强壮的电网, 更高的发电效率, 和更低的输配损耗的发展目标不断努力^[1]。

伴随着全球化、市场化进程的加快和各类新兴技术的发展, 电力系统也面临着新的机遇和挑战^[2]。作为其中典型代表的智能电网的发展引领了能源领域的重大变革。而智能用电是智能电网的重要环节, 直接面向社会和用户, 将供电端到客户端的重要设备, 通过灵活的电力网络、高效设备和信息网络相连, 形成高效完整的用电和信息服务网络, 通过电网和用户的灵活双向互动实现电力资源的最佳配置^[3]。

智能用电同时带来了用电模式的变化: 一是电力用户由消费者转变为消费者和供应者的双重身份^[4]; 二是分布式电源、储能、电动汽车、需求响应等多种新型用电形式出现^[5]; 三是各类先进理念和技术不断出现, 社会对供电服务的需求日趋多样化^[6]。当前亟须探索与之适应的理论模型、支撑技术、运行机制等, 满足智能用电的发展需求。

基于上述分析, 本文将总结概括智能用电的关键内容, 梳理智能用电的相关理论、技术、机制等, 分析智能用电的现状和趋势。首先从需求响应相关理论研究入手, 研究需求侧资源的响应机理, 探讨电网角度优化配置需求侧资源的途径; 其次, 分析智能用电关键技术实现, 通过技术促进理论模型的工程应用, 发挥智能用电的积极效用; 进而研究智能用电的商业运行模式, 分析外部环境、政策配置、技术标准化等对智能用电的影响, 从机制上促进智能用电的推广和发展。

此外, 智能用电的本意旨在提高系统可靠性、降低电价波动等, 但同时智能用电在促进系统绿色运行和新技术融合等多方面也有一定的积极效用^[7-8], 如: 新能源消纳、电动汽车发展等, 本文最后将分析智能用电的相关延伸应用。

1 智能用电用户响应机理研究

智能用电的发展使电力系统的发电侧和需求侧两端面临着前所未有的考验。在发电侧, 以风电、光伏为代表的间歇性新能源装机容量正在迅速增加, 但出力调节困难的火电和核电的单体装机规模日益大型化, 发电侧变得更加难以调节。在需求侧, 随着电动汽车的大规模普及, 人类社会对电能的需求将急剧增加。然而, 全球城市人口的高度集中化将会进一步加剧部分地区电力负荷激增, 从而威胁电网的正常稳定运行。

在这样的背景下, 如何利用互联网、云计算和大

收稿日期: 2015-07-30; 修回日期: 2015-08-16。

国家自然科学基金资助项目(71471036, 51277028); 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2015AA050401); 国家电网公司科技项目“柔性负荷参与地区电网调度的关键技术研究与应用”。

数据等新兴技术的优势,协调调度电力系统中各种可用资源,实现电网柔性发用平衡,强调负荷和发电资源的灵活协调配合,将成为未来电力系统能否稳定运行的关键^[2]。

1.1 需求响应资源的建模

智能电网环境下通信技术发展以及相应基础设施的建设,用电设备与电网设备的实时信息交互成为了可能^[9]。基于实时交互的信息,电网企业可以对整个系统实现优化调度,并能够利用大数据分析技术,对不同电力消费群体的用能习惯进行分析,来制定针对不同消费群体的精细差别电价,奖励灵活互动用户,并同时惩罚顽固消极用户。同时,电力用户们可以通过智能能量管理系统(或智能网关),根据实时信息帮助家庭用户,公共设施以及生产企业节能减排,并实现削峰填谷以减少电费支出。这样,未来电力系统将进化成一个以市场为导向的,服务化的,动态的,开放的能源互联网,并通过这个以互联网理念构建的平台为电网公司和多元化的用户服务提供支撑^[10]。

然而,用户终端负荷的复杂性,用户用电习惯的多样性给负荷的建模和实现智能需求侧优化调度带来了空前的挑战。因此,目前的研究主要侧重于:①面向调度中心需求的,需求响应不确定性资源建模,该模型需计及气象环境、外界经济激励及用户差异化需求模式等多因素的影响;②分析经济手段、社会人口学等在激励用户配合需求响应的作用,进而建立用户在需求侧调控中用电行为的概率预测模型。

随着大量间歇性新能源的入网,需求响应资源建模未来将朝着快速响应柔性负荷的控制模型、提供多维时间尺度的备用指标模型等方面发展。

1.2 需求响应在虚拟电厂中的功能

虚拟电厂指的是由能量管理系统和其所控制的小型分布式能源资源组成的集成性电厂。虚拟电厂运营商借助先进的电力电子、通信、储能技术,在各种不同类型不同出力方式的电源之间进行柔性切换,如风电、光伏组件、微型水电站以及需求响应资源等,满足电力用户特定的需求^[11]。

国内外现有的虚拟电厂研究主要由分布式电源和可直接控制的空调和取暖设备组成,忽略了需求响应资源在虚拟电厂中的重要作用。然而,通过建立特定区域内用户基于一定经济补偿下的集中需求响应潜力期望值以及可靠性的关联模型,可以将需求响应引入虚拟电厂的组合优化调度模型,从而将需求响应作为一种可以共同参与系统资源调度,以提高虚拟电厂调度的经济性和环境友好性^[12]。

因此,该领域未来的研究重点应侧重于如何借助未来能源互联网信息的双向互动的优势,将用户的集中需求响应引入虚拟电厂调度运营中,从而降低系统运行成本,减少被迫削减的负荷和额外的切风弃光等可再生能源流失。此外,如何依靠大数据分析平台,在虚拟电厂模型的基础上解决不确定性的动态需求响应资源引入难的问题,来进一步优化提高系统可靠性,降低风险成本也是值得关注的。

1.3 源网荷综合资源优化

实时信息的交互使得电网调度员更容易和及时地获知用户用电状态及用户参与电网能量互动。高级量测体系可以对用户用电数据进行监测、分析和预警,实现用电行为优化。得益于大数据相关技术(并行数据库、大数据传输和存储技术、数据挖掘技术、云计算技术等),在电力系统各环节的逐步应用,需求侧可调用资源数量和容量得到了极大的增长,并能够被高效地处理和分析,从而实现智能用电环境下源网荷能量流、信息流、业务流的双向互动^[13]。

但当前如何在更大地域范围和更广阔时间尺度方面的需求侧和发电侧的优化协调运行规划尚处于研究阶段。该领域未来大量的研究工作应侧重于新能源消纳的经济性分析,系统安全约束,以及考虑不确定性的需求侧激励机制设计等。

2 智能用电灵活互动技术实现

智能用电旨在为用户提供优质的供电服务,并提高电能的利用效率。智能用电在技术上以高级量测体系(AMI)系统及终端技术为支撑,涵盖了高速通信技术、智能电表技术、智能用电交互终端技术,用户侧能量管理技术、智能用电服务系统技术支持平台等多个方面。

2.1 高速通信技术

智能用电技术的发展,对配电通信网的可靠性、传输能力的要求也在不断提高。由于智能用电环节的通信网络规模大、结构复杂,涉及的用电设备和信息不仅多而且分散,单一的通信方式不能满足智能用电可靠性与传输能力的要求,因此需要采用以光纤网络为主干,无线技术、电力载波等通信方式为补充的网络结构^[14-15],以满足用电信息采集、用能服务、业务数据的交互等多种通信需求。

国内外对于智能用电通信网络已开展了广泛的研究,但在实际建设中仍然存在着缺乏总体规划、通信接口不兼容、业务网络相互孤立、通信资源浪费等很多问题。如何对智能用电环节的通信网络进行综合全面地规划,并开展通信网络的标准化工作,是目前迫切需要解决的问题。

2.2 智能电表技术

智能电表是智能用电的基础单元和核心设备。智能电表可实现以下四方面的功能:①自动抄表、自动测量管理;②支持实时电价、激励电价、紧急峰值电价等电价机制;③实现用电设备运行状况的诊断与评估;④实现用电设备的远程控制。

从国内目前关于智能电表的大量实践来看,目前居民用户所安装的智能电表中,最普遍采用的是自动远程抄表、双向计费的功能(即上述功能①和②),而其他高级功能,例如用电设备运行状况的诊断、自动负荷管理等,在大量已安装的智能电表中暂时还不具备。而这些高级功能可由智能用电交互终端来完成^[16]。

2.3 智能用电交互终端技术

智能用电交互终端在整个智能用电技术体系中承担着用户终端“信息交互窗口”“业务操作平台”以及“用能管理平台”的重要作用^[10]。交互终端设备包括笔记本、平板电脑(Pad)、智能手机或其他交互终端等,这些终端设备可以通过客户端软件与综合业务网关进行交互^[17]。

用户可以通过各类终端设备及时地获知用电信息、电价、预付电费、剩余电费、告警信息以及电价政策等相关内容,可以随时随地支付相关费用,并通过可视化界面接受小区信息、社区服务等增值服务^[18]。

尽管目前国内外已经出现了大量智能用电交互终端的产品及其软件,但在终端设备的软件可移植性及可扩展性,服务内容的深度和广度,以及交互手段的丰富性等方面,尚需进一步的拓展和提高。

2.4 用户侧能量管理系统

用户侧能量管理系统是指能够通过调整用户用电设备的负荷或储能设备的充放电,来适应电网的需求或电价变化的自动化系统。通过对用电设备进行能量管理,以达到节约能源、保证用电安全、减少电费支出、提高电网稳定性等目的^[19]。

用户侧能量管理系统可以使用户通过智能用电交互终端读取用电设备所消耗的功率,查看分布式发电装置产生的电力等情况,并根据需要进行相关操作。用户侧能量管理系统还可以通过有线、无线等传输方式将用电信息传至电力相关部门,方便对用户用电信息进行分析,合理安排电力生产。当然,用户也可接收电力部门发送的电价等信息,合理安排日常用电。

目前国内外已经对用户侧能量管理系统开展了很多实践,微软、谷歌等公司开发了一系列相关产品,使用户侧能量管理系统服务于人们的日常生活。

尽管用户侧能量管理系统在技术上已积累了丰富经验^[20],然而其产业化、长期的推广尚需要社会各方的共同努力。

2.5 智能用电服务系统技术支持平台

电网企业传统的用电服务主要包括营业厅服务、现场服务、有偿服务以及 95598 服务等。随着智能用电的开展,对传统的用电服务提出了新的要求。智能用电服务系统技术支持平台(以下简称“平台”)是电网企业完成智能用电双向互动式服务和营销业务应用的核心技术支撑平台,为电力用户提供互动化的信息、业务受理、缴费以及其他辅助服务。

在信息共享方面,“平台”将传统用电服务的内容进行进一步的开发和整合,与用户实现全面的数据共享,从而使用户能够通过智能用电交互终端实时查询电量、电费等信息;在业务办理及缴费方面,“平台”支持用户能够通过各种虚拟方式(网站、应用软件)办理业务和缴费;在分布式电源的支撑技术方面,“平台”能够支持风电、光伏、电动汽车以及储能的双向计量;在新型用电服务方面,“平台”能够对电力用户提供能效分析、电能质量检测等服务。

目前电网企业的用电服务系统已经能够实现“平台”的大部分功能,并且已在厦门开展了智能服务平台的智能用电试点项目^[17]。在今后的发展中,电网企业还应当及时反馈电力用户的用电需求,对“平台”进行必要的更新和改进,从而为电力客户提供更加智能化、多样化、互动化的用电服务。

3 智能用电商业运营模式

灵活互动智能用电的大面积推广需要建立在商业化的基础之上。商业化必然要求需求侧参与到电力市场中,会对传统的电力市场造成冲击,催生新的市场主体和市场业务,扩展市场交易模式。除此之外,成功的商业运营离不开政策和技术的支持、社会环境的支持,以及合理的智能用电项目设计、运作和管理。

本节将主要从外部市场环境、政策与规则、商业运营模式、宣传和引导、技术的标准化过程等方面总结智能用电的商业运营模式及外部条件。

3.1 智能用电与市场环境融合

智能用电允许电力用户以需求响应的形式参与到电力系统运行,但需求响应项目的有效实施依赖于能够发现需求响应资源价值的市场机制^[21]。

需求侧参与市场的先决条件是电网的所有权解捆和独立系统运营商(ISO)的引入。因为当获利与售电量直接挂钩时,智能用电项目与公司盈利相矛盾,电网公司缺乏实施项目的动力^[22-23]。

在传统市场运作良好的前提下,ISO 可将需求响应逐步融入到已有的电力市场中^[24],给予了需求侧与发电侧相当的权利。该过程也催生了新的市场主体并拓展了已有市场主体的业务范围^[25]。在需求响应参与市场运营较为成熟的地区可进一步完善需求响应参与电力市场的方式^[26]。

3.2 智能用电的政策与规则设计

智能用电的建设与推广涉及电力公司、用户、第三方服务商、政府等多个参与方,为确保各参与方协同工作,分级分类的政策与规则设计必不可少。

以美国的政策架构为例,智能用电的相关政策可分为联邦机构制定的法律法规和州立制定的政策和规则。前者主要是各类指导性原则;后者则主要集中在四种政策的制定上:电量净计量政策、分布式电源并网规则、智能量测目标和电价政策^[27]。政府根据反馈的项目的执行效果来出台新规则或对已有规则进行相应调整。

政策的逐级细化与实施效果的及时反馈有助于建立可操作性较强的智能用电政策,进而保证了智能用电项目的广泛开展。

3.3 智能用电的项目商业运营模式

商业性运营有助于智能用电的普及和长期发展,也能让用户分享智能电网的建设成果。常见的智能用电项目包括各类需求响应项目、智能电表项目、电动汽车项目、智能楼宇和智能社区、智能交通项目、分布式能源接入项目、用能管理项目等^[8,28]。用户参与智能用电项目的方式有合同制和相对灵活的其他方式^[29]。

项目按实施主体可分为第三方机构主导、政府主导和电力公司主导三种^[30],其中电力公司主导模式最为常见,但随着智能电网的发展第三方主导的模式也日益普遍^[31]。项目运营模式主要包括公司投资,自营业务的独立运营模式;政府投资并委托电力公司开展项目或公司投资并委托第三方开展业务的运营模式;多方投资,协同开展业务的合作运营模式^[32]等。融资渠道通常有从电价中提取、政府财政专项资金、排污税或污染税等^[33]。

由于智能用电项目投资大,短期成本回收效果不明显^[34],为促进项目实施,部分智能用电项目对实施主体和参与用户设置了激励机制^[35]。前者主要有补贴机制、奖励金机制、获利分享的机制、收入和售电量分离的机制;后者主要有折让激励、免费安装激励、节电特别奖励、电价激励以及基于激励的需求响应项目的补偿等^[36]。

项目管理大致可分为:研究与计划、审批与监管、管理与评估三个步骤,评估结果还将对下一步项目开展的研究与计划起指导作用^[37]。深入探讨市

场参与主体之间的关系以及准确量化不同主体在项目中获得的效益也是今后需继续研究的方向。

3.4 智能用电的宣传引导支持

美国能源部的调查显示智能用电的项目是否有效开展严重依赖于用户对于项目的了解程度,引导用户接受并参与智能用电,对推广智能用电至关重要^[38]。

用户交流与教育方面,由于多样的激励机制和复杂的终端设备给用户带来了理解和使用的不便,APP、门户网站、社交媒体、邮件短信等宣传手段必不可少。

社会机构参与方面,本地社区在用户教育以及反馈公众意见上有天然的优势,可在智能用电的早期发挥重要作用,地方非营利机构的参与也有助于项目的实施。

今后需继续探索更加智能化、个性化的宣传引导手段,满足用户的多样化需求,提升智能用电的推广效果。

3.5 智能用电技术的标准化过程

为促进智能用电各参与方的协调配合,需要建立统一、规范的信息接口标准,以实现系统和设备的互操作,保证智能用电业务的开展。

技术标准常见的制定方式有政府主导成立相关部门制定、标准化组织负责制定和逐步推广地方标准等。主要智能用电相关标准有自动需求响应通信规范(OpenADR)、AS 4755、IEC 62746 标准草案、智能能源规范 SEP2.0、OASIS 标准等^[39]。

目前,智能用电的相关标准的国际化在进行中。IEC SMB 成立了智能电网用户接口项目委员会 IEC PC118,旨在推动智能电网用户接口标准和 DR 标准的开发,最终形成 IEC 国际标准^[40]。

商业运营模式及外部环境如图 1 所示。

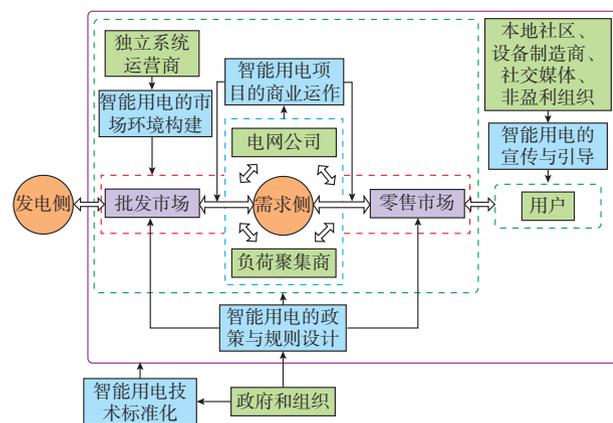


图 1 商业运营模式及外部环境示意图
Fig.1 Schematic diagram of commercial operation mode and external environment

4 智能用电延伸应用

灵活互动智能用电通过支持和引导用户参与供需平衡,扩展了电力市场交易模式,调节了价格形成机制^[41],改变了传统的用电服务模式,为用户提供了多元化用电服务,并对系统安全、绿色运行的多个方面都产生了积极影响。如:推动市场机制的发展和新技术的应用,促进电源、电网及负荷之间的协调互动,提升新能源消纳水平,提高系统用能效率和资源的优化配置水平等。

本节将探讨总结智能用电与新能源消纳、电网与电动汽车互动、能效改善、大数据应用、能源互联网等的关系及其积极效用。

4.1 智能用电与新能源消纳

风电等新能源具有随机性、波动性和间歇性等特点,给系统调度和运行带来新的挑战。灵活互动智能用电的发展为新能源消纳提供了新的途径,现有研究主要从理论模型和配套运行机制等方面展开。根据新能源接入形式不同,智能用电与新能源消纳关系主要体现在以下几个方面。

在大规模集中接入的模式下,新能源的波动性和反调峰特性更为明显,增加了对系统调峰资源、辅助服务等的需求。需求响应引导用户进行负荷需求的调整,作为灵活互动资源以调峰、提供辅助服务等形式参与电网能量互动,可以有效降低新能源接入影响,包括提高新能源利用效率,降低系统运行成本,缓解网络阻塞影响,提升减排效益等。

在分布式系统中,通过高级能量管理技术实现对储能、电动汽车和分布式能源的协调优化控制,提升分布式新能源的利用效率。

目前研究主要侧重于新能源消纳的经济性分析,今后的研究需更多关注系统安全约束、新能源和需求响应不确定性的影响以及促进新能源消纳的激励机制设计等,为其工程应用打下坚实基础。

4.2 智能用电环境下电网与电动汽车互动技术

电动汽车是智能用电环境下重要的友好互动资源,电网与电动汽车的互动主要指利用电动汽车的储能性质,通过电动汽车接入电网(vehicle to grid, V2G)技术^[42]协调充放电行为并参与电网运行,可实现削峰填谷、平抑新能源波动等效用^[43]。研究内容主要涉及:电动汽车充电行为建模、充放电行为控制策略、充电设施规划、效益评估、电网与电动汽车互动运行机制,充放电行为对电网的影响等。

当前研究侧重分析互动对电网运行的促进作用,对电动汽车随机接入对电网稳定运行的影响关

注不足,尚需全面评估电动汽车对电网的影响并制定相应的改善措施,并进一步探索电动汽车商业运营模式,全面提升电网与电动汽车的互动水平和效益。

4.3 智能用电与能效改善技术

能效改善不等于简单的节能,需要在不影响特定服务或性能前提下减少能源使用^[44]。智能用电精细化、互动化的用电服务模式引导了能效技术的发展革新,主要包括基于信息互动的能效提升和基于公共服务平台能效服务等。

智能用电的信息互动提升了信息传递效率,一方面便于用户参与电网能量互动,优化用户用电行为,提升电网运行效率;另一方面基于AMI的采集数据,利用远程传输手段,实现对重点耗能客户的用电数据采集和实时监测、设备健康状况及能耗情况分析、能效评测和诊断等,制定针对性的节能技改措施,并为客户提供设备巡检、安全诊断、维护检修等延伸服务。

智能用电推动了用电服务模式的改变,基于公共服务平台的用户用能服务是提高用电营销管理与服务水平的重要部分,也是提升用户用能管理服务能力的关键。通过需求侧管理理论、电能监测、分析、优化、管理技术、现代通信和物联网技术、集群数据库管理技术、海量数据处理技术和信息安全等技术的整合对用户能效进行全面分析诊断,为用户提供整套能效解决方案。

在节能减排的背景下,能效改善技术得到了广泛关注,但在能效评测方法及规范、能效智能诊断模型、能效机制推广、能效标准及指标体系建设、公共服务模式等方面仍需完善。

4.4 智能用电领域的大数据分析及应用

伴随着物联网和云计算等技术的发展使大数据成为各界关注的热点问题,大数据技术可贯穿应用于电力系统的各个环节,主要涉及并行数据库、大数据传输和存储技术、数据挖掘技术、云计算技术等^[13]。

在智能用电领域,智能电表、传感器等的普及使用户侧数据的数量和复杂程度增加^[45],通过大数据技术实现的对用户侧数据的高效处理分析,是实现智能用电环境下电网与用户能量流、信息流、业务流双向互动的关键。具体应用主要包括:经济运行与电力供需关联分析、负荷特性分析、用电特征挖掘、负荷预测、用电能耗分析与用电优化、用能数据综合服务平台等,为用户节能、电网营销决策和多元化用

户服务等提供支撑。

目前该领域研究尚处于初级阶段,仍需在大数据关键技术应用、效益评估、风险防范等方面进行深入探索。

4.5 智能用电与能源互联网

能源互联网是以互联网思维与理念构建的新型信息-能源融合网,旨在提供便捷的能源接入和消费平台,其核心内涵之一是实现可再生能源的有效利用^[9-10]。智能用电与能源互联网紧密相连,智能用电中基于微网的分布式能源、自动需求响应等技术与能源互联网的目标深度融合,能源互联网的网络化、智能化和智能交互为智能用电多技术融合提供了平台/载体。

能源互联网概念提出时间较短,相关的顶层设计也在制定中,该领域大量研究工作都有待开展,包括:机制设计、技术支持、系统建模、优化调度设计、标准规范、信息安全等。

5 结论

本文分别从智能用电(需求响应机理)理论研究、技术实现、运营模式和延伸应用等角度入手总结了智能用电的发展现状和趋势,以期为推动中国智能用电发展提供借鉴和参考。该领域未来的发展方向将侧重于以下方面。

1)利用互联网、云计算和大数据等新兴技术的优势,协调调度电力系统中各种可用资源,实现电网柔性发用平衡。

2)在互动技术实现方面需重点关注网络通信的标准化、终端设备的软件可移植性及可扩展性,服务内容的深度和广度,以及交互手段的丰富性等方面,同时各种技术的市场化推广也是一个重要问题。

3)智能用电激励政策、商业运作模式探索,尝试更加智能化、个性化的宣传引导手段,满足用户的多样化需求,提升智能用电的推广效果。

4)未来随着智能用电的推广普及,在新能源消纳、电网与电动汽车互动、能效改善、大数据应用、能源互联网构建等方面均会产生深远影响,需重点关注其延伸应用,以期实现更大的社会效益。

参 考 文 献

[1] U.S. Department of Energy. The smart grid: an introduction [R]. 2009.

[2] 余贻鑫,刘艳丽.智能电网的挑战性问题[J].电力系统自动化,2015,39(2):1-5.

YU Yixin, LIU Yanli. Challenging issues of smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 1-5.

[3] 李同智.灵活互动智能用电的技术内涵及发展方向[J].电力系统

自动化,2012,36(2):11-17.

LI Tongzhi. Technical implications and development trends of flexible and interactive utilization of intelligent power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 11-17.

- [4] 盛万兴,史常凯,孙军平,等.智能用电中自动需求响应的特征及研究框架[J].电力系统自动化,2013,37(23):1-7.
- SHENG Wanxing, SHI Changkai, SUN Jun, et al. Characteristics and research framework of automated demand response in smart utilization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(23): 1-7.
- [5] 李威,丁杰,姚建国.智能电网发展形态探讨[J].电力系统自动化,2010,34(2):24-28.
- LI Wei, DING Jie, YAO Jianguo. Views on smart grid evolution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 24-28.
- [6] 葛磊蛟,王守相,张明,等.智能用电条件下用户用能管理与服务平台[J].电力自动化设备,2015,35(3):152-156.
- GE Leijiao, WANG Shouxiang, ZHANG Ming, et al. Power usage management and service platform in smart electricity utilization condition[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 152-156.
- [7] 姚建国,赖业宁.智能电网的本质动因和技术需求[J].电力系统自动化,2010,34(2):1-4.
- YAO Jianguo, LAI Yening. The essential cause and technical requirements of the smart grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 1-4.
- [8] 王广辉.中国智能用电的实践与未来展望[J].中国电力,2012,45(1):1-5.
- WANG Guanghui. Practice and prospect of China intelligent power utilization[J]. Electric Power, 2012, 45(1): 1-5.
- [9] 曹军威,孟坤,王继业,等.能源互联网与能源路由器[J].中国科学:信息科学,2014,44(6):714-726.
- CAO Junwei, MENG Kun, WANG Jiye, et al. An energy Internet and energy routers [J]. Science China: Information Science, 2014, 44(6): 714-726.
- [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: basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11.
- [11] ZURBORG A. Unblocking customer value: the virtual power plant[M]. World Power, 2010.
- [12] 牛文娟,李杨,王蓓蓓.考虑不确定性的需求响应虚拟电厂建模[J].中国电机工程学报,2014,34(22):3630-3637.
- NIU Wenjuan, LI Yang, WANG Beibei. Demand response based virtual power plant modeling considering uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3630-3637.
- [13] 宋亚奇,周国亮,朱永利.智能电网大数据处理技术现状与挑战[J].电网技术,2013,37(4):927-935.
- SONG Yaqi, ZHOU Guoliang, ZHU Yongli. Present status and challenges of big data processing in smart grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 927-935.

- [14] 雷煜卿, 李建岐, 侯宝素. 面向智能电网的配用电通信网络研究[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 14-19.
LEI Yuqing, LI Jianqi, HOU Baosu. Power distribution and utilization communication network for smart grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 14-19.
- [15] 曹津平, 刘建明, 李祥珍. 面向智能配用电网络的电力无线专网技术方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 76-80.
CAO Jinping, LIU Jianming, LI Xiangzhen. A power wireless broadband technology scheme for smart power distribution and utilization networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 76-80.
- [16] 史常凯, 张波, 盛万兴. 灵活互动智能用电的技术架构探讨[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2868-2874.
SHI Changkai, ZHANG Bo, SHENG Wanxing, et al. A discussion on technical architecture for flexible intelligent interactive power utilization[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2868-2874.
- [17] 林弘宇, 张晶, 徐鲲鹏, 等. 智能用电互动服务平台的设计[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 255-259.
LIN Hongyu, ZHANG Jing, XU Kunpeng, et al. Design of interactive service platform for smart power consumption[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 255-259.
- [18] 刘伟. 智能用电关键技术的应用探讨[J]. 科学导报, 2014(20): 158.
LIU Wei. Discussion on the key technologies of smart power consumption[J]. Science Guide, 2014(20): 158.
- [19] 王伟, 何光宇, 万钧力. 用户侧能量管理系统初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 10-15.
WANG Wei, HE Guangyu, WAN Junli. Preliminary investigation on user energy management system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 10-15.
- [20] 曹志刚. 智能配用电园区用户侧双向互动功能的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9): 79-83.
CAO Zhigang. Design and implementation of user interaction in smart power distribution and utilization park[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 79-83.
- [21] MANAGAN K. Demand response: a market overview[R]. Institute for Building Efficiency of Johnson Controls Inc., 2014.
- [22] PALENSKY P, DIETRICH D. Demand side management: demand response, intelligent energy systems, and smart loads [J]. IEEE Trans on Industrial Informatics, 2011, 7(3): 381-388.
- [23] TORRITI J, HASSAN M G, Leach M. Demand response experience in Europe: policies, programs and implementation [J]. Energy, 2010, 35(4): 1575-1583.
- [24] WALAWALKAR R, FERNANDS S, THAKUR N, et al. Evolution and current status of demand response (DR) in electricity markets: insights from PJM and NYISO [J]. Energy, 2010, 35(4): 1553-1560.
- [25] The California Public Utilities Commission. California demand response: a vision for the future[EB/OL]. [2015-07-21]. <http://www.caiso.com/1fe3/1fe3ebb5d860.pdf>.
- [26] Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. Coordination of retail demand response with Midwest ISO wholesale markets[R/OL]. [2015-07-16]. https://eaei.lbl.gov/sites/all/files/REPORT_lbnl-288e_0.pdf.
- [27] BROWN M A, ZHOU S. Smart-grid policies: an international review [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, 2013, 2(2): 121-139.
- [28] 沈昌国, 李斌, 高宇亮, 等. 智能电网下的用电服务新技术[J]. 电气技术, 2010(8): 11-15.
SHEN Changguo, LI Bin, GAO Yuliang, et al. The new technology for smart grid power electricity utilization [J]. Electrical Engineering, 2010(8): 11-15.
- [29] 王蓓蓓. 面向智能电网的用户需求响应特性和能力研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3654-3663.
WANG Beibei. Research on consumers' response characteristics and ability under smart grid: a literatures survey [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3654-3663.
- [30] 裴丽君. 美国和日本需求响应运作模式和激励机制[J]. 电力需求侧管理, 2013(2): 57-60.
PEI Lijun. Analysis and experience of demand response operation mode and incentive mechanism overseas[J]. Power Demand Side Management, 2013(2): 57-60.
- [31] U.S. Department of Energy. Future of the grid: evolving to meet America's needs, December 2014[R/OL]. [2015-07-05]. <http://energy.gov/oe/downloads/future-grid-evolving-meet-america-s-needs-december-2014>.
- [32] 黄莉, 卫志农, 韦延方, 等. 智能用电互动体系和运营模式研究[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2230-2237.
HUANG Li, WEI Zhinong, WEI Yanfang, et al. A survey on interactive system and operation patterns of intelligent power utilization[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2230-2237.
- [33] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Energy incentive programs [EB/OL]. [2015-07-20]. <http://energy.gov/eere/femp/energy-incentive-programs>.
- [34] 李扬, 孙宇军, 王蓓蓓. 智能电网下需求响应实施模式和激励机制研究[J]. 供用电, 2014(3): 28-31.
LI Yang, SUN Yujun, WANG Beibei. Research on demand response and implementation patterns and incentive mechanism in smart grid[J]. Distribution & Utilization, 2014(3): 28-31.
- [35] Mossavar-Rahmani Center for Business and Government. Providing incentives for efficient demand response[EB/OL]. [2015-07-20]. http://www.hks.harvard.edu/fs/whogan/Hogan_Demand_Response_102909.pdf.
- [36] CA Public Utilities Commission. Energy efficiency program administration: options and issues [EB/OL]. [2015-07-11]. <http://www.cpuc.ca.gov/NR/rdonlyres/C93E41C3-9115-4258-B810-6E109A385BB8 / 0 / GoldmanCPUCWorkshopEECharlesGoldman3PPresentationProgramAdministration.pdf>.
- [37] 田世明, 王蓓蓓, 张晶. 智能电网条件下的需求响应关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3575-3589.
TIAN Shiming, WANG Beibei, ZHANG Jing. Key technologies for demand response in smart grid [J].

- Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3575-3589.
- [38] U.S. Department of Energy, Smart Grid Investment Grant Program. Customer participation in the smart grid-lessons learned[EB/OL]. [2015-07-11]. <http://www.energy.gov/oe/downloads/customer-participation-smart-grid-lessons-learned-september-2014>.
- [39] 张晶,王婷,李彬.电力需求响应技术标准化研究[J].中国电机工程学报,2014,34(22):3623-3629.
ZHANG Jing, WANG Ting, LI Bin. Research on technical standardization for electric demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3623-3629.
- [40] 高赐威,梁甜甜,李慧星,等.开放式自动需求响应通信规范的发展和综述[J].电网技术,2013,37(3):692-698.
GAO Ciwei, LIANG Tiantian, LI Huixing, et al. Development and application of open automated demand response[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 692-698.
- [41] 王锡凡,肖云鹏,王秀丽.新形势下电力系统供需互动问题研究及分析[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5018-5028.
WANG Xifan, XIAO Yunpeng, WANG Xiuli. Study and analysis on supply-demand interaction of power systems under new circumstances [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5018-5028.
- [42] KEMPTON W, TOMIĆ J. Vehicle-to-grid power implementation: from stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy[J]. Journal of Power Sources, 2005, 144(1): 280-294.
- [43] 胡泽春,宋永华,徐智威,等.电动汽车接入电网的影响与利用[J].中国电机工程学报,2012,32(4):1-10.
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10.
- [44] BOSHELL F, VELOZA O P. Review of developed demand side management programs including different concepts and their results [C]// Bogota: Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES, 2008: 1-7.
- [45] 王德文,孙志伟.电力用户侧大数据分析与并行负荷预测[J].中国电机工程学报,2015,35(3):527-537.
WANG Dewen, SUN Zhiwei. Big data analysis and parallel load forecasting of electric power user side[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 527-537.

李 扬(1961—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力市场和需求侧管理。E-mail: li_yang@seu.edu.cn
王蓓蓓(1979—),女,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:电力市场和需求侧管理。E-mail: wangbeibei@seu.edu.cn

李方兴(1973—),男,博士,教授,博士生导师,IEEE PES PSPI 委员会副主席,北美中国电力专业协会(NACPPA)董事,IET 资深会员,北卡罗来纳州注册专业工程师(P.E.),主要研究方向:新能源接入、需求响应、电力市场、分布式能源和智能电网。E-mail: fli6@utk.edu

(编辑 代长振)

Outlook and Thinking of Flexible and Interactive Utilization of Intelligent Power

LI Yang¹, WANG Beibei¹, LI Fangxing²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. The University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA)

Abstract: Being an important segment of smart grid, intelligent power utilization addresses the flexible bilateral interaction between power grid and users, which leads to great changes in the power consumption mode. In order to provide references for the developing intelligent power utilization, several key research issues, such as the related theory and technology and operation mechanisms, are summarized. The current status and trends of intelligent power utilization and the important problems that need to be further studied are discussed in this paper. Based on the theories of demand response (DR), the response mechanism of DR resources is studied to obtain optimal allocation. Then, the bi-directional interactive technology implementations are analyzed to promote engineering application of theoretical models. Furthermore, the commercial operation modes of intelligent power utilization, the impacts of electricity market environment, relevant policies, and technology standardization are all summed up. Extended applications of intelligent power utilization on the power system's green operation and the blend with new technology are briefly treated.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 71471036, No. 51277028), National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2015AA050401) and State Grid Corporation of China.

Key words: intelligent power utilization; demand response; bi-directional interactive technology; commercial operation modes