

智能电网条件下的需求响应关键技术

田世明¹, 王蓓蓓², 张晶¹

(1. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192; 2. 东南大学, 江苏省 南京市 210096)

Key Technologies for Demand Response in Smart Grid

TIAN Shiming¹, WANG Beibei², ZHANG Jing¹

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

2. Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: At present, smart grid has become a general development trend of the grid, it can meet the development requirements of the society. This paper deeply analyzed and summarized the development of demand response (DR) in smart grid. Firstly, an investigation of the current situation of domestic and foreign demand response had been made. Secondly, this paper tried to summarize DR related research status from several aspects, such as basic definition of demand response, benefits analysis and incentive mechanism design, support platform technologies, integration of wind power and so on. With combined analysis of some typical application cases, the paper pointed out the current problems in the implementation of DR and related measures, hoping to provide reference for the development of smart power utilization and demand response.

KEY WORDS: demand response (DR); smart grid; demand side management; smart power utilization

摘要: 目前, 智能电网已成为世界电网发展的大趋势, 符合社会和经济发展的必然要求。文章针对智能电网条件下的用户需求响应展开深入分析和总结, 调研国内外需求响应的发展现状, 从需求响应概念、激励机制、效益评估、支持平台技术、应用于风电消纳等方面对国内外学者在相关领域的研究成果进行总结, 并结合典型案例深入剖析, 指出当下实施需求响应存在的问题和相关对策, 以期为我国智能用电和需求响应的发展提供借鉴。

关键词: 需求响应; 智能电网; 需求侧管理; 智能用电

0 引言

需求响应(demand response, DR)和分布式洁净

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(863 计划)(2011AA05A116); 国家电网公司科技项目(DZ71-14-042)。

The National High Technology Research and Development of China (863 Program) (2011AA05A116); State Grid Science & Technology Project (DZ71-14-042).

能源的大量并网, 不仅可以有效地缓解输电和发电容量迅速扩建的步伐, 也是社会可持续发展的必然要求。智能电网的关键目标是催生新的技术和新的商业模式, 实现新的产业革命^[1]。智能用电是智能电网的重要组成部分, 其功能是将供电侧到用户侧的重要设备, 通过灵活的电力网络和信息网络相连, 形成高效完整的用电信息服务体系和服务平台^[2], 构建电网与用户电力流、信息流、业务流实时互动的新型供用电关系^[3]。通过互动化策略, 调动用户参与需求响应或直接进行远程优化控制, 实现电力负荷的柔性化, 指导用户或直接进行用电方式优化, 支撑供电侧的可靠、经济运行。智能用电系统建设的好坏直接关系到电网的能源使用效率、经济运行和有序用电^[4], 对电网建设、节能环保、电能质量管理会产生深远的影响^[5]。

随着智能电网和电力市场的发展与完善, 需求侧资源在竞争市场中的作用正在被重新认识, 在电力市场竞争中引入需求响应, 通过价格信号和激励机制来增加需求侧在市场中的作用^[6], 并将供应侧和需求侧的资源进行综合资源规划, 面向灵活互动智能用电的需求响应成为发展趋势^[7]。

灵活、互动是智能用电的重要特征。灵活包括 2 层含义: 其一为快速响应市场变化和客户需求, 包括满足客户多元化、个性化需求, 充分利用电网资源为客户提供增值服务^[7]; 其二为支持新能源新设备接入, 实现各种不同容量的分布式电源、电动汽车、储能装置等新能源设备的即插即用式接入^[8]。大规模风电的随机性和波动性为风电调度带来巨大困难, 如何抑制风电波动, 使之平稳地接入电网具有重大现实意义。相关研究表明, 从需求侧风电能量互补匹配的角度可令等效的风电并网功率平

稳在其期望值附近,且负荷峰谷差也会明显减小^[9]。

智能电网在保障电网安全、消纳清洁能源发电、提升电能利用效率方面具有重要作用。国内外已开展大量智能电网技术研究和工程建设工作,为开展需求响应研究提供了技术基础。下文第 1 部分在查阅大量国内外文献和典型案例的基础上,总结国内外在智能电网条件下需求响应的发展现状;第 2 部分将从需求响应概念、激励机制、效益评估、支持技术等多个方面对国内外学者在相关领域的研究成果进行总结,以期在理论成果方面为我国智能用电和需求响应发展提供借鉴;第 3 部分选择以市场经济为主导的美国加州、PJM 需求响应项目和法国电力公司受管制电力市场的需求响应项目为典型案例进行介绍,并对我国需求侧管理试点项目进行介绍,同时指出我国目前需求响应工作存在的问题并提出相应对策。

1 国内外的发展现状

1.1 国内现状

近年来,我国制定了一系列计划推动智能电网的建设,从政策、后备科研支撑层面保证了灵活互动的智能用电技术的发展。2009 年,国家电网公司首次向社会公布了智能电网的发展计划^[5]。2011 年国家科技部开展了国家高技术研究发展计划(863 计划)智能电网重大专项的研究,其中有相当大的比例是涉及智能用电方面的研究。2012 年,科技部发布《智能电网重大科技产业化工程“十二五”专项规划》,提出“十二五”期间我国将建设 5~10 个智能电网示范城市、50 个智能电网示范园区。

在需求响应相关工程建设方面,截止目前,国家电网公司系统内 27 个省级电力公司已经完成省级用电信息采集系统主站的构建,累计安装智能电表约 2 亿只。在智能用电方面,智能小区、智能楼宇和智能园区的建设成为中国最具典型的智能用电实践。2010 年,国家电网首次在河北、北京、上海和重庆 4 个省市开展智能楼宇和小区试点工程建设,建成 2 个智能楼宇和 6 个智能小区。2011 年,甘肃白银、山东东营以及江苏南京等地区开始建设国内首批智能园区,开展大用户能效监测、管理方案的实践^[3]。目前,国家电网公司已在 17 个省级公司建设 28 个智能小区,在上海、重庆、浙江建设 3 个智能楼宇。2012 年,霍尼韦尔与天津泰达经济技术开发区共同开展并完成中国首个智能电网需求响应项目^[10]。

在需求响应标准方面,对应于 IEC PC118 的全国智能电网用户接口标准化技术委员会于 2013 年 6 月获得国家标准化委员会的批复。标委会 2014 年国家标准制定计划的内容包括:1) 智能电网用户接口术语;2) 电力需求响应技术导则;3) 电力需求响应的系统接口。

1.2 国外现状

世界发达国家基于发展新能源、节能减排、提高电网运营效率、改善供电服务质量等需要,陆续开展了需求响应相关的智能用电服务的研究和实践工作。

1) 为推动智能用电的发展,各国立法先行,发布了相关政策法规,支持智能用电。

在欧洲,智能用电的发展主要源自欧盟倡导清洁、可持续、高效的能源战略。2006 年,欧盟发布《欧洲可持续的、竞争的和安全的电能策略》,提出智能用电服务方面的目标;2009 年,奥巴马政府将智能电网建设提升为国家战略,此后明确将 45 亿美元拨款给美国能源部,用于促进电网现代化、整合 DR 设备和实现智能电网技术^[11],此外美国政府要求能源部启动电网数字信息技术研发项目,以支持智能电表、需求响应等相关技术评价与研究,同时启动智能电网区域示范计划,对关键技术进行验证^[12-13]。

2) 在技术发展方面,一系列技术和标准在相关政策刺激下得到发展。

2011 年 11 月 11 日,IEC 成立 IEC PC118,秘书处设在中国国家电网公司。PC118 包含 2 个工作组,其中 WG2 负责制定电力需求响应标准,建立了 3 个 DR 标准工作任务小组,任务是 CIM-DR 扩展,Open ADR 适配器研制以及符合 CIM 规则的 IEC DR 标准。

欧盟注重关键平台的开发建设,如节能和需求侧管理控制平台,也重视智能用电标准的制定和修订^[14];而美国则更关注电力网络基础架构的提升,在智能用电领域的目标是促进节能减排,提高供电服务质量。美国 Itron 公司与 Converge 公司的家庭能源管理系统^[13],IBM、思科等公司的智能用电互动支持平台,美国西太平洋国家能源实验室“电网友好”技术^[15],以及英特尔公司制定的“2030 年能源技术、信息技术及电力系统与终端用户负荷互动的智能电网信息互操作导则”均是例证。在亚洲,日本于 2009 年成立智能电网技术标准化战略工作组,开展智能电网标准相关研究工作,针对重点领

域制定了技术标准国际化发展策略^[16]。

3) 在技术应用方面, 各国积极展开 DR 发展计划和实施方案。

目前美国太平洋天然气与电力公司、南加州爱迪生等电力公司相继应用互动业务系统, 鼓励用户主动参与需求响应, 有效降低了高峰负荷^[11]; 2006~2007年, 加拿大安大略省能源局, 开展了为期一年的居民用户智能用电实证, 有效降低了居民用电量^[17]; 2008~2012年, 欧洲开展了多国参与需求侧响应的 Address 项目, 目标是使居民用户和小型商业用户更好地参与电力市场, 并为参与者提供更多服务^[14,16]。近年来, 日本在丰田、横滨、北九州、关西 4 个城市也展开智能社区示范工程的建设^[18]。

1.3 比较分析

1) 美国、欧盟及日本等发达国家在政策制定、技术发展和应用方面积累了广泛的经验, 我国可借鉴其技术成果和运作机制。

2) 我国开展了大规模高级量测系统、电能服务平台及智能用电实证研究与建设, 取得了较好成效。但是国内智能用电实践侧重于供电公司和电力用户间的信息交互和营销互动业务, 而用能互动和电能量交互等业务尚未有效开展, 尚不能满足灵活互动的智能用电需求, 未来的研究与实践工作宜更多关注这些方面^[3]。

3) IEC 正在开展需求响应国际化工作, 国内已启动开展国标编制工作。

2 需求响应机制及关键技术研究

2.1 需求响应基本概念及实现

需求响应指电力用户根据价格信号或激励机制做出响应, 改变固有习惯用电模式的行为^[6,19-20]。实施需求响应项目的重要环节在于电力用户对电力公司激励措施的响应行为, 以及电力用户调整自身用电方式所引起的负荷特性变化, 而这种响应行为的方式与强度取决于用户自身的响应特性^[21]。需求响应措施按照用户不同的响应方式可划分为 2 种类型: 基于价格的需求响应(price-based demand response, PBDR)和基于激励的需求响应(incentive-based demand response, IBDR)^[22]。

在基于价格的需求响应项目中, 价格对用户电力消费行为的影响作用最大, 一般采用需求价格弹性来定量表征电力价格变化对于用户响应行为特性的影响。经常采用负荷价格弹性^[23-24]来反映电力消费需求对电价变动的敏感程度。也用替代弹性^[25]

来衡量在电价变化峰时段用电量和谷时段用电量的比例变化。而在工程中数据量较小时可采用弧弹性^[26]来描述需求价格弹性。也有文献用多智能体的方法^[27]和电力消费者心理学模型^[28]来模拟用户对于价格的响应特性。在基于激励的需求响应项目中, 一般以响应量、响应速度、响应持续时间、响应频率、响应间隔时间、可响应性和响应通知时间等特性^[29]对可中断负荷^[30]、直接负荷控制^[31]等项目的响应特性建模。也采用回归的思想模拟电力用户在具体需求响应项目下对不同的电价和激励信号的响应效果^[21]。在具体分析用户响应特性时, 对电力用户按照需求响应特性进行聚类可简化问题分析的繁琐性, 分类把握用户的需求响应特性^[21,32]。

随着智能电网的快速发展, 先进的通信、控制等需求响应支撑技术增强了用户的响应能力^[33]。需求响应自动化提高了需求响应的灵活性和效率, 使得电网和用户的参与更加容易^[34], 美国劳伦斯伯克利国家实验室针对需求响应自动化制定了开放式自动需求响应通信规范 OpenADR^[35]。

2.2 需求响应目标多层次优化

需求响应项目中, 根据参与主体不同、需求响应项目不同, 优化决策中的决策变量、决策目标、约束条件也是不同的。

电力公司将基于激励的需求响应参与发电调度优化决策时, 决策变量是各个需求响应用户或负荷聚集商的负荷削减量和削减时间^[36], 或直接负荷控制的控制策略^[37]。目标函数一般是发电成本最低^[38]、网损最小化^[36]、需求响应项目激励补偿最小化^[39]、本身收益最大化^[40]、阻塞补偿最小化^[41]以及碳排放最小化^[42]等。将基于价格的需求响应参与优化决策时, 决策变量则是能够满足削峰填谷要求的电价政策^[40], 优化目标一般是日负荷曲线最大峰荷最小化、日负荷曲线峰谷差最小化, 以及用户的满意度最大化^[43]等。

用户接到电力公司的需求响应项目要求时, 一般通过智能交互终端^[44]或者能量管理系统的优化决策对生产生活进行重新安排。用户成本一般分为 3 个部分, 购电成本、服务成本和停电成本^[45]。用户中断成本函数可表示为一次型、二次型、三次型和指数型^[46]。工业用户用电模式与其生产流程、用电设备等多种因素密切相关。在响应系统侧信号时, 需要综合考虑生产班制、设备连续性、前驱后继关系等信息进行内部经济决策, 以寻求最优能量管理方案^[47]。商业用户的电能消耗多以商业楼宇

用电为主,根据商业用户侧各系统的能源使用情况和电网侧的各种激励政策和运行信息,为用户提供最佳的能量管理方案^[48]。居民用户的家庭能源管理系统通过智能家居根据电价和激励信号对家用电器的使用时间进行优化^[49]。

2.3 需求响应效益评估

需求响应通过负荷调整来参与电力市场运行,提高了系统和资源的使用效率,对电力工业和经济发展以及环保有着重要的战略作用^[20,50]。需求响应项目的效益包括项目的参与者通过项目的执行而带来的用户侧电费节省、经济补偿,电网侧购电成本降低、维持可靠性费用减少等直接效益,还包括公共效益、外衍效益和自然资源效益等外部效益^[51]。但要准确评估需求响应为电力系统中的不同主体带来的效益,还需要对这些效益进行定量表达。量化分析需求响应的效益对于把握需求响应的发展潜力、推进需求响应项目的开展实施具有重要意义^[52]。可从主体、时间和项目对需求响应综合效益进行多维度分析^[53],采用解耦的思想实现效益评估的量化^[54]。

2.4 需求响应激励机制

在需求响应项目中,激励机制的设计是关键。基于激励的需求响应项目中,用户参与需求响应可通过 2 种方式获得补偿额:一种方法类似于独立系统运营商 ISO(independent system operator)、电力交易中心 PX(power exchange)等机构对用户的停电价格进行评估;另一种方法是由用户申报可中断负荷容量及其相应的缺电成本^[55]。针对后一种情况,用户有策略性上报缺电成本的倾向,可通过设计激励相容的激励机制,使用户在上报真实类型时获得最大利润,鼓励用户上报真实的缺电成本^[56-57]。也有文献提出基于信用积分激励理论,计算消费、奖惩积分,并用多余积分兑换电费或可避免电量等^[58]。

2.5 需求响应应用于批发电力市场

由于电力工业和电力商品的特性,使得电力市场在较长的一段时间内并不是理想的完全竞争市场,而是自然垄断的行业。不把需求侧和供应侧同等对待就不能形成一个真正良性运作的电力市场^[6]。需求响应就是保证单边市场稳定性,降低寡头发电厂市场力的一个有效措施^[59]。单边发电市场中,寡头发电厂商操纵市场价格的能力,即为其市场力。根据微观经济学中的古诺模型^[60],提高需求价格弹性、增加需求响应能力,是降低市场力的有效方法,比降低发电厂商的市场参与份额更容易实

现^[22]。将需求响应引入竞争市场,增加需求侧在市场竞争中的作用,使市场竞争更为有效,价格更为合理,促进电力市场的良性发展,因此需求响应项目可以称为电力批发市场的减震器^[61]。

2.6 需求响应应用于消纳大规模清洁能源

大规模风电的随机性和波动性给电网调度带来巨大困难,利用需求响应来配合可再生能源发电运行以降低可再生能源发电的波动性是在技术上与经济上都极佳的解决方案^[62],多个国家要求采用需求响应来保障新能源的接入^[63]。将需求响应和可再生能源消纳的促进关系融入单边开放和双边开放的电力市场组织结构,形成交易和价格机制^[64],采用潜在动态博弈理论分析用户之前的协调和互动^[65],通过实时电价机制引导用户在风电出力高峰时多用电,低谷时少用电^[66],并结合一定数量的可控负荷和动态需求响应^[67],使用户的负荷曲线与风电出力互补,从而平缓新能源波动,减少系统运行负担,提高新能源的接纳能力^[68]。需求响应与可再生能源发电组合的模式也开创了需求响应项目的新型运作方式^[62],Pedro S 等人构建了考虑可再生能源和用户不确定性的基于电价的需求响应长期、中期和短期市场均衡模型^[69]。在微网中,可以采用居民温控负荷的直接负荷控制和常规发电、储能的联合调控来抑制分布式新能源引起的微网联络线功率波动^[70]。为了更精确的选用合适的需求响应用户来缓解新能源发电的波动性,采用频域互谱分析的方法,对风力发电曲线与用户需求曲线的频域波动特征进行比对,找出匹配风力发电的需求响应目标用户群体^[71],分析风电的渗透接入对需求响应策略的影响^[72]。另外,自动需求响应的采用能够有效缓解由于间歇性可再生能源接入带来的电力供需矛盾,但其成本只有使用储能装置的 10%^[73]。

作者在需求响应应用于风电消纳方面做了深入研究,考虑基于价格和基于激励 2 类 DR 项目的互补,建立了考虑用户侧互动的风电消纳调度模型^[74],综合分时电价(time-of-use pricing, TOU)与可中断负荷(interruptible load, IL)消纳风电正负波动的效用,并通过蒙特卡洛运行模拟评估了 DR 融入前后系统的弃风、电力不足和风电等效容量等,验证了 DR 对风电消纳的积极作用。文献[75]将实时电价下的需求响应资源参与消纳风电提供系统爬坡能力,建立了随机优化模型下以社会福利最大化为目标函数的调度模型。此外,由于需求响应资源的分散性、响应时间特性不同、响应效果不确定

性等原因,如何结合新能源发电出力特性进行有效多时间尺度调度策略制定以及如何进行商业运营模式设计(如引入削减聚集商等)从而使其在调度运营中发挥更大优势,也是值得研究的问题。

2.7 需求响应支持技术

需求响应支持技术包括高级量测系统、电能公共服务平台^[76]、需求响应系统、智能用电设备等多种技术,前两者目前已经规模化应用,为需求响应提供规模化应用支撑。高级量测系统主要实现用户智能电能表用电信息采集,电能服务平台主要实现用户内部用电、用能信息采集。

1) 高级量测系统。

高级量测系统实现了电网公司范围内用电数据统一采集、存储、处理及应用,并实现了集中的系统监控及业务分析。高级量测系统架构如图1所示,一般分为智能终端层、通信信道层、主站层。

智能终端层。

目前主要覆盖的采集终端包含专变终端、配变终端、低压集抄终端、需求响应终端以及变电站终端等。当地采集设备根据需要可组网或直接连接到前置通信层。

通信信道层。

一般使用3G/4G无线公网传输、LTE 230 MHz无线专网、光纤通信、宽带电力线载波等通信方式。

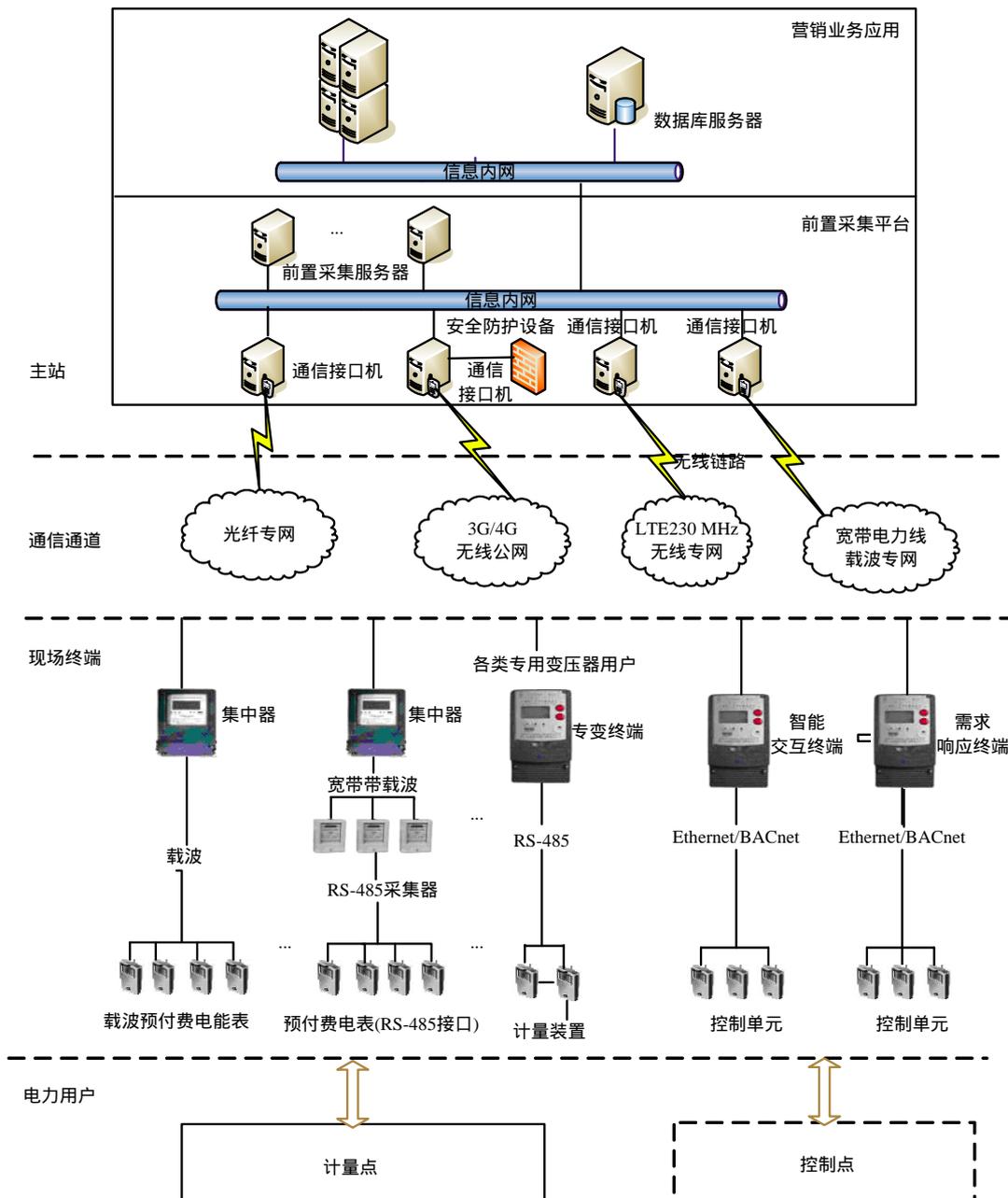


图1 高级量测系统架构

Fig. 1 Logical diagram of advanced metering infrastructure

主站层。

根据系统规模，一般可分为前置通信、数据存储、业务应用等子层。

前置通信子层主要实现大规模采集终端接入及通信，用于完成采集终端的数据采集任务及用电信息采集系统下发的任务，自动建立采集终端与信道及规约的适配，满足大规模、不同类型采集终端的通信需求，并具有数据转发及负载均衡功能。在海量终端可靠接入的基础上，具有省级集中式以及市级分布式 2 种接入模式，其中省级集中式主要完成所有无线公网方式的现场终端和表的接入，市级分布式主要接入专网方式的现场终端和表计。

数据存储子层是为满足数据几何增长情况下存储性能对硬件的要求，在前置通信平台数据库与生产数据库间构建的一个数据缓冲层，使系统具备海量源码数据存储及采集数据缓存能力。在此基础上采用数据分库技术，将通信数据、操作类、负控类业务等实时性要求非常高的数据及统计分析数据分离开来存储，将原依赖生产库的统计分析等复杂应用迁移至管理数据库中，降低了生产库压力，并为统计分析、数据查询等高级操作部署了单独的资源，使系统具备海量数据存储及分析查询能力。

业务应用子层，以云计算架构为支撑，实现海量数据实时处理，架构引入 Hadoop 分布式计算框架，对计算任务进行并行化处理，将计算任务分配至多个工作节点完成，提高计算效率。可支持包含线损计算、电量计算、负荷计算、采集成功率指标

计算、终端设备运行状态统计等计算服务；支持对应物理设备的灵活部署与装配，满足不断增长的终端规模带来的海量数据实时处理需求。

2) 电能公共服务平台。

电能公共服务平台主要功能可分为 5 大部分，包含节能服务管理、节能监测与分析、有序用电与负荷管理、需求响应、需求侧考核、能效知识库等，如图 2 所示。限于篇幅，重点阐述其节能服务管理、能效监测与分析及需求响应功能。

节能服务管理。

电能服务管理平台的具体业务是通过对节能服务公司、节能评测机构等信息的填报、统计，实现对各级节能服务机构的管理。并依据国家节能量指标对各级单位的节能量进行逐层分解下达。对节能服务公司实施的合同能源项目进行全过程跟踪、统计及评价，从而实现节能量的统计。

能效监测与分析。

节能监测与分析主要包括客户用能档案管理、采集设备运行管理、数据采集管理、现场检测、库房管理、能效数据信息管理、用户能耗分析、宏观能耗分析、能效对标与评估分析。

需求响应。

制定不同的响应方案，让电力客户根据需求响应方案合理控制峰值负荷，针对方案中电力价格或电力政策的改变做出响应，并暂时改变固有用电模式的行为，达到减少或者转移某时段用电负荷的目的，从而降低费用，最终对电力客户执行需求响应方案情况进行分析，对需求响应实施效果进行分析。其功能包括方案制定、方案发布、用户响应、

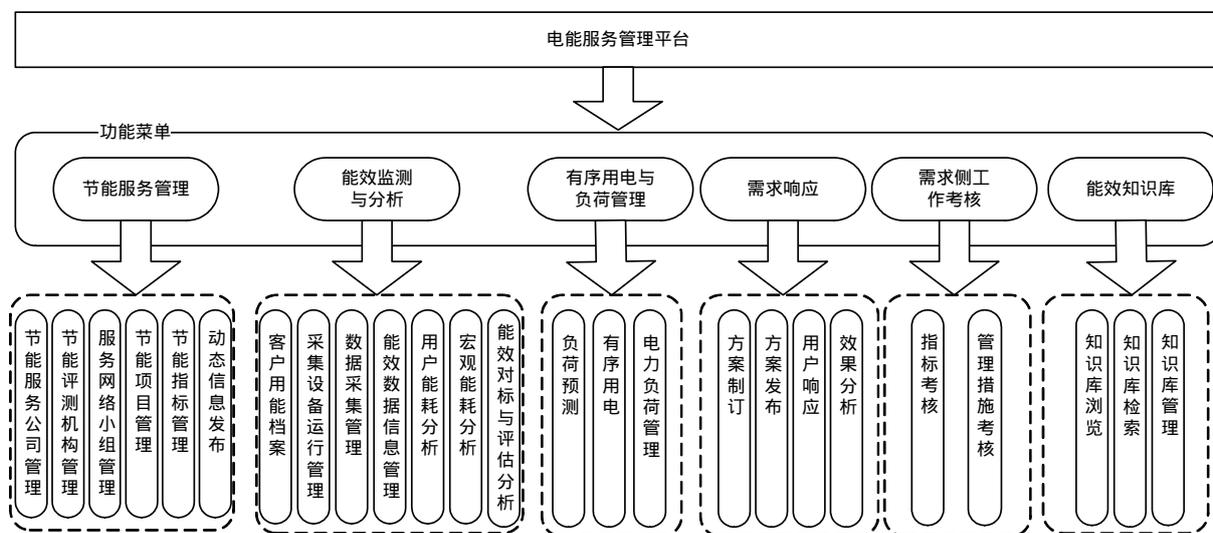


图 2 电能公共服务平台功能图

Fig. 2 Function diagram of energy management and public service platform

效果分析 4 个方面。

3 国内外需求响应典型案例

3.1 美国加州自动需求响应项目

3.1.1 项目概况

在 2000 年到 2001 年年间,加州经历了一次能源危机,该州竞争性电力市场的引入而导致的短期电力容量短缺是这次危机的主要来源。到 2002 年,这个迫切的短期问题得到解决,但长期的发电和输电网络容量的短缺仍然存在。加州能源危机发生后,加州公共事业委员会为增强该州的电力需求响应,批准了几项试验和试点项目。其中一个试点项目就是针对居民的自动需求响应系统(automated demand response system, ADRS)^[77-78]。

为了评估一个全面自动系统的需求响应能力,太平洋电气公司(pacific gas and electric, PG&E),南加州爱迪生公司(southern california edison, SCE),和圣迭戈燃气及电气(San Diego gas and electric, SDG&E)公司在加州公共事业委员会的支持下,于 2004 年发起了加州自动需求响应系统试点计划,并持续至 2005 年底。这项试点关注的是与电价措施一起实施的负荷控制技术的作用,针对的是加州的居民用户^[76]。

ADRS 运行在一种尖峰电价的电费下,并且有住宅用户层面的自动需求响应技术的支持。相比较其他项目,ADRS 试点项目是一个小规模的探索性项目,只有 175 户加州家庭参与。试点的参与者安装了 GoodWatts 系统,这是一种先进的家庭气候控制系统,允许用户通过网络程序设定自己对控制家电产品的喜好。在尖峰电价(critical peak pricing, CPP)下,高峰期(工作日下午 2 时至 7 时)的电价较高,所有其他小时、周末和假期都采用基准费率。当“超级高峰事件”发生时,峰时电价比常规峰时电价高出 3 倍。

3.1.2 项目内容

ADRS 试点用户均安装了 GoodWatts 系统。GoodWatts 是 1 个双向通信自动化的家居自动控制系统,用户可通过 web 方式按照自己使用家电的喜好对系统进行编程。通过互联网,房主可设置气候控制参数和水泵运行参数,并可以本地或者远程随时查看这些设置。参与者还可以实时查看整个住宅或者终端设备的负荷水平和历史消费的显示趋势。

GoodWatts 允许用户在任何时候在线或者通过

恒温器浏览当前电力价格,也允许恒温器和水池负荷控制与监视设备自动响应电力价格的变化。这些设备设定的工作方式为:当电价上升到某个限值,将自动减少负荷。

3.1.3 项目成效

2004~2005 年,参与用户都完成了可观的负荷削减量,与对照组形成较大对比。并且尖峰事件日的峰时负荷削减量始终都是非事件日的 2 倍。从数据上看,使能技术似乎是负荷减少的主要驱动力,尤其是在尖峰事件日和高耗电客户中。另外,ADRS 参与者的负荷削减量比其他没有应用这些技术的需求响应项目要大。

2005 年 7—9 月,ADRS 共发生 7 次用电尖峰事件,耗能较高的用户在高峰时段平均减少 1.4 kW 的负荷,相比对照组家庭来说,削减了 43%。在非事件日,ADRS 高耗电用户相对对照组用户平均减少了 0.7 kW,削减幅度为 27%。每个公用事业公司的结果也互不相同,详细情况如表 1 所示。

表 1 2005 年 7—9 月 ADRS 高耗电用户峰荷削减
Tab. 1 ADRS peak load reduction of big power consumers in July to September 2005

公司名称	事件日			非事件日		
	平均削 减量/ kW	5 h 内削 减量 (kW-h)	削 减 比/%	平均削 减量/ kW	5 h 内削 减量 (kW-h)	削 减 比/%
	PG&E	0.83	4.15	29%	0.47	2.36
SCE	1.85	9.24	49%	0.89	4.47	30
SDG&E	1.17	5.84	38%	0.69	3.46	27
全州平均	1.42	7.10	43%	0.73	3.67	27

3.2 美国 PJM 独立系统运营项目

3.2.1 项目概况

截至 2012 年底,美国宾州-新泽西-马里兰州互联(Pennsylvania-New Jersey-Maryland interconnection, PJM)电力市场的装机容量为 185.6 GW,年用电量为 8 323.3 亿 kW·h,年市场交易额为 291.8 亿美元,服务人口超过 6 000 万^[11]。随着电力市场改革进程的推进,美国 PJM 地区的电力市场交易内容已由主能量市场、容量市场、辅助服务市场交易推广到以负荷响应为主要对象的需求响应市场交易。

3.2.2 项目内容

PJM 市场中实施的 DR 项目主要分为经济负荷响应和紧急负荷响应 2 类,如表 2 所示。

表 2 PJM 市场中 DR 项目的主要类型

Tab. 2 Main types of DR programs in PJM market

紧急负荷响应		经济负荷响应	
仅基于容量	基于容量和电量	基于电量	基于电量
仅通过 ILR 注册	RPM 出清或 ILR 注册	不包含于 RPM	不包含于 RPM
强制削减	强制削减	自愿削减	调度削减
RPM 事件过测试中 中具有响应不足惩罚	RPM 事件过测试中 具有响应不足惩罚	—	—
基于 RMP 出清价 支付容量价格	基于 RMP 出清价 付容量价格	—	—

注：可中断负荷响应(interruptible load response, ILR)在 2012/2013 交易年开始终止；可靠价格模型(reliability price model, RPM)是容量市场中的基于可靠性的竞价交易方式。

3.2.3 项目成效

1) 经济负荷响应项目的实施成效。

2012 年 4 月 1 日美国联邦能源管理委员会(federal energy regulatory commission,FERC)颁布了 745 条例，规定对经济负荷响应的激励标准由原来的按边际电价和发电成本的差额补贴，改为按照边际电价(locational marginal price, LMP)全额补贴，这对于提高经济负荷响应度起到了较大效果。经济负荷响应的总电量值由 2011 年的 17 398 MW·h 增加为 2012 年的 141 568 MW·h，对经济负荷响应的结算总额由 2011 年的 2 052 996 美元增加到 2012 年的 9 159 381 美元。各年经济负荷响应在最高负荷日注册容量如表 3 所示^[75]。

表 3 年度最大峰荷日经济负荷响应项目注册容量

Tab. 3 Registration capacity of economic load response program in max peak load day of a year

时间	注册用户数量	最大峰日的注册容量/MW
2007.08.08	2 897	2 498.0
2008.06.09	956	2 294.7
2009.08.10	1 321	2 486.6
2010.07.06	899	1 725.7
2011.07.21	1 237	2 041.8
2012.07.17	885	2 302.4

2) 紧急负荷响应项目的实施成效。

自 2007 年 6 月 1 日开始实施可靠价格模型 RPM 竞价方式以来，容量市场已成为 PJM 市场中需求侧资源参与市场的主要交易层次。负荷管理项目的结算总额由 2011 年的 48 700 万美元下降为 2012 年的 33 100 万美元，旋转备用容量信用价值由 2011 年的 9 400 万美元下降为 2012 年的 450 万美元。各年的紧急负荷响应注册容量如表 4 所示^[77]。

表 4 各年紧急负荷响应注册容量

Tab. 4 Registration capacity of emergency load response in each year

交易年	DR 总容量/MW	ILR 容量/MW	LM 容量/MW
2007—2008	560.7	1 584.6	2 145.3
2008—2009	1 017.7	3 480.5	4 498.2
2009—2010	1 020.5	6 273.8	7 294.3
2010—2011	1 070.0	7 982.4	9 052.4
2011—2012	2 792.1	8 730.5	11 522.7
2012—2013	7 449.3	0	7 449.3

注：2012/2013 年起停止可中断响应 ILR。

由此可以看出 PJM 市场中的 DR 响应削减总量和结算额呈逐年增加的态势，而随着激励政策的不同，各年中经济负荷响应项目和紧急负荷响应项目的占比情况也有所变动。随着电力市场对需求侧资源竞价的开放程度的加深，经济负荷响应计划是需求侧资源参与市场竞价过渡阶段的一种实施机制。而紧急负荷响应计划要求相关技术和管理体制进步的支撑，包括负荷基线的确定、对响应负荷的测试和结算等。未来需求响应的实施和运营将和电力市场的运行调度各环节更紧密的结合。

3.3 法国电力公司 TEMPO 项目

3.3.1 项目概述

1993 年，法国电力公司 EDF 以浮动电价管理办法为基础，提出了 TEMPO 电价。包括了标准 TEMPO(客户只安装电子间隔电表)；双能源 TEMPO(客户的供暖锅炉可以在 2 种能源之间进行切换)；恒温 TEMPO(客户安装负荷控制设备，可根据电价调整供暖和热水器负荷)和舒适 TEMPO(客户有 1 个复杂的能量控制器) 4 个选择。

1995 年后，TEMPO 电价项目面向大众市场所有的 EDF 客户推出，逐步有 30 万居民客户和超过 10 万小型企业客户选择了 TEMPO，目的是减少电费的支出，而且除了连续不断的红色电价日，客户很满意 TEMPO 的电价。

3.3.2 项目内容

TEMPO 电价类似于尖峰电价和动态电价。在法国，尖峰电价中包含根据规定具体用电时间计算的电费部分，每日 6—22 时的电价比其他时间段高 35%。TEMPO 电价是在 1 天中，根据平时与峰时供电的差别以及供电时间长短的不同，将电价按照颜色分为 3 类，即红日、白日、蓝日。其中：红日 22 天，电价最高(平时电价的 5 倍)；白日 43 天，电价次之(约为平时电价)；蓝日 300 天，电价最低(约

为平时电价的一半)。相比之下,电价最高时段(红日)与电价最低时段(蓝日)的电价比高达9倍。此外,3种颜色的日期由系统运营及负荷状况决定。红色日和白色日的具体日期最晚在前一天晚上5:30宣布,正是需求开始攀升或供给开始跌落的时间。电价颜色通过电子邮件、手机短信、TEMPO网站等媒介发送给各用户仪表,并显示在相应指示装备上。

3.3.3 项目成效

电力市场和辅助服务市场中的客户对于负荷的削峰起到重要作用。法国管制电力市场中大约有22万用户(即国内用户总数的1.2%)参与了该项目。以法国2009年9月到2010年8月期间电价为例,在红色的日子里,用电高峰从450 MW削减到300 MW;在白色的日子里,削峰的幅度是150 MW。这为TEMPO电价用户节省了45%的电费。与蓝日电价相比,客户的电力消耗在白日下降了15%,在红日下降了45%。TEMPO客户的平均电价支出减少了10%。

3.4 我国电力需求侧管理城市综合试点项目

2012年7月,财政部、国家发展和改革委员会联合下发了《电力需求侧管理城市综合试点工作指导意见》(以下简称《指导意见》),标志着电力需求侧管理城市综合试点工作的正式启动实施。《指导意见》提出了该项试点工作的基本原则和总体目标,明确了5项重点任务:电能管理信息化、能效电厂规模化、负荷管理智能化、电能服务产业化、能力建设常态化。这些工作集中体现了电力需求侧管理城市综合试点工作的系统工程性,以及促推节能减排和经济发展方式转型的多重作用。对通过实施能效电厂项目、移峰填谷项目等实现的永久性节约/转移高峰电力负荷,奖励440~550元/kW;对通过需求响应等措施临时性减少的高峰电力负荷,奖励100元/kW。江苏苏州是国家发改委需求侧管理城市综合试点首批4个城市之一,下面以该试点城市为范例,简要阐述相关工作。

苏州需求侧管理试点城市建设方案的重点是:政府牵头,建立通畅、高效的需求侧管理工作体制;探索市场化机制,构建需求侧管理可持续发展机制;加强各级财政支持,引导和激励苏州市深入推进电力需求侧管理工作;将政策激励与绩效相挂钩,强化实施绩效考核,提升苏州市电力供需平衡和应急保障能力。苏州示范工程建设主要目标是:1)有效降低全市电力最高负荷,实现有序用电、科学用电、节约用电;2)打造需求侧管理应用示

范园区;3)打造苏州电能公共服务平台;4)建立重要行业(企业)的科学用电标准;5)培育壮大现代电能服务产业。

我国需求侧管理城市试点效果还有待观察。

4 存在问题及对策

1)需进一步明确需求响应在智能电网中的重要定位。

需求响应在高级量测系统等支持下,提供电力用户自主调节电力负荷能力,实现电力负荷自主控制、自适应响应,使得传统电力负荷不可控特性发生转变,电力负荷变成部分可控和自调节,这是智能电网技术带来的电力系统重大变革;需求响应在电力系统调峰移峰、消纳大规模清洁能源、提高能效及分布式电源、电动汽车与电网互动等方面具有技术推动作用,并具有拉动智能家电、智能电器产业发展作用。国家相关部门和电网公司应组织产学研用,开展需求响应多学科创新体系建设。

2)需求响应市场配置资源手段需进一步完善。

虽然国内一些试点城市已经出台了峰谷分时电价政策,但峰谷电价执行范围有限且峰谷价差偏小,价格杠杆的作用有待进一步发挥。《电力需求侧管理办法》明确了电力需求侧管理专项资金来源渠道,但未以文件的形式落实项目资金分配比例及额度标准,需进一步完善,引入合理的激励机制降低投资风险,从财政、税收、贷款等方面对发展智能用电与需求响应给予充分的政策和资金支持,充分发挥价格等优化配置需求侧资源能力,以创建各利益相关方共赢的局面。

3)电能公共服务平台建设需进一步完善。

随着电力供需形式的变化和发展低碳经济概念的提出,电力需求侧管理工作的重心更多地转向了提高用电效率、能效水平方面。各级电力需求侧管理平台的需求响功能建设和效果评价有待进一步完善,提升实效性。

4)需要建立需求响应标准规范。

从政策上提出针对技术服务课题研究的资金、设备条件支持,制定需求响应项目规划、建设、实施和评估的技术服务规范;制定需求响应信息模型、交换模型、接口、需求响应装备、通信设备的生产、安装和维护标准体系;制定需求响应各方沟通、服务标准,培育有效、快速、多样化的服务机制,消除自动需求响应互操作性方面的障碍,为需求响应项目的实施提供服务保证。

5 结论

本文对智能电网条件下的需求响应运作机制和关键技术进行了较为全面细致的介绍,并选择典型案例进行分析,并得到以下结论:

1) 需求响应的应用使得不可控的电力负荷变得部分柔性可控,使得电力负荷具有一定自适应能力,这对电力系统是一个重大变革;

2) 需求响应可用于电力系统调峰移峰,并使智能用电设备具有自动跟踪系统变化的能力,既有助于保障电网安全,又有利于消纳大规模清洁能源,拓展对需求响应的认知;

3) 目前我国需求侧管理城市综合试点将对需求响应有较大的推进,通过价格机制和市场手段优化配置电力需求侧资源仍需重点关注;

4) 需求响应试点和推广方案应同时关注电力用户调峰和节能潜力的分析和挖掘;应考虑拉动智能家电、智能电器产业发展和模式创新。

参考文献

- [1] 余贻鑫,栾文鹏.智能电网述评[J].中国电机工程学报,2009,29(34):1-8.
Yu Yixin, Luan Wenpeng. Smart grid and its implementations[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 1-8(in Chinese).
- [2] 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(in Chinese).
- [3] 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(in Chinese).
- [4] 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(in Chinese).
- [5] 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(in Chinese).
- [6] 王蓓蓓,李扬,高赐威.智能电网框架下的需求侧管理展望与思考[J].电力系统自动化,2009,33(20):17-22.
Wang Beibei, Li Yang, Gao Ciwei. Demand side management outlook under smart grid infrastructure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 17-22(in Chinese).
- [7] 史常凯,张波,盛万兴,等.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(in Chinese).
- [8] 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(in Chinese).
- [9] 艾欣,刘晓.基于需求响应的风电消纳机会约束模型研究[J].华北电力大学学报,2011,38(3):17-22.
Ai Xin, Liu Xiao. Chance constrained model for wind power usage based on demand response[J]. Journal of Noah China Electric Power University, 2011, 38(3): 17-22(in Chinese).
- [10] 中华工控网.霍尼韦尔圆满完成中国首个智能电网需求响应项目[EB/OL]. [2012-12]. <http://www.gkong.com/item/news/2012/12/70976.html>.
GKong. Honeywell successfully completed the first smart grid demand response project of China [EB/OL]. [2012-12]. <http://www.gkong.com/item/news/2012/12/70976.html>(in Chinese).
- [11] 潘小辉,王蓓蓓,李扬.国外需求响应技术及项目实践[J].电力需求侧管理,2013,15(1):58-62.
Pan Xiaohui, Wang Beibei, Li Yang. Demand response technology abroad and its practice[J]. Power Demand Side Management, 2013, 15(1): 58-62(in Chinese).
- [12] 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 Qin, Wang Xifan, Wang Jianxue, et al. Survey of demand response research in deregulated electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 97-106(in Chinese).
- [13] 张钦,王锡凡,付敏,等.需求响应视角下的智能电网[J].电力系统自动化,2009,33(17):49-55.
Zhang Qin, Wang Xifan, Fu Min, et al. Smart grid from the perspective of demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 49-55(in Chinese).
- [14] 霍沫霖,单葆国.欧洲智能用电发展综述及启示[J].中国电力,2012,45(11):91-95.
Huo Molin, Shan Baoguo. Overview and reflection of European smart end-use development[J]. Electric Power, 2012, 45(11): 91-95(in Chinese).

- [15] 林弘宇,田世明.智能电网条件下的智能小区关键技术[J].电网技术,2011,35(12):1-7.
Lin Hongyu ,Tian Shiming .Research on key technologies for smart residential community[J]. Power System Technology , 2011 , 35(12) : 1-7(in Chinese) .
- [16] 冯庆东,何战勇.国内外智能用电发展分析比较[J].电测与仪表,2012,49(2):1-6.
Feng Qingdong , He Zhanyong . Analysis and comparison for the development of smart electricity consumption in domestic and foreign[J]. Electrical Measurement & Instrumentation , 2012 , 49(2) : 1-6(in Chinese) .
- [17] 许高杰,张雪菲,石坤,等.楼宇用户智能用电实证研究[C]//2012年电力通信管理暨智能电网通信技术论坛.中国,北京:中国通信学会,2013:329-331.
Xu Gaojie ,Zhang Xuefei ,Shi Kun ,et al .Empirical study on smart power assumption for residential buildings[C]// Power Communication Management & Smart Grid Communication Technology Forum in 2012 . Beijing , China : China Institute of Communications , 2013 : 329-331(in Chinese) .
- [18] 能源观察网.日本开展“智能社区”计划[EB/OL].(2010-11-25)[2013-12-05].
<http://www.chinaero.com.cn/zxdt/djxx/11/75492.shtml> .
Energy Observation Network . Japan carry out the “smart communities” plan[EB/OL] . (2010-11-25)[2013-12-05] . <http://www.chinaero.com.cn/zxdt/djxx/11/75492.shtml>(in Chinese) .
- [19] Federal Energy Regulatory Commission .2012 assessment of demand response and advanced metering staff report[R] . America : Federal Energy Regulatory Commission , 2012 .
- [20] 李扬,王蓓蓓,宋宏坤.需求响应及其应用[J].电力需求侧管理,2005,7(6):13-15,18.
Li Yang ,Wang Beibei ,Song Hongkun .Demand response and its application[J]. Power Demand Side Management , 2005 , 7(6) : 13-15 , 18(in Chinese) .
- [21] 韩伟吉.需求响应特性分析方法研究[D].山东:山东大学,2012.
Han Weiji . Studies on analysis methods of demand response characteristeics[D] . Shandong : Shandong University , 2012(in Chinese) .
- [22] US Department Of Energy . Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them[EB/OL] . (2006-01-01) . http://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/DOE_Benefits_of_Demand_Response_in_Electricity_Markets_and_Recommendations_for_Achieving_Them_Report_to_Congress.pdf .
- [23] Kirschen D S , Strbac G , Cumperayot P , et al . Factoring the elasticity of demand in electricity prices[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2000 , 15(2) : 612-617 .
- [24] 王蓓蓓,李扬,万秋兰,等.需求弹性对系统最优备用投入的影响[J].电力系统自动化,2006,30(11):13-17.
Wang Beibei , Li Yang , Wan Qiulan , et al . Influence of demand elasticity on optimal system spinning reserve [J] .Automation of Electric Power Systems ,2006 ,30(11) : 13-17(in Chinese) .
- [25] Hopper N ,Goldman C ,Neenan B .Demand response from day-ahead hourly pricing for large customers[J] . The Electricity Journal , 2006 , 19(3) : 52-63 .
- [26] Faruqia , Earle R . Demand response and advanced metering[EB/OL] . (2006-03-01) . <http://www.cato.org/sites/cato.org/files/serials/files/regulation/2006/3/v29n1-3.pdf> .
- [27] 谈金晶,王蓓蓓,李扬.基于多智能体的用户分时电价响应模型[J].电网技术,2012,36(2):257-263.
Tan Jinjing , Wang Beibei , Li Yang . Modeling of user response to time-of-use price based on multi-agent technology[J] . Power System Technology , 2012 , 36(2) : 257-263(in Chinese) .
- [28] 阮文骏,王蓓蓓,李扬,等.峰谷分时电价下的用户响应行为研究[J].电网技术,2012,36(7):86-93.
Ruan Wenjun , Wang Beibei , Li Yang , et al . Customer response behavior in time-of-use price[J] . Power System Technology , 2012 , 36(7) : 86-93(in Chinese) .
- [29] NERC . Potential reliability impacts of emerging flexible resources[R] . American : The North American Electric Reliability Corporation , 2010 .
- [30] Aalami H A ,Moghaddam Parsa M ,Yousefi G R .Demand response modeling considering interruptible/curtailable loads and capacity market programs[J] . Applied Energy , 2009(87) : 243-250 .
- [31] Molina A ,Gabaldon A ,Fuentes J A ,et al .Implementation and assessment of physically based electrical load models : Application to direct load control residential programmes[J] . IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution , 2003 , 150(1) : 61-66 .
- [32] 宗柳,李扬,王蓓蓓.计及需求响应的多维度用电特征精细挖掘[J].电力系统自动化,2012,36(20):54-58.
Zong Liu , Li Yang , Wang Beibei . Fine-mining of multi-dimension electrical characteristics considering demand response[J] . Automation of Electric Power Systems , 2012 , 36(20) : 54-58(in Chinese) .
- [33] Faruqui A , Palmer J . The discovery of price responsiveness—A survey of experiments involving dynamic pricing of electricity[EB/OL] . [2012-03-12] . <http://ssrn.com/abstract=2020587> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2020587> .
- [34] Stadler I . Power grid balancing of energy systems with high renewable energy penetration by demand response [J] . Utilities Policy , 2008 , 16(2) : 90-98 .

- [35] 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应综述[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(in Chinese).
- [36] 于娜. 电力需求响应参与系统运行调控问题的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
Yu Na. Research on problems of power system's operation and regulation with power Demand Response [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009(in Chinese).
- [37] Ng K H, Gerald B S. Direct load control-A profit-based load management using linear programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(2): 688-694.
- [38] 刘小聪, 王蓓蓓, 李扬, 等. 智能电网下计及用户侧互动的发电日前调度计划模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 30-38.
Liu Xiacong, Wang Beibei, Li Yang, et al. Day-ahead generation scheduling model considering demand side interaction under smart grid paradigm[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 30-38(in Chinese).
- [39] 李渝曾, 刘畅, 张少华, 等. 基于智能优化算法的多时段可中断负荷调度[J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(4): 34-38.
Li Yuzeng, Liu Chang, Zhang Shaohua, et al. Multi-period dispatch of interruptible loads by intelligent optimization algorithms[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2009, 24(4): 34-38(in Chinese).
- [40] 郭联哲, 谭忠富, 李晓军. 基于用户响应下的分时电价优化设计模型与方法[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 25-28.
Guo Lianzhe, Tan Zhongfu, Li Xiaojun. Demand response based model and method for optimal design of time-of-use electricity price[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 25-28(in Chinese).
- [41] 孙芊, 彭建春, 潘俊涛, 等. 多时段电力需求响应的阻塞管理[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 139-143.
Sun Qian, Peng Jianchun, Pan Juntao, et al. Congestion management considering multi-time interval demand response[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 139-143(in Chinese).
- [42] 刘晓, 艾欣, 彭谦. 计及需求响应的含风电场电力系统发电与碳排放权联合优化调度[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 213-218.
Liu Xiao, Ai Xin, Peng Qian. Optimal dispatch coordinating power generation with carbon emission permit for wind farms integrated power grid considering demand response[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 213-218(in Chinese).
- [43] 丁伟, 袁家海, 胡兆光. 基于用户价格响应和满意度的峰谷分时电价决策模型[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(20): 10-14.
Ding Wei, Yuan Jiahai, Hu Zhaoguang. Time-of-use price decision model considering users reaction and satisfaction index[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(20): 10-14(in Chinese).
- [44] 日经 BP 社. 丰田着手开发具备蓄电功能的 HEMS, 力争 2011 年实用化[EB/OL]. (2009-01-01). http://www.newmaker.com/news_67547.html.
NIKKEI BP. Toyota sets out to develop electricity storage HEMS and is working hard to make it practical 2011 [EB/OL]. (2009-01-01). http://www.newmaker.com/news_67547.html(in Chinese).
- [45] 吴杰康, 任震, 黄雯莹, 等. 在全面开放的电力市场中用户用电管理及其策略[J]. 电网技术, 2001, 25(8): 50-53, 57.
Wu Jiekang, Ren Zhen, Huang Wenying, et al. Customer management of electric energy use and its strategy in fully open electricity market[J]. Power System Technology, 2001, 25(8): 50-53, 57(in Chinese).
- [46] Fahrioglu M, Alvarado F L. Using utility information to calibrate customer demand management behavior models [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(2): 317-322.
- [47] 鞠全勇. 智能制造系统生产计划与车间调度的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
Ju Quanyong. Research on intelligent manufacturing system of production planning and workshop scheduling [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2007(in Chinese).
- [48] 侯晓坤. 需求响应在商业楼宇中的应用[J]. 电源技术应用, 2013(12): 559, 569.
Hou Xiaokun. Application of demand response in commercial buildings[J]. Power Supply Technology Application, 2013(12): 559, 569(in Chinese).
- [49] 李悦, 刘鲲. 用电侧智能家居解决方案[C]//2010 第二届中国电工仪器仪表产业发展论坛. 宁波: 中国仪器仪表协会, 2010: 105-109.
Li Yue, Liu Kun. Measurement for demand side in smart home[C]//The 20th China Electrical Instrumentation Industry Development Forum in 2010. Ningbo: China association of instruments and meters, 2010: 105-109(in Chinese).
- [50] Bompard E, Napoli R, Bo Wan. The effect of the programs for demand response incentives in competitive electricity markets[J]. European Transactions on Electrical Power, 2009, 19(1): 127-139.
- [51] 王蓓蓓, 李扬. 面向智能电网的电力需求侧管理规划及实施机制[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(12): 19-24.

- Wang Beibei, Li Yang. Demand side management planning and implementation mechanism for smart grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(12): 19-24(in Chinese).
- [52] 张泽卉. 需求响应效益的量化评估研究[D]. 山东: 山东大学, 2011.
Zhang Zehui. Research on quantitative evaluation of the benefit demand response[D]. Shandong: Shandong University, 2011(in Chinese).
- [53] 任震, 邝新武, 黄雯莹. 可中断负荷措施的成本效益分析[J]. 电网技术, 2006, 30(7): 22-25.
Ren Zhen, Kuang Xinwu, Huang Wenying. Cost-benefit analysis for actualizing interruptible load measure [J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 22-25(in Chinese).
- [54] 谈金晶. 考虑可再生能源接入的需求响应资源综合评价研究[D]. 南京: 东南大学, 2013.
Tan Jinjing. Research on demand response resources comprehensive value evaluative considering renewable energy integration[D]. Nanjing: Southeast University, 2013(in Chinese).
- [55] 董军, 张婧, 陈小良, 等. 考虑需求侧响应的短期阻塞管理模型与激励机制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 24-28.
Dong Jun, Zhang Jing, Chen Xiaoliang, et al. Study on short-run congestion management model and incentive mechanism considering demand response[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 24-28(in Chinese).
- [56] 李海英, 李渝曾, 张少华. 一种激励相容的输电阻塞管理模型[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 36-40.
Li Haiying, Li Yuzeng, Zhang Shaohua. An incentive compatible model for transmission congestion management[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 36-40(in Chinese).
- [57] Fahrioglu M, Alvarado F L. Designing incentive compatible contracts for effective demand management [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(4): 1255-1260.
- [58] 陈璐, 杨永标, 姚建国, 等. 基于电力积分的需求响应激励机制设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 82-87.
Chen Lu, Yang Yongbiao, Yao Jianguo, et al. Incentive mechanism design for demand response based on power score[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 82-87(in Chinese).
- [59] 刘宝华, 王冬容, 曾鸣. 从需求侧管理到需求侧响应[J]. 电力需求侧管理, 2005, 7(5): 10-13.
Liu Baohua, Wang Dongrong, Zeng Ming. From DSM to demand side response[J]. Power Demand Side Management, 2005, 7(5): 10-13(in Chinese).
- [60] 朱治中. 电力系统经济学原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
Zhu Zhizhong. Fundamental of power system economics [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007(in Chinese).
- [61] 赵鸿图, 朱治中, 于尔铿. 电力市场中需求响应市场与需求响应项目研究[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 146-153.
Zhao Hongtu, Zhu Zhizhong, Yu Erkeng. Study on demand response markets and programs in electricity markets[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 146-153(in Chinese).
- [62] 刘峻, 何世恩. 建设坚强智能电网助推酒泉风电基地发展[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 19-23.
Liu Jun, He Shien. Strong smart grid boosts Jiuquan wind power base development[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 19-23(in Chinese).
- [63] Elliott R N, Eldridge M, Shipley A M, et al. Potential for energy efficiency, demand response, and onsite renewable energy to meet texas's growing electricity needs [R]. America: American Council for an Energy-Efficient Economy, 2007.
- [64] 孙宇军, 李扬, 王蓓蓓, 等. 需求响应促进可再生能源消纳的运作模式研究[J]. 电力需求侧管理, 2013(6): 6-10.
Sun Yujun, Li Yang, Wang Beibei, et al. Study on operation mode of demand response accommodating the utilization of renewable energy[J]. Power Demand Side Management, 2013(6): 6-10(in Chinese).
- [65] Wu Chenye, Mohsenian-Rad H, Huang Jianwei, et al. Demand side management for wind power integration in microgrid using dynamic potential game theory[C]// GLOBECOM Workshops. Beijing, China: IEEE, 2011: 1199-1204.
- [66] Roscoe A J, Ault G. Supporting high penetrations of renewable generation via implementation of real-time electricity pricing and demand response[J]. Renewable Power Generation, IET, 2010, 4(4): 369-382.
- [67] Hamidi V, Li F, Robinson F. Responsive demand in networks with high penetration of wind power[C]// Transmission and Distribution Conference and Exposition. Chicago, IL: IEEE, 2008: 79.
- [68] Moura P S, Anibal T De Almeida. The role of demand-side management in the grid integration of wind power [J]. Applied Energy, 2010, 87(8): 2581-2588.
- [69] Moura P S, Anibal T de Almeida. Multi-objective optimization of a mixed renewable system with demand-side management[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(5): 1461-1468.
- [70] Al-Alawi A, Islam S M. Demand side management for remote area power supply systems incorporating solar

- irradiance model[J]. *Renewable energy*, 2004, 29(13): 2027-2036.
- [71] 董楠. 电力负荷峰谷特性的谱分析方法及应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
Dong Nan. Research on spectral analysis method and application of electric load peak-valley characteristics [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012(in Chinese).
- [72] André P, Silva C, Ferrão P. The impact of demand side management strategies in the penetration of renewable electricity[J]. *Energy*, 2012, 41(1): 128-137.
- [73] Watson D. Fast automated demand response to enable the integration of renewable resources[EB/OL]. [2012-05-01]. http://esci-ksp.org/wp/wp-content/uploads/2012/05/Day2_5_Fast-Automated-Demand-Response-to-Enable-the-Integration-of-Renewable-Resources.pdf.
- [74] 王蓓蓓, 刘小聪, 李扬. 面向大容量风电接入考虑用户侧互动的系统日前调度和运行模拟研究[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(22): 35-44.
Wang Beibei, Liu Xiaocong, Li Yang. Day-ahead generation scheduling and operation simulation considering demand response in large-capacity wind power integrated systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(22): 35-44(in Chinese).
- [75] Wang Beibei, Hobbs B F. A flexible ramping product: Can it help real-time dispatch markets approach the stochastic dispatch ideal?[J]. *Electric Power Systems Research*, 2014(109): 128-140.
- [76] 田世明. 高级量测技术研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2013.
Tian Shiming. Technology research on advanced metering infrastructure[R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2013(in Chinese).
- [77] Rocky Mountain Institute. Automated demand response system pilot, final report volume 1-Introduction and executive summary[EB/OL]. (2006-01-01)[2013-10-10]. <https://www.sgclearinghouse.org/LessonsLearned?q=node/2408&lb=1>.
- [78] Faruqui A. The Power of experimentation new evidence on residential demand response [EB/OL]. [2013-10-10]. <http://www.brattle.com/experts/ahmad-faruqui>.



田世明

收稿日期：2014-05-14。

作者简介：

田世明(1965), 男, 高级工程师, 主要研究方向为智能电网用电、需求侧管理、分布式电源等, laotian@epri.sgcc.com.cn;

王蓓蓓(1979), 女, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力市场、需求侧管理, wangbeibei@seu.edu.cn;

张晶(1963), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为需求侧管理、需求响应、智能电网用电等。

(编辑 李泽荣)