

面向电力需求侧主动响应的商业模式及市场框架设计

丁 一¹, 惠红勋¹, 林振智¹, 郑梦莲², 曲欣瑶¹, 崔文琪¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310058; 2. 浙江大学能源工程学院, 浙江省杭州市 310058)

摘要: 中国智能电网的发展面临峰谷差持续拉大、空调负荷不断攀升、新能源接入等新挑战, 而电力需求响应是解决上述问题的有效方法之一。中国新一轮电力体制改革正在稳步推进, 为电力需求响应的发展提供了重要契机。在此背景下, 文中分析了不同市场环境下电力需求响应的开展情况, 提出了适合中国国情的面向电力需求侧主动响应的商业模式。通过分析需求响应与电力市场的关系, 设计了与中国电力市场改革相互协同的包含需求响应的市场框架: 在第 1 阶段建立与电量市场相对独立、包含需求响应的辅助服务市场; 在第 2 阶段建立与电力市场相结合、包含需求响应的辅助服务市场。此外, 分别介绍了 2 个阶段中需求响应的产品类型、出清方式和考核方式。面向电力需求侧主动响应的商业模式和市场框架要随中国电力市场的发展而不断完善, 需求响应将在电力系统的稳定性和经济性方面发挥更大作用。

关键词: 需求响应; 电力市场; 商业模式; 市场框架

0 引言

随着产业结构的转型和人民生活水平的提高, 电力需求季节差异越发凸显; 同时, 空调用电占比不断攀升, 用电尖峰日益明显^[1]。现代通信系统和智能电表的广泛应用, 使需求侧资源具备了快速响应以协助电力系统平衡的能力^[2-3]。2015 年 3 月, 随着《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》(中发〔2015〕9 号, 以下简称 9 号文) 的发布, 中国开启了新一轮电力体制改革^[4]。9 号文明确指出要积极开展电力需求侧管理, 实施需求响应, 通过市场手段增大系统的柔性调节能力, 保障生活和生产安全, 完成电网角色由管理型向服务型的转变^[5]。

国内外研究表明, 电力需求响应具有协助系统降低峰谷差、消纳新能源、提高系统经济性等功能^[6-12]。欧盟智能生态电网(Ecogrid EU)项目设计了适应需求侧主动响应的市场机制, 以实时电价反映电力供需情况, 提高了系统消纳新能源的能力^[13-14]。文献^[15]提出了针对中国需求响应的一种运作模式, 即在智能电网起步阶段通过政府的财政手段指导电力用户开展工作, 在智能电网发展成长期成立专项基金支持电力公司开展工作。文献^[16]提出了一种以电力公司和用户为主体、以电网和负

荷设备为物理系统的需求响应概念模型, 并设计了需求响应控制中心到负荷设备的二级物理系统构架。然而, 国外的需求响应研究还不适用于中国的电力市场环境; 国内的需求响应研究仅限于理论研究层面, 结合中国电力市场改革现状的需求响应商业模式和市场框架研究不足。

2016 年国家重点研发计划“城区用户与电网供需友好互动系统”在江苏省启动, 该项目将通过城区用户与电网之间的供需友好互动, 实现降低区域综合能耗、减小电网峰谷差的目标。此项目以江苏省苏州市环金鸡湖地区和常州市武进地区为示范区, 建成后将成为世界上规模最大的需求响应示范工程之一。

本文将结合中国电力市场改革进程, 探索中国在不同阶段市场环境中需求响应的商业模式和市场框架。

1 不同市场环境下电力需求响应的参与方式

电力需求响应的参与方式与市场环境紧密相关。在不同的市场环境下, 电力需求响应的实施对象、市场手段和执行方式都不相同^[17-23]。本文以中国未开展需求响应的地区和已经开展需求响应的地区(如江苏省), 以及美国 ERCOT (Electric Reliability Council of Texas) 电力市场为典型案例^[24], 分析电力需求响应的发展现状。

收稿日期: 2017-02-18; 修回日期: 2017-06-11。

上网日期: 2017-06-16。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0901103)。

1.1 中国未开展需求响应的地区

需求响应的概念在中国被提出之前,需求侧管理早已在中国推行,主要用于削峰填谷、节能省电和能源替换等^[6]。需求侧管理主要是站在系统安全可靠运行的角度,采取行政命令的手段削减负荷,用户参与调控被当做一项义务,主要的执行方式有有序用电和峰谷电价等。

1.2 中国已开展需求响应的地区

已经开展需求响应的地区以江苏省为例,依靠行政命令手段的需求侧管理开始向需求侧主动响应转变。需求响应强调用户与电网的友好互动,是用户的主动行为,协助系统削峰填谷和新能源的消纳,从而使系统更加经济高效。需求响应采用部分项目自愿的参与原则,受到相应的政策鼓励,包括电价政策带来的平均电费的降低,以及激励政策给予的补贴。

1.3 美国 ERCOT 电力市场

美国 ERCOT 电力市场把需求响应定位为提升系统的可靠性和经济性、增强市场的竞争性、降低价格尖峰、使需求侧更好地响应批发市场的价格信号^[25]。由于 ERCOT 具有完全竞争的现货市场,能够提供反映实际电力供需在不同时段的电力价值,因而为需求响应提供了很好的价格参考和更丰富的参与形式。ERCOT 市场中的需求响应产品包括 5 种^[26]。

1) 负荷资源。它可以参与辅助服务市场,提供响应备用服务,在日前市场中与发电机提供的电能和备用服务共同出清;还可以作为可控负荷资源参与实时能量市场,提供旋转备用服务和快速响应调节服务。2015 年,ERCOT 拥有 238 个负荷资源,总容量达 3 412.51 MW。

2) 紧急响应服务(emergency response service, ERS)。它包含非天气敏感型 ERS 和天气敏感型 ERS 两种,根据 10 min 响应速度和 30 min 响应速度分别购买。

3) 输配电服务商负荷管理项目。它指输配电服务商与 ERCOT 签订协议,规定了响应速度、月度和年度的最多响应次数、每次响应最长持续小时数和年度最长持续小时数。输配电服务商负荷管理项目一般只存在于 6 月至 9 月这 4 个月每个工作日的 13:00—19:00。受控的终端用户通过减少指定时间段的峰值需求,得到来自输配电服务商的补偿。2015 年,ERCOT 的 5 个输配电服务商提供的负荷管理项目总容量达 180 MW。

4) 4CP(coincident peak) 负荷削减。4CP 指夏季 6 月至 9 月这 4 个月用户的最高同时负荷,以

15 min 为时间尺度计量。无购电选择权区域的实体(non-opt in entity)和有购电选择权区域的大用户(容量超过 700 kW)可以参与 4CP 负荷削减。2015 年,ERCOT 购买的 4CP 负荷削减容量约为 840~985 MW。

5) 价格响应的需求响应产品。它受需求侧工作组指导并由电力零售商提供给用户,包括尖峰电价、实时电价、分时电价和尖峰回扣等产品类型。2015 年,ERCOT 价格响应的需求响应产品容量约为 472~761 MW。

1.4 电力需求响应效益分析

电力需求响应的效益,是指与未引入需求响应前相比,引入需求响应后获得的经济效益,包括短期经济效益和中长期经济效益^[27]。因此,电力需求响应总经济效益为考察期内各次需求响应产生的短期经济效益与中长期经济效益之和,减去初始成本和各次的响应成本。

1) 短期经济效益

未建立现货市场^[28]时,需求响应短期经济效益包括降低系统峰谷差、提高系统可靠性和降低电力消耗的效益。

建立现货市场(包括以英国为代表的基于双边合同的现货市场和以美国为代表的基于集中竞价的现货市场^[28])时,需求响应短期经济效益表现为供应侧和需求侧总成本的减少。

2) 中长期经济效益

需求响应中长期经济效益应根据避免峰荷容量成本的方法计算,包括发电厂投资成本和电网投资成本。

3) 初始成本和响应成本

初始成本是指实现需求响应最初的技术和设备投资费用,包括软件开发投资费用、硬件设备投资费用,以及针对用户的宣传培训费用;响应成本是指用户在每次响应中调整用电行为造成的损失,包括用户改期生产的损失、需求响应通信设备耗电成本,以及用电舒适度降低的机会成本^[29]。

2 电力需求响应的商业模式设计

目前,中国处于电力体制改革的过程中,没有成熟电力市场中的现货市场、辅助服务市场等。因此,需求响应的商业模式不能照搬国外成熟市场环境下的需求响应案例。

2.1 电力需求响应市场的参与主体

中国于 2016 年发布了国家标准《电力需求响应系统通用技术规范》,将需求响应的参与者定义为 5 个,分别是电能供应商、需求响应监管者、需求响

应服务管理者、需求响应聚合商和电力用户^[30]。其中,电能供应商指发布电力价格信息和负荷需求信息的电网营销部门;需求响应监管者指对需求响应业务进行指导监督的政府部门;需求响应服务管理者指监测需求响应系统运行并评估需求响应效果的电网调度部门;需求响应聚合商指聚合并管理用户侧分散的响应资源的实体;电力用户是指参与需求响应的个体电力用户。目前,在中国的电力市场架构中,5个需求响应参与者可以划分为3个参与主体,分别是政府(需求响应监管者)、电网公司(电能供应商和需求响应服务管理者)和需求响应提供商(demand response provider, DRP)(需求响应聚合商和电力用户)。

1) 政府负责市场的监管,包括对电网公司制定的电价、激励等政策的审核和对用户的宣传引导。通过鼓励负荷聚合商、智能家电厂商、分布式能源厂商、分布式储能和电动汽车的发展,推动需求响应市场的活跃和技术的革新。

2) 电网公司负责需求响应市场的运营管理,建立透明公开的交易体系,使需求响应工作健康有序发展^[5]。通过制定合理的政策,提高 DRP 参与需求响应市场的积极性。此外,电网公司负责开发和完善相关交易平台并提供技术支持。

3) DRP 是提供需求响应的实体,可以参与到市场的各个环节。DRP 可以是专门的需求响应服务商,也可以是普通的负荷聚合商。由于中国负荷聚合商的发展刚刚起步,为鼓励更多用户参与需求响应,DRP 包含大工业用户、普通工商业用户和普通居民用户,建议不设置响应容量限制。同时,DRP 也可以是分布式电源公司、充电站(充电桩)运营公司和智能家电厂商等。

2.2 电力需求响应市场的商业模式

商业模式可以定义为商业活动参与者之间的价值交换^[31-32]。电力需求响应市场中的3个参与主体,即政府、电网公司和 DRP;政府在中没有资金收益,其为全社会能源资源的优化配置、促进经济发展、提高社会效率提供服务;电网公司在需求响应市场中的主要功能是建立交易体系,完善相关政策和平台,获得固定的劳务收益,不参与市场的竞争获益;DRP 在响应成功后获得相应的补贴,包括资金补贴、电费抵扣等方式;电力用户是需求响应市场资金的根本来源,通过不同时段有区分度的电价政策,获得资金收益。

电力需求响应市场建立初期,商业模式如图1所示。政府负责市场管理并制定灵活的电价政策,电网公司负责市场运营,将获得的资金收益补贴给

成功响应的 DRP。

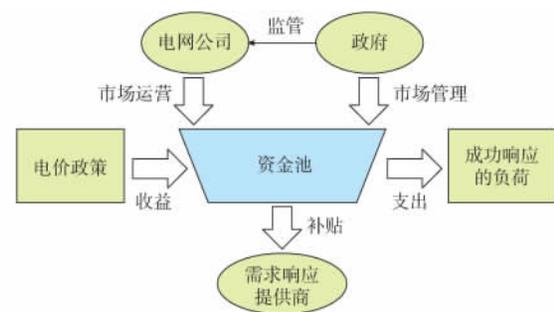


图1 现阶段中国电力需求响应市场的商业模式

Fig. 1 Business model of demand response market at the present stage

3 电力需求响应的市场框架设计

3.1 需求响应与电力市场的关系

电力需求响应的市场框架设计要与我国电力市场改革现状相结合。9号文开启了中国新一轮的电力体制改革,广东省启动了电力市场化交易,浙江省发布了电力用户与发电企业直接交易试点方案,江苏省启动了电力集中竞价交易^[33-35]。上述电力市场化交易方式均围绕“电量”开展,即交易时间长度为1年、1季度或1个月。交易方式主要有2种,即电力用户与发电企业的双边协商形式和集中竞价形式。本文将中国这种电力市场暂且称为“电量市场”。然而,需求响应主要为系统提供辅助服务,要求市场框架围绕“电力”开展。

现阶段,中国的辅助服务可分为基本辅助服务和有偿辅助服务2种^[36]。基本辅助服务不予补偿,是为了保障电力系统安全稳定运行、保证电能质量、发电机组必须提供的辅助服务,包括一次调频、基本调峰和基本无功调节。有偿辅助服务是指并网发电厂在基本辅助服务之外所提供的辅助服务,包括自动发电控制(automatic generation control, AGC)、有偿调峰、有偿无功调节、自动电压控制(automatic voltage control, AVC)、旋转备用、热备用和黑启动。因此,需求响应提供的辅助服务应与发电机组提供的有偿辅助服务平等竞争。

基于以上针对中国电力市场改革的分析及辅助服务的分析,本文设计的面向电力需求侧主动响应的市场框架包含2个阶段。

第1阶段:当前中国电力市场改革的方向是双边协商和集中竞价形式的电量市场,而面向电力需求侧主动响应的市场框架要围绕“电力”开展。因此,中国在第1阶段应发展与电量市场相对独立的、包含需求响应的辅助服务市场。

第2阶段:随着电力市场改革的深入,以年度和

月度为时间尺度的电量市场会发展为更小时间尺度的电力市场,即建立电力现货市场。此时,可以发展联合电力市场的含需求响应的辅助服务市场。

3.2 第1阶段:与电量市场相对独立的含需求响应的辅助服务市场

1) 需求响应的产品类型

需求响应的参与方式一般包括价格型需求响应和激励型需求响应^[37]。其中,价格型需求响应指通过较短时间尺度(如15 min)的电价变化影响电力用户的用电需求。然而,中国现阶段的电力市场改革是中长期的电量交易,零售商在批发市场中购买的电量在月内价格相同。零售商在零售市场中发布较短时间尺度的动态电价没有意义。因此,在第1阶段不设计价格型需求响应。

激励型需求响应是指通过激励政策使用户在系统可靠性受到影响或发电成本较高时及时响应并削减负荷^[37]。类似于本文3.1节所述的发电机组提供的辅助服务,本文设计激励型需求响应为系统提供4种辅助服务:自动中断控制、旋转备用、热备用和调峰服务。其中,自动中断控制与发电机组的AGC对应,跟踪电力调度指令,可在秒级实现中断操作;旋转备用和热备用主要为保证系统可靠供电,分别可在10 min内和1 h内达到响应容量要求;调峰服务主要为应对系统的负荷尖峰,在24 h内达到响应容量要求。因此,激励型需求响应可以与发电机组平等竞争提供如上4种有偿辅助服务(原来全部由发电机组提供,现在也可以由激励型需求响应提供),如图2所示。

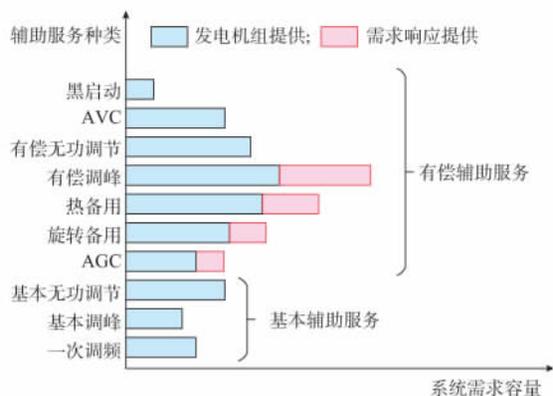


图2 激励型需求响应参与的4种辅助服务
Fig. 2 Four ancillary services that can be provided by incentive demand response

2) 需求响应与辅助服务市场及电量市场关系

现阶段中国的电力市场是中长期的电量交易市场(如广东、江苏等),而辅助服务市场围绕“电力”展开,所以现阶段的辅助服务市场与电量市场相对独

立。辅助服务市场不只进行中长期时间尺度的交易,还在日前市场交易。现阶段的需求响应类型只包含激励型去参与4种辅助服务,如图3所示。

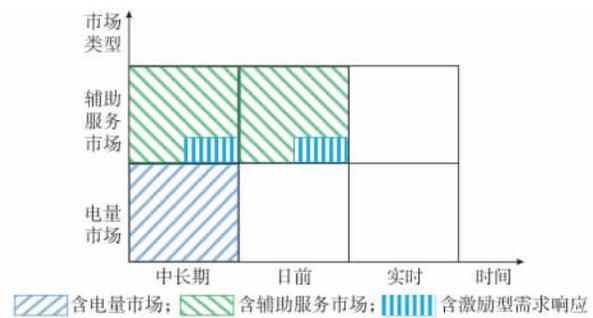


图3 第1阶段电量市场与辅助服务市场关系
Fig. 3 Relationship between energy market and ancillary service market in the first stage

3) 含需求响应的辅助服务市场竞价与出清方式

如图2所示,基本辅助服务是规定发电机组必须提供的辅助服务,不予补偿。有偿辅助服务中的3种(有偿无功调节、AVC和黑启动)仅由发电机组集中竞价提供,另外4种(AGC、旋转备用、热备用和有偿调峰)由DRP和发电商集中竞价提供。

系统组织者根据报价从低到高进行排序,累计容量达到系统辅助服务需求容量时,对应的报价即为此类有偿辅助服务的出清价格,如图4所示,在某时段,某种有偿辅助服务的需求容量为 Q_1 ,则出清价格为 P_1 。考虑到DRP和发电商在不同时间能够提供的辅助服务容量不同,可以根据工作日24时段和节假日24时段分别出清。

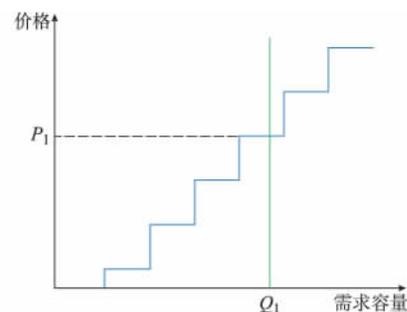


图4 含需求响应的辅助服务市场出清方式
Fig. 4 Clearing methods of price in ancillary service market containing demand response

4) 批发市场与零售市场的关系

上述电量市场和辅助服务市场的竞价均属于批发市场,只有发电商和零售商(或工商业大用户)可以参与,小规模终端用户不能参与。小规模终端用户可以在零售市场中选择零售商购电和参与需求响应,如图5所示。

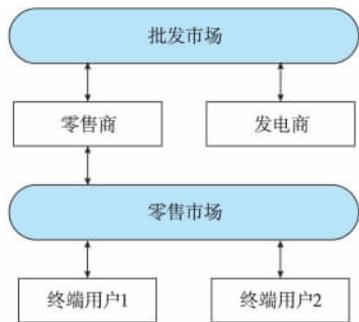


图 5 批发市场与零售市场关系
Fig. 5 Relationship between wholesale market and retail market

在批发市场中,零售商和发电商进行电量交易,同时也进行辅助服务集中竞价。在零售市场中,零售商需要将购买的电量和竞价得到的辅助服务出售给终端用户。因此,零售商(部分零售商参与需求响应即为 DRP)实现了批发市场和零售市场之间的传导。

DRP 出售辅助服务的方式包括:帮助用户安装远程控制设备并与用户签订远程控制合同;帮助用户安装自动控制装置并与用户签订可中断合同;发送短信提示用户暂时关闭家电设备等。

DRP 可以根据用户提供的需求响应容量和响应速度对用户进行奖励。DRP 从批发市场获益并通过零售市场支付部分收益给终端用户,赚取中间差额部分。

3.3 第 2 阶段:联合电力市场的含需求响应的辅助服务市场

1) 需求响应与辅助服务市场及电力市场关系

随着电力市场改革的深入,以年度和月度交易为主的电量市场发展为更小时间尺度的电力现货市场,此时可发展联合电力市场的含需求响应的辅助服务市场(即第 2 阶段)。

与第 1 阶段相比,第 2 阶段的电力价格可以在短时间波动,并由批发市场传导到零售市场。因此,需求响应的参与类型包括价格型需求响应,同时也包括提供备用型辅助服务的激励型需求响应,如图 6 所示。

中长期电力市场中,零售商和发电商可以签订双边合同规避价格波动风险。中长期辅助服务市场中,可以集中竞价出清部分辅助服务容量,中标机组和 DRP 必须参与日前和实时的辅助服务市场,根据可用容量获得容量收益,这有助于引导需求响应的投资。下文将着重介绍日前市场和实时市场。

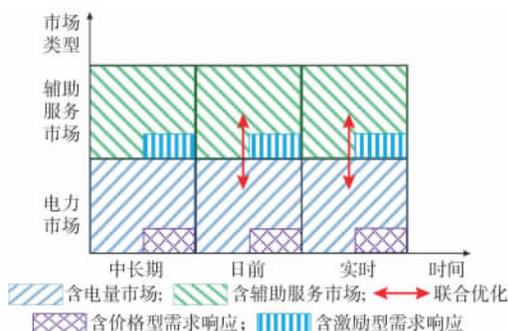


图 6 第 2 阶段电力市场与辅助服务市场关系
Fig. 6 Relationship between electricity market and ancillary service market in the second stage

2) 日前市场

日前市场中,DRP 可以提供随用电递减的电力报价曲线,也可以提供备用型辅助服务的容量报价曲线。此时,机组组合、机组出力及辅助服务(含需求响应)联合优化,优化目标为总社会成本最小,可以表示为:

$$\min \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I [S_i \alpha_i(t) (1 - \alpha_i(t-1)) + F_{G_i,t}(P_{G_i}^D(t)) + C_{G_i,t}^{up}(E_{G_i}^{up}(t)) + C_{G_i,t}^{down}(E_{G_i}^{down}(t))] + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K C_{k,t}^{up}(D_k(t)) - \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M B_{m,t}(P_m^D(t)) \right\} \quad (1)$$

式中: T 为时段数; I 为机组个数; S_i 为机组 i 的开机费用; $\alpha_i(t)$ 为机组 i 在时段 t 的开停机状态,开机则 $\alpha_i(t)=1$,关机则 $\alpha_i(t)=0$; $P_{G_i}^D(t)$ 为机组 i 的有功功率; $F_{G_i,t}(P_{G_i}^D(t))$ 为机组 i 的运行成本; $E_{G_i}^{up}(t)$ 和 $E_{G_i}^{down}(t)$ 分别为机组 i 的上调量和下调量; $C_{G_i,t}^{up}(E_{G_i}^{up}(t))$ 和 $C_{G_i,t}^{down}(E_{G_i}^{down}(t))$ 分别为机组 i 提供上调辅助服务和下调辅助服务的成本; K 为提供辅助服务的 DRP 个数; $D_k(t)$ 为 DRP 提供的备用容量; $C_{k,t}^{up}(D_k(t))$ 为 DRP 提供的辅助服务成本; $M, P_m^D(t), B_{m,t}(P_m^D(t))$ 分别为提供随用电递减的电力报价曲线的 DRP 个数、DRP 有功功率,以及 DRP 的用电收益。

日前市场的安全约束机组组合优化模型的约束条件包括 8 组,分别是:潮流方程、联络线断面潮流约束、最小开停机约束、机组出力约束、机组爬坡率约束、系统最小备用容量约束、提供备用型辅助服务的 DRP 容量约束,以及提供电力报价的 DRP 出力约束。其中,系统最小备用容量约束要包含需求响应提供的备用容量,即

$$\sum_{i=1}^I E_{G_i}^{up}(t) + \sum_{k=1}^K D_k(t) \geq E^{up} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^I E_{Gi}^{\text{down}}(t) \geq E^{\text{down}} \quad (3)$$

式中: E^{up} 和 E^{down} 分别为系统最小上调备用容量和最小下调备用容量。

提供备用型辅助服务的 DRP 容量约束为:

$$0 \leq \sum_{k=1}^K D_k(t) \leq \beta E^{\text{up}} \quad (4)$$

式中: β 为需求响应容量在系统上调备用容量中的占比。

由于需求响应的不确定性较大,因此限制其在系统备用容量中的占比,以保证系统的安全可靠。例如:ERCOT 电力市场,其需求侧资源提供旋转备用的响应容量在 ERCOT 电力市场总旋转备用容量中的占比被限制到不大于 50%,即 $\beta=50\%$ 。

提供电力报价的 DRP 出力约束为:

$$P_m^{\text{D}}(t) \leq \bar{P}_m \quad (5)$$

$$P_m^{\text{D}}(t) \geq \underline{P}_m \quad (6)$$

式中: \bar{P}_m 和 \underline{P}_m 分别为 DRP 的负荷最大功率和最小功率。

3) 实时市场

实时市场中,DRP 可以提供随用电递减的电力报价曲线,也可以提供备用型辅助服务的容量报价曲线。此时,机组出力和辅助服务(含需求响应)联合优化,优化目标为总社会成本最小,可以表示为:

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^I [F_{Gi,t}(P_{Gi}^{\text{D}}(t) + \Delta P_{Gi}^{\text{D}}(t)) + C_{Gi,t}^{\text{up}}(E_{Gi}^{\text{up}}(t)) + C_{Gi,t}^{\text{down}}(E_{Gi}^{\text{down}}(t))] + \sum_{k=1}^K C_{k,t}^{\text{up}}(D_k(t)) - \sum_{m=1}^M B_{m,t}(P_m^{\text{D}}(t) + \Delta P_m^{\text{D}}(t)) \right\} \quad (7)$$

式中: $\Delta P_{Gi}^{\text{D}}(t)$ 为机组 i 的有功功率与日前市场中有功功率的偏差; $\Delta P_m^{\text{D}}(t)$ 为提供随用电递减的电力报价曲线 DRP 的有功功率与日前市场中有功功率的偏差。

实时市场中考虑安全约束的经济调度约束条件与日前市场中考虑安全约束的机组组合约束条件相比,不包含最小开停机约束,其余约束条件相同,只是要将约束中的 $P_{Gi}^{\text{D}}(t)$ 更改为 $P_{Gi}^{\text{D}}(t) + \Delta P_{Gi}^{\text{D}}(t)$, $P_m^{\text{D}}(t)$ 更改为 $P_m^{\text{D}}(t) + \Delta P_m^{\text{D}}(t)$ 。

4) 零售市场中的价格型和激励型需求响应

与第 1 阶段类似,上述电力市场和辅助服务市场的竞价均属于批发市场,只有发电商和零售商(或工商业大用户)可以参与,小规模终端用户不能参与。但小规模终端用户可以在零售市场中选择零售商购电和参与需求响应,如图 5 所示。

零售市场中的价格型需求响应:与第 1 阶段不同,第 2 阶段存在电力现货市场,电力价格可以在短时间内波动,此时零售商会通过零售市场将波动电价传导给终端用户。零售商在零售市场中可以制定多种形式的电价套餐(包括恒定电价、峰谷电价、分时电价、实时电价等)供终端用户选择。零售商的目标是收益最大,即从零售市场出售电力的收益减去从批发市场购买电力的支出最大。因此,零售商制定的恒定电价会比实时电价的均价略高,以规避电价波动的风险。此时,终端用户会以电力支出最小为目标在零售市场中选择电价套餐,电价敏感型的用户将更愿意选择实时电价或分时电价,从而积极响应波动电价来减少电费支出。

零售市场中的激励型需求响应:与第 1 阶段类似,在零售市场中,零售商(参与备用型辅助服务的 DRP)将批发市场出清得到的备用型辅助服务出售给小规模终端用户,出售方式包括与用户签订远程控制合同、可中断合同等。DRP 从批发市场获益并通过零售市场支付部分收益给终端用户,赚取中间差额。

3.4 需求响应市场的考核与结算方式

价格型需求响应不需要考核,电力用户受电价政策的影响改变用电方式;激励型需求响应采用与基本负荷曲线(简称“基线”)对比的方式进行考核。统计激励型需求响应的电力用户过去 1 年的用电数据,根据季节、日期和天气建立回归模型,得到该用户在不同情形时的日负荷曲线,作为该用户的用电基线,如图 7 所示。

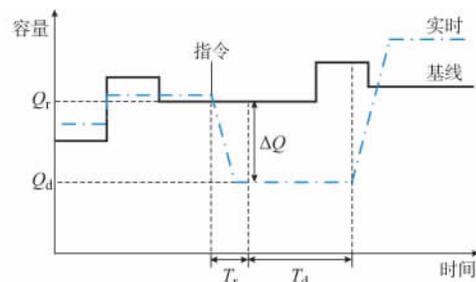


图 7 激励型需求响应考核方式

Fig. 7 Assessment method of incentive demand response

实时运行中,DRP 收到需求响应指令后在规定时间内(T_r)内的功率削减量要达到合同规定的响应容量($\Delta Q=Q_r-Q_d$),并保持不增大耗电功率一段时间(T_d),则为响应成功。

以提供旋转备用的电力用户为例,电力用户收到系统指令后,需要在 T_r (10 min) 内削减功率($\Delta Q \geq$ 合同容量),保持不增大耗电功率的时长($T_d \geq$ 合同规定持续时间),则为响应成功。

结算系统包括年度结算、月度结算、月终核算和年终核算。价格型需求响应根据用户耗电量与电价计费规则进行结算,在每月结束后进行月度结算。激励型需求响应在年度市场交易结束后进行年度结算,在月度市场交易结束后进行月度结算。激励型需求响应的电力用户每次执行需求响应后,将被电力调度部门考核,未通过考核的用户将在月终核算和年终核算中被给予惩罚。

4 结语

本文立足于中国智能电网发展过程中的新挑战,探讨了开展电力需求响应的紧迫性和重要性。通过分析需求响应在不同国家和地区的典型案例,得出中国目前处于电力市场改革的过程中,需要分2个阶段制定电力需求响应政策。其次,本文分析了需求响应市场的参与主体及各主体的作用,构建了适合中国现状的电力需求响应商业模式。最后,设计了与中国电力市场改革相互协同的需求响应市场框架,可为需求响应工作的开展提供良好的交易环境。

随着分布式能源、电动汽车、储能设备和信息技术的发展,需求响应可为电力系统作出更大贡献。然而,中国需求响应的开展尚处于起步阶段,商业模式和市场框架需要结合实际情况不断修正,以增强其合理性和全面性。随着电力市场改革的不断推进,需求响应市场的产品类型将更加市场化,参与方式将更加多元化。

参考文献

- [1] 李天阳,赵兴旺,肖文举.面向峰谷平衡的商业楼宇空调负荷调控技术[J].电力系统自动化,2015,39(17):96-102. DOI: 10.7500/AEPS20150311009.
LI Tianyang, ZHAO Xingwang, XIAO Wenju. Regulation technology of air-conditioning load in commercial buildings for balance of power grid peak and valley[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 96-102. DOI: 10.7500/AEPS20150311009.
- [2] 王剑晓,钟海旺,夏清,等.基于成本-效益分析的温控负荷需求响应模型与方法[J].电力系统自动化,2016,40(5):45-53. DOI: 10.7500/AEPS20150521009.
WANG Jianxiao, ZHONG Haiwang, XIA Qing, et al. Model and method of demand response for thermostatically-controlled loads based on cost-benefit analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 45-53. DOI: 10.7500/AEPS20150521009.
- [3] HUI Hongxun, DING Yi, LIU Weidong, et al. Operating reserve evaluation of aggregated air conditioners[J]. Applied Energy, 2017, 196: 218-228.
- [4] 中共中央、国务院关于进一步深化电力体制改革的若干意见(中发〔2015〕9号)[EB/OL]. [2017-02-15]. <http://www.ne21.com/news/show-64828.html>.
- [5] 丁一,吴华华,惠红勋,等.适合需求侧主动响应的中国电力市场机制的思考与建议[J].南方电网技术,2016,10(3):24-31.
DING Yi, WU Huahua, HUI Hongxun, et al. Analysis and related suggestions on power market mechanism of demand side response in China[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(3): 24-31.
- [6] 胡兆光.需求侧管理在中国的应用与实施[J].电力系统自动化,2001,25(1):41-44.
HU Zhaoguang. Application of demand side management to China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(1): 41-44.
- [7] 王冬容.价格型需求侧响应在美国的应用[J].电力需求侧管理,2010,12(4):74-77.
WANG Dongrong. Application of price-based demand side response in the USA[J]. Power Demand Side Management, 2010, 12(4): 74-77.
- [8] 宋梦,高赐威,苏卫华.面向需求响应应用的空调负荷建模及控制[J].电力系统自动化,2016,40(14):158-167. DOI: 10.7500/AEPS20160307018.
SONG Meng, GAO Ciwei, SU Weihua. Modeling and controlling of air-conditioning load for demand response applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 158-167. DOI: 10.7500/AEPS20160307018.
- [9] 刘念,王程,雷金勇.市场模式下光伏用户群的电能共享与需求响应模型[J].电力系统自动化,2016,40(16):49-55. DOI: 10.7500/AEPS20160120002.
LIU Nian, WANG Cheng, LEI Jinyong. Power energy sharing and demand response model for photovoltaic prosumer cluster under market environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 49-55. DOI: 10.7500/AEPS20160120002.
- [10] 罗纯坚,李姚旺,许汉平,等.需求响应不确定性对日前优化调度的影响分析[J].电力系统自动化,2017,41(5):22-29. DOI: 10.7500/AEPS20160702006.
LUO Chunjian, LI Yaowang, XU Hanping, et al. Influence of demand response uncertainty on day-ahead optimization dispatching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 22-29. DOI: 10.7500/AEPS20160702006.
- [11] 仇梦林,胡志坚,王小飞,等.基于动态场景集和需求响应的二阶段随机规划调度模型[J].电力系统自动化,2017,41(11):68-76. DOI: 10.7500/AEPS20160908008.
ZHANG Menglin, HU Zhijian, WANG Xiaofei, et al. Two-stage stochastic programming scheduling model based on dynamic scenario sets and demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 68-76. DOI: 10.7500/AEPS20160908008.
- [12] 马莉,范孟华,郭磊,等.国外电力市场最新发展动向及其启示[J].电力系统自动化,2014,38(13):1-9. DOI: 10.7500/AEPS20140520007.
MA Li, FAN Menghua, GUO Lei, et al. Latest development trends of international electricity markets and their enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 1-9. DOI: 10.7500/AEPS20140520007.
- [13] DING Yi, PINEDA S, NYENG P, et al. Real-time market concept architecture for Ecogrid EU: a prototype for European smart grids[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2013, 4(4): 2006-2016.
- [14] DING Yi, PREBEN N, JACOB Ø, et al. Ecogrid EU: a large scale smart grids demonstration of real time market-based

- integration of numerous small DER and DR[C]// Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), October 14-17, 2012, Berlin, Germany.
- [15] 黄甜. 面向智能电网的电力需求响应商业运作模式研究[D]. 南京:东南大学,2016.
- [16] 高志远,曹阳,田伟,等. 需求响应概念模型及其实现架构研究[J]. 电力信息与通信技术,2016(11):8-13.
GAO Zhiyuan, CAO Yang, TIAN Wei, et al. Research on conceptual model of demand response and its implementation architecture [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2016(11): 8-13.
- [17] 赖菲,丁振华,张崇见,等. 电力市场不完全竞争问题[J]. 电力系统自动化,2002,26(7):9-12.
LAI Fei, DING Zhenhua, ZHANG Chongjian, et al. Study on imperfect power market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(7): 9-12.
- [18] 文福拴,DAVID A K. 加州电力市场失败的教训[J]. 电力系统自动化,2001,25(5):1-5.
WEN Fushuan, DAVID A K. Lessons from electricity market failure in California [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(5): 1-5.
- [19] 郑风雷,文福拴,吴复立. 电力市场环境下的输电投资与扩展规划[J]. 电力系统自动化,2006,30(10):80-87.
ZHENG Fenglei, WEN Fushuan, WU Fuli. Transmission investment and expansion planning in electricity market environment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(10): 80-87.
- [20] 高鑫,王秀丽,雷兵,等. 独立发电商的策略报价研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(7):41-46.
GAO Xin, WANG Xiuli, LEI Bing, et al. Research on bidding strategy for an independent power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 41-46.
- [21] 马新顺,文福拴,倪以信,等. 计及风险的发电公司最优报价策略[J]. 电力系统自动化,2003,27(20):16-20.
MA Xinshun, WEN Fushuan, NI Yixin, et al. Development of optimal bidding strategies for generation companies with risk management [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 16-20.
- [22] 宋依群,侯志俭,文福拴,等. 电力市场三种寡头竞争模型的市场力分析比较[J]. 电网技术,2003,27(8):10-15.
SONG Yiqun, HOU Zhijian, WEN Fushuan, et al. Comparison of market power in three oligopoly models of electricity market [J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 10-15.
- [23] 夏清,黎灿兵,江健健,等. 国外电力市场的监管方法、指标与手段[J]. 电网技术,2003,27(3):1-4.
XIA Qing, LI Canbing, JIANG Jianjian, et al. Electricity market surveillance summary[J]. Power System Technology, 2003, 27(3): 1-4.
- [24] 惠海龙,于兴斌,李永刚. 美国德州电力市场综述[EB/OL]. [2017-06-12]. http://www.360doc.com/content/16/0312/15/21479328_541593670.shtml.
- [25] ERCOT. Demand response[EB/OL]. [2017-06-12]. <http://www.ercot.com/services/programs/load>.
- [26] ERCOT. 2015 annual report of demand response in the ERCOT region[EB/OL]. [2017-03-28]. <http://mis.ercot.com/misapp/GetReports.do?reportTypeId=13244&reportTitle=Annual%20Report%20on%20ERCOT%20Demand%20Response&showHTMLView=&mimicKey>.
- [27] 王冬容,刘宝华,杨赛,等. 电力需求响应的经济效益分析[J]. 电力需求侧管理,2007,9(1):8-10.
WANG Dongrong, LIU Baohua, YANG Sai, et al. Economic benefit analysis of power demand response[J]. Power Demand Side Management, 2007, 9(1): 8-10.
- [28] 邹鹏,陈启鑫,夏清,等. 国外电力现货市场建设的逻辑分析及对中国的启示与建议[J]. 电力系统自动化,2014,38(13):18-27. DOI:10.7500/AEPS20140219003.
ZOU Peng, CHEN Qixin, XIA Qing, et al. Logical analysis of electricity spot market design in foreign countries and enlightenment and policy suggestions for China [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 18-27. DOI: 10.7500/AEPS20140219003.
- [29] 赵晨晨. 低碳背景下电力需求响应效益评估研究[D]. 北京:华北电力大学,2015.
- [30] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 电力需求响应系统通用技术规范:GB/T 32672—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
- [31] 魏伟,朱武祥,林桂平. 基于利益相关者交易结构的商业模式理论[J]. 管理世界,2012(12):125-131.
- [32] JAAP G, AKKERMANS H, VAN VLIEJ T. Designing and evaluating e-business models[J]. IEEE Intelligent Systems, 2001, 16(4): 11-17.
- [33] 国家能源局南方监管局. 广东电力市场交易基本规则和市场监管办法正式发布[EB/OL]. [2017-06-12]. http://nfj.nea.gov.cn/action/front/contentAction__initViewContent?contentId=6744667_1.
- [34] 浙江省经济和信息化委员会. 浙江省进一步扩大电力直接交易试点工作方案[EB/OL]. [2017-06-12]. <http://jxw.zhejiang.gov.cn/cszc/dlc/wjtz/2016/06/08/2016060800052.shtml>.
- [35] 国家能源局江苏监管办公室. 关于印发《江苏省电力集中竞价交易规则(试行)》的通知[EB/OL]. [2017-06-12]. <http://jsb.nea.gov.cn/news/2016-8/2016810113112.htm>.
- [36] 华东区域并网发电厂辅助服务管理实施细则(试行)[EB/OL]. [2017-02-15]. <https://wenku.baidu.com/view/c2b133135f0e7cd1842536a1.html>.
- [37] 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.

丁 一(1978—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:智能电网、复杂多状态工程系统可靠性、电力系统规划与可靠性评估和电力经济。E-mail: yiding@zju.edu.cn

惠红勋(1992—),男,博士研究生,主要研究方向:电力需求响应、电力市场。E-mail: huihongxun@zju.edu.cn

林振智(1979—),男,博士,副教授,副博士生导师(具有博士生招生资格),主要研究方向:电力应急与电力系统恢复、需求侧响应。E-mail: linzhenzhi@zju.edu.cn

(编辑 顾晓荣)

(下转第 189 页 continued on page 189)

