

电力需求响应的研究进展及文献述评

陶小马, 周雯

(同济大学 经济与管理学院, 上海 200092)

摘要: 电力需求响应是现代电力市场条件下,缓解电力供需矛盾、降低高峰负荷、促进节能减排的重要工具。通过回顾已有文献,认为:一方面,目前发达国家关于电力需求响应的理论和实践研究已经深入开展,而中国基本上没有开展具有一定政策意义的分析研究,亟需加快推进中国电力市场进程,以创造必要的市场环境和制度条件;另一方面,也需要加快开展适当规模、多种类型的需求响应实验试点,在项目设计、策略选择、技术条件、评估工具和方法等方面积累经验。在理论和实践中,从评估需求响应项目收益和分析其影响因素的角度,应按针对用户采取的激励方式,将需求响应分为激励型、价格型、信息反馈型三类;在收益分析中,应将减轻市场力理解为取得需求响应收益的一个重要途径;在政策制定中,应当充分考虑用户的便利度与舒适度,注意负荷控制的反弹效应和信息反馈的衰减效应可能产生的影响,并重视需求响应对于降低线损、促进减排等方面的效果。

关键词: 需求响应; 高峰负荷; 节能减排; 成本收益评估

中图分类号: F426

文献标识码: A

文章编号: 1009-3370(2014)01-0032-08

改革开放以来,中国电力消费快速增长,特别是进入21世纪后在重工业加速发展的拉动下,中国电力消费增速高达11.9%。与此同时,高峰期电力供给不足问题也日益突出。局部时段电力供应无法满足迅速增长的负荷需求,拉闸限电情况不断发生,电荒问题凸显^[1]。在电力供需矛盾加剧背后,同时又还隐藏着电力装机容量得不到充分利用的资源浪费问题^[2]。由于电力无法大规模储存,供给必须与需求保持实时平衡,发电环节在用电低谷期往往产生大量容量冗余。而在高峰期装机容量虽然得到充分利用,但在需求超出容量限制后,短期只能中断供电发生前述电荒问题,长期则只能通过被动增加投资、扩大装机容量来满足需求增长。前者将对经济社会造成严重影响,后者则带来成本迅速增加。

特别是随着碳排放正从一个生态环境问题演变成涉及全球政治、经济、贸易的复杂博弈,中国电力行业也面临越来越大的压力与挑战。就中国碳排放结构而言,根据国际能源组织(IEA)的研究报告^[3],中国电力与热力工业的CO₂排放占总排放的比重接近1/2,超过其他工业部门排放量的总和(31.2%),是目前中国CO₂排放量最高的部门。从中

国能源禀赋看,当前电力行业以煤为主的结构在较长时期内难以改变,加之发电设施往往具有很长服役年限,这就使电力行业具有很强的“碳锁定效应”,即碳排放将被当前的电源结构所“锁定”^[4]。那么,电力行业如何在加快结构调整、实现电源低碳化这一长期战略的同时,鼓励用户减少消费、引导厂商减少投资,以实现缓解供需矛盾和节能减排双重目标,已成为迫切需要解决的问题。

近年来,电力系统拆分和市场化改革浪潮席卷全球。在电力行业组织结构不断裂变的背景下,电力需求响应在发达国家脱颖而出,并得到大规模实践。仅2010年,美国区域输电组织(Regional Transmission Organization)与独立系统运营商(Independent System Operator)实施的需求响应项目,就提供了27 189MW的需求响应资源,约占全美电力装机容量的3%。2011年,极端炎热天气使得美国东部地区电力需求达到历史最高水平,纽约ISO自7月21日在对纽约州南部实施了覆盖其所有注册用户的需求响应,结果第二天全州节约2 000MW的需求资源,使高峰负荷下降了5%~6%^[5]。

可以说,电力需求响应已成为缓解电力供需矛

收稿日期: 2013-04-14

基金项目: 上海市科技发展基金资助项目“科技促进上海创建低碳城市的路径及策略研究”(09692103200)

作者简介: 陶小马(1954—),男,教授,博士生导师,E-mail:55zwtj@tongji.edu.cn

能源消费数据根据《中国统计年鉴》中的2010年、2001年的数据计算,电力消费数据根据《中国统计年鉴》中的2009年、2000年的数据计算。

“十一五”期间,中国京津唐、江苏、重庆、浙江等23个电网先后出现不同程度的夏季电力供应紧张形势。

例如2011年,全国统调(省级以上调度)的56 210万kW公用常规燃煤机组中,平均利用小时数为5 357小时,利用率仅为61.2%。

盾、推进节能减排政策实践中,综合降低需求和引导需求两方面作用的重要政策工具。相比之下,中国还停留在对需求侧资源进行行政管理为主的阶段,价格引导、信息引导等手段运用得还不多。目前,发达国家需求响应实验已经广泛开展起来,仅2005年以前针对居民用电的价格型需求响应实验项目就有超过10个^[65]。而迄今为止,中国尚未开展具有一定政策意义的实验研究。正如美国能源部给美国国会的报告中提出的建议,“我们需要加强对于需求响应的分析与定量评估的研究,只有这样,政策制定者以及用户才能够更好地评价需求响应能够带来的收益”^[75]。鉴于此,本文将围绕需求响应的概念与分类、收益与成本和有关实证研究的国内外相关领域文献进行系统述评,为中国进一步开展需求响应研究和实践提供参考。

一、电力需求响应的概念与分类

根据国际能源机构(IEA)在2003年对需求响应作出的定义,凡是为了改变某一时段的电力需求水平或电力消费总量的行为,都属于需求响应行为^[8]。从这一定义看,该表述主要强调了需求响应的最终目的。美国能源部的定义则是,需求响应是指终端用户根据电力价格波动或其他激励方式,在市场价格较高或系统稳定性受到威胁时调整其行为以减少电力消费、降低负荷^[76]。根据上述定义,所谓“响应”是指用户在外激励作用下产生的反应。从已有文献对需求响应的分类看,主要依据两种标准:一是“响应”的来源,即项目实施针对用户采取的激励方式;二是“响应”的形式,即用户采取怎样的行动来调整消费行为。

(一)按激励方式划分需求响应类型

在这一分类中,美国能源部的报告最具代表性。该报告将电力需求响应项目划分为激励型(Incentive-based)和价格型(price-based Programs)^[78]。当然,也有相当一部分文献采取了同样划分依据,但它们对这两类需求响应项目的名称定义有所不同,如稳定型与经济型^[9];紧急型与经济型^[105];系统导向型与市场导向型^[11]。但总体上,这些定义的内涵是一致的。

1. 激励型需求响应

所谓激励型需求响应,是指为了避免电力系统出现紧急情况,电力部门或系统运营商在需求高峰

期对电力用户的负荷进行直接或间接的控制或干扰,以降低在该时段的负荷需求,并对其控制或干扰行为进行补偿激励。主要包括直接负荷控制、可干扰负荷控制、紧急需求响应、需求竞价等^[65]。

直接负荷控制(Direct Load Control)是指电力部门在高峰负荷时段或系统发生紧急情况时,直接远程控制用户设备或循环干扰用电设备运行,通常电力部门采取行动时不通知用户或只在较短时间(通常在15分钟)前通知用户。直接负荷控制通常适用于短时间停电,并作用于对质量与安全影响较小的负荷,主要针对居民与小型商业用户的空调、电热水器等设施^[79]。1968年底,特律爱迪生公司首次实施了直接负荷控制。到2010年,美国参与直接负荷控制项目用户已超过560万,贡献需求响应资源约900kW。

可干扰负荷控制(Interruptible Load)是指电力部门提前与用户签订协议,约定在系统负荷高峰期或紧急情况下,电力部门可控制用户设备使其削减负荷。这是一种预想事故下的备用项目,为系统的安全运行提供辅助性服务。参与者将获得一定数额的报酬或是一定比例的电价折扣作为经济补偿,如果参与者在高峰期人为忽视干扰,则将面临一定数量的惩罚。可干扰负荷控制项目通常是提供给具备一定容量门槛以上的工业和商业用户^[79]。例如,在美国的加州该项目的容量门槛值在200kW以上,在俄亥俄州为3000kW以上。

紧急需求响应(Emergency Demand Response)是指用户在高峰期或紧急状况时自行削减负荷,电力部门将按照事先约定的经济手段给予激励。相对于负荷控制项目来说,参与该项目电力用户更有自主性。

需求侧竞价(Demand Bidding)是指用户在电力市场对指定高峰期的负荷进行投标竞价,提出其在某一价格下愿意削减的负荷量,或削减一定负荷后的期望收益,最后由执行方按照报价进行优化调度。一旦价格被电力部门接受,参与用户必须在特定时段削减一定量的负荷,否则将面临惩罚。此类项目允许需求侧资源能够以竞价形式主动参与市场竞争并获取相应的经济利益,而不仅仅是响应负荷的价格接受者^{[12][10]}。该项目通常适用工商业大用户,也可以通过第三方机构将居民这样的小用户打包继而参与市场^[13]。目前,需求侧竞价项目已在发达国家得到了大量实践,项目通常由系统独立运营商运营(ISO)。

在发达国家电力市场中,ISO一般负责管理最终市场,即平衡负荷与发电的实时市场。至于其他电力市场,如日前市场一般由独立的盈利性市场运营商管理。ISO往往兼有最终市场运营职能与系统运营职能,其主要职责是保证电力系统的安全,其独立性表现在竞争性环境下的系统运营商不能偏向于某些市场成员。

在上述四类项目中,需求竞价项目对于高峰时段要求削减的负荷价格是由市场供需决定的,能够为电力用户提供参与市场的机会,是针对高峰期负荷最为彻底的体现供需双方意愿的激励方式。然而,就电力市场化改革不同阶段来说,负荷控制更适用于电力市场改革初期。可干扰负荷控制、需求侧竞价与紧急需求响应项目更适用于成熟的竞争性电力市场^[14]。

2. 价格型需求响应

在过去很长一段时期里,电力部门仅在区分不同类型用户(例如工业、商业、居民)的基础上对终端用户以固定价格供电。电力价格是一段时期内的平均供电成本。但事实上,电力供给的边际成本在不同时段存在显著差异。所谓价格型需求响应,就是通过人为或者市场自发调整电力价格来反映供电成本的时段差异。比如,使电价随着成本不断波动或设定分段价格粗略反应成本波动,让电力用户除了根据作息安排用电时间与方式外,还能够根据价格信号调整其消费行为。具体来说,价格型需求响应就是通过用户在较高价格的高峰期减少用电,在较低价格的非高峰期增加用电(弥补之前的用电削减)来平缓负荷曲线。从而将反映真实成本的价格信号传递给终端用户,增强需求侧对价格的响应能力,并提高电力系统的稳定性。参与此类项目的电力用户可以直接降低高峰期负荷需求或是将部分高峰期用电转移到非高峰期^[15]。具体地,价格型需求响应项目包括分时电价、关键峰荷电价、实时电价等项目^{[16][17][19]}。

分时电价(Time of Use)是指电力部门针对不同类型用户,根据时段、日期、季节制定不同的电价,可以是一年分为两季或是更多时段的电价(例如丰枯电价、高温和非高温电价、采暖季和非采暖季电价等),也可以分为工作日、周末或是节假日电价,还可以是将一天分为2~3个、甚至4个时段(尖峰、高峰、平段、低谷)。这种时间段的划分旨在反映不同时段电力生产成本的不同,在低谷时段电价较低、高峰时段电价较高,从而激励用户根据价格信号将部分高峰时段负荷转移到低谷时段,实现削峰填谷的目标。

关键峰荷电价(Critical Peak Price)是在分时电价的基础上,针对极端高峰时段增加了一个新的价格,即关键峰荷电价。在用电最高峰期或是系统出现紧急情况时,电力部门利用极高的关键峰荷电价在每年有限的时段产生激励作用。与分时定价的高峰时段不同,关键峰荷电价期是不确定的,电力部

门提前较短时间通知用户在特定情况下采取特殊电价,往往每年仅有几天甚至几小时。可见,这一响应方法兼具有分时电价以及紧急负荷控制两类项目的属性。

实时电价(Real Time Price)是一种动态电价、电力价格与电力成本联动,反映电力市场的实时供需状况。用户可根据电价实时变动作出响应。与前两种价格型需求响应不同,此类项目的电价不是提前设定的,而是随着供需状况变化而持续不断波动。

比较价格型需求响应的分时定价、关键峰荷定价与实时定价三种类型,最能够反映电力市场供需、符合市场经济要求,也是电力市场价格机制的目标就是实时定价。电价的更新周期是确定电价体系的一个重要考虑因素,周期越短,电价的杠杆作用发挥得越充分,当然对于技术支撑的要求也就越高。实时电价是一种动态定价机制,其更新周期可以达到一小时甚至更短,使价格精确反映一天中各个时段供电成本的变化。实时定价是最具有经济效率的方法。最为极端以及最为自然的实现需求响应的方式就是电力实时价格,实时价格使得电力系统能够类似于水果、蔬菜、汽油、电脑芯片等其他产品市场,价格能够快速变动以反映成本的变动^[18-19]。

显然地,在价格型需求响应中,电价更新周期是项目实施的一个关键因素,周期越短则杠杆作用发挥得越充分。比较三类需求响应,不难看出其中最能够反映市场供需、符合市场经济要求的是实时定价。同时,这也是电力市场化改革的最终目标。作为一种动态定价机制,实时电价的更新周期可以达到1小时甚至更短,使价格精确反映一天中各个时段的成本变化。特别是在智能电网发展成熟后,这一定价机制则很可能做到类似股市报价一样,做到即时报价、在最短时间内达成电力交易。从分时和实时电价的差别看,分时电价的时段、费率划分都是事先规定的,在一定时期内(通常是一个季度以上)是固定价格。因此,分时电价不是联动电价,在价格型需求响应中分时定价最为基础。相对于分时定价来说,关键峰荷定价则由于增加了临时出现的高峰紧急状况而显得更加灵活,兼具了分时电价以及负荷干扰项目的属性。

3. 信息反馈型需求响应

在激励型和价格型需求响应项目之外,Chris King 和 Dan Delurey 首次提出将需求响应分为信息反馈、动态定价、可靠性三类^{[6][56]}。其中,动态定价与可靠性项目分别对应上述价格型需求响应与激励

型需求响应。所谓信息反馈项目,是指通过即时的将诸如消费量、电费等信息反馈给用户,从而促使其调整消费行为,达到节约电费、平稳负荷的目的。因为与消费其他商品不同,电力用户在使用电力一段时间之后才能看到消费数量与金额,这段时间通常是半个月到一个月甚至一个季度,并且用户收到账单与电力消费的实际结算日之间也存在滞后。在这种情况下,电力用户通常无法及时调整其消费行为,选择更为经济合理的方式使其利益最大化。根据反馈方式的不同,信息反馈型需求响应又可划分为直接信息反馈与间接信息反馈两种^{[6]59[20]}。直接信息反馈型需求响应包含通过信息显示装置、预付装置、网络显示方式反馈信息。间接信息反馈型需求响应是指电力部门将消费数据发送给电力用户,包含邮寄账单、用户更为频繁读取消费数据、电力部门提供分析报告以及安装环境提醒装置。

到目前为止,实施信息反馈型需求响应规模最大的是美国加州于2001年实施的针对商业用户的信息反馈项目。加州能源委员会为最高电力需求超过200kW的商业用户安装了接近23300个即时反馈设备,电力部门远程读取数据,然后通过整合的软件包(包括硬件软件系统与专业服务)使得用户能够在第二天上午通过网络读取前一天数据(包括每小时负荷曲线及电量)。这一项目覆盖了加州所有主要的电力公司,并且在第一年的使用中减少了约500MW的高峰需求。截至2005年,美国已有超过120个电力公司为其居民用户提供在线账单分析工具^{[6]58}。

(二)按行为调整方式分的需求响应类型

除了依据对电力用户的激励方式划分类型以外,还有研究依据用户在需求响应中的行为调整的不同方式划分类型,M.H.Albadi和E.F.El-Saadany^{[17]1991}将需求响应分为三类:第一类,用户在电力价格较高的高峰期直接减少电力消费量(即削峰方式),用户的这一行为改变不涉及高峰期以外的其他时段,但可能损害用户的便利性与舒适度^[21-22]。第二类,用户在响应时将部分高峰用电转移到其他时间段(即削峰填谷方式),这种情况下用户除了需要支付行为调整成本外,几乎不需要承担需求响应的成本。第三类,用户通过使用分布式发电装置应对电力价格波动^[23-24]。分布式发电是直接相连在配电网或者用户电表安装处的发电形式,分布式发电装置能够使得电力用户在电价较高的用电高峰期自备发电从而节约了电费,降低电网的高

峰期负荷^[25]。对于此类需求响应,用户几乎不需要改变他们原有的电力消费行为模式。

根据C. Goldman、N. Hopper和R. Bharvirkar的一项研究^[26],在尼亚加拉莫霍电力公司于2004年开展的实时电价实验中,71%的参与实验用户对高峰电价作出了响应。其中,22%通过转移高峰用电作出响应,45%直接减少高峰用电,16%通过分散式发电装置自行供电,13%的用户采取了不止一项的响应方式。

从前述需求响应类型的划分看,无论是按“响应”的来源,还是以“响应”的形式来考察,都有其合理性。但从评估需求响应项目效益和分析其影响因素的角度看,若以“响应”的形式——用户行为调整方式划分,较不利于界定变量和观测相应数据。此外,在依据“响应”形式的分类中,第三类用户响应行为的原理与前两类行为类似,本质上仍是减少用电高峰期负荷,只是其实施路径是采取分布式发电装置为高峰期额外供电。因此,本文倾向于按“响应”的来源——针对用户采取的激励方式来划分,将需求响应分为激励型、价格型、信息反馈型三类。

目前,负荷控制和分时电价两类较为基础的需求响应形式在中国已在一定范围内应用,但相对来说,这两类项目产生的节能、平稳负荷等效果,不如其他更高阶的更富弹性、用户选择权更多的项目类型。今后一个时期,中国政府应进一步拓展现有小规模试点项目,并积极引入其他项目类型。但这既依赖于电力市场的竞争程度,也需要引入科学合理的实验方法作为技术支撑。

二、电力需求响应的收益与成本

(一)实施电力需求响应的收益

对于需求响应带来的经济社会收益,已有研究主要集中在降低用电成本,减少供给成本,抑制厂商行使市场力,提高系统安全性,减少环境外部性等方面。

1.降低用户用电成本

现有文献普遍认为,需求响应能够降低参与用户的用电成本。然而,参与不同类型需求响应项目的电力用户,其节约用电成本的方式不同:参与激励型需求响应项目的电力用户能够通过在使用用电高峰期直接减少其电力消费量,节约其总的用电成本^{[16]4};参与价格型需求响应项目的用户,能够根据价格信号自主安排、调整其用电行为,将电价较高的高峰用电转移到电价较低的非高峰期,总的电力消费量有

即使在中国部分城市实行的预付费制度,账单的送达时间也是滞后的,甚至超出惯常的一个月周期。

可能不变,但用户用电成本降低^{[7]26},或者能够使得电力用户增加总的电力消费量而无须支付更多的电费^{[17]991}。此外,参与激励型需求响应的用户还能够基于其在需求响应中的表现获得激励性支付,也能够降低用户的用电成本。

2.减少高峰期需求增加带来的成本快速增长

随着需求增加,电力生产者开始受到机组容量限制,当电力市场需求接近生产容量时,电力供应成本呈指数型增长。一旦电力企业生产能力得到完全利用,再增加供应量就得依靠固定资产投资扩大规模,而电力行业属于资本密集型产业,新增机组容量需要支付高额成本。而需求响应通过减少高峰期需求,能够有效避免或减少在基础设施升级、新建方面需要投入的巨大成本,这种系统运行成本方面的节约是需求响应带来收益的一个重要方面。此外,不同于单纯降低用电成本,减少高峰期高额供给成本的增长,也能够避免电价上升,因此这一收益对于所有电力用户都有好处^{[17]991[27]}。

3.改善电力市场运行效率

除了降低用户用电成本,避免高额供给成本增加以外,需求响应还能够改善电力市场运行效率^{[7]29}。这是因为,一方面,在目前的电力市场中,用户没有能力参与市场决策,是价格的接受者,而需求响应使得用户能够根据经济激励或是价格信号调整消费行为,在一定程度上部分地或是完全地参与市场决策影响电价,为需求端提供更多的市场选择机会,这是需求响应得以实施的一个非常重要的动力。另一方面,需求响应还能够减少电力市场供应方行使市场力的机会,降低电力价格的脆弱性^[28]。引入需求响应后,发电侧的价格波动信息能够传递给用户,用户不再只是被动接受生产厂商单方面定价,而是可以对价格做出响应,自主决定消费的时间与数量,减弱发电厂商的市场力。

4.提供电力市场辅助服务,提高电力系统安全性

电力市场良好运营的重要前提条件是,必须有一个坚实的物理系统作为基础。在系统运行期间,当发电机或输电线意外失效时,系统备用供给可能会小于需求,影响供电质量或系统安全;在高峰期,现有装机容量无法满足电力需求时,就不得不拉闸限电。因此,电力市场成员对于系统安全达成这样一种共识:电力系统应当能够抵御所有一般性的扰动。在发生扰动之后需要采取校正措施,其目的是将扰动的影响限制在一定的范围内。在传统电力体制下,垂直一体化公用事业掌握了完成校正措施所

必须的全部资源。然而,随着竞争性电力市场的建立,其中有些资源已经分流到另外一些行业成员手中,此类资源变成一种需要进行付费购买的商业服务,称为辅助服务(ancillary service),其作用是保证主要商品即电力的顺利交易^[29]。而需求响应项目的实施,能够使用户参与辅助服务市场,帮助电力部门提高系统安全可靠,减少电力中断与电力质量下降的概率。由电力用户提供辅助服务的好处包括:(1)增加供给数量,有利于促进市场竞争;(2)提高资源的利用效率,例如利用可中断负荷满足备用需求,预作备用的发电容量就可以相应减少,由此厂商可将更多的容量投入发电;(3)与大型发电机组相比,用户是更为可靠的辅助服务供应者,因为所有小负荷同时出现故障的概率几乎为零^[30]。

5.需求响应的环境效益

随着发展低碳经济的呼声日益高涨,越来越多的文献开始讨论需求响应在节约能源、改善环境方面的收益。(1)需求端的环境效益,这来自于电力消费减少而产生直接碳减排。加州一项研究发现,在针对商业用户的一个干扰型负荷控制项目和一个需求侧竞价项目中,实验期间用户电力消费减少了20%,其中仅1/5会在其他时段产生反弹(payback)^[31]。新泽西州的一项研究针对居民用电的研究也显示,需求响应产生的高峰用电削减量在非高峰时段的反弹用电约是40%^[32]。此外,需求响应还有利于增加用户对电力消费方面的认知进而间接地影响碳排放^[60]。(2)供给端的环境效益,这主要来自于在转移高峰负荷时,提高机组利用率,使总的能源利用效率得以提高^{[12]102};同时备用容量的减少,也减缓了新增产、输、配电方面的基础设施投资,带来更为高效的土地利用^{[7]27-28}。特别值得一提的是,电网企业在输配电环节通过平衡用电负荷,提高负荷率能够降低线路损耗,这也是推进节能减排的重要途径之一。也就是说,需求响应能够通过降低线损率带来减排效益。

(二)需求响应的成本

已有文献主要将成本分为两个部分:一是用户参与需求响应的成本;二是项目实施方需要承担的成本^[33]。需求响应的实施方可能是负荷服务实体(Load Service Entity)、独立系统运营商等系统运行机构。目前,还出现了需求管理服务商(Curtailment Service Provider),此类服务商能够根据系统运营商的需求响应计划,按照参加该项目的最低规模要求,集合打包小规模用户的负荷,以达到需求响应计划的准入要求。

用户需要承担的成本主要包括:实施需求响应需要特定设备的安装与维护成本,例如温度感应设备、负荷测度设备、信息显示设备、分布式发电设备等,当然,这些成本也时常部分地甚至全部地由需求响应实施方承担^{[7]23}。同时,电力用户参与需求响应项目过程中往往需要调整其消费行为,比如减少或是转移高峰期用电,于是产生了行为调整成本。另外,需求响应还有可能影响到用户生活的便利性与舒适性,其福利损失也是一种成本。

需求响应实施方需要承担的成本包括需求响应实施之前、实施过程中以及结束后三方面成本:(1)在项目实施前,首先要对潜在用户进行宣传教育,告知其可能获得的收益与承担的风险,鼓励用户参与到需求响应中,由此产生了宣传成本。然后运行机构要为用户安装信号交流、负荷测量、显示等设备,以测量、显示电力使用情况,并远程接发数据;对于价格型需求响应来说,电力价格实时波动,因此更换电表系统是引入此类项目必经的一个步骤。有研究估算,美国如果要实现电力价格部分或是完全的动态波动,大约需要花费400亿美元进行计量设备的安装等基础设施改造^[34]。(2)在需求响应实施过程中,实施方监控电力使用数据,维护、管理参与用户需要支付一定维护成本。(3)在需求响应实施之后,激励型需求响应的运行机构还要针对参与用户的表现依照合约支付一定的激励性补偿。

就需求响应的效益分析来看,已由研究主要从降低用电成本,减少高峰负荷及其带来的成本快速上涨,减弱电力企业市场力,提高系统安全性,改善环境等经济和社会效益。其中,有两个方面需要关注:

一是关于降低电力企业行使市场力机会,从而提高市场效率的作用,往往被视为单独的一点。然而,消除或是减少市场力的结果是最终降低生产成本、减少用电成本。因此,本文倾向于将减轻市场力理解为取得其他各种收益乃至社会福利的一个重要途径。

二是需求响应能够通过降低线损率带来减排效益。然而这一点在以往文献中尚未提及,在政策制定中,如果忽视了需求响应对于降低线损、促进减排等方面的效果,那么有些项目就可能被放弃。

三、需求响应效果评估的实证研究

纵观现有文献对于实施需求响应的成本收益评估方面的研究,主要从两个角度考察:

一是考察需求高峰负荷削减量。比如,加州高级需求响应系统(California's Advanced Demand Response System)在2004年开展的关键峰荷价格实验中,发现用户在面临尖峰时段价格时,减少负荷高达51%;在非尖峰时段,参与者面对分时价格时高峰期负荷减少达32%^[35]。Ahmad Faruqui和Sanem Sergici^[34]回顾了15个近期的动态定价实验以评估用户是否减少高峰期负荷以响应较高的电价,以及在多大程度上减少负荷。研究发现分时电价使得高峰期负荷需求平均降低3%~6%;尖峰时段价格使得高峰期负荷需求降低13%~20%。

二是考察电力消费削减量。例如,2006年加拿大的5家电力公司联合开展的一项信息反馈实验,发现用户电力消费平均减少6.5%。2005年,SRP电力公司开展的一项为期预支付信息反馈实验,也显示预支付系统能够带来电力消费量平均减少12.8%,最高情况下能够促使节能率达到30%。此外,还有部分文献针对目前已小范围开展的实时电价项目进行了价格弹性变动的研究。

在研究方法方面,从国外已开展的需求响应实验来看,较多是在科学设计实验的基础上进行。研究通常对参与实验的用户电力消费进行高频度的测量,以比较用户在实施需求响应前后用电负荷的直接变化。也有部分实验将用户分为实验组和控制组,然后利用面板数据构建模型进行计量分析。然而已有研究多数仅考察实施需求响应的实验期,缺少对未实施需求响应前的分析。因此,最好的实验设计应该是设定控制组存在未实施需求响应与实施需求响应两个时期,以及实验组也存在未实施需求响应与实施需求响应两个时期,即所谓的“difference-in-differences”估计^{[34]199}。

在需要考虑的影响因素,即控制变量方面,已有文献主要从态度、外部力量、个人特征和生活习惯4个维度方面加以考察,具体如表1所示。在研究中,通过对这些因素加以考察,既能够将项目本身产生的各种收益较好的分离出来,也能够为政策制定者选择特定参与用户、需求响应策略以及项目实施的时间、地点等提供参考。比如,Greenberg和Straub一项关于负荷控制的研究就发现,安装室内温度控制装置和户外压缩机开关装置都能显著降低高峰负荷并且二者没有显著差异,但是对室内温湿度将产生不同影响^[36]。

在研究中,不同项目类型对居民行为将产生不同的影响,因而在项目评估中需要对这些影响加以考虑。比较突出的影响包括:(1)参与负荷控制的用

表1 居民电力消费行为影响因素

维度	态度	外部力量	居民特征	生活习惯
影响因素	用户接受程度	用电设备特征	年龄组合	作息起居
		响应实施设备	婚姻状况	
		房屋特征(面积、朝向等)	人口数	
	节能意识	气候特征(温度、季节等)	收入	工作方式
		需求响应策略	职业	
		激励与惩罚	教育程度	

户在高峰控制时段的便利度与舒适度会受到的影响。已有部分研究讨论了这一问题,例如 Piette、Sezgen 和 Watson 与 Herter、McAuliffe 和 Rosenfeld 的研究^{[10][21]}。但还没有研究对这些影响进行量化考察,仅有少数实验通过比较负荷控制天与非负荷控制天温湿度度的变化来加以研究,如 Greenberg 和 Straub 的研究^[36]。(2)已有研究采集的消费数据通常是整个房屋的是总体用电负荷,于是实验通常考察的是对特定设备进行负荷控制后对所有用电设备的影响,这在一定程度上影响了研究的可靠性。(3)由于直接负荷控制在实施之前,电力部门不通知用户或仅提前很短时间。因此,研究需要考虑到反弹负荷对于减少高峰需求的负面影响。例如, Torgeir Ericson 的一项实验研究发现,实施负荷控制期间平均每户家庭减少 0.5kW,而在负荷控制停止后却发生了 0.28kW 的反弹^[37]。(4)信息反馈需求响应对于用户行为有正面影响已经毋庸置疑,但也有研究发现其节能效果可能存在“衰减效应”。因此,考虑为居民提供更及时的信息反馈,对于居民节约电量的激励随着时间的推移效果可能存在“衰减效应”,客观评估信息反馈的节能效果是信息反馈实验研究需要注意的第一个问题。

目前,国内的实证研究还只是限于一些初级的需求响应项目,主要是针对工业大用户的可干扰负荷控制和分时电价项目^[38-41],并且这些研究基本上都没有进行比较科学的设计。例如,李扬针对南京实施峰谷分时电价后大工业用户的响应情况研究,其分析只是简单地将需求响应实施前后时期的数据进行分析,同时也没对可能的影响因素加以控制。

四、结语

总体来说,目前发达国家关于电力需求响应的理论和实践研究已经深入开展,而中国基本上没有开展具有一定政策意义的分析研究。理论层面还处于概念解释和项目推介阶段,对引入需求响应的制度环境、技术手段、实施要求和项目评价工具等核心内容尚未进行深入研究。实践方面也仅限于针对工业大用户的可干扰负荷控制以及分时电价项目,针对居民用电的需求响应实践和研究尚未开展。这一方面需要加快推进中国电力市场化进程,为引入需求响应创造必要的市场环境和制度条件;另一方面也需要学术界和政府共同推动开展适当规模、各种类型的需求响应实验试点,为今后的实践,特别是在项目设计、策略选择、技术条件、评估工具和方法等方面为项目决策者、实施者提供决策依据和项目实施的行动指南,从而推动电力需求响应得以深入开展,为中国电力市场发展和节能减排提供有力的政策工具。

具体地,在今后的理论研究和项目实践中需要注意以下几个方面:从评估需求响应项目收益和分析其影响因素的角度,应按针对用户采取的激励方式,将需求响应分为激励型、价格型、信息反馈型三类;在收益分析中应将减轻市场力理解为取得需求响应收益的一个重要途径;在政策制定中,应当充分考虑用户的便利度与舒适度,注意负荷控制的反弹效应和信息反馈的衰减效应可能产生的影响,并重视需求响应对于降低线损、促进减排等方面的效果。

参考文献:

- [1] 国网能源研究院. 2010年中国电力供需分析报告[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [2] 国家电监会. 2011年度发电机组并网运行情况监管报告 [EB/OL]. (2012-07)[2013-01-10]. <http://wenku.baidu.com/view/e6a9639f51e79b89680226e3.html>.

- [3] IEA.CO₂ emissions from fuel combustion 2009 edition[R]. Paris:International Energy Agency,2009.
- [4] Grubb M, Jamash T, Pollitt M G. Delivering a low carbon electricity system [M]. Cambridge, UK:Cambridge University Press, 2008.
- [5] Federal Energy Regulatory Commission. Assessment of demand response and advanced metering:2006 staff report [EB/OL]. [2010-03-20](2013-01-10). <http://www.ferc.gov/legal/staff-reports/demand-response>.
- [6] King C, Delurey D. Efficiency and demand response: twins, siblings, or cousins? [EB/OL]. (2005-03) [2013-01-10]. <http://www.demandresponsecommittee.org/>.
- [7] US Department of Energy. Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them:a report to the United States congress pursuant to section 1252 of the energy policy act of 2005[EB/OL]. (2006-02) [2013-01-10]. <http://energy.gov/oe/downloads/benefits-demand-response-electricity-markets-and-recommendations-achieving-them-report>.
- [8] IEA. Strategic plan for the IEA demand-side management program 2004—2009[EB/OL]. (2004-08-05) [2013-01-16].<https://www.ea.govt.nz/dmsdocument/5945>.
- [9] Jazayeri P, Schellenberg A, Rosehard W D, et al. A survey of load control programs for price and system stability [J].IEEE Transactions on Power Systems,2005,20 (3):1504-1509.
- [10] Piette M A, Sezgen O, Watson D S, et al. Development and evaluation of fully automated demand response in large facilities[EB/OL]. (2004-3-30)[2013-1-16].<http://escholarship.org/uc/item/4r45b9zt#page-5>.
- [11] 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(5):10-13.
- [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(3):97-106.
- [13] Alvarez C, Gabaldon A, Molina A. Assessment and simulation of the responsive demand potential in end-user facilities: application to a university customer[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004,19 (2):1223-1231.
- [14] Goldman C A, Barbose G L, Eto J H. California customer load reductions during the electricity crisis: did they help to keep the lights on? [J]. Journal of Industry, Competition and Trade, 2002, 2(1-2):113-142.
- [15] Spees K, Lester B Lave. Demand response and electricity market efficiency[J]. The Electricity Journal, 2007,20 (3):69-85.
- [16] Albadi M H, El-Saadany E F. Demand response in electricity markets: an overview[C]. Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 2007:1-5.
- [17] Albadi M H, El-Saadany E F. A summary of demand response in electricity markets[J]. Electric Power Systems Research, 2008 (78):1989-1996.
- [18] Ruff L E. Economic principles of demand response in electricity prepared for edison electric institute[R]. Washington: Edison Electric Institute, 2002.
- [19] Borenstein S, Jaske M, Rosenfeld A. Dynamic pricing, advanced metering, and demand response in electricity markets[EB/OL]. (2002-10).[2013-01-15].<http://escholarship.org/uc/item/11w8d6m4#page-1>.
- [20] Darby S. The effectiveness of feedback on energy consumption: a review of defra of the literature on metering, billing and direct displays. University of Oxford [EB/OL]. (2006-08-12)[2013-01-16]. <http://powerwatch.biz/site/wp-content/uploads/2012/02/smart-metering-report.pdf>.
- [21] Herter L, McAuliffe P, Rosenfeld A. An exploratory analysis of california residential customer response to critical peak pricing of electricity[J]. Energy,2007(32):25-34.
- [22] Piette M, Sezgen O, Watson D, Motegi N, Shockman C. Development and evaluation of fully automated demand response in large facilities[R]. Prepared For California Energy Commission, Public Interest Energy Research (PIER) Program: LBNL-55085, March, 2004.
- [23] Valero S, Ortiz M, Senabre C, Alvarez C, Franco F, Gabaldon A. Methods for customer and demand response policies selection in new electricity markets[J]. IET Gen. Transm. Distrib,2007(1):104-110.
- [24] Sezgen O, Goldman C A, Krishnarao P. Option value of electricity demand response[J]. Energy, 2007(32):108-119.
- [25] 赵豫,于尔铿.电力零售市场研究[J].电力系统自动化,2003(15):25-28.
- [26] Goldman C, Hopper N, Bharvirkar R. Customer strategies for responding to day-ahead market hourly electricity pricing[EB/OL]. (2005-08)[2013-01-16]. <http://escholarship.org/uc/item/72x4824m>.
- [27] Patrick R H, Wolak F A. Real-time pricing and demand side participation in restructured electricity markets[M]//Electricity Pricing in Transition. Springer US, 2002:345-356.
- [28] Caves D, Eakin K, Faruqui A. Mitigating price spikes in wholesale markets through market-based pricing in retail markets[J]. ?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

- Electricity Journal, 2000(13):13-23.
- [29] 萨利·亨特. 电力竞争[M]. 北京:中国经济出版社,2004.
- [30] Kirschen D S. Demand-side view of electricity markets[J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 2003, 18(2):520-527.
- [31] Al-Shakarchi M, Abu-Zeid N. A study of load management by direct control for Jordan's electrical power system [J]. Journal of Science & Technology, 2002, 7(2):25-30.
- [32] Goldberg M. Knowing your limits: direct load control capacity credits based on censoring distribution analysis [C]. AEIC Load Research Conference, 2000.
- [33] Su C L, Daniel Kirschen. Quantifying the effect of demand response on electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3):1199-1207.
- [34] Faruqi A, Sergici S. Household response to dynamic pricing of electricity: a survey of 15 experiments[J]. Journal of Regulatory Economics, 2010, 38(2):193-225.
- [35] Mountain D C. The impact of real-time feedback on residential electricity consumption: the hydro one pilot[R]. Mountain Economic Consulting and Associates Inc, 2006.
- [36] Greenberg D, Straub M. Demand response delivers positive results: residential customers embrace baltimore gas & electric's demand-response pilot program launched to control load[J]. Transmission and Distribution World, 2008, 60(4):38.
- [37] Ericson T. Direct load control of residential water heaters[J]. Energy Policy, 2009, 37(9):3502-3512.
- [38] 丁宁, 吴军基, 邹云. 基于 DSM 的峰谷时段划分及分时电价研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23):9-12.
- [39] 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, (20):10-14.
- [40] 刘严, 谭忠富, 乞建勋. 峰谷分时电价设计的优化模型[J]. 中国管理科学, 2005(5):88-92.
- [41] 李扬, 王治华, 卢毅, 等. 峰谷分时电价的实施及大工业用户的响应[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(8):45-48.

A Review of the Research on Electricity Demand Response

TAO Xiaoma, ZHOU Wen

(School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: On condition of modern electric marketization, demand response has become an important tool to alleviate contradiction between supply and demand, reduce peak load and promote energy saving and emission reduction. By reviewing the literature, the paper found that there is basically no research of certain policy implications practiced in China, while the research and policies have already been carried out in developed countries. Therefore, there is a gaping need to promote the reform of electrical industry and the research on experimental design, strategy, technical specification and evaluation tool. Specifically, attention should be drawn to several aspects, which are the following: demand response should be classified into incentive, price and information feedback based on the incentive method in practice; controlling the market force of electricity producers should be an important way for analyzing the benefit of demand response, the convenience and comfort issue, the payback response and the attenuation of responsiveness; the benefit of line loss reduction should be paid sufficient attention in policy making.

Key words: demand response; peak load; energy saving and emission reduction; cost-benefit analysis

[责任编辑:孟青]