

电力体制改革背景下的需求响应积分方案探索

谢康¹,张凯杰¹,栾开宁²,惠红勋¹,胡怡霜¹,丁一¹

(1. 浙江大学 电气工程学院,杭州 310027;2. 国网江苏省电力有限公司,南京 210024)

Exploration of demand response score scheme under the background of electric power system reform

XIE Kang¹, ZHANG Kaijie¹, LUAN Kaining², HUI Hongxun¹, HU Yishuang¹, DING Yi¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

摘要:我国电力负荷峰谷差逐年增加,需求侧资源可以通过参与需求响应实现削峰填谷的目的。美国和欧洲的需求响应实践市场化明显,我国部分省份也开展过需求响应实践。以积分制为核心的需求响应方案无需用户直接参与市场,它包括价格型和激励型积分方案2类。价格型积分方案在负荷高峰时段给予响应用户正积分,负荷低谷时段给予负积分;激励型积分方案在直接控制用户设备时根据成功响应与否给予正积分或者负积分。该积分方案在电力体制改革初级阶段,有利于形成电网与用户良好互动的局面和泛在电力物联网的建设。

关键词:电力体制改革;需求响应;价格型积分方案;激励型积分方案

Abstract: Chinese peak-valley power load gap is increasing year by year. Demand-side resources can achieve the goal of peak-cutting and valley-filling by participating in demand response. Demand response can be divided into price-based response and incentive-based response, which guide users to adjust their electricity consumption behavior through price mechanism and incentive measures respectively. Demand response practices in the United States and Europe are market-oriented obviously, and some provinces in China have also carried out demand response practices. Users can avoid participating in the market by the demand response score scheme directly, including price-based and incentive score schemes. Price-based score scheme gives positive scores to users in the peak load period and negative scores in the low load period; incentive-based score scheme gives positive or negative scores according to whether the response is successful or not. The score scheme adapts to the initial stage of the power system reform. It is conducive to the formation of a good interaction between the power grid and users and construction of ubiquitous power Internet of things.

Key words: electric power system reform; demand response; price-based score scheme; incentive-based score scheme

中图分类号:F407.61;TM715 文献标志码:B

0 引言

随着我国经济的快速发展,用电需求量不断攀升,尤其在夏季用电高峰时段,电力的供需矛盾更加突出,负荷峰谷差逐年增加^[1]。为应对这种电力供需不平衡现象,传统方案是增加发电容量,然而此方案在用电低谷时段的巨大容量冗余,产生了巨大的资源浪费。通信技术的发展使需求侧资源可以参与需求响应,为电力系统提供平衡服务,有效实现削峰填谷的目的。随着泛在电力物联网与智能电网技术的推进,未来需求侧资源将有更大的互动基础,释放出更大的调节潜力^[2]。

许多西方国家普遍实施了需求响应策略,这些国家的电力市场处于成熟阶段,需求响应策略的市

场化明显。我国尚处于电力体制改革初级阶段,不具备发展市场化需求响应的基础,广大电力用户也对其知之甚少^[3],所以部分传统的需求响应方案在中国难以实现。本文在介绍传统需求响应类型及其实践的基础上,提出了以积分制为核心的需求响应方案,这个方案在电力市场发展初期的中国有着较好的适应性,是市场化需求响应方案的等效替代品。

1 需求响应的分类

电力需求响应是指在某些电力系统运行场景下,如:发生紧急事件严重威胁电力系统可靠性或者某些特定时段系统负荷过高,由电网公司发出价格信号或激励信号,用户做出相应用电方式调整的行为^[4]。作为电力需求侧管理的一种解决方案,它通过调集大规模用户统一行动,有力地维护了电力系统的安全稳定运行,达到削峰填谷、降低能耗的目的。需求响应模式主要有2类:价格型需求响应和激励型需求响应。

收稿日期:2019-03-18;修回日期:2019-04-24

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0901103)

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0901103)

1.1 价格型需求响应

价格型需求响应是用户根据当前电价自主调整和安排自身用电的响应模式。在成熟的电力市场中,用户可以根据实时电价及时对当前的用电行为做出改变以减少电费支出^[5]。价格型需求响应主要包括实时电价机制、分时电价机制和关键峰荷电价机制,其主要特点如表1所示。

表1 价格型需求响应的分类及特点

Tab. 1 Classification and characteristics of price-based demand response

响应类型	定义	用户策略	适用阶段
实时电价机制	零售侧实时电价通常基于日前或小时前批发市场的电价,一般采用两部制电价	根据实时价格及时调整用电行为	电力市场成熟阶段
分时电价机制	根据负荷曲线特征,将一年或者一天中电价分成峰谷/峰谷平时段	减少峰荷用电,转移至谷荷时段用电	电力市场过渡阶段
关键峰荷电价机制	在分时电价上叠加尖峰费率形成,尖峰时段执行尖峰费率	及时避开尖峰时刻用电	电力市场初级阶段

1.2 激励型需求响应

激励型需求响应是电网公司通过直接给予奖励来激励用户调整用电行为参与到需求响应的方法。凡是要参与到这种响应模式的用户,要事先和电网公司或负荷聚合商签订合同,若由于自身原因未完成响应,用户需承担相应的责任。对于电网公司来说,这种需求响应模式具有较高的主动性和可控性,既可以提高需求响应的可靠性,又可以防止成本风险。激励型需求响应主要包括直接负荷控制、紧急需求响应、需求侧竞价和容量/辅助服务等,其主要特点如表2所示。

表2 激励型需求响应的分类及特点

Tab. 2 Classification and characteristics of incentive-based demand response

响应类型	定义	典型特征
直接负荷控制	电网公司根据与用户的合同,在特定时间直接控制切断负荷	电网公司远程控制;设备一年控制次数和时间有限制
紧急需求响应	紧急情况下用户自愿参与的需求响应,若参与成功将会获得奖励	自愿性质的需求响应;可靠性不高
需求侧竞价	用户主动参与到需求响应市场中,通过投标竞价方式来参与其中	大用户或者负荷聚合商才有参与的能力;市场化明显
容量/辅助服务	用户可消减的负荷量作为运行备用,根据实际情况决定调用与否	用户获益包括容量和实际调用奖励2部分;作为备用不一定被真正调用

2 需求响应的国内外实践

2.1 国外需求响应实践

美国在需求响应的管理与研究方面处于世界领

先的地位。早在2005年和2007年时,美国就颁布了《能源政策法案》与《能源独立与安全法案》,在法律层面为需求响应实践扫清了障碍,以此来促进需求响应项目的快速发展。2010年,美国发布了需求响应的国家行动计划。截止到2013年,美国的需求响应资源达到了29.5 GW。预计到2019年时,若电力消费者都使用实时电价和智能计量装置,需求响应资源将占到系统高峰负荷的20%^[6]。

英国的需求响应类型主要包括分时电价、直接负荷控制以及需求侧竞价3类,其分时电价率多样,满足多时段要求;直接负荷控制参与到系统运行备用中去,减少发电资源的需求量;需求侧竞价也与发电商一同报价,有效地防止市场力的发生^[7]。

西班牙采用了分时电价和可中断负荷2种方法^[8],其将一年分成电力高峰季节、电力中等季节和电力低谷季节,又在这个基础上叠加上了峰谷电价,总共分成6种不同的分时电价。对于可中断负荷,西班牙又根据响应时段与响应时长分成6个时段,并且对一年的响应次数和响应总时长做了规定。

2.2 国内需求响应实践

河北省的需求侧管理实践开启较早^[9],曾经出台过《关于大力开展电力需求侧管理的意见》,设立需求侧管理专项资金,重点推出了需求侧管理“十项绿色工程”,推进能效电厂市场化运作和促进需求侧管理产业链建设。

江苏省在2015年发布了《江苏省电力需求响应实施细则》,于同年夏季实行动态式季节性尖峰电价政策。政策要求,江苏省内315 kVA及以上的大工业用户,在7、8月份每日上午和下午各1 h,当该日最高气温超过35℃,在峰期电价基础上每千瓦时电价增加0.1元。在2015年8月,执行有效加价的尖峰电量3.2亿kWh,尖峰电价加价收入3 200万元。8月5日10:30~11:00,江苏省实施了非工业空调调控演练,调控负荷达14.95万kW^[10],效果如图1所示。

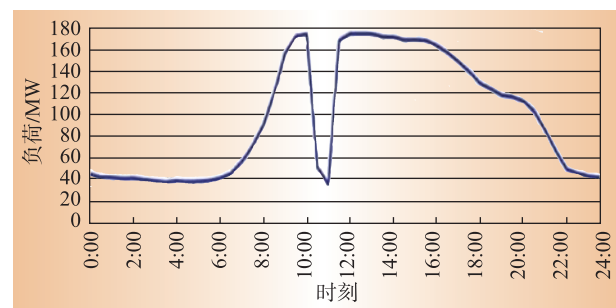


图1 江苏省实施需求响应后空调负荷变化

Fig. 1 Air-conditioning load variation after demand response implemented in Jiangsu Province

3 以积分制为核心的需求响应方案

我国需求响应实践起步较晚,与国外成熟电力

市场差距较大,直接采用国外高度市场化的需求响应方案难以适应我国现阶段发展水平。2015年,我国开启了新一轮的电力体制改革,电力市场才刚刚开始发展,电价制定由国家管控。对于电力大用户,可以通过双边谈判,集中竞价等方式进行电力市场交易,得到动态电价,而居民用户用电规模较小,小用户不具备参与报价的知识信息储备及能力,因此居民用户不具有参与市场报价的条件。在这种情况下,本文提出需求响应积分方案,根据用户需求响应结果赋予用户相应的积分值,用户可以利用积分值抵扣电费或获取增值服务。

3.1 以积分制为核心的价格型需求响应

价格型需求响应方案的原理是在用电高峰时段对用户进行积分惩罚以减少用户高峰时段负荷量;在用电低谷对用户进行积分奖励来促进用户增加用电,实现峰荷向谷荷转移,达到削峰填谷的目的。其示意图如图2所示。

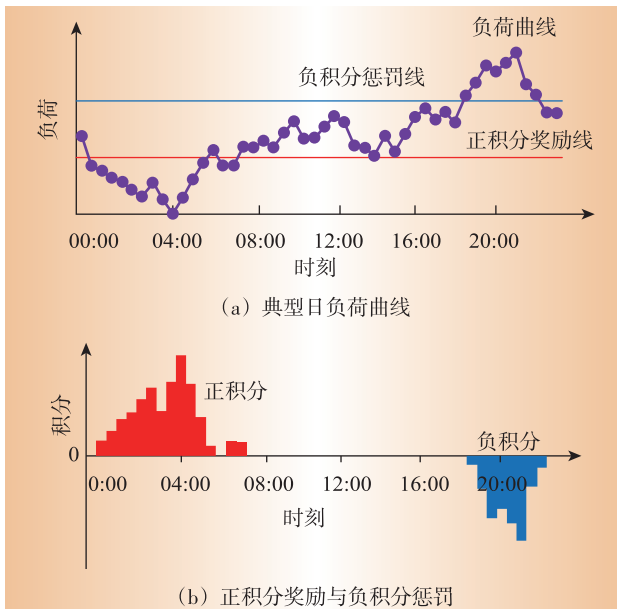


图2 价格型积分原理图

Fig. 2 Price-based integral schematic

图2(a)中,在负荷曲线上、下方与横轴平行的线分别为负积分惩罚线与正积分奖励线。一天的积分时段分成96个,即每15 min为一个积分时段。当负荷曲线低于正积分奖励线时,如:1:30~7:30,此时为负荷曲线低谷时段,为激励用户提高负荷使用量,这一时段给予用电用户正积分奖励;当负荷曲线高于负积分惩罚线时,为激励用户减少用电,这一时段给予用户负积分惩罚。图2(b)为每个时段对应的积分值。用户一天中所获得的积分如式(1)所示

$$G_{\text{day}} = \sum_{t=1}^{96} g_t \cdot Q_t \quad (1)$$

式中: g_t 为每隔15 min时段内单位电量可以取得的积分值,一般由电网公司定期发布给用户,在负荷高峰时段为负值,在负荷低谷时段为正值; Q_t 为某个

15 min时段电力用户所使用的电量; G_{day} 为用户在一天中所取得的积分值总和,即96个时段所取得的积分值之和。

其中, g_t 的值可由式(2)求解

$$g_t = \begin{cases} -\lambda_{L-} \times \lambda_N (L_t^* - L_{\text{base-}}^*) & L_t^* \geq L_{\text{base-}}^* \\ 0 & L_{\text{base+}}^* \leq L_t^* \leq L_{\text{base-}}^* \\ \lambda_{L+} \times \lambda_N (L_{\text{base+}}^* - L_t^*) & L_t^* \leq L_{\text{base+}}^* \end{cases} \quad (2)$$

式中: $L_{\text{base-}}^*$ 和 $L_{\text{base+}}^*$ 分别为负积分惩罚线与正积分奖励线的归一化后的值; L_t^* 为负荷曲线归一化后的值,归一化的目的是在输入负荷曲线变化时,保证算法和参数的通用性; λ_N 为用户参与度因子,当参与用户减少时增加该值,对应的积分可以增加,从而提高用户的参与数量; λ_{L-} 和 λ_{L+} 分别为负积分惩罚系数和正积分奖励系数,用以调节需求响应行为对积分值大小。

从本质上来看,价格型积分方案是实时电价需求响应的一种替代品。实时电价以一定周期发布电价,从而来引导电力用户参与到需求响应中去。价格型积分方案在每个15 min时段规定了对应的单位电量的积分值,用户根据此信息来调整自身的用电行为。两者在运行周期、实现方式和最终目的上都有相似性。另外,价格型积分方案同样可以看作是分时电价增加了更多时段的一种变体。在电力体制改革的初期阶段,这种方法可以帮助电力用户参与到电力市场中去,有利于实现电力系统与电力用户的友好互动。

3.2 以积分制为核心的激励型需求响应

激励型需求响应主要目的是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^[11]。考虑到我国正处于电力市场发展初期,用户或者聚合商还不具备进行需求侧竞价的能力,所以考虑激励型积分方案应是直接控制负荷响应方法和容量/辅助服务响应方法的结合体。

参加激励型需求响应积分方案的用户首先需要与实施方(电力公司)签订合同,激励型积分主要由3部分组成:用户调节负荷功率提供辅助服务容量的积分奖励,用户成功响应电网需求调节用电功率的积分奖励以及用户响应失败或不参与响应的积分惩罚。第一类积分方式属于激励型需求响应方法中的容量/辅助服务类型,后2种积分方式属于直接负荷控制类型。

参与激励型积分方案的用户,可切除设备分为电网公司可以远程控制并直接切除的可控负荷 $L_{\text{cut}}^{\text{grid}}$ 和用户自主选择并自主操作的负荷 $L_{\text{cut}}^{\text{user}}$ 。对于电网切除类负荷,愿意参与激励型方案的用户首先要和电网公司签订合同,说明负荷可切除量以及可接受切除时间,此时这部分负荷相当于电网的备用;对于用户切除类负荷,这一部分不受电网公司的控制,而是由电网公司发布信息,用户自主选择并切除负荷。用户在参与到激励型需求响应方案中的积分收益如式(3)所示

$$G_{\text{cut}} = G_{\text{cut}}^{\text{anc}}(Q, t, s, T) + G_{\text{cut}}^{\text{succ}}(Q, t, s, T, N_s) - G_{\text{cut}}^{\text{fail}}(Q, t, s, T, N_f) = G_{\text{cut}}^{\text{anc}}(Q, t, s, T) + \sum_{i=1}^{N_s} Q_i \cdot g_{\text{cut}}^{\text{succ}}(t, s, T) - \sum_{j=1}^{N_f} Q_j \cdot g_{\text{cut}}^{\text{fail}}(t, s, T) \quad (3)$$

式中： $G_{\text{cut}}^{\text{anc}}(Q, t, s, T)$ 为用户为电力系统提供运行备用获得的积分奖励，与是否被调用无关，与用户申报的容量 Q 、切除时段 t 、切除速度 s 、切除时长 T 有关； $G_{\text{cut}}^{\text{succ}}(Q, t, s, T, N_s)$ 为用户成功响应对应的奖励积分； N_s 为成功响应次数； $g_{\text{cut}}^{\text{succ}}(t, s, T)$ 为单位容量的积分奖励额； $G_{\text{cut}}^{\text{fail}}(Q, t, s, T, N_f)$ 为用户未成功响应对应的惩罚积分； N_f 为失败响应次数； $g_{\text{cut}}^{\text{fail}}(t, s, T)$ 为单位容量的积分惩罚额。激励型积分方案是价格型积分方案的补充，当价格型需求响应方案的负荷调整量难以满足电力系统的需求时，或者电力系统发生紧急情况时，激励型积分方案能够快速响应，增强积分方案的响应能力，及时满足电网安全可靠经济运行的要求。

4 结束语

随着经济的发展，需求侧用电量迅速攀升，需求侧有着巨大的调峰填谷和紧急需求响应的潜力。国外电力市场很早就进行了需求响应实践，市场化明显，而我国的部分省份也通过各种形式采用需求响应方法削峰填谷，提高能源利用率。我国电力市场改革还处于初期阶段，用户不具备参与市场报价的能力，所以本文提出了以积分制为核心的需求响应方案，包括价格型积分方案和激励型积分方案。

以积分制为核心的需求响应模式适应于我国电力体制改革初级阶段，能够促进电网公司与用户形成良好的互动，有利于更好地发挥需求侧巨大的潜力和促进泛在电力物联网的建设。D

参考文献：

[1] 董振斌,王文,周珏,等.需求响应参与系统频率调节研究综述[J].电力需求侧管理,2017,19(4):22-26.
DONG Zhenbin, WANG Wen, ZHOU Jue. Review on demand response participating in power system frequency regulation[J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(4):22-26.

[2] CONEJO A J, MORALES J M, BARINGO L. Real-time demand response model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(3):236-242.

[3] 邵常政,丁一,宋永华,等.典型新兴市场国家电力体制改革经验及借鉴意义[J].南方电网技术,2015,9(8):13-18.
SHAO Changzheng, DING Yi, SONG Yonghua, et al. Experiences of power system deregulation in typical emerging market countries and its reference value for China[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(8):13-18.

[4] KIRSCHEN D S. Demand-side view of electricity markets [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 520-527.

[5] 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):97-107.
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):97-107.

[6] 文福拴,林鸿基,胡嘉骅.需求响应的商业机制与市场框架初探[J].电力需求侧管理,2019(1):4-9.
WEN Fushuan, LIN Hongji, HU Jiahua. A preliminary investigation on commercial mechanism and market framework for demand response [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(1):4-9.

[7] 李国栋.欧洲与美国需求侧管理创新与发展趋势(上)[J].电力需求侧管理,2012,14(5):59-62.
LI Guodong. DSM innovation and development trends in European countries and the United States [J]. Power Demand Side Management, 2012, 14(5):59-62.

[8] 闫华光,陈宋宋,李世豪,等.需求响应发展现状及趋势研究[J].供用电,2017(3):1-8.
YAN Huaguang, CHEN Songsong, LI Shihao, et al. Research on the current situation and development trend of demand response [J]. Distribution & Utilization, 2017(3): 1-8.

[9] 陈刚,刘涛,陈章乐.浅析河北省电力需求侧管理中长期规划[J].电力需求侧管理,2009,11(5):67-68.
CHEN Gang, LIU Tao, CHEN Zhangle. Analysis to the medium and long term plan of DSM in Hebei province [J]. Power Demand Side Management, 2009, 11(5):67-68.

[10] 李作锋,陈振宇.江苏电力需求响应的探索和实践[J].电力需求侧管理,2018,20(1):4-8.
LI Zuofeng, CHEN Zhenyu. The exploration and practice of Jiangsu power demand response [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(1):4-8.

[11] 牛文娟,李扬,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):3 630-3 637.
NIU Wenjuan, LI Yang, WANG Beibei. Demand response based virtual power plant modeling considering uncertainty [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22):3 630-3 637.

作者简介：

谢康(1995),男,山东济宁人,博士研究生,研究方向为需求侧管理;
张凯杰(1996),男,山东东营人,硕士研究生,研究方向为需求侧管理;
栾开宁(1973),男,江苏南京人,研究员级高级工程师,主要从事电力营销等方面的工作;
惠红勋(1992),男,河北邯郸人,博士研究生,研究方向为需求侧管理;
胡怡霜(1995),女,浙江嘉兴人,博士研究生,研究方向为电力系统可靠性;
丁一(1978),男,北京人,教授,主要从事智能电网、电力系统可靠性等方面的研究。