

适合需求侧主动响应的中国电力市场机制的思考与建议

丁一¹, 吴华华², 惠红勋¹, 张俊²

(1. 浙江大学电气工程学院, 杭州 310007; 2. 国网浙江省电力公司, 杭州 310007)

摘要: 需求侧主动响应的市场机制在我国新一轮电力体制改革中占重要的地位。针对我国如何逐步建立适合需求侧主动响应的市场机制, 首先分析了需求侧主动响应与已推行的需求侧管理的区别, 然后探讨了市场角度下需求侧主动响应的互动模式, 包括价格机制、激励机制以及适用于我国的增值服务补偿机制, 并提出了利用多维度模糊描述法对需求侧的多重属性进行描述, 最后结合国外电力市场实践经验, 调研了我国电力市场存在的问题, 分析了我国适合需求侧主动响应的市场机制发展机遇, 并提出了相应的发展建议。

关键词: 电力体制改革; 需求侧主动响应; 互动模式; 电力市场

Analysis and Related Suggestions on Power Market Mechanism of Demand Side Response in China

DINY Yi¹, WU Huahua², HUI Hongxun¹, ZHANG Jun²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China;
2. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, China)

Abstract: Market mechanism on demand side response plays an important role on the new round of electricity reform in China. In order to develop the pathway of market mechanism which is suitable for demand side response in China, the differences between demand side management(DSM) and demand side response(DR) are analyzed. Then, several interactive modes, such as price-based DR, incentive-based DR and value-added services-based DR, are discussed. The multi-dimensional fuzzy description method is put forward to describe the multiple attributes of various DRs. Moreover, by introducing foreign electricity market experiences, the problems and opportunities of electricity market in China are analyzed. Several development proposals are also put forward in this paper.

Key words: electricity reform; demand side response; interactive mode; electricity market

0 引言

2015年3月15日, 中共中央、国务院发布了《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)^[1], 致力于促进电力行业的健康稳定发展。9号文提出了深化电力体制改革的五项基本原则, 其中第四项原则明确指出要坚持节能减排, 积极开展电力需求侧管理和能效

管理; 在近期推进电力体制改革的重点任务中, 明确指出要实施需求响应, 从而发挥市场机制的作用, 促进电力供给侧和需求侧的平衡。2015年4月7日, 国家发展改革委、财政部发布了《关于完善电力应急机制做好电力需求侧管理城市综合试点工作的通知》^[2], 进一步强调了实施需求侧管理具有转移电力高峰负荷、保障电力供需平衡的重要意义, 并要求实施需求侧管理的试点城市组织实施需求响应。以试点省份江苏为例, 2015年6月16日, 江苏省经济和信息化委员会、江苏省物价局发布了《江苏省电力需求响应实施细则》(试行)^[3], 从实施背景、原则与目标、实施内容、实施方式、组织

基金项目: 国家自然科学基金项目(51577167); 国家电网公司项目(5211JX150103)。

Foundation items: Supported by the National Science Foundation of China(51577167); Project of State Grid Corporation of China(5211JX150103)。

运行保障和监督检查等方面对需求响应进行了详细的规定。由此可见,本次新一轮的电力体制改革非常重视需求侧主动响应,而实现需求侧主动响应需要有相应的市场机制作为前提和保障。

国外在需求侧主动响应的市场机制方面具有一定的实践和经验。美国等国家通过供电方发出电价信号或者减少负荷的通知,影响需求侧的用户主动改变用电计划,以达到降低尖峰时段用电负荷的目的^[4-7]。欧洲等国家在需求侧主动响应方面进行了示范性验证工作^[8-10],欧盟第七框架计划(FP7)大型智能电网试点项目——欧盟智能生态电网(Eco-grid EU)项目^[11],在中小用户侧装上智能电表和智能控制器等设备,通过短时间间隔的实时电价,让其参与到电力市场平衡调节中,实现需求侧和供给侧的友好互动。

本文首先深入分析了需求侧主动响应与需求侧管理的关系,然后研究了市场角度下需求侧主动响应的互动模式,最后在借鉴国外相关实践经验的基础上,剖析了中国电力市场发展现状与发展机遇,最后提出了中国适合需求侧主动响应的市场机制发展建议。

1 需求侧主动响应是需求侧管理的丰富和完善

需求侧管理(demand side management, DSM)早已在中国推行,主要用于削峰填谷、省电节能、能源替换等方面^[12]。DSM用于削峰填谷就是通过增大峰谷电价的差别^[13-16]、签订高峰时段的中断负荷协议^[17]以及提高分布式储能容量^[18-20]等措施,达到降低峰荷、提高谷荷的效果;省电节能就是通过推广使用节能家用电器和宣传提高省电环保意识^[21],达到社会的经济高效和环境的友好;能源替换就是在城市等人口密集区鼓励居民多用电能替代煤炭等能源^[22],最终实现电力企业服务质量的提升。

需求侧主动响应与需求侧管理有一定的相关性,也有学者将需求响应称为需求侧管理的一部分^[23]。本文认为,需求侧主动响应是需求侧管理的丰富和完善。需求侧管理更多的是站在系统的角度考虑问题,目的是提高电力系统的运行效率、电网的经济效益以及系统的安全稳定运行等;而需求侧主动响应更多的是强调用户的主动行为^[24],是

用户在价格信息、激励机制和增值服务补偿机制等情况下采取的主动响应。

需求侧主动响应强调电力用户通过电力输配网络与电力供给商的友好互动,在这种互动平衡中,用户、电力输配公司以及电力供给商都可以受益;需求响应强调电能的商品属性^[25-27],电力价格不再由政府部门控制和制定,而更多的是由市场上的供求关系决定,这样的电力价格反映了市场信息。

2 市场角度下需求侧主动响应的互动模式

2.1 需求侧的多重属性

需求侧用户是多元的,具有多重属性,这体现在研究不同的问题或面对不同的情景时,需要侧重的负荷属性有很大区别。一般来说,需求侧用户可以按照如下几种方式进行分类。

2.1.1 按照响应方式分类^[28-29]

1) 自主响应类:此类用户根据市场运营商发布的电价信息(例如分时电价、尖峰电价、实时电价等)^[4]自主改变用电习惯,调整用电模式,是一种通过市场方式实现的自主响应,一般中小型用户居多。

2) 直接调度类:此类用户与市场运营商签订可调度合同,通过直接经济补偿等方式,接受售电公司的控制,可以用于紧急需求响应、辅助服务等,一般大型工商业用户居多。

3) 自主响应和直接调度混合类:此类用户既会根据电价信息自主改变用电模式,又会与市场运营商签订合同接受其直接调度,例如一些工业用户,根据电价信息安排检修计划,同时也接受电力紧急中断,从而得到相应的经济补偿。

按照响应方式分类是站在电力市场整个体系下,从电力系统的角度进行的宏观的分类。因为这种分类方式可以直接解释为不同种类的互动模式,所以这是研究市场机制时对用户进行的最直接、最简单的一种分类方式。

2.1.2 按照电力用途分类

按照电力用途的分类方式根据电能消耗的场合、电能的作用进行分类,共分为农业用户、工业用户、商业用户和居民用户四类^[30]。

按照电力用途分类是从社会产业的角度进行的分类,即第一产业、第二产业和第三产业^[31],是一种最直观、最容易让全社会理解的一种分类方式。同时,这种分类方式便于开展用户用电行为特

性的研究,便于分析不同电力用户在不同情况下的互动响应潜力。

2.1.3 按照电压等级分类

按照电压等级分类是将用户划分为高压用户、中压用户和低压用户^[32]。高压用户主要包括大工业用户和带自备电厂的大工业用户等,中压用户主要包括微网用户、生产型企业等,低压用户主要包括普通居民用户、商业用户和小型充电桩等。

按照电压等级分类清晰地划分了不同用户在不同电压等级下的地位重要性,在适合需求侧主动响应的市场机制形成过程中,这种分类方式便于指导电网的规划和建设。

2.1.4 按照物理层面分类

按照物理层面分类是将用户划分为具有需求响应能力的用户、具有分布式电源的用户、具有储能作用的用户等不同类别。

按照物理层面的分类便于分别研究用户的有源特性和无源特性,从而更清晰地分析用户主动响应的互动潜力和互动可靠性。

2.2 多维度方法描述需求侧多重属性

对于需求侧某一特定的用户,在不同的分类方式中具有不同的属性,可采用多维度模糊描述法,分析不同维度属性之间的关联性。多维度是指不同的分类方式,模糊描述是指利用隶属度函数描述各维度的属性。利用多维度模糊描述法对某一负荷 L 进行描述,如图 1 所示。

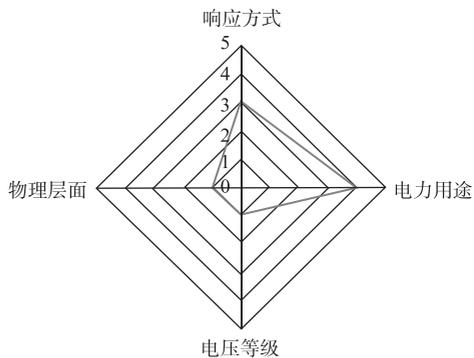


图 1 多维度描述需求侧多重属性

Fig. 1 Multi-dimensional method describing DR's multiple attributes

图 1 包含四个维度,分别代表四种分类方式:按照响应方式分类、按照电力用途分类、按照电压等级分类、按照物理层面分类。负荷 L 的属性可以表示为 $L(L_1, L_2, L_3, L_4)$, $L_1=3$ 代表按照响应方

式分类中的自主响应类, $L_2=4$ 代表按照电力用途分类中的居民用户, $L_3=1$ 代表按照电压等级分类中的低压用户, $L_4=1$ 代表按照物理层面分类中的具有需求响应的用户。

每个维度都可以用隶属度函数来表述,例如 $L_1=2.5$ 代表此负荷按照响应方式分类时,属于自主响应和直接调度混合类,且偏向于自主响应类。

2.3 市场角度下需求侧主动响应的互动模式

根据国内外已有的研究和实践经验,一般将互动模式分为两大类:基于价格机制的互动模式和基于激励机制的互动模式^[28]。根据我国电力产业发展的特色,可以在以上两大类互动模式的基础上,发展增值服务补偿机制的互动模式。

2.3.1 基于价格机制的互动模式

基于价格机制的互动模式就是通过一套满足需求侧响应的电价体系实现电力用户与电力公司之间的友好互动^[33]。具体实现方式如图 2 所示。

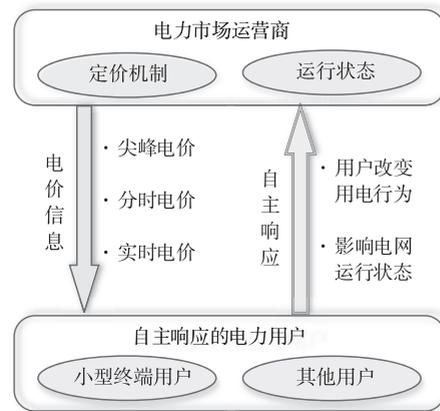


图 2 基于价格机制的互动模式

Fig. 2 Interactive mode of price-based DR

首先电力市场运营商根据目前电网的运行状态和已有的定价机制,得到不同时间尺度的电价信息并将其发布给用户,电价信息包括尖峰电价、分时电价、实时电价等信息;用户接收到电价信息会主动改变用电行为,用电行为的改变又会反过来影响电网的运行状态;电力市场运营商根据电网新的运行状态再次制定新的电价信息并将其发布给用户。如此反复,实现用户与电力市场运营商的友好互动。

2.3.2 基于激励机制的互动模式

基于激励机制的互动模式就是通过市场运营商

与电力用户提前签订协议, 当电网的安全稳定运行受到威胁或电力成本极高时, 市场运营商可以直接控制电力用户, 削减负荷, 并在事后对按照协议规定进行响应的用户进行补偿, 对不按照协议规定进行响应的用户进行惩罚^[34-37]。

基于激励机制的互动模式包括直接负荷控制、可中断负荷、紧急需求响应等方式^[28]。基于激励机制的互动模式与基于价格机制的互动模式相比, 可以进行更广泛时间尺度上的主动响应互动。基于价格机制的互动模式通过电价影响用户的用电行为, 一般来说不能进行紧急响应服务; 但是基于激励机制的互动模式可以通过控制手段, 实现等效为发电机组一次调频和二次调频的响应服务, 在时间尺度上比价格机制的互动模式响应更快^[38]。因此, 基于激励机制的互动模式可以进行更广泛时间尺度上的主动响应。在一些情况下, 面对需求侧主动响应的用户还会采用两种机制并用的策略。

2.3.3 基于增值服务补偿机制的互动模式

基于增值服务补偿机制的互动模式是在以上两种互动模式的基础上, 根据我国电力产业发展的特色, 可以尝试发展的一种互动模式。

增值服务补偿机制就是当用户通过需求侧主动响应为电力系统的安全可靠运行做出贡献后, 根据电力用户的需要, 向电力用户提供超出常规服务范围的服务, 或采用超出常规服务方法提供的服务^[39]。增值服务也可以解释为在完成基本电力服务要求的基础上, 根据电力用户的需要提供各种延伸服务。例如, 某地区居民接受主动响应服务协议, 一年时间若供需双方遵守协议并进行了良好的互动响应, 则将此地区的电网进行升级改造, 提高此地区电网的安全性和可靠性, 从而实现增值服务补偿的互动。

3 国外适合需求侧主动响应的市场机制实践经验

国外在适合需求侧主动响应的市场机制方面有过一定的探索, 例如美国加州早在 20 世纪 80 年代就进行了实时电价机制的需求响应试验项目, 测试了用户对实时电价的响应特性^[40-41]; 欧盟第七框架计划(FP7)大型智能电网试点项目——欧盟智能生态电网(Ecogrid EU)项目是一个成功的示范项目, 本文将以此项目为实例, 简单介绍国外适合需求侧主动响应的实时市场机制设计实践经验^[11, 42]。

欧盟智能生态电网项目设计了适合需求侧主动响应的市场机制, 市场构架如图 3 所示^[42]。

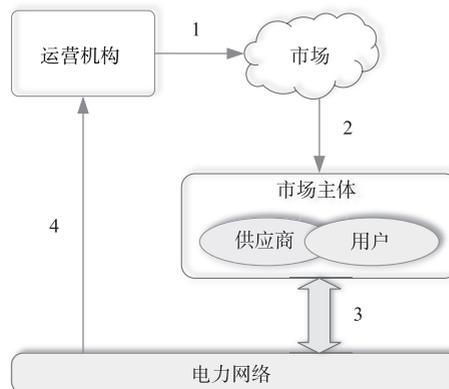


图3 欧盟智能生态电网项目市场构架

Fig. 3 Ecogrid EU market concept architecture

图中, 运营机构是指电力市场运营商; 市场包括日前市场、日内市场、实时市场以及其他市场; 市场主体包括电力供应商和电力用户。

电力市场运营商根据电力网络的运行状态, 比如在电力网络出现了拥塞、电力供给侧和需求侧出现了不平衡等问题时, 制定实时电价策略并发布给市场主体。根据实时电价信息, 市场主体中的用户会调整自己的用电安排; 市场主体中的供应商会调整发电策略, 最终通过用户和供应商的共同响应达到电力网络的平衡。反之, 若电力网络中不存在上述问题, 则实时电价按照日前电价执行。

4 中国适合需求侧主动响应的市场机制思考与发展建议

随着我国太阳能、风能等清洁能源的使用规模不断扩大, 电网的安全性、可靠性以及经济性等都面临极大挑战, 而需求侧主动响应的市场机制就是解决这一问题的最好方案。在本次新一轮电力体制改革过程中, 我国需要探索保证电力安全可靠运行、与中国国情紧密结合、符合目前电力发展现状、促进电力和能源产业繁荣发展的适合需求侧主动响应的市场机制。

4.1 中国电力市场发展现状

国务院在 2002 年下发了《电力体制改革方案》(国发[2002]5 号, 以下简称 5 号文)^[43], 提出通过“厂网分开、主辅分离、输配分开、竞价上网”四步改革措施, 逐步建立竞争性的电力市场, 目前我国只完成了第一步^[44], 厂网实现了分离, 仍然存

在改革的空间。

首先,考虑到我国的国情,发电市场没有实现类似国外电力市场的竞争,原因有如下三点:1)发电市场中电力购买者是唯一的^[45],买方在交易上处于主动地位,属于买方市场^[46];2)电网企业为保证供电的安全可靠,会与发电企业签订一定份额的长期合同,电量比例占到 80%~90% 左右^[47],只有小部分电量竞价上网;3)发电企业的上网电价被调控,而未反应市场中能源真正的成本,以煤电为例,2008 年煤价上涨,但上网电价的调整相对滞后,造成发电企业政策性亏损^[48]。

其次,输配电价形成机制未理清。用户电费不只是用户消耗的有功功率电费,还包括无功功率的传输、电能的损耗、固定成本的分摊、备用费用等,理清电价机制是电力市场得以健康发展的前提^[49]。

最后,普通用户没有购电选择权。电力市场的主体应该包含电力供应商和用户,缺少其中任何一个主体都不能形成真正的电力市场。

4.2 中国适合需求侧主动响应的市场机制发展机遇

4.2.1 发电容量充足有利于电力市场化改革

发电容量充足是电力市场化改革的前提。2003 年夏,浙江省竞价上网全面停止^[47],就是因为发电容量不足,出现大规模缺电。目前,我国发电设备利用小时数自 2011 年至 2014 年逐年降低(如图 4 所示)^[50],电力供需形势总体宽松,原因可以归纳为如下两点:(1)从电力生产侧来看,装机容量增速过快,发电设备投资过度,2012—2014 年,全国新增装机每年同比增长高达 7.9% 以上^[51];(2)从电力消费侧来看,电力需求增速下降,2014 年全国用电量增速创 1998 年以来新低^[50]。

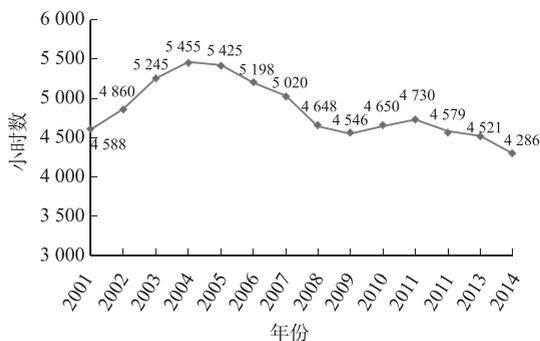


图 4 2001—2014 年发电设备利用小时情况

Fig. 4 Utilization ratio of power generation from 2001 to 2014

4.2.2 强健的电力传输网络有利于电力市场化改革

强健的电力传输网络是电力市场化改革过程中电网安全可靠的保障。国家电网公司在 2009 年 5 月正式提出了要建设“坚强智能电网”的公司战略,并进行了三个阶段的规划安排:第一阶段为规划试点阶段(2009—2010 年),第二阶段为全面建设阶段(2011—2015 年),第三阶段为引领提升阶段(2016—2020 年)^[52]。当前我国正处于建设的第三阶段,目标中明确指出,要显著提高电网与电源、用户之间的互动性^[52-55]。

4.3 中国适合需求侧主动响应的市场机制发展建议

4.3.1 建立透明公开的交易体系

建立透明公开的交易体系是保障电力体制改革健康有序发展的前提,也是提高电力企业的公信力以及市场主体的参与热情和满意度的有力方式。

对于参与电力市场竞价的主体要保证其公平竞争,电力交易机构提前发布竞价电量规模以及申报的开始和结束时间,发电企业和用户只要满足了市场主体的要求,都可以公平参与竞价。申报结束后,电力交易机构进行市场出清,并报电力调度机构对其进行安全校核,将最终结果及相关信息进行统一发布。

对于实时需求主动响应而不参与电力市场竞价的用户,要将电价机制中的电价信息、激励机制中的控制信息及时向用户发布。争取实现费用成本的清晰划分,即能源成本、发电成本、过网传输成本、管理成本、盈利信息以及税务费用等,分别发布给用户,而不只是费用总价。

4.3.2 鼓励企业发展电力智能管理系统

建设适合需求侧主动响应的市场机制需要信息通信手段作为有力支撑,要鼓励企业发展电力智能管理系统,比如相应的网关设备、智能电表、家庭能源管理系统、工商业能源管理系统等。

我国目前信息通信产业发展迅猛,走在了世界前列。通信技术、物联网、自动控制设备、智能家电设备等技术已经为需求侧主动响应提供了强有力的技术支撑,营造了良好的发展环境。利用这些技术,需求侧响应可以实现更小的时间尺度,甚至可以满足实时响应的需求。参与主动响应的用户也不再仅限于工商业等大型电力用户,可以实现更小容量的电力用户,如普通家庭用户,参与到市场中

来。因此,鼓励企业大力发展电力智能管理系统可以促进需求侧主动响应的顺利安全可靠实施。

4.3.3 鼓励分布式储能技术的发展

分布式储能技术是实现需求侧主动响应的关键,更多用户拥有储能设备将极大地促进需求响应和清洁能源的发展。用户储能设备与风能、太阳能共同发展,同时可作为这些清洁能源与电力网连接的枢纽。

储能技术正在飞跃式发展,从2010年到2015年,锂电池价格下降了60%,据预测2015—2020年的五年间,锂电池价格将再下降65%^[56],这将使大规模储能技术更具经济竞争力。2015年,特斯拉公司推出家用电池墙(Powerwall),并将于2016年推出第二代产品^[57]。拥有储能设备的用户可以作为电力消费者,根据需求在电价较低的时候,从电力市场买入电能;也可以作为电力供应者,将家庭分布式电源发出并储存的电能或其他时段买入的电能,在电价较高的时段卖出。储能技术实现了新的商业模式,保障了电网运行的安全可靠和经济性,同时促进了清洁能源的发展。

4.3.4 积极宣传引导用户参与需求侧主动响应

用户积极响应、主动参与是实现需求侧响应的市场机制的最终要求。适合需求侧主动响应的市场主体是用户和发电企业,相对于经过上一轮电力体制改革的发电企业来讲,用户侧更应该注重宣传和引导工作^[58]。

用户的宣传引导工作不仅需要电力运营机构的努力,也需要电力主管部门和政府的共同努力。可以通过小区展板、宣传画、公益广告、社交平台、手机软件等方式全方位立体宣传。只有用户的积极主动参与,才能让需求响应的电力市场更有活力,进入不断完善响应制度的健康发展道路。

5 结论

探索适合需求侧主动响应的市场机制在新一轮电力体制改革中占有重要地位。针对我国如何逐步建立适合需求侧主动响应的市场机制,本文的主要结论如下:

1)需求侧主动响应是需求侧管理的丰富和完善,需求侧管理更多的是站在系统的角度考虑问题,而需求侧主动响应更强调用户的主动行为,还原了电能的商品属性。

2)需求侧用户是多元的,具有多重属性,在研究不同的问题或面对不同的情景时,需要侧重的负荷属性有很大区别,可采用多维度模糊描述法对需求侧的多重属性进行综合描述,从而便于从多个角度研究需求侧的互动潜力、互动可靠性以及互动模式。

3)考虑到我国的国情,我国电力市场的发展与国外发达国家有很大不同。当前我国发电容量充足,全国电力供需总体宽松,同时处于坚强智能电网建设的引领提升阶段,拥有电力市场化改革的发展机遇。本文对我国建立适合需求侧主动响应的市场机制提出了若干建议:尽快完善市场机制建设的相关制度,建立透明公开的交易体系,鼓励发展电力智能管理系统和分布式储能技术,积极宣传引导用户参与。

参考文献

- [1] 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)[Z/OL]. [2016-3-20]. <http://www.ne21.com/news/show-64828.html>.
- [2] 国家发展改革委、财政部关于完善电力应急机制做好电力需求侧管理城市综合试点工作的通知(发改运行[2015]703号)[Z/OL]. [2016-3-20]. http://www.sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201504/t20150409_677004.html.
- [3] 关于印发《江苏省电力需求响应实施细则》的通知(苏经信电力[2015]368号)[Z/OL]. [2016-3-20]. http://www.jseic.gov.cn/xwzx/gwgg/gwfb/201506/t20150625_162408.html.
- [4] 王冬容. 价格型需求响应在美国的应用[J]. 电力需求侧管理, 2010, 12(4): 74-77.
WANG Dongrong. Application of price-based demand side response in the U. S. A. [J]. Power Demand Side Management, 2010, 12(4): 74-77.
- [5] FARUQUI A, GEORGE S. The value of dynamic pricing in mass markets [J]. The Electricity Journal, 2002, 15(6): 47-48.
- [6] FARUQUI A, GEORGE S. Quantifying customer response to dynamic pricing [J]. The Electricity Journal, 2005, 18(6): 58-59.
- [7] GAO. Electricity markets; consumers could benefit from demand programs, but challenges remain [J]. GAO-04-844, 2004(8): 22-23.
- [8] PAPAGIANNIS G, DAGOUMAS A, LETTAS N, et al. Economic and environmental impacts from the implementation of an intelligent demand side management system at the European level [J]. Energy Policy, 2008, 36(1): 163-180.
- [9] BELHOMME R, ASUA RC, VALTORTA G, et al. Address-active demand for the smart grids of the future [C]//CIRED Seminar on Smart Grids for Distribution, IET-CIRED, 2008: 1-4.
- [10] 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.
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.

- [11] DING Yi, PINEDA S, NYENG P, et al. Real-time market concept architecture for EcoGrid EU—A prototype for European smart grids [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, 4(4): 2006–2016.
- [12] 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.
- [13] 周永灿, 李扬. 考虑需求侧响应的尖峰电价实施效益的分析[J]. *电力需求侧管理*, 2009, 11(2): 12–14.
ZHOU Yongcan, LI Yang. The effectiveness analysis of implementing the advanced peak electricity price considering the demand side response [J]. *Power Demand Side Management*, 2009, 11(2): 12–14.
- [14] 熊长虹, 马体. 峰谷电价对典型大用户影响的分析[J]. *电力需求侧管理*, 2012, 14(3): 40–43.
XIONG Changhong, MA Ti. Affection of TOU price on typical large customers [J]. *Power Demand Side Management*, 2012, 14(3): 40–43.
- [15] 陈建长, 黄锟宁. 基于需求侧响应的上网侧与售电侧峰谷分时电价联动机制[J]. *系统工程*, 2006, 24(10): 88–91.
CHEN Jianchang, HUANG Kunning. The investigation into the linkage of the on-grid and sale TOU price based on the demand response [J]. *Systems Engineering*, 2006, 24(10): 88–91.
- [16] 周玖. 需求侧与峰谷电价分析[J]. *四川建材*, 2007, 33(1): 131–132.
ZHOU Jiu. The analysis of demand side and TOU price [J]. *Sichuan Building Materials*, 2007, 33(1): 131–132.
- [17] 王建学, 王锡凡, 王秀丽. 电力市场可中断负荷合同模型研究[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(9): 11–16.
WANG Jianxue, WANG Xifan, WANG Xiuli. Study on model of interruptible load contract in power market [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(9): 11–16.
- [18] 韦立坤, 赵波, 吴红斌, 等. 虚拟电厂下计及大规模分布式光伏的储能系统配置优化模型[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(23): 66–74.
WEI Likun, ZHAO Bo, WU Hongbin, et al. Optimal allocation model of energy storage system in virtual power plant environment with a high penetration of distributed photovoltaic generation [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(23): 66–74.
- [19] 杨玉青, 牛利勇, 田立亭, 等. 考虑负荷优化控制的区域配电网储能配置[J]. *电网技术*, 2015, 39(4): 1019–1025.
YANG Yuqing, NIU Liyong, TIAN Liting, et al. Configuration of energy storage devices in regional distribution network considering optimal load control [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(4): 1019–1025.
- [20] 唐文左, 梁文举, 崔荣, 等. 配电网中分布式储能系统的优化配置方法[J]. *电力建设*, 2015, 36(4): 38–45.
TANG Wenzuo, LIANG Wenju, CUI Rong, et al. Optimal allocation method of distributed energy storage system in distribution network [J]. *Electric Power Construction*, 2015, 36(4): 38–45.
- [21] 江亿. 我国建筑耗能状况及有效的节能途径[J]. *暖通空调*, 2005, 35(5): 30–40.
JIANG Yi. Current building energy consumption in China and effective energy efficiency measures [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2005, 35(5): 30–40.
- [22] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [23] 李扬, 王蓓蓓, 宋宏坤, 等. 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, et al. Demand side response and its application [J]. *Power Demand Side Management*, 2005, 7(6): 13–15, 18.
- [24] 王蓓蓓, 李扬, 高赐威, 等. 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, et al. Demand side management outlook under smart grid infrastructure [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(20): 17–22.
- [25] 刘宝华. 电能的属性与电力工业市场化[J]. *中国电力企业管理*, 2010, (3): 12–15.
- [26] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光, 等. 能源互联网: 驱动力、评述与展望[J]. *电网技术*, 2015, 39(11): 3005–3013.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang, et al. Energy internet: driving force, review and outlook [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(11): 3005–3013.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 黄焘, 马溪原, 雷金勇, 等. 考虑分时电价和需求响应的家庭型用户侧微电网优化运行[J]. *南方电网技术*, 2015, 9(4): 47–53.
HUANG Tao, MA Xiyuan, LEI Jinyong, et al. Optimal operation of household user-side microgrid considering time-of-use price and demand response [J]. *Southern Power System Technology*, 2015, 9(4): 47–53.
- [30] 胡博. 基于智能电网的电力营销模型及关键技术的研究[D]. 石家庄: 华北电力大学, 2013.
- [31] 一丁. 关于社会产业的划分说[J]. *当代经济管理*, 1985, (4): 50–50.
- [32] 黄永皓, 康重庆, 夏清, 等. 用户分类电价决策方法的研究[C]//西南交通大学. 2003年全国高等学校电力系统及其自动化专业第十九届学术年会. 成都: 西南交通大学出版社, 2003.
- [33] 魏鲁鸿. 基于电力需求侧管理的电价决策模型及管理策略[D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [34] 黄清辉. 电力市场环境实施需求侧管理的激励机制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [35] 张艳霞. 需求侧管理(DSM)激励机制理论研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2006.
- [36] 汪晓露. 电力需求侧管理保障体系和激励机制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- [37] 余良. 基于DSM的节能项目投资效益评价与激励机制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.
- [38] 高赐威, 梁甜甜, 李扬. 节能发电调度下基于虚拟机组的日前负荷调度模型[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(22): 3691–3699.
GAO Ciwei, LIANG Tiantian, LI Yang. Model of day-ahead

- load scheduling based on virtual generator unit in energy – saving power generation dispatching [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3691–3699.
- [39] 徐一寒, 刘敏. 增值服务在保险业务中的价值分析[M]//罗忠敏. 中国保险学会学术年会入选文集 2011(实务卷). 北京: 中国法制出版社, 2011.
- [40] 王冰, 郝豫. 电力实时定价制的发展历程及其制约因素探析[J]. 外国经济与管理, 2006, 28(8): 34–40.
- [41] 宋宏坤. 美国加州如何通过 DSM 解决能源危机[J]. 电力需求侧管理, 2004, 6(3): 34–36.
SONG Hongkun. How to resolve energy crisis by DSM in California [J]. Power Demand Side Management, 2004, 6(3): 34–36.
- [42] DING Yi, NYENG P, ØSTERGAARD J, 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), 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on. IEEE, 2012; 1–7.
- [43] 国务院. 国务院关于印发电力体制改革方案的通知(国发[2002]5号)[Z/OL]. [2016-3-19]. <http://www.lawxp.com/statute/s1068870.html>.
- [44] 朱成章. 中国电力市场化改革的设计[J]. 中国电力企业管理, 2014(4).
- [45] 王新生. 中国电力市场的现状与展望[J]. 商业, 2015(2): 56–58.
- [46] 刘宏宇. 浅论机制型买方市场[J]. 求索, 1998(1): 29–30.
- [47] 章顺华. 我国电力市场改革现状与思考[J]. 商场现代化, 2007(33): 160–161.
- [48] 黎瑜新. 我国电力市场现状分析与建议[J]. 中国电力教育, 2009(11): 240–241.
- [49] 黄继明. 电力市场电价理论[J]. 电力需求侧管理, 2000, 2(5): 34–36.
- [50] 中国电力企业联合会. 中国电力工业现状与展望[Z/OL]. [2016-3-19]. <http://www.ccc.org.cn/yaowenkuaidi/2015-03-10/134972.html>.
- [51] 王敏. 电力市场现状及未来走势[J]. 中国经济报告, 2015(5): 69–72.
- [52] 曾平良, 许晓慧. 坚强智能电网的规划与发展[J]. 国家电网, 2013(1): 82–85.
- [53] 刘振亚. 推动坚强智能电网创新发展[J]. 电气时代, 2013(10): 28–30.
- [54] 刘振亚. 建设坚强智能电网、推动能源安全高效清洁发展——在 2013 国际智能电网论坛上的主旨发言[J]. 国家电网, 2013(10): 22–27.
- [55] 刘振亚. 建设坚强智能电网支撑又好又快发展[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(9): 1–3.
LIU Zhenya. Build strong smart grid as pillar of sound and rapid development [J]. Power Grid and Clean Energy, 2009, 25(9): 1–3.
- [56] 李思蕾. 技术进步将使锂电池价格在 5 年内降 65% [J]. 汽车科技, 2015(3): 46–46.
- [57] Tesla Home Battery. Powerwall [Z/OL] [2016-3-19]. <https://www.teslamotors.com/powerwall>.
- [58] 周明, 李庚银, 倪以信, 等. 电力市场下电力需求侧管理实施机制初探[J]. 电网技术, 2005, 29(5): 6–11.
ZHOU Ming, LI Gengyin, NI Yixin, et al. A preliminary research on implementation mechanism of demand side management under electricity market [J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 6–11.

收稿日期: 2016-02-17

作者简介:

丁一(1978), 男, 教授, 博士生导师, 国家第五批“青年千人计划”入选者, 研究方向为智能电网、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等, yiding@zju.edu.cn;

吴华华(1977), 男, 从事电网调度自动化及电网安全分析工作;

惠红勤(1992), 男, 博士生, 研究方向为电力市场, huihongxin@zju.edu.cn。

(上接第 15 页 Continued from Page 15)

- [12] 肖蔷. 可再生空气储能技术来袭[N]. 中国能源报, 2015-06-08(3).
- [13] 薛小代, 梅生伟, 林其友, 等. 面向能源互联网的非补燃 CAES 及应用前景初探 [J]. 电网技术, 2016, 40(1): 164–171.
XUE Xiaodai, MEI Shengwei, LIN Qiyu, et al. Energy internet oriented non-supplementary fired compressed air energy storage and prospective of application [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 164–171.
- [14] Prospects for large-scale energy storage in decarbonised power grids. international energy agency [R/OL]. http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/energy_storage.pdf.
- [15] SAMIR S, ROBERT H W. Compressed air energy storage: theory, resources and applications for wind power [R]. Princeton Environmental Institute Princeton University, 2008.
- [16] PETER M. Energy storage technologies & their role in renewable

integration(2012) [R]. Global Energy Network Institute (GENI), 2012.

- [17] 刘斌, 陈来军, 梅生伟, 等. 多级回热式 CAES 系统效率评估方法[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(8): 1–7.
LIU Bin, CHEN Laijun, MEI Shengwei, et al. Cycle efficiency evaluation method of multi-stage RCAES system [J]. Advanced echnology of Electrical Engineering and Energy, 2014, 33(8): 1–7.

收稿日期: 2016-02-25

作者简介:

梅生伟(1964), 男, 教授, 博士生导师, 长江学者特聘教授, IEEE Fellow, 研究方向为电力系统控制、灾变防治、大规模储能技术, meishengwei@tsinghua.edu.cn;

薛小代(1983), 男, 博士后, 研究方向为大规模储能技术、新能源发电等, xuexiaodai@tsinghua.edu.cn;

陈来军(1984), 男, 副教授, 研究方向为大规模储能技术、电力系统分析与控制等, chenlaijun@tsinghua.edu.cn。