

# 国网浙江电力高弹性电网需求响应的探索和实践

陈吉换<sup>1</sup>, 刘强<sup>2</sup>, 李磊<sup>1</sup>, 戴昶<sup>3</sup>, 林振智<sup>4</sup>, 陈宋宋<sup>5</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司,杭州 310007;2. 浙江电力交易中心有限公司,杭州 310020;  
3. 浙江华云信息科技有限公司,杭州 310012;4. 浙江大学,杭州 310058;5. 中国电力科学  
研究院有限公司 需求侧多能互补优化与供需互动技术北京市重点实验室,北京 100192)

## Exploration and practice on demand response of Zhejiang high elastic power grid

CHEN Jihuan<sup>1</sup>, LIU Qiang<sup>2</sup>, LI Lei<sup>1</sup>, DAI Chang<sup>3</sup>, LIN Zhenzhi<sup>4</sup>, CHEN Songsong<sup>5</sup>

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China;2. Zhejiang Electric Power Trading Center Co., Ltd., Hangzhou 310020, China;3. Zhejiang Huayun Information Technology Co., Ltd., Hangzhou 310012, China;  
4. Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;5. Beijing Key Laboratory of Demand Side Multi-Energy Carriers Optimization and Interaction Technique, China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

**摘要:**国网浙江电力为适应国家能源转型和电网发展需要,开展多元融合的高弹性电网建设。电力需求响应是实现源荷互动的重要手段,能够缓解区域电力供需紧平衡态势,以强交互能力支撑电网弹性。从浙江高弹性电网发展需求出发,结合电力需求响应实践历程,总结了浙江开展需求响应的工作经验,提出了能源互联网背景下深化需求响应的发展方向,为我国需求响应技术研究和应用提供借鉴和参考。

**关键词:**能源互联网;高弹性电网;电力需求响应;分钟级可调节负荷

**Abstract:** In order to meet the needs of energy transformation and power grid development, diversified and high elastic power grid is being constructed in Zhejiang province. Demand response is the core carrier to realize the source-load interaction, which can alleviate the tight balance between regional power supply and demand, and support the grid elasticity with strong interaction ability. Based on the development needs of Zhejiang high elastic power grid and the practical course of demand response, the working experience of Zhejiang demand response is summarized. The development direction of deepening demand response business in the background of energy Internet is also put forward, in order to provide reference for the research and application of demand response in China.

**Key words:** energy Internet; high elastic power grid; power demand response; minute adjustable load

## 0 引言

随着能源互联网的深入发展和智能电能表的广泛应用,需求侧资源具备了快速响应能力<sup>[1]</sup>。电网公司通过定向邀约或组织竞价等方式与电力用户或负荷聚合商达成需求响应(demand response, DR)共识,降低需求侧尖峰负荷,能够在一定程度上使需求侧提供与电源侧对等的调节资源,提高电网资源的整体利用效率,对缓解电力供需紧平衡态势、促进可再生能源消纳具有重要意义<sup>[2]</sup>。

国外典型电力市场在用户需求响应方面具有较为完善的实践经验。自20世纪60年代起,以分时电价为代表的价格型DR已经在美国各州得到普及,有效缓解了电网调峰压力,后陆续推出了基于

容量市场、电量市场和辅助服务市场的DR项目<sup>[3]</sup>;挪威和芬兰电网分别采用市场竞价和双边协议等方式实现可中断负荷(interruptible load, IL)参与调频备用容量市场<sup>[4]</sup>。此外,以电力积分<sup>[5]</sup>、电力套餐<sup>[6]</sup>以及优惠券<sup>[7]</sup>等为载体的DR也在国内外理论研究和实践应用中方兴未艾。

相比于国外成熟电力市场环境下的需求响应策略,我国电力市场体系建设尚不完善,需求响应同时受到市场改革配套机制、电力物联网技术赋能等多元因素的共同影响,其发展将表现出能源互联网背景下的时代和地域特色。本文结合浙江多元融合高弹性电网建设发展情况,总结了浙江电力需求响应在实践中取得的经验成果,分析了能源互联网背景下深化需求响应业务所需解决的关键问题,在此基础上提出需求响应下一步的工作和研究方向。

收稿日期:2020-08-15;修回日期:2020-09-24

基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0901100)

This work is supported by National Key Research and Development Program(No.2016YFB0901100)

## 1 浙江高弹性电网需求响应

### 1.1 浙江电网发展现状

浙江电网地处华东特高压交直流混联电网的中心地带,枢纽通道地位突出。随着宾金、浙福等特高压交直流工程相继投运,浙江电网跨区输电规模扩大,省外来电大幅提升。2020年1—4月,浙江最大外来电力超过2 800万kW,占当日全社会最大负荷的41.5%。电源装机方面,当前浙江以光伏为主的新能源发电装机达1 731万kW,占发电装机总容量的17.7%。与此同时,浙江地区预计2020年夏季全社会最高负荷为8 860万kW,较2019年同比增长4%,供用电呈现紧平衡态势。

总体来看,浙江电网作为交直流混联受端电网,具有高比例外来电、高比例新能源以及高比例峰谷差等特点。在大容量直流馈入、新能源快速发展的背景下,浙江电网调节能力持续下降,安全运行红线不断收紧,面临着深刻变化和转型需求。

### 1.2 多元融合高弹性电网

为解决浙江电网向能源互联网转型的发展问题,国网浙江电力创造性地提出开展多元融合高弹性电网建设,通过转变发展理念、完善市场机制、推动“大云物移智链”技术与先进能源电力技术融合应用等方式,提升源网荷储等电力系统核心环节的互动水平和调节能力,丰富电网调剂手段,在提高电网安全水平的同时提升电网运行效率。

多元融合高弹性电网实质上是未来电网发展理念上的变化。长期以来,我国电网采用以冗余保安全的规划运行方式,通过刚性投资,满足负荷平衡需要,同时安排一定的冗余度以保障电网安全运行。发展建设多元融合高弹性电网,是在最大限度利用现有设备、保护现有投资基础上,挖掘需求侧调节能力,推动“源随荷动”向“源荷互动”转变,丰富电网调剂手段,从“冗余保安全”转变为“降冗余促安全”,在提高电网安全水平的同时提升电网运行效率,使其具有高承载、高互动、高自愈、高效能等核心能力。

### 1.3 需求响应支撑电网弹性

从应用场景来看,需求响应可参与省间/省内调峰、调频、省间备用共享、局部阻塞消除<sup>[8]</sup>,在促进源网荷储弹性平衡的同时也对网架灵活规划产生影响,是支撑浙江多元融合高弹性电网建设的核心业务。为唤醒需求侧可调节负荷资源,国网浙江电力有限公司提出一系列举措促进需求响应业务发展,包括:完善市场机制,建立可调节负荷、储能等需求侧灵活资源参与现货和辅助服务市场的框架体系;培育负荷聚

合商,拓展可调节负荷类型和规模,聚合互动潜力;打造源网荷储友好互动系统平台,提升可调节负荷资源汇聚和协调互动能力。

实现高弹性电网源荷互动,能够支撑区域电网由能源精细开发向精细使用转变,由刚性投资向提升电网辅助服务水平、满足电量增长的柔性投资转变,提升社会综合能效<sup>[9]</sup>。需求响应实践过程中产生的大量有效需求侧电力数据也能够作为电网公司的电力数字资产,丰富数据库,为未来的电力交易与综合能源服务业务发展提供重要支撑<sup>[10]</sup>。

## 2 浙江电力需求响应实践

### 2.1 实践基础

国网浙江电力十分重视需求响应的实施,逐步进行了需求响应机制的探索和实践。2017年首次实施试点企业需求响应邀约,2019年发布邀约式需求响应管理细则,2020年建立需求响应市场竞价机制,建设省级电力需求响应平台,从工业用户扩展到商业、低压用户、负荷聚合商等多类型主体,初步形成具有浙江特色的电力需求侧管理模式。

国网浙江电力深入挖掘了高压用户需求响应潜力,同时推广网上国网App签约形式,进一步激发储能设施、充电桩、商业楼宇、居民家庭等多种主体的互动能力。全省共签约高压用户2 547户,削峰能力715.06万kW;低压用户16户,削峰能力47.5 kW,保障需求响应市场竞价机制的有效运行。

在此基础上,国网浙江电力发布了需求响应标准建设计划,重点开展需求响应效果测量验证、负荷聚合商响应技术、空调系统终端技术标准研究,逐步形成省级需求响应标准体系;与此同时,需求响应平台功能开发、互动终端接入、信息交换等方面标准化建设逐步落地,为开展分钟级实时需求响应提供了统一的技术基础。

### 2.2 浙江电网需求响应竞价交易机制

浙江省在《关于开展2020年度电力需求响应工作的通知》(浙发改能源〔2020〕221号)中引入市场化竞价机制,对日前削峰需求响应按照边际出清方式确定需求响应补贴单价和用户中标容量,日前填谷和实时需求响应执行年度固定补贴单价<sup>[11]</sup>。

具备完善的负荷管理终端及用户侧开关设备、相关数据接入电网公司负荷管理系统的电力用户或负荷集成商可申请参与当年需求响应。以日前削峰需求响应为例,响应过程包含年度签约—响应邀约—竞价反馈—交易出清—响应执行—有效性评估—补贴结算等主要环节,如图1所示。符合申

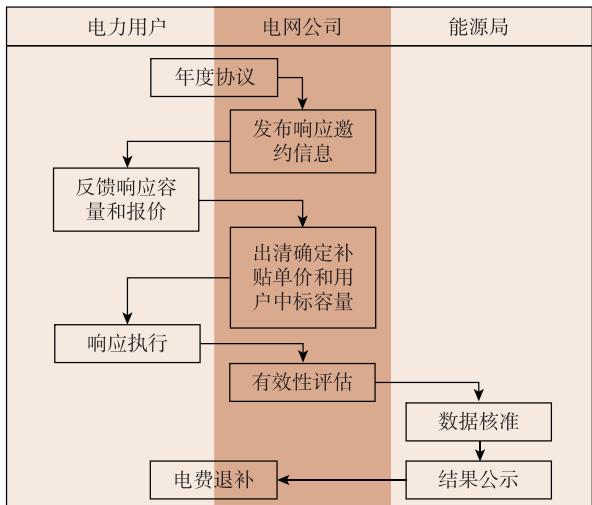


图1 日前削峰需求响应竞价交易流程

Fig. 1 Bidding transaction process of day-ahead peak clipping demand response

请条件的用户和负荷聚合商于年度需求响应签约中明确参与需求响应的响应容量。当次日前削峰需求响应启动后,电网公司提前一天向签约用户发出响应邀约,用户需在2 h内反馈响应容量和响应价格等竞价信息,供电公司根据用户反馈信息,按照边际出清的方式确定补贴单价和用户中标容量,中标用户在响应日按中标容量进行响应,供电公司对通过基线负荷评估的响应量进行补贴结算。

填谷需求响应与削峰需求响应的实施环节类似,区别在于填谷需求响应时用户中标容量是根据用户申报容量占全省总申报容量的比例确定的,而非通过市场竞价的方式,对通过有效性评估的响应量则按照固定价格补贴。实时需求响应需要事先与用户签订协议,并且将分钟级可响应负荷接入负荷管理系统,包含年度签约—响应执行—补贴结算的流程,所有用户统一执行年度固定补贴单价,根据其实际响应情况发放响应补贴。

需求响应的有效性判断及响应电量计算均以基线负荷为参考,取参考日对应响应时段的平均负荷曲线作为基线。负荷聚合商的基线为其所集成的用户基线叠加。其中,对削峰需求响应,当响应时段内用户的实际最大负荷小于基线最大负荷、平均负荷小于基线平均负荷且响应电量超过自身响应指标80%时,认定用户有效响应,响应电量按照120%响应指标封顶计算补贴;对填谷需求响应,则要求用户的实际最小负荷大于基线最小负荷、平均负荷大于基线平均负荷,其差值处于需求响应负荷指标的80%~120%之间。

### 2.3 需求响应实践

#### 2.3.1 日前削峰需求响应

国网浙江电力有限公司于2020年7月27日至28

日进行了全省范围的日前削峰需求响应演练。其中,27日进行日前需求响应的邀约演练,向全省签约的2 563户高压和低压用户发送邀约信息,63%的用户反馈竞价信息,响应能力共计139.9万kW。根据浙江需求响应竞价规则,按照20万kW的总削峰指标进行边际出清,且报价不大于边际补贴电价的用户全容量中标,实际出清价格为2元/kWh,总出清负荷30.2万kW,如图2所示。用户于28日14:00~15:00执行需求响应方案,实际平均响应负荷达24.33万kW,最大响应负荷26.31万kW,满足总指标要求。通过响应效果评估,有效响应用户共计58户,占中标用户的35.8%,有效响应电量19.2万kWh,需求响应补贴共计38.4万元。

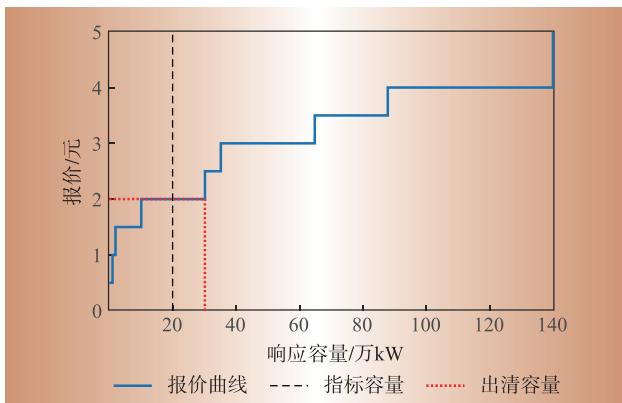


图2 实际出清情况

Fig. 2 Actual clearing situation

按价格区间统计用户参与需求响应报量情况(简称“报量能力”)和用户签约需求响应能力(简称“签约能力”)。报量比定义为用户报量能力与签约能力之比,用户报量情况如图3所示。

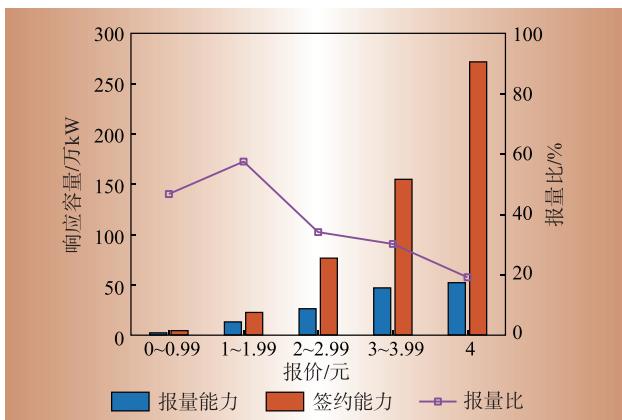


图3 用户参与需求响应报量情况  
Fig. 3 Reporting of users' participation in demand response

由图3可知,用户总报量能力为139.9万kW,总签约能力达530.3万kW,平均报量比约为26.3%。用户需求响应报价越高,报量比越低,用户年度协议中的签约能力虚高越明显。超过40%的用户选择顶格

报价(4元/kWh),但报量比仅为20%左右,说明当前设定的补贴上限不能完全激发用户需求响应潜力。

根据需求响应邀约演练中用户的真实报价数据,按每10万kW指标累计进行模拟出清,出清价格及出清负荷如图4所示。

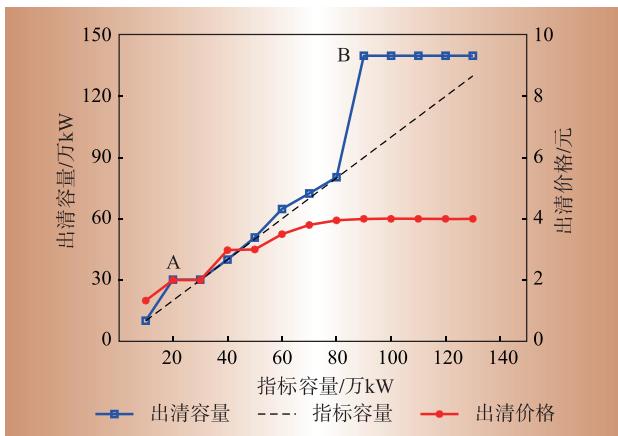


图4 模拟出清情况

Fig. 4 Simulated clearing situation

由图4可以看出,当指标容量≤80万kW时,指标容量曲线与出清容量曲线相近。特别地,当需求响应指标容量为20万kW时,出清容量将达30.18万kW(即图4中A点),这是由于报价恰好为出清价(2元/kWh)的用户数量和容量均较大,而报价不大于边际补贴电价的用户全容量中标,使得出清容量高于指标容量。当需求响应指标容量为90万~130万kW时,出清容量均为139.9万kW,出清价格均为4元(即图4中B点),说明此时用户多选择顶格报价,在指标容量较大时将产生过高的出清容量,不利于需求响应的实施。

### 2.3.2 实时削峰需求响应

国网浙江电力有限公司于2020年7月29日进行了分钟级实时削峰需求响应演练,对全省共10个需求响应分钟级可调节签约用户进行调控,响应指标为1.34万kW,在当日14:30~15:00响应时段内,最高压减1.40万kW,总体上达到响应指标。通过评估响应效果,认定有效响应用户共7户,有效响应电量3 487.8 kWh,实时需求响应补贴共1.39万元。

无效响应用户中,1户用户平均响应负荷未达到80%响应指标,原因是该用户空调负荷未全部接入需求响应可调系统,受控负荷压减后替代机组开启,用户总负荷削减不足;1户用户当日存在特殊用电需求(地下室排积水),总用电需求明显高于参考日,负荷压减后仍高于基线负荷;1户为陶瓷制造企业,负荷特性为频繁冲击性负荷,指标响应能力刚好取到监视负荷的峰值,导致指标响应能力过大,且响应过程中采集到的负荷最大值超过基线负荷最大值,被判定为无效响应。

## 3 浙江需求响应未来发展方向

从浙江需求响应实践可以看出,尽管目前削峰需求响应和实时削峰需求响应演练均取得成功,但响应过程中仍暴露出竞价机制不完善、事前用户响应潜力评估不准确、有效响应比例较低等问题,需要继续从以下几个方面拓展需求响应业务研究,支撑浙江多元融合高弹性电网建设。

### 3.1 建立完善市场配套机制

在现有的需求响应竞价机制下,继续完善市场配套机制。目前竞价机制中规定报价不大于边际补贴电价的用户全容量中标,可能出现需求响应出清容量高而有效响应用户占比低的窘境。对此,可根据需求响应实施经验,引入用户响应信用评分等因素,完善需求响应指标分配机制,同时考虑用户自主响应时存在的不确定性,设置合理的出清裕度,满足需求响应总指标要求。此外,考虑冲击性负荷对用户响应有效性判定的影响,可采用负荷-电量综合判定的方式,完善响应有效性判定规则或改进基线负荷计算方式;对于接入需求响应终端的用电负荷,可采用设备级电能采集仪表,避免其他负荷影响需求响应有效性的判断,保证用户参与需求响应的经济效益。

### 3.2 构建动态需求响应资源池

在前期普查和需求响应实践经验的基础上,深化需求响应数据分析,构建动态需求响应资源池,提高需求响应指标分配的准确性及响应完成率<sup>[12]</sup>。面向数量众多、响应特性各异、用户行为复杂的多种类需求侧资源,可建立设备级精细仿真模型,评估用户实际响应能力,避免用户上报响应指标过高对指标分配和有效性评估的影响。与此同时,可进一步汇集储能、充电桩等小型分散用户的可调节负荷资源<sup>[13]</sup>,充分挖掘潜在用户的需求响应能力,提高浙江高弹性电网的需求侧互动能力。

### 3.3 打造区块链需求响应交易平台

在完善市场配套机制、挖掘用户响应潜力基础上,国网浙江电力正在加快需求响应数字化转型,打造区块链技术支撑的需求响应平台<sup>[14]</sup>,与电力需求侧在线监测平台、负荷聚合商管理系统以及用户电能管理系统进行对接,扩展虚拟电厂、中低压用户的参与形式<sup>[15]</sup>,利用区块链共识机制、加密算法以及智能合约等技术手段为市场主体提供透明、安全、及时、可靠的需求响应交易管理服务,提高电力用户参与需求响应的积极性和认可度,最大程度实现用户与电网公司的友好互动。

## 4 结束语

随着电力市场化改革和储能、电动汽车等灵活性资源的深入发展,需求响应将承载多样化的源荷互动元素,在缓解电力供需矛盾、支撑可再生能源消纳、保障电网稳定运行等方面的重要性不断凸显。目前浙江正着力发展多元融合高弹性电网建设,有力推动了需求响应业务应用,积累了丰富的实践经验;下一步将在解决现存问题基础上,进一步对计及灵活性资源参与、创新技术支撑的需求响应交易机制、管理方式以及平台构建等方面,进行深入研究,打造需求响应业务高质量发展的浙江样板,为其他网省公司拓展需求响应业务提供浙江经验。

## 参考文献:

- [1] 南思博,李庚银,周明,等.智能小区可削减柔性负荷实时需求响应策略[J].电力系统保护与控制,2019,47(10):42-50.  
NAN Sibo, LI Gengyin, ZHOU Ming, et al. Real-time demand response of curtailable flexible load in smart residential community[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10):42-50.
- [2] 马琎劼,徐正安.江苏电网“填谷”需求响应的探索与实践[J].电力需求侧管理,2018,20(6):50-52.  
MA Jinjie, XU Zhengan. The exploration and practice of “valley shaft” demand response in Jiangsu grid[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(6):50-52.
- [3] 丁一,胡怡霜,崔文琪.国外电力需求响应实践及启示[J].电力需求侧管理,2019,21(2):1-4.  
DING Yi, HU Yishuang, CUI Wenqi. Practices and enlightenment of foreign power demand response[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(2):1-4.
- [4] 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):18-22.  
DONG Zhenbin, WANG Wen, ZHOU Jue, et al. Review on demand response participating in power system frequency regulation[J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(4):18-22.
- [5] 谢康,张凯杰,栾开宁,等.电力体制改革背景下的需求响应积分方案探索[J].电力需求侧管理,2019,21(3):7-10.  
XIE Kang, ZHANG Kaijie, LUAN Kaining, et al. Exploration of demand response score scheme under the background of electric power system reform [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(3):7-10.
- [6] 侯佳萱,林振智,杨莉,等.面向需求侧主动响应的工商业用户电力套餐优化设计[J].电力系统自动化,2018,42(24):11-21.  
HOU Jiaxuan, LIN Zhenzhi, YANG Li, et al. Design of electricity plans for industrial and commercial customers oriented to active demand response on power demand side [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24):11-21.
- [7] FANG X, HU Q R, LI F X, et al. Coupon-based demand response considering wind power uncertainty: a strategic bidding model for load serving entities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2):1 025-1 037.
- [8] 王晴,刘友波,黄杨,等.考虑数据中心需求响应的城市电网阻塞管理[J].电网技术,2020,44(8):3 129-3 138.  
WANG Qing, LIU Youbo, HUANG Yang, et al. Congestion management of urban power grid considering demand response of data center [J]. Power System Technology, 2020, 44(8):3 129-3 138.
- [9] 仇晨光,程锦闽,李新家,等.网荷互动用户可中断负荷选择与恢复策略研究[J].电力工程技术,2018,37(4):33-37,70.  
QIU Chenguang, CHENG Jinmin, LI Xinjia, et al. Intermittent load selection and recovery strategy for network load interactive user [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(4):33-37, 70.
- [10] 丛小涵,苏慧玲,李海思,等.基于数据挖掘与需求响应的个性化智能用电套餐研究[J].电力需求侧管理,2019,21(5):21-25.  
CONG Xiaohan, SU Huiling, LI Haisi, et al. Research on intelligent electricity package based on deep mining and demand response [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(5):21-25.
- [11] 浙江省发展和改革委员会.关于开展2020年度电力需求响应工作的通知[EB/OL].(2020-07-08)[2020-08-04].[http://fzggw.zj.gov.cn/art/2020/7/8/art\\_1229123367\\_1046464.html](http://fzggw.zj.gov.cn/art/2020/7/8/art_1229123367_1046464.html).  
Zhejiang Development and Reform Commission. Notice on carrying out power demand response in 2020 [EB/OL]. (2020-07-08) [2020-08-04]. [http://fzggw.zj.gov.cn/art/2020/7/8/art\\_1229123367\\_1046464.html](http://fzggw.zj.gov.cn/art/2020/7/8/art_1229123367_1046464.html).
- [12] 刘国辉,赵佳,孙毅.基于模糊优化集对分析理论的需求响应潜力评估[J].电力需求侧管理,2018,20(6):1-5.  
LIU Guohui, ZHAO Jia, SUN Yi. Potential evaluation of demand response based on fuzzy optimization of set pair analysis[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(6):1-5.
- [13] 邹京希,秦汉,刘东,等.考虑频率约束下提升风储联合发电系统可靠性的储能系统控制策略[J].供用电,2020,37(2):73-78.  
ZOU Jingxi, QIN Han, LIU Dong, et al. Energy storage system control strategy for improving the reliability of an integrated power generation system of wind and energy storage unit under frequency constraint [J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(2):73-78.
- [14] 李彬,卢超,曹望璋,等.基于区块链技术的自动需求响应系统应用初探[J].中国电机工程学报,2017,37(13):3 691-3 702.  
LI Bin, LU Chao, CAO Wangzhang, et al. A preliminary study of block chain based automated demand response system[J]. Proceedings of CSEE, 2017, 37(13):3 691-3 702.
- [15] 何奇琳,艾芊.区块链技术在虚拟电厂中的应用前景[J].电器与能效管理技术,2017(3):14-18.  
HE Qilin, AI Qian. Application prospect of block chain technology in virtual power plant [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(3):14-18.

(责任编辑 徐文红 赵雨昕)