

新型电力系统下需求侧管理机制及发展策略研究

张天米,王俐英,王永利,曾 鸣

(华北电力大学经济与管理学院,北京 102206)

摘要:大规模高比例新能源的接入,对电力系统容量保障、新能源消纳带来巨大挑战。将需求响应资源引入电力市场,发挥需求侧资源在促进新能源消纳、保障系统供需平衡等方面的重要作用,实现需求响应与电力市场的有机衔接是未来发展的必然趋势。针对新型电力系统需求侧管理机制,介绍了需求响应内涵与资源类型,研究了以美国、新加坡和英国为代表的国外需求响应发展现状,分析了可供借鉴的经验,提出了新型电力系统背景下中国需求响应发展策略与实施建议。

关键词:新型电力系统; 新能源; 需求响应

中图分类号: TM 711 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)02-0075-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240213

Research on Demand-side Management Mechanism and Development Strategy under New Power System

ZHANG Tianmi, WANG Liying, WANG Yongli, ZENG Ming

(School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The large-scale and high-proportion access of renewable energy brings great challenges to the capacity guarantee of power system and the consumption of renewable energy. It is an inevitable trend of future development to introduce demand response resources into electricity market, give play to the important role of demand-side resources in promoting renewable energy consumption, ensure the balance of supply and demand in the system, and realize the organic connection between demand response and electricity market. The connotation and resource types of demand response are introduced, the development status of foreign demand response represented by the United States, Singapore and the United Kingdom are studied, the experiences that can be used for reference are analyzed, and the development strategy and implementation suggestions of demand response in China under the background of new power system are put forward.

Key words: new power system; renewable energy; demand response

0 引 言

构建以新能源为主体的新型电力系统是电力行业践行双碳目标的重要举措^[1-2]。然而,由于风电、光伏等新能源发电出力具有随机性、波动性,大规模高比例新能源的接入将极大影响电网运行灵活性,对电力系统容量保障、新能源消纳带来巨大挑战^[3-4]。仅靠电源侧调节难以保证新型电力系统的安全可靠运行且成本高昂;同时,需求侧的大量柔性

负荷也蕴含巨大的调节潜力^[5]。推动电力系统由“源随荷动”向“源荷互动”转变,充分发挥需求侧资源在新型电力系统中的作用是迫切且必要的^[6]。

当前许多国家已将需求响应资源引入电力市场中,发挥需求侧资源在促进新能源消纳、保障系统供需平衡等方面的重要作用。美国于20世纪70年代最早提出电力需求侧管理,其PJM市场已实施了紧急需求响应、经济需求响应等诸多项目^[7]。中国于20世纪90年代,引进电力需求侧管理以提升用能效率、降低峰谷差^[8]。随着电力市场改革的不断深入,中国需求响应市场已有一定进展。浙江、山东等部分省市开展了现货市场试点,大部分地区主要通

基金项目: 国网四川省电力公司科技项目“四川新型电力系统辅助服务市场规则设计研究”(SGSCJY00NYJS2200059)

过固定补贴激励需求侧响应资源参与系统调节^[9]。

在需求响应实施方面,学界进行了诸多探索。文献[10]研究了现货市场环境下,售电商开展激励性需求响应的优化策略;文献[11]研究了基于主从博弈的需求响应补贴定价机制;文献[12]研究了基于区块链的需求响应交易机制,该机制具有高可用性、低违约性的优势;文献[13]提出了基于奖励券的需求响应机制,借助社交媒体达到较为理想的推广效果;文献[14]提出了一种基于数据挖掘的个性化电价定制方法。

随着中国电力体制改革和电力市场建设的深入推进,实现需求响应与电力市场的有机衔接已成为未来需求响应发展的必然趋势^[15]。下面基于已有研究,首先,介绍了需求响应的内涵与需求响应资源类型及特性;然后,分析了国外电力市场需求响应发展现状,总结了可供借鉴的经验;最后,提出了适合中国的非现货市场化与现货市场化手段下需求响应发展策略与实施建议。

1 需求响应内涵与资源类型

1.1 需求响应内涵

需求响应是用户对于价格或激励信号做出反应,并对其常规用电模式做出调整,以确保电力供需平衡,并实现电力和系统资源的综合优化配置^[16]。根据响应方式差异,需求响应分为价格型和激励型两类^[17]。

1.1.1 价格型需求响应

价格型需求响应是指用户对零售电价的变化做出反应并调整自身用电需求,主要涵盖:

1) 分时电价,是一种能够准确体现在不同时间段内电力供应成本差异的电价机制。

2) 实时电价,是一种动态电价机制,通过将零售价格及电力批发市场的结算价格相互关联,准确体现每天不同时间段供电成本的差异,有效传递电价信息。

3) 尖峰电价,同样是一种动态电价机制,在前两者基础上发展而来,是在分时电价的基础上添加尖峰费率。

4) 系统峰时段响应输电费用,是响应输电费用的一种需求响应项目。

1.1.2 激励型需求响应

激励型需求响应是指需求响应机构采取推出确定性或随时间变化的政策手段,以鼓励用户在系统可靠性产生波动或者电价上涨时迅速响应减轻负荷^[18]。

1) 直接负荷控制:由直接负荷控制执行机构采取远程控制装置关闭或循环控制用电设备。

2) 可中断负荷:根据供需双方已达成的合同约定,由可中断负荷实施机构于电网高峰时段对用户发送中断申请,在用户回应之后断掉局部电力供应。

3) 需求侧竞价:这是一种允许需求侧资源主动加入电力市场竞争的实施机制。通过需求侧竞价,用户得以更换自身用电方式,积极加入市场竞争,从而收获相符的经济利益。

4) 紧急需求响应项目:在紧急事故下给予用户激励补偿以削减负荷。

5) 容量市场项目:用户可以通过主动减少自身用电需求,为系统提供额外容量以满足电力需求,降低对传统发电机组或传输资源的依赖。

6) 辅助服务市场项目:区域性独立系统运营商市场中,用户可将负荷削减作为运行备用参与竞价。

1.2 需求响应资源类型及特性

1.2.1 可调节需求响应资源

可调节需求响应资源,即传统的电力需求响应资源,涵盖工业用户侧的生产设备、商业用户侧的中央空调、居民用户侧的空调和热水器。

1) 工业用户可调负荷

选取钢铁、水泥、计算机 3 类典型工业用户进行分析。

钢铁行业一般为三班四运转 24 h 连续运行,用电设备供电可靠率要求高,负荷较稳定,负荷率高。钢铁行业的可调负荷约为 20%~25%,响应速度为小时级,响应时长为 0.5~2.0 h^[19]。

水泥行业通常为三班连续运行,并且设备运转周期较长,负荷曲线波动较小,负荷率较高,且供电可靠性要求较高。水泥行业可调负荷约为 25%。主要可调设备为生料磨和水泥磨,响应速度为小时级,响应时长为 0.5~2.0 h^[20]。

计算机、通信和其他电子设备制造业通常采用连续生产的方式,用电负荷趋于平缓,主要生产负荷包括车间设备、空压机、空调等。计算机、通信和其他电子设备制造业可调负荷约为 30%,响应速度为

小时级,响应时长为 $1.0\text{ h}^{[21]}$ 。

2) 商业用户可调负荷

商业楼宇中的负荷涵盖商业部门照明、空调等多类用电负荷^[22]。中长期而言,在全部负荷类型中,商业负荷的比例低于工业与居民负荷,但覆盖范围广、总负荷稳定上升且消费电能呈现季节性波动。短期而言,商业用电负荷特性主要与运营时间有关,呈现出“单峰”特点。

商业用户响应潜力主要来源于空调负荷和照明负荷,可调节负荷约为 $20\% \sim 35\%$,响应速度为分钟级,响应时长为 $0.5 \sim 2.0\text{ h}$ 。

3) 居民用户可调负荷

家用电器是居民生活用电负荷的最重要来源,与居民日常作息规律具有高度相关性。从中长期来看,居民的用电负荷与商业用电负荷相同,具有季节性波动,此外随着时代的发展进步,有逐渐上升的趋势^[23]。从短期来看,居民生活用电负荷有两个高峰,高峰和低谷的负荷波动水平不大。

1.2.2 新型电力需求响应资源

新型电力需求响应资源,涵盖储能电池、电动汽车等。

1) 电动汽车

随着电动汽车反向送电技术不断成熟,可将电动汽车视为特殊的储能,参与电力系统调峰、调频等^[24]。有序充电,即让电动汽车采用可管理的负荷形式参加电网调节,是一种旨在避免电动汽车大范围充电对电网造成不良影响的关键手段。

从快充、慢充使用特征看,快充桩因充电速度快,成为 99.3% 用户的首选。从充电设施功率看,超 87% 用户倾向选择 120 kW 及以上大功率充电桩。

从空间来看,用户跨运营商、跨场站、跨城市充电比例均有所增多。其中:近 87% 用户具有跨运营商充电行为,平均跨6家运营商;超 95% 用户具有跨站充电行为,平均跨站14座。

2) 储能

储能技术通过某种方式或装置将电能转化为其他形式的能量有效存储。储能技术通过在用电低谷时期吸收多余的电能,在用电高峰时期释放储存的电能,缓解电力供需压力,促进可再生能源消纳。

与传统需求响应资源相比,储能技术具有效率高、响应速度快的特点,可以实现秒级的电网调频。在推动新能源消纳方面,单一储能配置在技术方面

能够做到多种功能应用;但在经济方面,实际配置往往需要考虑各种储能技术在不同工况下的适应程度。使用多元复合储能方案,能够充分利用各类储能技术的优势,取长补短,从而实现投资与运行成本的最优化^[25]。

2 国外需求响应发展现状及经验借鉴

2.1 美国 PJM 电力市场

在美国 PJM 电力市场中,参加需求响应交易的主体涵盖供电公司、负荷服务实体、削减服务提供商、终端用户。PJM 电力市场中,大部分项目以削减服务提供商作为主体的模式实施开展。由削减服务提供商主导的模式更容易将需求响应的风险分散至其他市场参与者,吸引优秀的技术与服务手段提升响应潜力,同时有助于拓宽市场交易的范围,彻底利用竞争机制增强需求响应资源配置成效^[26]。

目前,在 PJM 电网中,满足资格的需求响应资源能够自行决定所参加的需求响应项目,进一步加入 PJM 主能量市场、容量市场或辅助服务市场的竞价活动中来^[27],如图 1 所示。

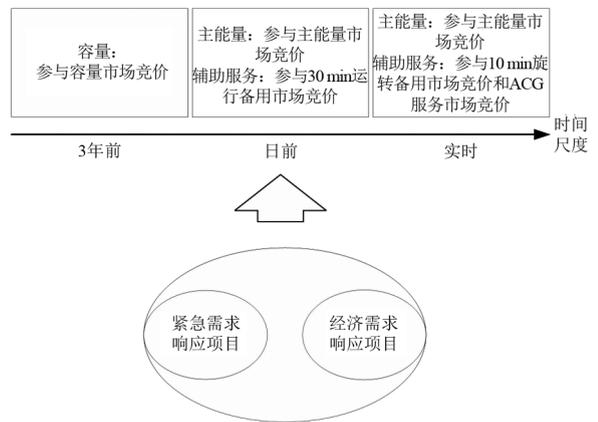


图 1 PJM 中的需求响应

2.2 美国其他电力市场

1) 新英格兰电力市场,其实时需求响应程序是为系统运营商提出请求后用电量可以在 30 min 或 2 h 内减少的客户而设计的。

2) 中西部电力市场,有 3 种竞争性的主要辅助服务:主要储备、补充储备和监管响应服务。进一步将监管分为两个产品:监管储备和监管服务。

3) 加州电力市场,其需求响应项目涵盖代理型与可靠性需求响应两种。代理型需求响应是一种市

场参与模型,它使第三方能够独立于负载服务实体对加州电力市场的需求响应投标。可靠性需求响应是在可靠性基础上产生的负荷削减型需求响应项目,仅在紧急情况下触发^[28]。

2.3 新加坡电力市场

1) 报价机制:实时运行之前的 65 min 内,发电企业与用户应提交发电与需求响应报价。发电企业报价涵盖电能量和辅助服务,还需提供发电机组的相关运行参数。用户报价涵盖总负荷量、负荷削减量-价格段(最多 10 段)以及负荷爬坡率。

2) 出清机制:新加坡现货市场出清机制如图 2 所示。在发电企业与用户的报价被提交之前,电网调度机构先发布系统负荷与调频需求。一旦发电与需求报价完成提交,电网调度机构将参考市场出清模型与网络拓扑,联合优化发电企业与用户报价,获取发电资源与需求响应资源的优化调度结果。

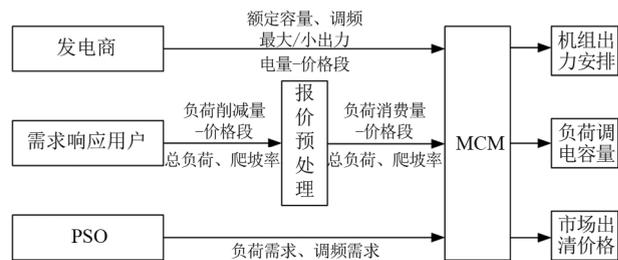


图 2 新加坡现货市场出清机制

3) 结算机制:通过执行市场出清模型,能够获取电能量平衡、备用平衡与调频平衡方面的拉格朗日乘子,进一步求得各节点的电能量、备用与调频价格,并将这些价格用于发电企业结算。

2.4 英国电力市场

英国电力市场的需求响应策略包含时变电价机制与可中断负荷等,主要提供多样化分时电价费率与多类可中断负荷合同,也可以通过参与辅助服务市场实现需求响应^[29]。

时变电价机制是指反映能源批发市场成本变化的定价机制。主要包括以下 3 种:实时电价、分时电价、尖峰电价。这 3 种定价方法广泛应用于英国的工商业用户,客户可以选择适合其需求灵活性和价格风险敞口的电价。

在英国,较大的工业用户可以选择在冬季的“超高峰”时段自愿签订合同降低负荷。在这一时段,电价会大幅上涨。该方式的一个特点是,“超高峰”时段是在事件发生后定义的^[30]。

2.5 经验借鉴

在应用场景方面,发达国家需求侧资源广泛应用于提升系统经济性、安全性及可靠供电;在激励机制方面,实施电价激励机制激发用户积极性;在市场建设方面,建立较完备的需求侧资源参与细分市场的规则与交易机制;在商业模式方面,形成集合需求响应、能源交易和数据增值服务的多元商业模式。

当前中国电力市场需求响应实践多集中于中东部负荷密集、峰谷差较大地区。部分省市初步出台了激励机制开展市场建设,但商业模式仍较为传统单一。综合分析美国、新加坡、英国等国家的需求响应实施现状,对中国电力市场需求响应发展有以下经验启示:

1) 电力市场机制的成熟与需求响应机制的完善,是充分利用需求响应资源的关键保障。电力市场机制的完备程度直接影响需求响应资源在市場中的参与度,且需求响应机制的发展程度影响市场对需求响应资源的接受程度。

2) 主动引导需求响应服务提供商、负荷聚合商及售电公司等第三方实体整合用户侧资源参与到电力市场交易中來。通过这种参与方式,可以高效整合需求响应资源,并采取统一调度让终端用户获取稳定收益。

3) 需求响应项目要想参与电力市场交易,就需要配套设备的完善与技术手段的帮助。由于需求响应资源在市場交易中涉及电量与容量的复杂计量与计算,因此应积极开展研发工作,提供协调控制、信息通信和智能计量等领域的技术基础。

4) 重视基础数据与历史数据的收集与管理,对需求响应资源数据进行双向挖掘,定期组织第三方机构分析其市場数据,提高市場透明度和数据共享性,吸引更多用户参与需求响应。

3 需求响应发展策略与实施建议

3.1 发展关键问题

在电源结构、用电结构及系统生态等方面,新型电力系统与传统电力系统相比均存在显著差异。随着中国电力市場改革的不断深入,需求侧资源在新型电力系统的建设过程中发挥着愈加重要的作用。需求侧资源的灵活调节能力是保证新型电力系统安全可靠低成本运行的关键。然而,需求侧资源的利

用面临新型电力系统诸多关键问题。

1) 电力系统保证电力电量平衡困难, 电力稳定供应压力大。新能源出力具有随机性、波动性, 无论以何种新能源为主导, 其发电能力与实际用电需求均难以匹配。发电侧调节能力薄弱, 大量弃风弃光, 电力平衡紧张只能提高需求侧响应潜力。

2) 电力系统安全稳定运行风险高。新能源设备抗扰性低、支撑性弱, 系统故障与极端情景会严重冲击电力系统安全, 新能源引发的电网安全事故时有发生, 甚至可能出现大规模停电等极端事故。

3) 新能源跨越式发展情况下, 保持较高的能源利用率难度大。新能源的大规模接入和高效率利用需要付出大量成本, 如灵活性电源投资成本、平衡成本、运行损失成本及电网投资成本, 使电力系统的供应成本居高不下。

面向新型电力系统, 需求侧资源需要保障电力可靠供应, 保障电网稳定运行, 降低新能源高效利用成本。

3.2 发展策略

3.2.1 非现货市场化手段下的需求响应发展策略

1) 增加签约用户的数量和负荷规模。为保证新型电力系统建设背景下需求响应的实际效果, 根据已签约用户的用电特性、市场淡旺季历史响应情况和需求响应潜力, 调整需求响应负荷签约规模。

2) 加大居民用户参与需求响应的宣传力度, 改善激励政策。推进线上线下多渠道、多形式的宣传推广, 强调普及需求响应的重要性, 广泛宣传需求响应补贴政策, 鼓励居民用户积极参加需求侧响应活动。

3) 根据系统的紧急程度制定不同导向的需求响应机制。例如, 当新能源高比例接入的新型电力系统出现供需失衡时, 可以采取系统导向的紧急型需求响应、直接负荷控制、可调节负荷等需求响应措施等一种或多种组合形式。

3.2.2 现货市场化手段下的需求响应发展策略

市场化需求响应机制可应用于实时可控负荷, 要求单次响应容量不小于 1 MW, 且有完备的负荷管理设施、负控装置与用户侧开关设备, 要求主要能耗设备具备实时监控用电的能力, 保持良好运行状态的市场用户享有优先权。

在日前市场, 发电侧上报发电量和电价, 用户侧上报用电需求, 且需求响应用户应上报“负荷削减量-价格段”, 报价的范围和发电报价保持一致。调

度机构参考发电报价、需求响应报价和负荷预测出清, 确定发电企业和用户的中标量。

成功中标的用户将得到容量补偿, 且如果其中标量在实时运行过程中被调用, 将额外取得电量补偿, 日前上报的用电需求根据当时的市场电价结算。如果用户实时调用结果和出清结果存在不小的偏差, 则将面临一定的惩罚。

3.3 实施建议

1) 建议将电力需求侧管理纳入政府工作计划。“十四五”期间新能源将实现超常规、跨越式发展, 新型电力系统需要提升需求侧资源的安全可靠性, 要将电力需求响应纳入到国家电力发展规划、新型电力系统安全应急体系和“双碳”目标实施路径的全局进行统筹谋划和顶层设计。

2) 结合系统需求, 因地制宜开展电力现货市场、辅助服务市场和容量市场的建设。综合考虑地区性系统需求, 推进需求侧资源利用。鼓励需求侧资源通过负荷聚合商、售电公司等代理参与电力市场; 鼓励储能、充电桩运营商等新兴负荷参与需求响应。

3) 通过政策引导、市场主导, 完善直接负荷控制、紧急需求响应、可削减或填谷等可调节负荷型需求响应措施的激励补贴机制。逐步将用户或负荷聚合商作为市场主体, 待电力市场成熟之后, 推动电力用户参与电力现货市场和辅助服务市场交易。

4) 探索基于用户导向的优先级差异化需求响应模式。其一, 采用系统导向的紧急型需求响应与价格导向的经济型需求响应的“双导向”参与模式; 其二, 采用容量补偿和电量补偿相结合的价格补偿机制。

4 结论

上面分析了价格型需求响应和激励型需求响应的内涵, 研究了可调节需求响应资源和新型需求响应资源的响应特性。通过分析美国、新加坡、英国 3 类典型电力市场的需求响应实施情况, 得到需求响应发展的经验启示, 并提出新型电力系统背景下非现货市场化手段和现货市场化手段下的需求响应发展策略, 同时提供了具体的实施建议。

参考文献

- [1] 辛保安. 为实现“碳达峰 碳中和”目标贡献智慧和力量[N]. 中国电力报, 2021-02-24(1).
- [2] 伍梦尧. 构建新型电力系统为实现“3060”目标提供重

- 要支撑——摘自国家电网有限公司总经理张智刚在 2021 年国际能源变革对话上的主旨演讲[N].中国电力报,2021-06-30(2).
- [3] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等.新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):1-9.
- [4] 田君豪,张鸿宇,王宇.新型灵活性资源市场机制研究——面向高比例可再生能源系统[J].北京理工大学学报(社会科学版),2023,25(3):53-60.
- [5] 刘丽军,吴桐,陈贤达,等.基于时空特性以及需求响应的 DG 和 EV 充电站多目标优化配置[J].电力自动化设备,2021,41(11):48-56.
- [6] 曾博,杨雍琦,段金辉,等.新能源电力系统中需求侧响应关键问题及未来研究展望[J].电力系统自动化,2015,39(17):10-18.
- [7] PJM. Demand response[EB/OL].[2021-05-31].<https://www.pjm.com/markets-and-operations/demand-response>.
- [8] 王蓓蓓.面向智能电网的用户需求响应特性和能力研究综述[J].中国电机工程学报,2014,34(22):3654-3663.
- [9] 李嘉媚,艾芊,殷爽睿.虚拟电厂参与调峰调频服务的市场机制与国外经验借鉴[J].中国电机工程学报,2022,42(1):37-56.
- [10] 郭昆健,高赐威,林国营,等.现货市场环境下的售电商激励型需求响应优化策略[J].电力系统自动化,2020,44(15):28-35.
- [11] 林国营,卢世祥,郭昆健,等.基于主从博弈的电网公司需求响应补贴定价机制[J].电力系统自动化,2020,44(10):59-67.
- [12] 陈冠廷,张利,刘宁宇,等.基于区块链的面向居民用户需求响应交易机制[J].电力自动化设备,2020,40(8):9-17.
- [13] ZHONG H W, XIE L, XIA Q. Coupon incentive-based demand response: theory and case study[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(2):1266-1276.
- [14] YANG J J, ZHAO J H, WEN F S, et al. A model of customizing electricity retail prices based on load profile clustering analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2019,10(3):3374-3386.
- [15] 王彩霞,时智勇,梁志峰,等.新能源为主体电力系统的需求侧资源利用关键技术及展望[J].电力系统自动化,2021,45(16):37-48.
- [16] 宋莉,刘敦楠,庞博,等.需求侧资源参与电力市场机制及典型案例实践综述[J].全球能源互联网,2021,4(4):401-410.
- [17] 陶小马,周雯.电力需求响应的研究进展及文献述评[J].北京理工大学学报(社会科学版),2014,16(1):32-40.
- [18] 傅质馨,李紫嫣,朱俊澎,等.“双碳”目标下需求侧管理
- 机制研究综述及展望[J].电力信息与通信技术,2023,21(2):1-12.
- [19] PAULUS M, BORGGREFE F. The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany[J]. Applied Energy,2011,88(2):432-441.
- [20] YAO M T, HU Z G, ZHANG N, et al. Low-carbon benefits analysis of energy-intensive industrial demand response resources for ancillary services[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2015,3(1):131-138.
- [21] 朱思成.电力需求响应资源互联策略与仿真研究[D].北京:华北电力大学,2020.
- [22] 陈楚,杨斌,王峰.大规模空调负荷参与电网需求响应的应用探究[J].电力需求侧管理,2017,19(S1):51-53.
- [23] 刘旭娜,肖先勇,李长松.动态终端能量管理系统及其节能削峰效益分析[J].华东电力,2012,40(10):1709-1714.
- [24] 杨晓龙.电动汽车参与区域电网需求响应优化管理研究[D].北京:华北电力大学,2022.
- [25] 黄远明,张玉欣,夏赞阳,等.考虑需求响应资源和储能容量价值的新型电力系统电源规划方法[J].上海交通大学学报,2023,57(4):432-441.
- [26] 代心芸,陈皓勇,肖东亮,等.电力市场环境下工业需求响应技术的应用与研究综述[J].电网技术,2022,46(11):4169-4186.
- [27] 陈新仪,严正,魏学好,等.PJM 电网需求响应模式及其启示[J].中国电力,2015,48(4):113-120.
- [28] 杨永明.需求响应的国际发展历程及欧美实践[EB/OL].[2022-12-02].<http://www.cnmhg.com/Chemical-Knowledge/f44b69006bd4d26847fe75f56a1a2b9b.html>.
- [29] 王蓓蓓,亢丽君,苗曦云,等.考虑可信度的新能源及需求响应参与英美容量市场分析及思考[J].电网技术,2022,46(4):1233-1247.
- [30] STEFAN F, DIRK N. Intergration scenarios of demand response into electricity markets: Load shifting, financial savings and policy implications[J]. Energy Policy,2016,96:231-240.
- 作者简介:**
- 张天米(1999),女,硕士研究生,研究方向为电网投资、综合能源系统;
- 王俐英(1997),女,博士研究生,研究方向为综合能源系统、电力市场;
- 王永利(1980),男,副教授,研究方向为电网投资、综合能源系统;
- 曾鸣(1957),男,教授,研究方向为电力市场、综合能源系统。
- (收稿日期:2023-08-25)