

面向需求响应市场的柔性负荷调度方法研究

路学刚¹, 谢一工¹, 胡斌¹, 林莉¹, 王珍意¹, 黄梓欣², 张沛^{2,3}, 谢桦²
(1. 中国南方电网有限责任公司 云南电力调度控制中心, 昆明 650000; 2. 北京交通大学
电气工程学院, 北京 100044; 3. 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要:为保障新能源的充分消纳和电力系统的安全性及可靠性,需要更多的灵活性资源参与调度,以市场化手段制定负荷聚合商等新型主体的调度运行机制,充分发挥其调节能力,对新型电力系统的建设和发展具有重要意义。从参与主体、准入条件、响应规则和补偿规则4方面分析了目前柔性负荷参与需求响应现状,根据负荷控制场景下的调频及调峰需求,构建柔性负荷优化调度模型。按照目前大部分省市所应用单边报价的模式,以“价格优先、容量优先”竞价原则,决定补贴价格及各负荷主体响应量。利用包括独立负荷及负荷聚合商在内的5 000个柔性负荷规模系统测试调度优化速度,测试表明模型满足需求响应市场下快速高效调整负荷的需求。

关键词:柔性负荷;需求响应;负荷调度;新型电力系统

Research on flexible load dispatch method for demand response market

LU Xuegang¹, XIE Yigong¹, HU Bin¹, LIN Li¹, WANG Zhenyi¹, HUANG Zixin², ZHANG Pei^{2,3}, XIE Hua²
(1. Yunnan Electric Power Dispatching Control Center of China Southern Power Grid Co., Ltd., Kunming 650000, China; 2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. College of Electrical Automation and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to ensure the comprehensive integration of new energy sources and enhance the safety and reliability of the power system, it is imperative to involve more flexible resources in scheduling operations. Developing market-based mechanisms for entities such as load aggregators and fully leveraging their regulatory capabilities are crucial for advancing the construction and development of the new power system. The current situation of demand response participation in flexible loads is analyzed from the 4 aspects of participating entities, access conditions, response rules, and compensation rules. Based on the frequency and peak demand requirements in load control scenarios, an optimization dispatch model for flexible loads is constructed. The subsidy price and response quantity of each load subject are determined by the bidding principle of “price first, capacity first”, which is commonly adopted by most provinces and cities in their mode of unilateral quotation. A system test of 5 000 flexible loads, including independent loads and load aggregators, is conducted to evaluate the optimization speed. The test results indicate that the model meets the requirements of rapidly and efficiently adjusting loads in the demand response market.

Key words: flexible load; demand response; load dispatch; new type power systems

0 引言

新能源渗透率的逐步升高为电力系统运行带来了新的挑战。一方面,风电及光伏等新能源机组的出力间歇性以及有限的功率控制能力,使得电网源端的不确定性增大,导致荷侧需求与源侧出力的时空特性极易出现严重错位,传统的“源随荷动”的调控模式难以为继^[1];另一方面,我国现货市场及辅助服务市场的主要能量来源均为火电,火电占比的降低使得系统调节能力和稳定性水平大幅下降,不利于

系统的供需平衡。因此,为保障新能源的充分消纳和电力系统的安全性及可靠性,需要更多的灵活性资源参与调度,特别是分布在需求侧的负荷资源^[2]。

需求侧的柔性负荷主要包括温控负荷及分布式储能等,这些负荷具有易于控制、可调度潜力大等特点,能够快速响应电网调度指令^[3]。负荷资源利用形式已从行政命令、刚性控制的有序用电,演变为主动参与、市场驱动的需求响应,均可通过一定的控制方法参与系统功率平衡调节,补充系统灵活性的潜能^[4]。因此,开展新型电力系统的负荷调控研究,发挥政策导向和市场化手段实现电网大范围资源优化配置,对应对新形势下电力供需互动面临的新挑战新要求具有重要指导意义。通过价格信号、激励机制、调度

收稿日期:2024-03-02;修回日期:2024-04-05

基金项目:中国南方电网有限责任公司云南电力调度控制中心科技项目(YNKJXM20222463)

指令等措施,柔性负荷能够积极参与电网调控,弥补发电侧调节能力的不足,优化发用电资源配置控制^[5]。

需求响应市场是以市场化实施需求响应的场所,它为需求响应资源提供了与发电侧资源一起公平竞争的平台,促使电网部门对需求响应资源进行合理规划与有效利用^[6]。需求侧的负荷资源如何在市场机制的引导下,参与调控,其中最主要的是构建适用于当前需求侧市场机制下的负荷优化调度模型。目前,国内外许多学者对需求响应市场下的柔性负荷优化调度进行了大量研究,并取得了一定的成果。文献[7]把每时段内充放电的电动汽车数量作为可优化调度变量,研究了机组的最优组合问题,但是仅考虑电动汽车,柔性负荷种类过于单一;文献[8]针对大功率负荷或负荷聚合商,构建能反映柔性负荷响应特性的功率调整模型,但是没有结合目前需求侧规则;文献[9]建立了可平移负荷、可削减负荷和可转移负荷3类互动负荷模型;文献[10]文中提出一种涵盖多种类型柔性负荷的日前优化调度技术,为实现源网荷3侧资源的协同调度提供了技术支撑,但均只考虑了日前调度一种调度时间尺度。

综上所述,现有研究中的模型主要针对不同类型的柔性负荷提出调度模型,但是没有结合目前国内市场化需求响应规则背景,根据新型主体调度运行机制及模式,对新型电力系统的负荷调控模型进行研究。同时,调度模型中调度时间范畴考虑的不够全面。

基于上述背景,本文从参与主体、准入条件、响应规则和补偿规则几方面分析了目前柔性负荷参与需求响应现状。针对现有模型没有结合目前国内市场化需求响应规则背景的不足,利用目前大部分竞价需求响应的省份所单边报量报价的模式,采用的“价格优先、容量优先”原则,根据系统调频及调峰需求,构建日前及实时的柔性负荷优化调度模型,以最小调节成本为目标,考虑柔性负荷的负荷平衡、可调节能力限值及爬坡约束等约束,决定每小时的补贴价格及各负荷主体响应量。此外,在本模型中暂不考虑可中断负荷。

1 柔性负荷参与需求响应规则分析

我国需求响应主要为基于电价的需求响应及基于激励的需求响应。电力需求响应的核心目标是用户能够根据价格信号自愿地对用电行为做出改变,而实现目标的关键在于建立有效的激励机制。江苏省在2018年国庆期间的需求响应中首次引入市场机制,采用了竞价模式,由计划参与的负荷集成商及用户自主申报参与的负荷量和所需激励价格。目前我国已有近10个省市相继发布了负

荷侧资源参与电需求响应的交易规则,通过市场化手段激励负荷挖掘调节潜力。

本节主要从参与主体、响应类型、价格机制等方面分析柔性负荷参与需求响应竞价现状^[11-17]。如表1所示,多地政策均鼓励用户或负荷集成商自愿参与需求响应。参与用户类型包括工业企业、商场、酒店、办公楼宇、综合建筑等。同时对负荷主体的最小响应能力及响应时间有一定的要求,一些条件成熟、起步较早的区域,在响应资源方面的尝试也比较多元,启动探索商业用户、电动汽车、虚拟电厂、居民用户的参与。

表 1 部分省份需求响应规则
Table 1 Demand response rules in some provinces

省份	参与主体	响应类型	响应分类
浙江	工业用户、充电桩、商业楼宇、居民家庭等多种负荷类型,以独立负荷或者负荷集成商的形式参与	削峰 填谷	削峰日前需求响应、填谷日前需求响应、实时需求响应
河北	10 kV 及以上工商业用户或者负荷聚合商	削峰	约定需求响应、实时需求响应
广东	传统高载能工业负荷、工商业可中断负荷、用户侧储能、电动汽车充电设施、分布式发电、智慧用电设施等。调节能力不低于300 kW 的虚拟电厂且单次响应持续时间不低于2 h	削峰 填谷	日前需求响应
湖北	响应能力不低于500 kW 的工业电力用户,响应能力不低于200 kW 的其他用户响应持续时间不低于60分钟	削峰	约定需求响应
福建	响应能力不低于200 kW 的单个用户,响应能力低于200 kW 的用户通过负荷聚合商的形式参与	削峰	日前需求响应、日内需求响应

响应类型方面,一般分为约时需求响应(或经济型需求响应)和实时需求响应(或紧急型需求响应),主要区别为二者响应时间需求不同。

(1) 约时需求响应:电力公司于需求响应执行前一天(日前响应)、执行前数小时(小时级响应),通过平台公告、短信、电话等方式向参与主体发出响应邀约,告知响应范围、需求量、时段及邀约截止时间等信息。

(2) 实时需求响应:在电网紧急情况下,电力公司于需求响应执行前30 min(分钟级响应),通过平台向参与主体下发调节指令,告知响应范围、需求量、时段等信息,并通过平台自动完成响应能力确认。

此外响应的类型既有削峰也有填谷,但是以削峰型需求响应为主。

如表2所示,在补偿机制方面,主要分为两种类型。一是固定补偿机制。根据需求响应的类型、响应

速度等因素,事先确定需求响应补偿标准,根据负荷实际响应量进行补贴。二是竞价补偿机制。部分试点省市响应国家市场化方式驱动的号召开始采用竞价模型开展需求响应。采取市场化申报的方式,基于不同的需求响应类型,按照“单边报量报价、边际统一出清”的方式确定需求响应的补偿标准,以调节价格最低优先,在价格相同的情况下,考虑各个负荷申报时间及申报容量,对申报时间早及申报负荷容量大的负荷优先进行调用,补偿价格为出清价格。

表2 部分省份需求响应补偿规则			
Table 2 Demand response compensation rules in some provinces			
省份	补偿类型	补偿机制	竞价规则
浙江	日前削峰为竞价价格补偿;其余为固定价格补贴	日前削峰出清价格补贴;实时需求响应固定电量及容量补贴;日前填谷容量补贴	单边报量报价、边际价格出清;“价格优先,时间优先,容量优先”原则
河北	竞价价格补偿	出清价格补贴	单边报量报价、边际价格出清;“价格优先、容量优先、时间优先”原则
广东	竞价价格补偿	日前邀约需求响应	单边报量报价、边际价格出清;按照“价格优先,时间优先,容量优先”原则
湖北	竞价价格补偿	日前响应补贴标准最高为20元/kW;日内响应补贴标准最高为25元/kW	按照“价格优先,时间优先,容量优先”原则
福建	竞价价格补偿	用户需求响应补贴金额=该用户实际响应负荷*响应时长*补贴价格系数*补贴单价	按照“容量优先,时间优先”原则

2 面向需求响应市场的柔性负荷调度模型

根据对现有国内各省市柔性负荷参与需求响应规则分析的基础上,本文设计了面向需求响应市场的柔性负荷调度模型。

模型可应用独立负荷、虚拟电厂或负荷集成商多类参与用户,根据约时需求响应和实时需求响应时间需求不同,分别提出负荷调控实时调度模型及日前调度模型,满足系统削峰填谷的需求。模型以目前大部分省市所应用单边报量报价、边际价格出清的模式,只考虑负荷侧的报价,以“价格优先、容量优先”竞价原则,进行出清,决定补贴价格及各负荷主体响应量。

系统在日前或者日内响应前发布响应需求、响应时间段、响应价格上限、市场主体信息等,参与需

求响应的柔性负荷主体以独立用户、虚拟电厂或负荷集成商的形式按照 15 min 为一个时段申报数据,申报数据如表3所示。

调度部门根据反馈的信息及调度的时段按照出清规则,进行边际出清,最终决定本次补贴单价和用户中标容量。

表3 负荷申报数据	
Table 3 Load declaration data	
负荷申报数据	含义
$C_{i,t}^{cost}$	柔性负荷主体 i 在 t 时段的调节成本
$P_{min,i,t}$	柔性负荷主体 i 在 t 时刻的基础容量下限
$P_{max,i,t}$	柔性负荷主体 i 在 t 时刻的基础容量上限
$P_{base,i,t}$	柔性负荷主体 i 在 t 时刻的基础容量
$U_{l,i}$	柔性负荷主体 i 在 t 时刻最大向上调节上限
$R_{U,i}$	柔性负荷主体 i 在 t 时刻向上爬坡率
$D_{l,i}$	柔性负荷主体 i 在 t 时刻最大向下调节下限
$R_{D,i}$	柔性负荷主体 i 在 t 时刻的向下爬坡率

2.1 需求响应市场下柔性负荷实时优化调度模型

(1) 目标函数

面向需求响应市场的柔性负荷优化调度在单边报量报价、边际价格出清的模式下,目标函数只考虑负荷侧报价,旨在实现电网调度部门实时调度单个周期内各种柔性负荷调节成本的最小化

$$\min \left(\sum_{i=1}^{N_{DR}} P_{i,t} C_{i,t}^{cost} \right)$$

(1)

式中: N_{DR} 为柔性负荷主体数量; $P_{i,t}$ 为柔性负荷主体 i 在 t 时刻的调节量,当柔性负荷向上调节时,调节量为正,当柔性负荷向下调节时,调节量为负; $C_{i,t}^{cost}$ 为 t 时段柔性负荷主体 i 的调节成本; T 为所考虑的总时段数。负荷主体报价范围应在报价范围之间,报价为分段报价,报价曲线如图1所示。

$$\sum_{l=1}^{N_{segment}} P_{i,l,t} = P_{i,t}$$

(2)

式中: $P_{i,l,t}$ 为 t 时段下柔性负荷主体 i 在 l 分段的调整值。

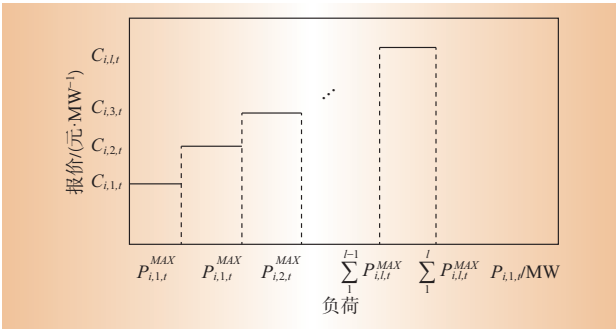


图1 分段报价曲线

Fig.1 Segment bid curve

按照“价格优先、容量优先”的原则,当柔性负荷主体报价一致时,将容量大的负荷主体将其报价下调0.000 01元/MW,使其在同等报价下获取优先调度序。

(2) 约束条件

1) 负荷平衡约束

柔性负荷优化调度需满足每个调度时段中负荷调度值与系统负荷调节需求值功率平衡,负荷平衡约束用式(3)表示

$$\sum_{i=1}^{N_{DR}} P_{i,t} = P_{\text{Demand},t} \quad (3)$$

式中: $P_{\text{Demand},t}$ 为系统在时刻 t 的总负荷调节需求。

2) 负荷容量约束

柔性负荷的调节量加上负荷基础值应该满足负荷最大值和最小值约束

$$P_{\min,i,t} \leq P_{i,t} + P_{\text{base},i,t} \leq P_{\max,i,t} \quad (4)$$

式中: $P_{\text{base},i,t}$ 为柔性负荷主体 i 在 t 时刻的基础容量; $P_{\min,i,t}$ 为柔性负荷主体 i 在 t 时刻的基础容量下限; $P_{\max,i,t}$ 为柔性负荷主体在时刻的容量最大值。

3) 负荷调整上下限约束

柔性负荷在每个时段的调节量不能超过其申报调节量的上限。

$$D_{L,i}^t L_{i,t} \leq P_{i,t} \leq U_{L,i}^t \quad (5)$$

式中: $U_{L,i}^t$ 为柔性负荷主体 i 在 t 时刻的向下调节量上限; $D_{L,i}^t$ 为柔性负荷主体 i 在 t 时刻的向上调节量上限。

4) 负荷每段报价调节约束:

柔性负荷在每一段报价的量不应超过每一段报价的上限

$$0 \leq P_{i,l,t} \leq P_{i,l,t}^{\max} \quad (6)$$

式中: $P_{i,l,t}^{\max}$ 为柔性负荷主体 i 的 l 段最大调整值。

通过集中竞价、边际出清决定本次中标负荷补贴的价格。每个时段、每个节点的市场出清价就是该时段的调度优化过程中产生的该节点的功率平衡约束的拉格朗日乘子。

$$L_t^{\text{LMP}} = \lambda_t \quad (7)$$

式中: λ_t 时段 t 系统负荷平衡约束的拉格朗日乘子。

2.2 需求响应市场下柔性负荷日前优化调度模型

(1) 目标函数

日前优化调度模型目标函数旨在实现电网调度部门日内调度多个周期内各种柔性负荷调节成本的最小化。

$$\min \left(\sum_{i=1}^{N_{DR}} \sum_{t=1}^T P_{i,t} C_{i,t}^{\text{cost}} \right) \quad (8)$$

式中: T 为所考虑的总时段数,日前共96个时段。负荷主体报价范围应在报价范围之间,报价为分段

报价,报价曲线如图1所示。

(2) 约束条件

日前模型的约束条件中除了需要考虑负荷平衡约束、负荷容量约束、负荷调整上下限约束和负荷每段报价调节约束,即式(2)一式(6)外,还需考虑:

1) 负荷爬坡约束

柔性负荷在连续调节的时间步中,调节量不能超过向上或向下爬坡上限

$$aD_{R,i}^t \leq P_{i,t+1} - P_{i,t} \leq aU_{R,i}^t \quad (9)$$

式中: $D_{R,i}^t$ 为柔性负荷主体 i 在 t 时刻向下爬坡速率限值; $U_{R,i}^t$ 为柔性负荷主体 i 在 t 时刻向上爬坡速率限值; $P_{i,t+1}$ 为柔性负荷主体 i 在 $t+1$ 时刻的调节量, a 为调度时间段间隔。

2) 日前负荷调控平衡约束

本文中模型不考虑可中断负荷,对于日前96个时段的调控,为了保证系统稳定性,负荷调节后应恢复调控后的水平,即全日调控量为0,即96个时段调整量之和为0。

$$\sum_{t=1}^T P_{i,t} = 0 \quad (10)$$

通过集中竞价、边际出清决定本次中标负荷补贴的价格。每个时段的市场出清价可由式(7)获得。

综上所述,面向需求响应市场的柔性负荷实时优化调度模型流程如图2所示。

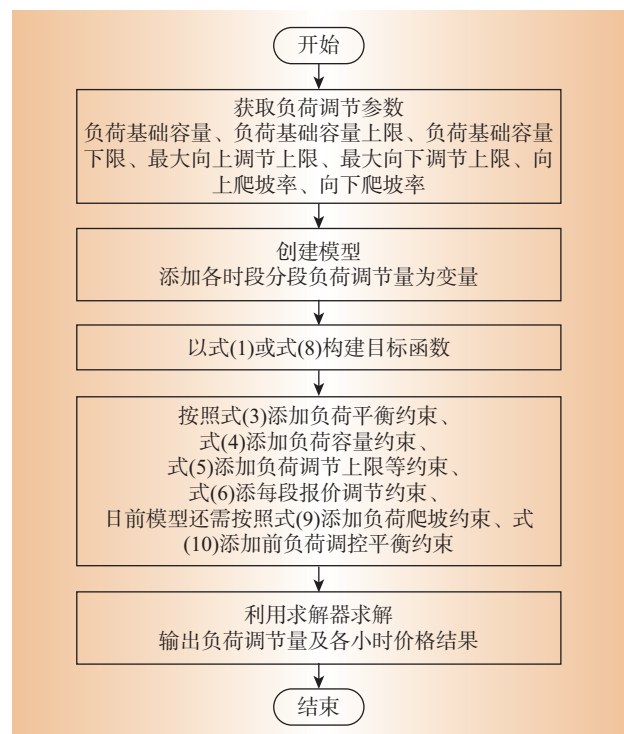


图2 面向需求响应市场的柔性负荷优化调度流程

Fig. 2 Process of flexible load dispatch method for demand response market

3 算例分析

3.1 算例介绍

以5 000个柔性负荷系统作为仿真算例,在Clion中通过C++进行模型地市级负荷调度的搭建,利用COPT求解器进行求解,验证所提出方法的有效性。该系统共5 000个柔性负荷,其中包含负荷聚合商及独立柔性负荷。参考2020年全国电力行业统计快报对国家典型行业可调潜力的评估,系统包含的柔性负荷类型及负荷调节范围如表4所示。

表4 柔性负荷参数

Table 4 Flexible load parameter table

%

负荷类型	可上调比例	可下调比例
钢铁	3.50	17.85
电解铝	9.72	17.07
水泥	6.82	64.68
化工	0.98	28.71
纺织业	6.82	55.14
电子设备	22.52	20.02
制造业	0	1.06
居民	0	1.38
商业	3.50	22.01

3.2 算例分析

经过COPT求解,可以得到系统中各个柔性负荷调节量。以第一个时段序号前50负荷为例求解结果如表5所示。

表5 柔性负荷调节量

Table 5 Flexible load regulation

MW

负荷序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
调节量	3.97	0	2.64	4.12	0	0	5.51	14.10	0	0
负荷序号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
调节量	0	8.43	5.42	0	7.51	0	0	47.50	8.00	47.50
负荷序号	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
调节量	0	47.50	3.30	0	0	9.60	10.00	5.42	5.00	4.21
负荷序号	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
调节量	0	10.00	9.48	0.79	8.00	20.00	6.07	0	5.42	8.00
负荷序号	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
调节量	8.00	25.00	47.5	6.93	0	25.00	10.10	0	1.82	0

前4个时段中负荷调节数量如表6所示。

表6 调用柔性负荷数量

Table 6 Number of flexible load dispatch

个

调度时段	第1个时段	第2个时段	第3个时段	第4个时段
调度负荷数量	2 303	2 914	1 745	1 799

不同调度时间段的求解时间如表7所示。

表7 不同时段调度求解时间

Table 7 Solution time of different dispatch time periods

s

调度时段	1个时段 (实时调度)	4个时段	16个时段	96个时段
测试时间	4.351	15.436	65.800	4 896.000

由此可见,本模型可适用于大规模负荷系统中,在短时间内快速获取各负荷调节量,及每小时的边际价格,满足负荷管理业务柔性负荷参与调节的需求,对于市场化背景下充分发挥负荷调节能力具有重要意义。

4 结束语

针对现有研究中的模型没有结合国内的市场化需求响应规则背景,对于调度模型中调度时间范畴考虑的不够全面的难题。本文从参与主体、准入条件、响应规则和补偿规则几方面分析了目前面向需求响应的柔性负荷参与需求响应现状。以目前大部分省市所应用单边报量报价的模式,结合“价格优先、容量优先”竞价原则。模型中以最小调节成本为目标,考虑柔性负荷的负荷平衡、可调节能力限值及爬坡约束等约束,建立实时及日内调度优化模型。利用5 000个柔性负荷规模系统测试多时段调度优化速度,满足负荷管理业务柔性负荷参与调节的需求。本文主要针对柔性负荷的通用模型进行研究,柔性负荷包括可转移、可缩减负荷等,其数学模型和响应特性不同,因此,如何根据不同类型柔性负荷研究需求响应的调度模型也将是下一步研究的重要内容。

参考文献：

[1] 樊宇琦,丁涛,孙瑜歌,等. 国内外促进可再生能源消纳的电力现货市场发展综述与思考[J]. 中国电机工程学报,2021,41(5):1 729-1 752.
FAN Yuqi, DING Tao, SUN Yuge, et al. Review and cogitation for worldwide spot market development to promote renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5):1 729-1 752.

[2] 文云峰,杨伟峰,汪荣华,等. 构建100%可再生能源电

- 力系统述评与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1 843-1 856.
- WEN Yunfeng, YANG Weifeng, WANG Ronghua, et al. Review and prospect of toward 100% renewable energy power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1 843-1 856.
- [3] TROVATO V, TENG F, STRBAC G. Role and benefits of flexible thermostatically controlled loads in future low-carbon systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 5 067-5 079.
- [4] 李碧君, 侯玉强. 紧急负荷调节用于安全稳定紧急控制的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 104-110.
- LI Bijun, HOU Yuqiang. Research of emergency load regulation for security and stability control [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 104-110.
- [5] 姜婷玉, 李亚平, 鞠平, 等. 柔性负荷控制及模型研究综述[J]. 智慧电力, 2020, 48(10): 1-8.
- JIANG Tingyu, LI Yaping, JU Ping, et al. Overview of modeling method for flexible load and its control [J]. Smart Power, 2020, 48(10): 1-8.
- [6] 国家能源局. 关于进一步加快电力现货市场建设工作的通知[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content_6913560.htm, 2023.10.12.
- National Energy Administration. Notice on further accelerating the construction of electricity spot market [EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content_6913560.htm, 2023.10.12.
- [7] 陆凌蓉, 文福拴, 薛禹胜, 等. 计及可入网电动汽车的电力系统机组最优组合[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 16-20.
- LU Lingrong, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Unit commitment in power systems with plug-in electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 16-20.
- [8] 宋原. 柔性负荷参与电网调度的策略[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- SONG Yuan. The strategy of flexible load participating in power grid dispatching [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [9] 孙川, 汪隆君, 许海林. 用户互动负荷模型及其微电网日前经济调度的应用[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2 009-2 016.
- SUN Chuan, WANG Longjun, XU Hailin. An interaction load model and its application in microgrid day-ahead economic scheduling [J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2 009-2 016.
- [10] 董蓓, 毛文博, 李峰, 等. 考虑多类型柔性负荷的日前优化调度技术[J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 97-102.
- DONG Bei, MAO Wenbo, LI Feng, et al. Day-ahead optimal scheduling technology considering multiple types of flexible loads [J]. Electric power engineering technology, 2018, 37(6): 97-102.
- [11] 周海浪, 刘一畔, 陈雨果, 等. 考虑灵活性收益的需求侧资源可行域聚合方法[J]. 中国电力, 2022, 55(9): 56-63, 155.
- ZHOU Hailang, LIU Yipan, CHEN Yuguo, et al. A feasible domain aggregation method for demand side resources considering flexibility benefits [J]. Electric Power, 2022, 55(9): 56-63, 155.
- [12] 浙江省发改委. 关于开展2021年度电力需求响应工作的通知[EB/OL]. (2021-06-08)[2023-12-31]. <https://www.163.com/dy/article/GC2MN8P005509P99.html>.
- Zhejiang Provincial Development and Reform Commission. On the implementation of 2021 electricity demand response work notice [EB/OL]. (2021-06-08)[2023-12-31]. <https://www.163.com/dy/article/GC2MN8P005509P99.html>.
- [13] 国家能源局山东能监局. 山东电力辅助服务市场运营规则(试行)(2020年修订版)[EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1681126874811635258&wfr=spider&for=pc>, 2020-10-20.
- Shandong Energy Supervision Bureau of the National Energy Administration. Shandong power auxiliary service market operating rules (trial) (2020 revision) [EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1681126874811635258&wfr=spider&for=pc>, 2020-10-20.
- [14] 广东电力交易中心. 广东省市场化需求响应实施细则(试行)[EB/OL]. <https://news.bjx.com.cn/html/20220418/1218193.shtml>, 2022-04-16.
- Guangdong Power Trading Center. Market demand response to the detailed rules for the implementation of guangdong province (trial) [EB/OL]. <https://news.bjx.com.cn/html/20220418/1218193.shtml>, 2022-04-16.
- [15] 河北省发展和改革委员会. 河北省电力需求响应市场运营规则[EB/OL]. <https://gxt.hebei.gov.cn/main/policy/zxzcdetail?id=f782edd0-6964-4d00-9a76-5e5a5840af94&eqid=923bcf5900141405000000002647555be>, 2023-04-24.
- Hebei Province Development and Reform Commission. Hebei power demand response market operating rules [EB/OL]. <https://gxt.hebei.gov.cn/main/policy/zxzcdetail?id=f782edd0-6964-4d00-9a76-5e5a5840af94&eqid=923bcf5900141405000000002647555be>, 2023-04-24.
- [16] 湖北省能源局. 湖北省电力需求响应实施方案(试行)[EB/OL]. <https://news.bjx.com.cn/html/20210622/1159658-1.shtml>, 2021-06-1.
- Hubei Energy Bureau. Hubei power demand response implementation plan (trial) [EB/OL]. <https://news.bjx.com.cn/html/20210622/1159658-1.shtml>, 2021-06-1.
- [17] 福建省发展和改革委员会. 福建省电力需求响应实施方案(试行)[EB/OL]. <https://news.bjx.com.cn/html/20220524/1227503.shtml>, 2022-05-23.
- Fujian Provincial Development and Reform Commission. Fujian power demand response implementation plan (trial) [EB/OL]. <https://news.bjx.com.cn/html/20220524/1227503.shtml>, 2022-05-23.
- [18] 马伟哲, 程韧俐, 史军, 等. 考虑柔性负荷的机组组合模型及求解[J]. 广东电力, 2019, 32(8): 73-82.
- MA Weizhe, CHENG Renli, SHI Jun, et al. Unit combined model considering flexible load and its solution [J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(8): 73-82.
- [19] 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, 21(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.
- [20] 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.

作者简介:

路学刚(1989),男,云南省昭通人,硕士,高级工程师,研究方向为电网调度自动化;

谢一工(1972),男,云南昆明人,硕士,高级工程师,研究方向为电网调度运行管理;

胡斌(1982),男,四川叙永人,硕士,高级工程师,研究方向为电网调度自动化;

(责任编辑 郝 逊)