

基于现货实时平衡的新能源微电网调峰激励机制

马喜平¹ 沈渭程¹ 杨臣² 杜松怀^{2*} 苏娟² 赵凤展² 董彦君²

(1. 国家电网甘肃省电力公司 电力科学研究院,兰州 730070;

2. 中国农业大学 信息与电气工程学院,北京 100083)

摘要 为达到具备一定调控能力的高比例能源微电网并入大型配电网或农村电网时,以市场手段管控其参与调峰的目的。采用基于现货实时平衡市场的新能源微电网参与电网调峰辅助服务的激励方法,对现货实时平衡的市场机制环境下,新能源微电网参与调峰辅助服务的激励效果进行研究。通过算例验证,调峰现货实时平衡市场出清结果表明:新能源微电网参与调峰的激励场景下,不仅降低了机组考核费用,也提高了调峰补偿费用,调峰收入增加 55.27%。本研究提出的结合并网发电机组提供调峰辅助服务的考核指标,增加了考核与激励环节的新能源微电网参与电网调峰辅助服务的激励方法,能够有效激发市场调峰主体的潜能与意愿,保障电网的安全稳定运营。

关键词 新能源微电网; 实时平衡; 调峰; 激励机制

中图分类号 TM715

文章编号 1007-4333(2020)05-0114-08

文献标志码 A

Peak shaving incentive mechanism of new energy microgrid based on spot real-time balance

MA Xiping¹, SHEN Weicheng¹, YANG Chen², DU Songhuai^{2*}, SU Juan²,
ZHAO Fengzhan², DONG Yanjun²

(1. State Grid Gansu Electric Power Company, Electric Power Research Institute, Lanzhou 730070, China;

2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract In order to achieve the purpose of market control when a high proportion of energy micro grid with certain regulation ability is incorporated into a large distribution network or rural power grid. In this study, the incentive method of new energy micro grid participating in peak load regulation auxiliary service based on spot real-time balance market is used to study the incentive effect of new energy micro grid participating in peak load regulation auxiliary service under the market mechanism environment of spot real-time balance. Through example verification, the real-time equilibrium market clearing results show that under the incentive scenario of new energy micro grid participating in peak regulation, both the unit assessment cost and the peak regulation compensation cost are reduced, and the peak regulation revenue is increased by 55.27%. In this study, by combining the assessment index of grid connected generating units to provide peak load regulation auxiliary services is proposed. The incentive method of new energy micro grid participating in peak load regulation auxiliary services in assessment and incentive link is added and it can effectively stimulate the potential and willingness of market peak load regulation subjects and ensure the safe and stable operation of the grid.

Keywords new energy microgrid; real-time balance; peak shaving; incentive mechanism

随着大规模的新能源并网,系统随机与波动性的增加对稳定性和峰谷调节会产生较大影响。关于

新能源消纳^[1-3]、资源配置及管理控制^[4-6]已有部分研究,但针对新能源微电网参与调峰的市场研究仍

收稿日期: 2019-10-10

基金项目: 国网甘肃省电力公司科技项目(52272217001L);国家自然科学基金青年科学基金项目(51707197)

第一作者: 马喜平,高级工程师,主要从事新能源并网技术研究,E-mail:maxpgs@163.com

通讯作者: 杜松怀,教授,主要从事电力市场、需求侧管理研究,E-mail:songhuaidu@cau.edu.cn

较少。现货实时平衡的市场交易可根据电网调度员依据报价调整发电出力或用户负荷,维持系统的能量平衡和安全运行,可采用建立现货实时平衡的市场交易机制来处理新能源微电网并网的调峰问题。在市场环境下的调峰过程中,需要建立相应的激励机制,以达到激发调峰市场的目的。

新能源微电网并网给电网调峰带来一些技术问题,现有研究提出了相应的解决方案,大规模新能源的调峰优化方案^[7-8]、新能源联合调峰^[9]、调峰深度及容量配置^[10]、联合储能调峰性能^[11-13],但关于新能源微电网参与调峰市场机制的研究较少。在市场方面如市场模式^[14-17]、现货交易机制^[18-21]、峰值调节电价补偿^[22-24],也存在一定的研究,但关于新能源微电网的调峰市场激励机制研究仍处于起步阶段。新能源微电网并网背景下,需要研究其参与调峰的市场模式及激励机制,实现激发调峰市场主体积极参与的目的。

为达到市场模式下,新能源微电网并网多种资源联合调峰的目的,本研究拟在现货实时平衡市场机制下,考虑并网发电机组提供调峰辅助服务的考核指标,采用基于现货实时市场的新能源微电网参与调峰辅助服务的激励模型。拟增加调峰考核与补偿激励环节,引入竞争的正向激励机制,以期获得更大程度激发市场各调峰主体的潜能与意愿,缓解各类电源间矛盾,达到有效保障电网的安全稳定运营的目的。

1 现货实时平衡交易机制

波动性新能源大规模并网与系统负荷峰谷差不断增加,调峰维持实时供需平衡越来越重要。现货实时平衡交易能够依据电网调度员依据增减出力(负荷)报价,调整发电出力或用户负荷,维持系统的能量平衡和安全运行,可建立现货实时平衡的市场交易机制来处理系统调峰问题。结合国际经验,实时平衡市场应包括:超短期负荷预测、上调与下调出力竞价、安全校核、市场结算等。各部分的设计方案如下。

1)超短期负荷预测:为实时平衡交易的基础,需要高精度的负荷预测。

2)上调与下调出力竞价:当市场交易调度中预测到存在较大负荷增加或发电计划过大,交易机构可以组织愿意参与市场调度的发电厂申报上下调节范围与价格。系统调度员根据总不平衡量及报价顺

序,调度机组满足不平衡量。机组出力调节的日内平衡市场交易竞价曲线见图1^[18]。

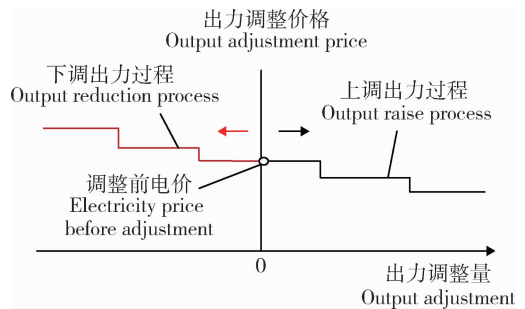


图1 机组出力调节的日内平衡市场交易竞价曲线

Fig.1 Bidding curve of intra-day equilibrium market for unit output regulation

3)安全校核:对实时平衡的市场交易计划需要校验线路潮流是否越限、是否存在阻塞,进行两端平衡调节,修正交易结果,满足电网安全约束。

4)市场出清结算:对交易进行机组调整电量与不平衡电量进行结算。目前电价机制主要有3种^[18]:以北欧市场为代表的统一边际上调、下调价格;以英国市场为代表的一机一价定价;以美国PJM市场为代表节点边际电价。我国目前的电价体制下,可结合政府批复电价,发掘电厂的边际上调价格和边际下调价格采用节点边际电价,也可采用相对简单的一机一价定价原则。

上述基于现货平衡市场下的交易机制,属于传统调峰辅助服务的交易形式。为增加交易中市场主体的积极性,本研究结合新能源微电网并网调峰性能指标,增加考核与激励环节,激发调峰市场主体的潜能。最后将其交易结果与未采用激励机制(传统交易机制)的交易结果进行对比分析。

2 新能源微电网并网的调峰性能指标

高比例新能源大规模并网必然会加剧电网功率平衡的压力,市场模式下的新能源以补贴的电价或合约政策进行交易,能够达到多种资源协调联合、需求侧管理手段进行调峰的目的。但需要对系统参与调峰的资源进行性能评估,因此,新能源微电网并网背景下,对提供辅助服务的机组进行指标考核。本研究拟选取调峰参与度、调峰容量、调峰速率、调峰精度4个调峰指标,在调峰过程中,前2项指标、后2项指标分别能够真实反映机组参与调峰的可调控范围、调控响应时间,与调峰辅助服务衡量标准基本

一致。

1) 调峰参与度 R 。新能源微电网机组的调峰参与度 R 指新能源微电网机组参与调峰实际运行时间占要求运行时间的百分比, 采用式(1)计算:

$$R = \frac{T_r}{T_N} \times 100\% \quad (1)$$

式中: T_r 为新能源微电网机组参与调峰实际运行时间; T_N 为要求运行时间。

2) 调峰容量。新能源微电网机组的调峰容量是指机组调峰范围上限和下限值之差的绝对值或者该绝对值所占机组额定容量的百分数。

3) 调峰速率 V 。新能源微电网机组的调峰速率 V 是调解过程的调峰幅度与调峰时间之间的比值的绝对值, 采用式(2)计算:

$$V = |\Delta P / \Delta T| \quad (2)$$

式中: ΔP 为调解过程的调峰幅度; ΔT 为机组的调峰时间。

4) 调峰精度 e 。新能源微电网机组的调峰精度 e 采用式(3)计算:

$$e = \left(\int_{t_2-T_0}^{t_2} \frac{|z-P|}{P_N} dt \right) / T_0 \quad (3)$$

式中: t_2 为机组调峰过程结束的时刻; P_N 为机组的额定容量; z 为机组的目标指令; T_0 为精度统计计算时间; P 为机组或电厂实际出力。若 $z > P$, 开始功率升高调峰, 开始时刻计为 t_1 , 初始功率 P_1 。直到 $z < P$ 或 $|z-P|$ 进入死区范围, 升功率过程结束, 结束时刻计为 t_2 , 同时记下该时刻的出力 P_2 , 新能源微电网参与调峰的调峰过程见图 2。

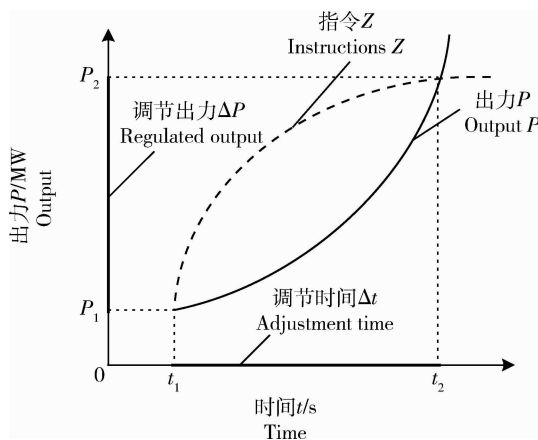


图 2 新能源微电网参与调峰的调峰过程示意

Fig. 2 Schematic diagram of peak regulation process of new energy microgrid

3 基于现货实时平衡的调峰激励

现货实时平衡交易的市场交易下, 结合并网发电机组提供调峰辅助服务的考核指标, 采用基于现货实时市场的新能源微电网参与调峰辅助服务的激励模型。该模型考虑提供辅助服务电厂的经济利益, 充分肯定其实际贡献, 以考核系数和激励系数, 激励电厂改进技术设备, 为电网提供经济、优质、高效的辅助服务。本研究在现货平衡交易机制的基础上, 增加考核与补偿激励 2 部分。

3.1 考核与补偿规则

1) 考核规则。依据现行调峰辅助服务规则, 对于电厂每日平均调峰速度或精度不满足要求的, 当日进行考核。各项指标应达到新能源微电网参与调峰的指标考核标准(表 1)^[22]。

表 1 新能源微电网参与调峰的指标考核标准

Table 1 Index assessment standard of new energy microgrid peak regulation

机组类型 Unit type	调峰速率 V / (MW/min) Regulating speed	调峰精度 e Adjustment accuracy
火电机组 Thermal power unit	$\geq 0.8P_N$	≤ 0.03
水电机组 Hydropower unit	$\geq 0.015P_N$	≤ 0.03
新能源机组 New energy unit	$\geq 0.9P_N$	≤ 0.03

注: P_N 为机组的额定容量。

Notes: P_N is the rated capacity of the unit.

2) 补偿规则。对于提供调峰辅助服务的机组, 且机组性能指标满足新能源微电网参与调峰的指标考核标准, 对其调峰过程进行补偿, 补偿费用的大小取决于机组调峰过程的贡献量, 并计算调峰辅助服务补偿的总费用, 采用式(4)和(5)计算:

$$M = \Delta P T_0^2 / \Delta T \quad (4)$$

$$F = \sum MR \quad (5)$$

式中: M 为调峰过程贡献量; ΔP 为调峰过程的调峰幅度; T_0 为统计精度计算时间, ΔT 为机组调峰过程结束后, 进入了稳态, 进行调峰精度统计计算的时间段长短; F 为总补偿费用; M 为调峰过程贡献量; R 为每

MWh 应补偿的费用。对于调峰性能不满足新能源微电网参与调峰指标考核标准的调峰过程不予补偿。

在考核指标中,主要考虑后 2 项指标,以此判断机组是否符合参与调峰的标准或对性能不合格的机组进行扣罚。针对前 2 项指标,拟考虑在激励机制中,对一些容量小,但实际参与了调峰的进行激励,期望达到:1)尽可能鼓励机组根据调度计划提供调峰辅助服务,维持电力系统的安全稳定运行。2)对于调峰性能不合格的机组给予扣罚,同时又不否定其做出的调峰贡献;既有惩罚,又肯定电厂的贡献,更为灵活。

3.2 考核补偿激励模型

上述考核与补偿标准规则,计算简单,但不够灵活。补偿规则中对于性能不满足要求的调峰过程不予补偿,同时受到考核,无法真实反映发电厂机组的实际贡献,对电厂会造成经济损失,不利于激励各电厂机组提供辅助服务。为弥补此缺陷,本研究采用基于现货实时平衡的调峰激励考核与补偿模型。

基于现货实时市场的新能源微电网参与调峰辅助服务激励模型建立的基本思想见图 3。1)在现货实时平衡交易的基础上,评估各机组调峰性能。

2)对性能不合格的机组依据考核规则进行电量考核,考核结果乘以考核系数,得到最终的考核扣罚结果,其中考核系数大小由机组调峰性能好坏决定。3)依据考核结果和超短期负荷预测结果计算机组的调峰贡献量,根据机组调峰性能对贡献量乘以激励系数,得到最终贡献量,按最终贡献量大小进行费用补偿。4)进行交易和出清计算。

该模型在调峰过程中,只要机组参与调峰,都需进行调峰贡献量计算,贡献量大小跟机组的调峰性能存在直接关系,性能越好,贡献量越大,反之亦然。机组扣罚电量与调峰贡献量进行核算方法如下。

1)机组扣罚电量采用式(6)和(7)计算:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i k_i \tag{6}$$

$$k_i = \begin{cases} 0 & v_i \geq v_N, e_i \leq e_N \\ 1 - \frac{v_i}{v_N} & v_i < v_N, e_i \leq e_N \\ \frac{e_i}{e_N} - 1 & v_i \geq v_N, e_i > e_N \\ 1 & v_i < v_N, e_i > e_N \end{cases} \tag{7}$$

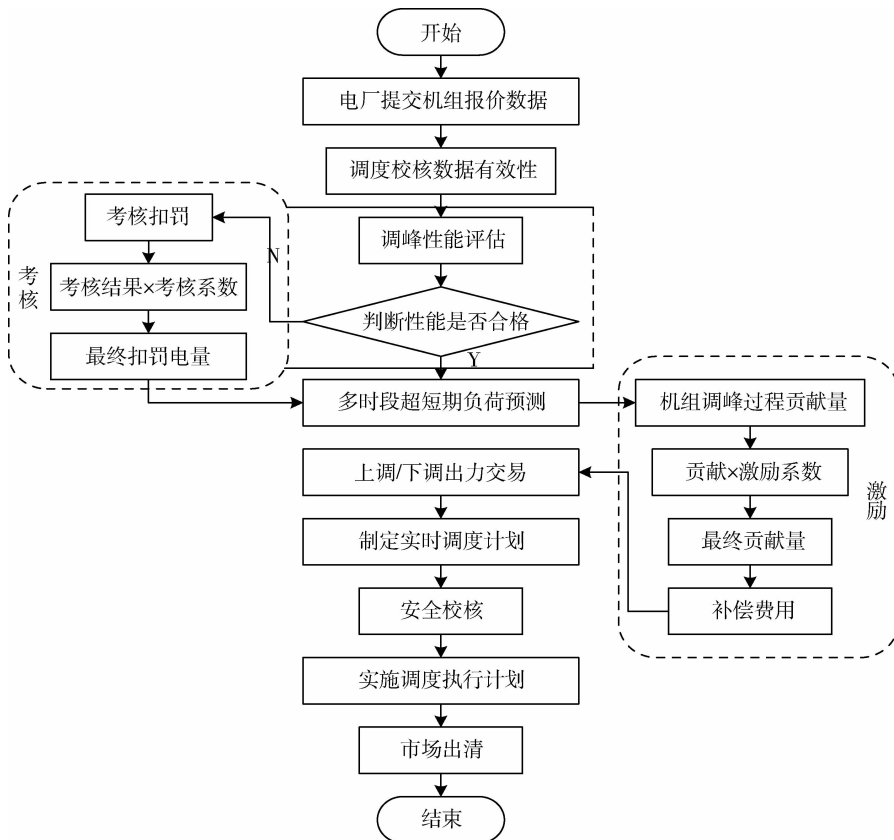


图 3 新能源微电网调峰的实时平衡交易流程

Fig. 3 Real time equilibrium transaction flow chart of new energy micro grid peak regulation

式中: C 为 n 天总的扣罚电量, n 为调峰天数; C_i 为日平均调峰速度或精度不满足要求时, 应扣罚的电量; k_i 为考核系数, 机组调峰性能偏离考核标准的程度, 偏离越大, k_i 越大, 考核电量也越多; v_i 和 e_i 分别为机组的实际第 i 天平均调峰速度和平均调峰精度, v_N 和 e_N 为机组调峰速度和调峰精度考核标准。

2) 机组调峰贡献量采用式(8)计算:

$$M = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\Delta P_{ij} T_0^2 / \Delta T_{ij}) k_{ij} \quad (8)$$

$$k_{ij} = \frac{v_{ij}}{v_N + v_{ij}} + \frac{e_{ij}}{e_N + e_{ij}} \quad (9)$$

式中: M 为机组 n 天总的调峰贡献量; n 为调峰天数; m 为 1 天中完整的调峰过程次数; ΔP_{ij} 为第 i 天第 j 个调峰过程的调峰幅度; T_0 为统计精度计算时

间; ΔT_{ij} 为第 i 天第 j 个调峰过程的调峰时间; k_{ij} 为机组的激励系数, 表明机组的综合调峰性能的高低, $k_{ij} < 1$, 表示惩罚机组, $k_{ij} > 1$, 表示奖励机组; v_{ij} 和 e_{ij} 分别为机组的实际调峰速度和调峰精度; v_N 和 e_N 分别为机组调峰速度和调峰精度考核标准。

4 算例分析

依照新能源微电网调峰的实时平衡交易流程, 结合电网辅助服务相关补偿规则, 测算当前发电机组现货实时平衡市场下调峰辅助服务的考核与补偿水平, 将其交易结果与未采用激励机制(传统交易机制)的交易结果进行对比。本研究算例以电网实际发用电数据为基础, 对电网机组进行简化等效, 新能源微电网的发电机组基本情况见表 2。

表 2 新能源微电网的发电机组基本情况

Table 2 Basic situation of generator set in new energy microgrid

发电厂 Power plant	装机容量/MW Installed capacity	最大可调出力/MW Maximum adjustable output	电压等级/kV Voltage grade
电厂 1 Power plant 1	2 400	2 400	500
电厂 2 Power plant 2	1 200	1 200	500
电厂 3 Power plant 3	1 340	1 340	220
热电厂 1 Thermal power plant 1	600	600	220
电厂 4 Power plant 4	600	600	220
电厂 5 Power plant 5	700	700	220
热电厂 2 Thermal power plant 2	300	270	220
电厂 6 Power plant 6	600	600	220
电厂 7 Power plant 7	200	200	220
热电厂 3 Thermal power plant 3	660	660	220
热电厂 4 Thermal power plant 4	600	600	220
热电厂 5 Thermal power plant 5	600	600	220
热电厂 6 Thermal power plant 6	660	660	220
电厂 8 Power plant 8	210	210	220
电厂 9 Power plant 9	1 070	1 070	220
热电厂 7 Thermal power plant 7	600	600	220
电厂 10 Power plant 10	1 300	1 300	220
风电场 1 Wind farm 1	185	185	110
风电场 2 Wind farm 2	191	191	110
风电场 3 Wind farm 3	175	175	110
风电场 4 Wind farm 4	400	400	220
风/光/储 Wind/Photovoltaic/Storage	443	443	220
光/储 Photovoltaic/Storage	150	150	220

4.1 峰平谷时段的确定

根据不同季节的负荷特点,算例选取秋冬季(09—12月)时段。

首先确定系统峰平谷时段。负荷高峰时段为 09:30—11:30 和 16:30—19:30,总计 5 h;负荷低谷时段为 00:00—05:00,总计 5 h;其余为平时段。根据当前峰平谷时段划分,以火电机组和新能源机组的出力总和,计算火电机组在发电空间未收到新能源挤占条件下,在峰平谷时段平均出力。

4.2 扣罚电量核算对比

根据电网实测数据,对机组分别进行未采用激励机制的标准场景和采用激励机制的激励场景进行机组考核和补偿的计算并比较,考核采用 9—12 月的数据。不同场景下机组调峰的扣罚电量对比计算结果见表 3。基于激励机制的扣罚电量平均比标准扣罚少 51.84%,说明激励机制一方面鼓励电厂根据调度计划提供调峰辅助服务,另一方面对调峰性能不合格的机组给予扣罚,但不否定其做出的调峰贡献,间接增加机组参与调峰辅助服务的贡献量。

表 3 不同场景下机组调峰的扣罚电量对比

Table 3 Comparison of the power penalty for peak load regulation in different scenarios MWh

月份 Month	标准场景 Standard scenario	激励场景 Incentive scenario
9	62.10	25.90
10	79.40	42.70
11	20.80	9.50
12	10.70	5.20
平均 Average	43.25	20.83

4.3 调峰贡献量核算对比

根据电网实测数据,补偿采用的是 9 月份的数据,标准场景与激励场景下的新能源微电网的调峰贡献量对比结果见图 4。9 月份基于激励机制的机组调峰贡献量普遍高于未采用激励机制的调峰贡献量,计算发现激励作用的机组调峰贡献量增加 46.82%,说明基于激励机制的补偿细化了传统机组

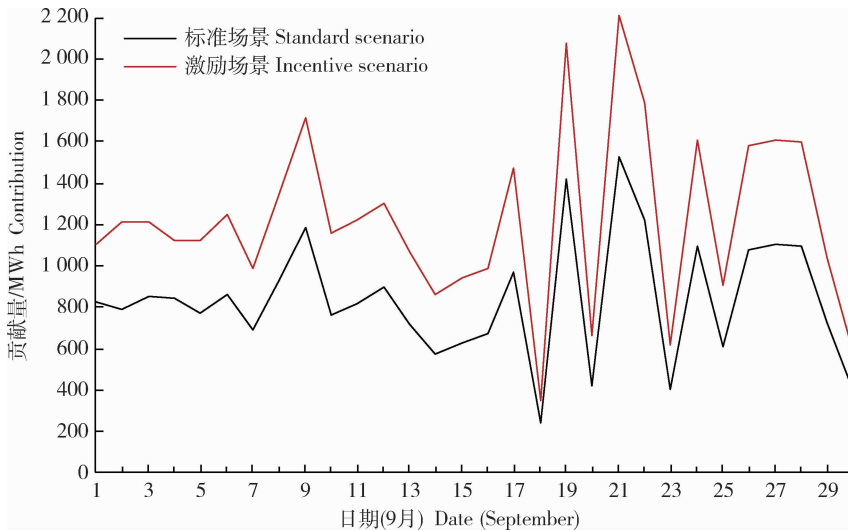


图 4 不同场景下新能源微电网的调峰贡献量对比

Fig. 4 Comparison of peak load regulation contribution of new energy microgrid in different scenarios

调峰机制,根据机组的调峰性能好坏进行补偿,机组性能越好,贡献量越大,补偿费用就越多;性能较差的机组,补偿费用相对越少,能够达到激励电厂改进技术,为电网提供优质的调峰辅助服务的目的,同时为电厂带来更多经济效益,实现双赢。

4.4 市场出清结果

根据不同场景下新能源微电网调峰的考核和补偿数据,确定机组各时段参与调峰的考核电量

和调峰贡献量。结合新能源微电网机组参与调峰的平衡交易市场报价,核算实时平衡交易的市场出清结果见表 4。可见,合计当天调峰补偿与考核费用,标准场景下共 22.98 万元调峰收入,激励场景下共 35.68 万元调峰收入;相比标准场景,基于现货平衡的激励机制降低了新能源机组参与调峰的部分考核费用,提高了补偿费用,调峰收入增加 55.27%。

表4 新能源微电网调峰的实时平衡交易市场出清结果

Table 4 Clearing results of real-time equilibrium trading market for peak load regulation of new energy microgrid

场景 Scenario	考核电量/ MWh Checking power	考核费用/ 万元 Assessment fee	调峰贡献量/MWh Contribution of peak load regulation	调峰补偿/万元 Peak load compensation	调峰收入/万元 Peak load income
标准场景 Standard scenario	43.25	2.16	837.89	25.14	22.98
激励场景 Incentive scenario	20.83	1.04	1 223.85	36.72	35.68

5 结论

高比例新能源并入大型配电网或农村电网会增加电网的波动性与随机性,市场模式下以新能源补贴电价或合约政策等需求侧管理手段,能够达到多种资源协调联合进行调峰的目的。本研究在现货实时平衡的市场机制下,结合机组提供调峰辅助服务的调峰参与度、调峰容量、调峰速率、调峰精度考核指标,采用基于现货实时市场的新能源微电网参与调峰辅助服务的激励模型对新能源微电网参与调峰进行激励。该模型增加考核与补偿激励环节,考虑提供辅助服务电厂的经济利益,充分肯定电厂实际调峰贡献,激励其提供经济、优质、高效的辅助服务。最后采用算例,验证激励机制的可行性与有效性,引入竞争的正向激励机制,更大程度的激发市场各调峰主体的潜能与意愿,缓解各类电源间矛盾的同时,有效的保障电网的安全稳定运营,但对运行调度的要求也有所提高,需要更加准确、及时的调度。

参考文献 References

- [1] 马彦宏,姜继恒,鲁宗相,乔颖,叶一达. 基于随机生产模拟的火电机组深度调峰提升新能源消纳能力评估方法[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(1): 35-43
Ma Y H, Jiang J H, Lu Z X, Qiao Y, Ye Y D. Assessment method of conventional units with deep peak-shaving for renewable energy accommodation based on probabilistic production simulation[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2019, 2(1): 35-43 (in Chinese)
- [2] 隋猛,李法社,苏有勇. 分布式能源系统在农业循环经济中的应用研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(S1): 181-185
Sui M, Li F S, Su Y Y. Application of distributed energy system in agricultural circular economy[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(S1): 181-185 (in Chinese)
- [3] 王焜杰,江岳文. 考虑环境价值及调峰充裕度的多目标风电

- 接纳水平优化[J]. 电器与能效管理技术, 2018(19): 26-30
Wang Y J, Jiang Y W. Multi-objective wind power acceptance level optimization considering environmental value and peak adjustment adequacy[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2018(19): 26-30 (in Chinese)
- [4] 王杰峰,任军辉,宋志顺,李嘉丰. 交直流混合微电网组网和控制策略的研究与应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(1): 172-179
Wang J F, Ren J H, Song Z S, Li J F. Study and application of networking and control strategy of AC/DC hybrid microgrid [J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2019, 40(1): 172-179 (in Chinese)
- [5] 孟晓丽,牛焕娜,贾东梨,张晓雪,罗希,杨明皓. 基于储能 Soc 日前计划的微电网实时能量优化调度方法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 155-161
Meng X L, Niu H N, Jia D L, Zhang X X, Luo X, Yang M H. Real-time energy optimal dispatch for microgrid based on day-ahead scheduling of charge state[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(8): 155-161 (in Chinese)
- [6] 汤旻安,高晓红. 不平衡电网电压条件下光储微电网并网控制[J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 1879-1888
Tang M A, Gao X H. Grid-connected control of microgrid with photovoltaic and energy storage systems under unbalanced grid voltage conditions[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(6): 1879-1888 (in Chinese)
- [7] 田浩,刘文颖,王方雨,王维洲,药炜. 基于负荷参与的源荷互动调峰多目标优化方法[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(11): 32-38
Tian H, Liu W Y, Wang F Y, Wang W Z, Yao W. Multi-objective optimal method of source-load peaking regulation based on participation of loads[J]. *Power System and Clean Energy*, 2018, 34(11): 32-38 (in Chinese)
- [8] 葛晓琳,金言,夏澍,符杨. 面向调峰调频需求的风水火电协调优化调度[J/OL]. 电网技术, 2019, 43(11): 3917-3926. 2019-08-30. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2018.2042>
Ge X L, Jin Y, Xia S, Fu Y. A Coordinated optimization scheduling of wind-hydro-thermal power system based on the requirement of peak load and frequency regulation[J/OL]. *Power System Technology*, 2019, 43(11): 3917-3926. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2018.2042> (in

- Chinese)
- [9] 周刚. 考虑核电参与的多类型电源联合调峰优化方法[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 928-935
Zhou G. An approach on coordinative peaking optimization for power system with nuclear power plant participation [J]. *Power System Technology*, 2019, 43 (3): 928-935 (in Chinese)
- [10] 何力, 吕红芳. 考虑经济性的多微电网优化调度研究[J]. 发电技术, 2018, 39(5): 397-404
He L, Lv H F. Research on optimal dispatching of multi-microgrid considering economy [J]. *Power Generation Technology*, 2018, 39(5): 397-404 (in Chinese)
- [11] 甘伟, 郭剑波, 李相俊, 艾小猛, 文劭宇. 面向多应用需求的分布式储能优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1504-1511
Gan W, Guo J B, Li X J, Ai X M, Wen J Y. Distributed energy storage optimization scheduling for multiple application requirements[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(5): 1504-1511 (in Chinese)
- [12] 胡泉, 徐国栋, 尚策, 王莉, 闻旻, 程浩忠. 工业园区参与调峰的电池储能-需求响应联合规划[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 116-126
Hu X, Xu G D, Shang C, Wang L, Wen M, Cheng H Z. Joint planning of battery energy storage and demand response for industrial park participating in peak shaving [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(15): 116-126 (in Chinese)
- [13] 石惠娴, 任亦可, 孟祥真, 陈慧子, 欧阳三川, 周强. 植物工厂水蓄能型地下水热源热泵供热系统节能运行特性研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(23): 157-163
Shi H X, Ren Y K, Meng X Z, Chen H Z, Ouyang S C, Zhou Q. Research on energy-saving operating characteristics of water storage groundwater source heat pump heating system in plant factory [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34 (23): 157-163 (in Chinese)
- [14] 姚刚, 赵翔宇, 张耀, 伍仕红, 石珂, 杜江. 考虑新能源波动性的调峰辅助服务成本定价研究[J]. 电力大数据, 2019, 22(7): 76-81
Yao G, Zhao X Y, Zhang Y, Wu S H, Shi K, Du J. Research on cost pricing of the peak load adjustment auxiliary service considering the new energy volatility[J]. *Power Systems and Big Data*, 2019, 22(7): 76-81 (in Chinese)
- [15] 程基峰, 贲靖洋, 严正, 张焰, 李明节. 富余风电参与调峰权交易的电力市场均衡分析[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2702-2710
Cheng J F, Yun J Y, Yan Z, Zhang Y, Li M J. Equilibrium analysis of peak regulation right trading market between wind farms and thermal power plants considering deep peak regulation[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(8): 2702-2710 (in Chinese)
- [16] Jiang J H, Qiao Y, Lu Z X, Wang N B, Li J, Ding K. Research on peak load regulation capacity planning for long-term market [C]. In: *Proceedings of 2017 International Electrical and Energy Conference*. Beijing: IEEE Beijing Section, 2017: 583-588
- [17] 李嘉龙, 陈雨果, 刘思捷, 张轩, 马子明, 钟海旺. 考虑深度调峰的电力日前市场机制设计[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 9-15, 78
Li J L, Chen Y G, Liu S J, Zhang X, Ma Z M, Zhong H W. Mechanism design of day-ahead market considering deep peak regulation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(4): 9-15, 78 (in Chinese)
- [18] 吴静, 昌力, 曹斌. 可再生能源跨省区现货交易技术支持系统设计及实现[J]. 山东电力技术, 2019, 46(3): 13-18
Wu J, Chang L, Cao B. Design and implementation of renewable energy inter-regional spot market operation support system[J]. *Shandong Electric Power*, 2019, 46(3): 13-18 (in Chinese)
- [19] 徐青山, 吕亚娟, 丁逸行. 考虑储能动态效率的风储微网三阶段协调优化[J/OL]. 电网技术, 2020, 44(3): 816-822
Xu Q S, Lv Y J, Ding Y X. Three-stage coordinated optimization of wind-storage microgrids considering dynamic efficiency characteristics of energy storage [J/OL]. *Power System Technology*, 2020, 44(3): 816-822 (in Chinese)
- [20] 龚钢军, 王慧娟, 张桐, 陈志敏, 魏沛芳, 苏畅, 文亚凤, 刘向军. 基于区块链的电力现货交易市场研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6955-6966, 7129
Gong G J, Wang H J, Zhang T, Chen Z M, Wei P F, Su C, Wen Y F, Liu X J. Research on electricity market about spot trading based on blockchain[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(23): 6955-6966, 7129 (in Chinese)
- [21] 周磊, 朱明杰, 张政, 殷勤, 钱霄杰. 针对空调聚合负荷的作用时段差别化尖峰电价机制设计[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(3): 11-16
Zhou L, Zhu M J, Zhang Z, Yin Q, Qian X J. Design of progressive time-differentiated peak pricing mechanism for aggregated air-conditioning load [J]. *Power Demand Side Management*, 2019, 21(3): 11-16 (in Chinese)
- [22] 王玉萍, 刘磊, 李小璐, 陈皓勇, 钟佳宇, 石可, 刘雨梦. 调峰辅助服务费用分摊机制[J]. 广东电力, 2019, 32(2): 1-7
Wang Y P, Liu L, Li X L, Chen H Y, Zhong J Y, Shi K, Liu Y M. Allocation mechanism of peak load regulation auxiliary service cost[J]. *Guangdong Electric Power*, 2019, 32(2): 1-7 (in Chinese)
- [23] 郭文鑫, 赵瑞锋, 王彬, 李世明, 卢建刚, 李昊飞. 计及负荷需求响应的电力现货市场均衡研究[J]. 新型工业化, 2019, 9(7): 7-14
Guo W X, Zhao R F, Wang B, Li S M, Lu J G, Li H F. Research on the impacts of demand response on power spot market equilibrium[J]. *The Journal of New Industrialization*, 2019, 9(7): 7-14 (in Chinese)
- [24] 王文超, 庞丹, 成龙, 王振浩. 考虑电价型需求响应的交直流混合配电网优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1675-1682
Wang W C, Pang D, Cheng L, Wang Z H. Optimal dispatch approach for hybrid AC/DC distribution networks considering price-based demand response[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(5): 1675-1682 (in Chinese)