

# 电能量—调频市场联合优化模式研究

李舒佳<sup>✉</sup>, 谢敏, 李建钊, 黄彬彬, 林盛振  
(华南理工大学 电力学院, 广州, 510640)

**摘要:** [目的] 调频作为电力系统稳定运行的机制与保障, 其辅助服务市场化已提上日程。电能量-调频联合优化成为一种市场组织模式。以 PJM 市场为研究大背景, 对考虑调频资源性能差异的电能量-调频市场联合优化模式进行研究。[方法] 通过建立调频辅助服务定价调整模型, 以及电能量-调频联合优化模型, 应用于某实际省级电网进行仿真, 设置丰水期、枯水期典型场景, 并与国内电能量-调频分阶段出清模式进行对比, 从调频资源出清、对现货市场购电费用影响、调频市场活跃程度三个方面进行详细研究。[结果] 分阶段模式下, 快速调频资源具有明显优势, 且造成电能量市场购电费用上升。电能量-调频联合优化模式中, 快慢调频资源出清结果受定价调整策略影响, 电能量市场购电费用上升幅度较分阶段模式小, 且其调频市场出清价格以及波动程度均较分阶段模式高。[结论] 具有合理价格调整策略的电能量-调频联合优化模式有助于实现调频性能差异机组合理竞争, 激发市场活力。

**关键词:** 调频市场; 电能量市场; 联合优化; 分步出清

中图分类号: TM7; F426.61

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)03-0055-07

开放科学(资源服务)二维码:



## Study on the Joint Optimization Mode of Electric Energy and Regulation Market

LI Shujia<sup>✉</sup>, XIE Min, LI Jianzhao, HUANG Binbin, LIN Shengzhen

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** [Introduction] As the guarantee for the stable of the power system, the marketization of the regulation auxiliary service has been put on the agenda. The energy-regulation joint optimization becomes a mode of market organization. This paper aims to study the combined optimization model of the electric energy-regulation market considering the performance difference of frequency modulation resources in the PJM market background. [Method] Regulation auxiliary service pricing adjustment model and the joint clearing model of electric energy and regulation market considering the difference of fast and slow regulation resources and regulation performance was proposed in this paper, which were applied to the simulation of a real power grid to compared with domestic electric energy - regulation step clearing market. Two typical scenarios were set up in wet season and dry season. The clearing of regulation resources, the influence on the electricity purchase cost in the spot market and the active degree of regulation market were studied in detail. [Result] In the stepwise clearing mode, the rapid regulation resource has obvious advantages and causes the increase of electricity purchase cost in the electricity market. In the electricity-regulation joint optimization model, the clearing results of fast and slow regulation resources are affected by the pricing adjustment strategy and the increase rate of electricity purchase costs in the power market is smaller than that in the stepwise model, and the clearing price and fluctuation degree in the regulation market are higher than that in the stepwise clearing mode model. [Conclusion] The combined optimization mode of electric-regulation modulation with reasonable price adjustment strategy is helpful to realize reasonable competition among units with different regulation performance and stimulate market vitality.

**Key words:** regulation market; electric energy market; joint optimization; stepwise optimization

长期以来, 我国调频辅助服务依据两个细则确

定<sup>[1-3]</sup>, 在增加调频服务供给、激励机组改良性能等方面作用显著, 但存在按文件固定补偿无法体现调频资源差异的问题。2015年3月, 中共中央、国务院正式下发《关于进一步深化电力体制改革的若

收稿日期: 2020-02-26

修回日期: 2020-05-15

基金项目: 广东省自然科学基金项目“含高维动态相依新能源的电力系统经济调度随机优化理论与方法研究”(2018A0303130134)

干意见》中提出建立辅助服务新机制的指导意义<sup>[4]</sup>。在电力体制改革新形势下,如何发挥市场的资源配置作用,探索合适的调频市场机制成为一大热点问题。

国外调频辅助服务市场发展较早,较为成熟。目前以美国加州、PJM为代表的采用能量-调频联合出清的联合优化市场模式,以北欧为代表的采用能量在平衡市场出清的分阶段出清市场模式较为普遍。目前已有一些文献对国外调频辅助服务市场进行研究,文献[5-6]对比了典型国家和地区的辅助服务市场发展历程、辅助服务产品种类、交易时序及市场运作模式。文献[7-8]对美国调频辅助服务市场补偿机制、定价机制进行探讨。文献[9]分析了美国加州调频、旋转备用辅助服务市场的发展,并结合我国实际给出相关建议。国内目前仍缺乏成熟的现货市场建设,辅助服务市场仍处于初级阶段。目前广东、东北、山西等地区普遍采用按综合调频性能指标调整报价的分阶段出清市场模式,浙江采用电能量-调频联合出清模式<sup>[10-11]</sup>。针对国内调频辅助服务市场,文献[12]分析了AGC机组调频性能指标的设定。文献[13]介绍了山西电力调频市场组织流程以及运营实践情况,并给出了调频市场深化发展的相关建议。文献[14]提出了一种适用于国内中长期电量合约分解的调频市场设计,并验证了整体流程的有效性。文献[15]总结了英国、美国PJM、澳大利亚及北欧等典型辅助服务市场,并针对我国实际分析了调频产品的市场需求,并设计了三种市场竞价机制。文献[16]提出了调频需求容量的预测方法,并设计了适合我国电力市场发展不同阶段的调频备用市场设计。

国内调频市场的建设需要借鉴国内外经验,同时必须结合自身实际及实践<sup>[17]</sup>。因此基于不同调频模式,对实际电网进行仿真分析尤其重要。上述文献对调频市场机制以及定价机制进行了深入分析和讨论,但并未将相应的定价机制以及市场运营机制运用到国内实际电网,缺乏定量分析和实操仿真应用。本文的主要贡献在于将以PJM调频辅助服务定价机制、市场机制运用于国内某省级实际电网,并与分阶段模式进行对比,探索调频辅助服务在国内的实际应用,进而给出未来调频辅助服务开展的相关建议。

本文在这方面进行了探讨,以PJM市场为研究大背景,对考虑快慢调频资源以及调频性能差异的电能量-调频市场联合优化模式进行研究,具体包括调频资源性能不同所导致的申报调整策略问题、电能量-调频联合优化模型、调频市场出清和结算等方面,具体如下。

## 1 考虑快慢调频资源的申报调整

本文按照跟随调频指令响应时间的快慢划分调频资源品种A(以下简称品种A),调频资源品种B(以下简称品种B),两品种的差异在于品种A跟随低频信号指令动作,品种B跟随高频信号指令动作,在相同调度尺度内的动作频率不同。根据PJM的实际运行,品种B出清资源通常包括储能、水力机组、部分燃气机组;品种A出清资源通常包括部分燃气机组、联合循环机组、燃煤机组。此外由于储能可以单独参与也可以与燃煤机组、可再生能源机组联合参与市场,联合参与将大幅提升整体调频性能,故燃煤-储能联合单元在品种A和B中潜力巨大。投标人可以根据所辖机组性能以及投标策略,决定是否参与电能量申报、调频申报。调频市场参与者在日前自主选择申报品种A或B,同时申报调频容量、调频容量价格以及调频性能价格。

### 1.1 收益因子

为了在相同的时间尺度内实现A、B两种调频资源同台竞争,引入收益因子概念,其值是依据收益因子曲线计算得到。设定收益因子曲线形状在满足单调递减的情况下,可由市场运营机构自行设定且可按季节等信息更换。本文设定收益因子曲线如下图1所示,实际设计中曲线可分成更多段:

$$p_{c,i}^{bf,a} = \frac{p_{c,i}^{c,o} + p_{m,i}^{c,o}}{s_i} \quad (1)$$

式中:  $p_{c,i}^{bf,a}$  为用于计算收益因子曲线后的调整后价格(元/MWh);  $p_{c,i}^{c,o}$ 、 $p_{m,i}^{c,o}$  分别为单位调频资源未经调整的容量报价(元/MWh)以及里程报价(元/ΔMWh);  $s_i$  为调频资源的历史绩效分数,表征调节信号响应的及时性、准确性和精确性。

同时,对品种B的调频容量进行调整,其调整公式如式(2)所示:

$$C_{ap,i}^{bf,a} = C_{ap,i}^o \times s_i \quad (2)$$

式中:  $C_{ap,i}^{bf,a}$  为调频资源调整后的申报调频容量;

$C_{ap,i}^o$  为原始调频申报容量。

如图1所示收益因子的后续计算方法如下:

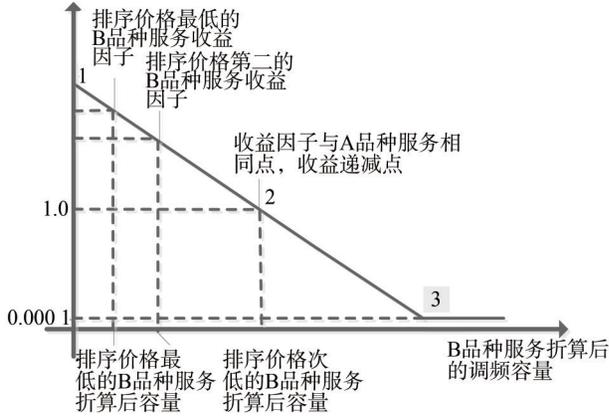


图1 典型收益因子曲线

Fig. 1 Typical benefit factor curve

1) 根据调整后的调频容量以及调频容量需求确定与纵轴交点1、收益递减点2的坐标, 绘制收益因子图。

2) 对调频资源品种B调整后的报价  $p_{c,i}^{bf,a}$  进行从低到高的排序, 其中资源  $i$  的收益因子对应的横轴坐标为排序小于  $i$  的所有调频资源对应的  $C_{ap,i}^{bf,a}$  累加。

对于调频品种B, 收益因子越高, 调整后的报价越低, 在市场出清过程中对应的有效调频资源越高。收益因子使得在排序点2之前的品种B更容易出清, 直到收益递减点2。点2的存在使得市场阻止过多调频资源品种B出清。

## 1.2 报价调整

为体现调频资源在调度尺度内的性能差别, 对任意参与市场的调频资源的容量报价以及里程报价进行调整:

$$p_{c,i}^{e,a} = \frac{p_{c,i}^{e,o}}{s_i^h \cdot f_{b,i}} \quad (3)$$

$$p_{m,i}^{e,a} = \frac{p_{m,i}^{e,o} a_{h,i}}{f_{b,i} s_i^h} \quad (4)$$

式中:  $p_{c,i}^{e,a}$  为调频申报资源  $i$  调整后单位容量价格 (元/MWh);  $p_{m,i}^{e,a}$  为调整后单位里程价格 (元/ $\Delta$ MWh);  $a_{h,i}$  为调频服务品种历史里程比 ( $\Delta$ MW/MW), 通常调频品种B的历史里程比是调频品种A的3倍左右;  $f_{b,i}$  为通过上节计算得到的该调频资源的收益因子。

经容量调整以及里程调整后的调频报价以及调频容量需求如下式所示:

$$p_i^r = p_{c,i}^{e,a} + p_{m,i}^{e,a} \quad (5)$$

$$R_c = \sum_{i \in I} s_i f_{b,i} C_{ap,i}^{in} \quad (6)$$

式中:  $P_i^r$  为调频资源总报价 (元/MWh);  $R_c$  为调度时段内调频资源总需求 (MW);  $C_{ap,i}^{in}$  为调频资源  $i$  的调频出清量 (MW);  $I$  为进行申报的调频资源总和。

本文所述申报调整与仅以历史调频性能指标进行报价调整后出清相比, 两者都反映了机组的调频性能。但引入收益因子后, 可以通过更改收益因子曲线设置使得部分申报品种B的历史调频性能指标较高的机组无法出清, 而部分申报品种A的历史调频性能指标较低的机组有参与市场竞争的机会。

## 2 电能—调频联合优化模型

### 2.1 目标函数

$$\begin{aligned} & [(\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T [C_{i,t}(P_{i,t}) + C_{i,t}^U] \\ & + \sum_{l=1}^{NL} \sum_{t=1}^T M [H_l^+ + H_l^-] \\ \min & \sum_{t \in T} \sum_{s=1}^{NS} M [H_s^+ + H_s^-] \\ & + \sum_{m=1}^{NM} p_{i,t}^{r,RA} P_{i,t}^{RA} \\ & + \sum_{m=1}^{NM} p_{i,t}^{r,RB} P_{i,t}^{RB} ] \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $N$  为可调机组数 (台), 包含水电机组与火电机组;  $T$  为调度周期, 本文取一天, 调度尺度为 15 min;  $P_{i,t}$  表示机组  $i$  在时段  $t$  参与能量市场部分出力 (MW);  $C_{i,t}(P_{i,t})$ 、 $C_{i,t}^U$  分别为机组  $i$  在时段  $t$  的运行费用报价 (元/MWh)、启动费用报价 (元/次), 其中机组运行费用  $C_{i,t}(P_{i,t})$  为多段阶梯线性函数;  $M$  是网络潮流约束松弛罚因子;  $H_l^+$ 、 $H_l^-$ 、 $NL$  依次代表线路  $l$  的正、反潮流松弛变量、线路数 (条);  $L_s^+$ 、 $L_s^-$ 、 $NS$  分别代表为断面  $s$  的正、反向潮流松弛变量、断面总数 (个)。  $p_{i,t}^{r,RA}$  是机组  $i$  品种A在  $t$  时刻调整后报价,  $P_{i,t}^{RA}$  是机组  $i$  的品种A调频出力 (MW);  $p_{i,t}^{r,RB}$  是调频资源品种B的调整后报价 (元/MWh);  $P_{i,t}^{RB}$  是机组  $i$  的调频出力 (MW)。

### 2.2 约束条件

#### 1) 系统调频容量需求

$$\sum_{t \in T} \left[ \sum_{i \in N_A} P_{i,t}^{RA} f_{b,i} s_i^h + \sum_{i \in N_B} P_{i,t}^{RB} f_{b,i} s_i^h \right] \geq P_{Rsys} \quad (8)$$

式中： $P_{i,t}^{RA}$ 为发电单元*i*调频资源品种A中标出力(MW)； $P_{i,t}^{RB}$ 为发电单元*i*调频资源品种B中标出力(MW)。

### 2) 调频出清约束

*i*号机组(调频品种A或调频品种B)的调频出力小于原始调频申报容量。

$$P_{i,t}^R \leq C_{ap,i}^0 \quad (9)$$

$$\left( P_{i,t}^R + \sum_{m=1}^{NM} P_{i,t,m}^R \right) u_{i,t} \leq \text{reg}_{\max} u_{i,t} \quad (10)$$

$$\left( \sum_{m=1}^{NM} P_{i,t,m}^R - P_{i,t}^R \right) u_{i,t} \leq \text{reg}_{\min} u_{i,t}$$

式中： $P_{i,t}^R$ 为调频中标资源(MW)；*m*为机组出力所处分段区间；NM为总分段数，本文取5； $P_{i,t,m}$ 为机组出力分段变量(MW)； $u_{i,t}$ 为机组状态变量，其值为1时开机、为0时停机； $\text{reg}_{\max}$ 、 $\text{reg}_{\min}$ 表征机组出力的最大最小范围(MW)。

联合优化市场模型考虑的其他约束条件有：功率平衡约束、系统正负备用约束、系统旋转备用约束、线路传输约束、断面潮流约束、机组功率平衡约束、机组出力约束、机组爬坡约束、机组最小连续开停时间约束。

## 3 联合优化中调频市场机制

对用户申报的调频容量和调频性能价格，分别形成调频容量边际价格、调频性能边际价格和调频边际价格，采用调频里程、调频容量分开结算的两部制结算机制。

### 3.1 日前市场出清价格

#### 1) 调频出清价格

出清的所有调频资源中，设定调频总报价 $p_i^r$ 与机会成本之和最大的资源称为边际调频资源，其调频出清价格如下式所示：

$$p_{\text{RMC}} = \text{Max}_{i \in N_p} (p_i^r + L_{\text{OC},i}) \quad (11)$$

式中： $N_p$ 表示所有中标的调频资源； $L_{\text{OC},i}$ 为调频资源*i*的机会成本(元/MWh)。

$$L_{\text{OC},i} = \frac{(L_{\text{MP},i} - p_E)}{s_i f_{b,i}} \quad (12)$$

式中： $L_{\text{MP},i}$ 表示节点边际价格(元/MWh)； $p_E$ 表示电能市场边际价格(元/MWh)。

#### 2) 调频里程出清价格

出清的所有调频资源中，调整后调频里程价格

$p_{m,i}^{\text{a}}$ 最高的资源为调频里程边际资源，其 $p_{m,i}^{\text{a}}$ 被称为调频里程出清价格 $p_m$ 。

#### 3) 调频容量出清价格

调频容量出清价格如下式所示：

$$p_{\text{CC}} = p_{\text{RMC}} - p_{\text{PC}} \quad (13)$$

## 3.2 市场结算

实际运营中在实时市场进行结算，对单个调度尺度内的调频容量、调频里程同时出清，根据小时内实时出清得到的3.1节所述市场出清价格计算取平均值，得到小时结算价格用于市场结算，采用调频容量和调频性能双结算的机制。

针对任一调频资源*i*，其调频结算公式如下所示：

$$g_{c,i} = C_{ap,i}^{\text{in}} s_i p'_c \quad (14)$$

$$g_{m,i} = C_{ap,i}^{\text{in}} s_i p'_m a_{r,i} \quad (15)$$

式中： $g_{c,i}$ 、 $g_{m,i}$ 分别为调频资源*i*获得的调频容量收益(元)； $s_i$ 为调频资源*i*实际运行中的调频性能指标； $a_{r,i}$ 为调频资源的实际里程调用率( $\Delta\text{MW}/\text{MW}$ )； $p'_c$ 、 $p'_m$ 分别为实时市场出清计算得到的小时调频容量、调频里程结算价格。

## 4 算例分析

本文将联合优化调频模式和分阶段优化应用于某省级实际电网进行分析(仅考虑220 kV以上主网)。该实际电网以水火电为主。该省统调机组包括86台发电机组，其中43台水电机组、41台火电机组、2台风电机组；1151个母线节点；220 kV电压等级以上线路621条。假设水电、火电机组均选择同时参与电能量、调频市场，暂不考虑风电参与调频，水电机组调频性能优越，具备跟随低频信号以及高频信号的能力，作为品种B或品种A申报都有较大潜力。本算例假设水电机组为获得更多的调频里程收益全部申报调频资源品种B。火电机组出于自身性能不足以及避免频繁动作增加的煤耗成本，申报调频品种A。采用2018年1月某日及2018年7月某日作为典型日分析。根据出力历史数据和某风电场出力历史数据，按文献[18]建立的短期风电预测模型得到负荷数据(含外送电数据)和风电出力预测曲线，如图2所示。水电机组、火电机组的能量报价及启停报价依实际设置如表1所示。本文的仿真环境为MATLAB R2016a，调用GAMS

CPLEX 求解器求解。

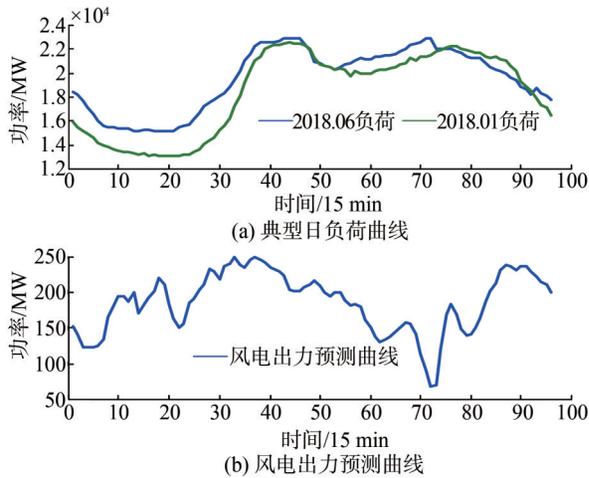


图 2 典型日负荷曲线及风电出力预测曲线

Fig. 2 Typical daily load curve and wind power output prediction curve

表 1 各类型机组成本

Tab. 1 Cost of each type of unit

价格/成本 类型	水电度电成本/ (元·kWh <sup>-1</sup> )	火电度电成本/ (元·kWh <sup>-1</sup> )	火电启停费用/ (万元·次 <sup>-1</sup> )
价格	0.24~0.26	0.35~0.5	15~30

### 4.1 调频市场日前出清

两种市场模式下资源出清情况如图 3 所示:

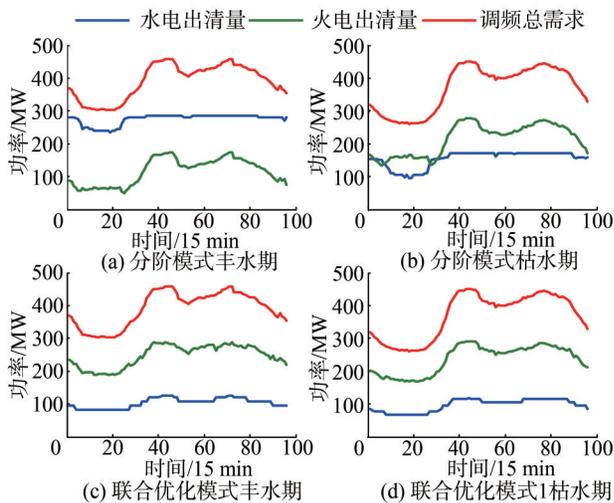


图 3 典型日调频资源出力

Fig. 3 Typical daily regulation resource output

对比图 3 可知, 分阶段模式下, 出清调频资源等于实际调频资源。在枯水期中, 由水电机组的简化水量约束以及日流量限制导致的修改上下限后的经济调度不满足约束的情况, 使得水电出清资源较

丰水期减少。同时, 由于火电的调频成本、历史调频性能指标均较差, 调整后的报价较高, 火电调频资源作为边际资源跟随需求波动。

联合优化模式下, 通过容量调整实现快、慢速资源的同时时间尺度竞争, 出清调频资源小于实际调频资源需求。对比表 2 中两种收益因子曲线, 模式 1 使得大部分品种 B 集中在图 1 收益递减点以右, 其资源出清如上图 3 (C) 所示, 模式 2 反之, 其资源出清如图 4 所示。

表 2 收益因子曲线设置

Tab. 2 Benefit factor curve setting

模式 1	点 1、2、收益因子曲线及 X 轴围成的面积 达实际调频需求一半
模式 2	按 $C_{ap,i}^{b,a} = C_{ap,i}^o \times s_i$ 折算后容量占实际 调频需求一半

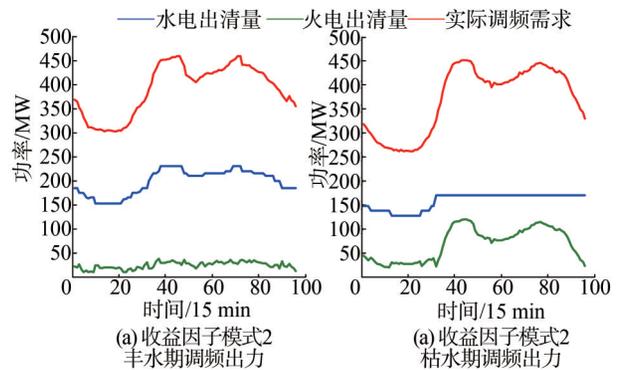


图 4 收益因子模式 2 调频资源出力

Fig. 4 Benefit factor model 2 regulation resource output

### 4.2 电能—调频联合市场对现货市场的影响

表 4 对比了考虑两种调频模式情况下, 现货市场优化出清后的购电费用的变化。分阶段模式下, 调频市场的存在会使得能量市场购电费用上升且上升幅度较联合优化模式显著。

表 4 联合市场模式对现货市场的影响

Tab. 4 The impact of the joint market model on the the optimization result of energy market 10<sup>6</sup>元

现货市场优化出清	丰水期	枯水期
不考虑调频	154.942 0	150.243 9
考虑分阶段调频	155.986 1	150.863 7
考虑联合调频	154.923 7	150.398 0

### 4.3 调频市场活跃度分析

价格的高低以及价格的波动程度侧面反映出市场的活跃程度。以丰水期典型日为例, 本文从调频

市场出清价格日内价格以及波动程度方面进行分析(如表5所示)。

表5 丰水期报价调整前后市场出清价格以及波动的对比

Tab. 5 Comparison of market clearing price and fluctuation before and after price adjustment in wet period 元/MWh

调整模式	RMCP		PCP		CCP	
	均值	波动率/%	均值	波动率/%	均值	波动率/%
无调整	482.466	1.87	14.066	4.3	468.34	1.9
模式1	590.325	3	97.069	9.4	493.256	2.4
模式2	539.525	2.25	62.842	13.9	476.683	1.9

市场主体参与市场的意愿程度受单位调频资源价格的影响。由表5可知,申报调整后的调频出清价格明显高于申报调整前,因此本文所提出的策略有利于市场主体参与调频市场。同时调整模式2的日前市场出清价格低于调整模式1,这是因为受限于实际电网电源结构,品种B均为成本相对较低的水电机组,且调整模式2出清的品种B明显高于品种A。申报调整后调频市场调频里程、调频容量、调频出清价格标准差均大于调整前,因此认为调整策略加强了市场价格波动性,有助于激发市场活力。

## 5 结论

本文将考虑电能量—调频联合优化市场出清模型以及分阶段出清模型用于某实际省级电网,从调频市场对现货市场影响、调频市场活跃度两个方面进行对比分析,得出含申报调整联合优化市场模式对现货市场购电费用影响相对较小,有助于激发市场活力。

立足于实际,我国目前大多数地区仍以按文件固定补偿或者通过修改机组出力上下限的分阶段式调频市场运营为主。分阶段式调频市场运营有着管理结构变动小、实现容易的优势。但随着可再生能源占比逐步提升,为消纳可再生能源,系统调频需求将不断增大,分阶段模式对于现货市场影响亦不断增大,因此认为调频市场组织形式应从便于目前管理的分阶段模式逐步向联合优化方式转变。此外在灵活资源“结构性不足”的地区,储能调频项目成为解决调频供需矛盾的重要手段。从协调常规调频机组与储能等快速调频资源收益角度,建议基于具体电源结构以及调频需求,设计不同调频资源品

种并制定合适的申报调整策略。从提升常规机组性能的角度,火电-储能聚合系统作为新的市场主体将受到广泛关注,研究这一类主体参与的电能量-调频市场联合出清问题也将成为未来电力市场发展的一大热门领域。

## 参考文献:

- [1] 国家能源局南方监管局. 南方区域发电厂并网运行管理实施细则(修订稿)[S]. 广州:国家能源局南方监管局,2017.
- [2] 国家能源局南方监管局. 南方区域发电厂辅助服务管理实施细则(修订稿)[S]. 广州:国家能源局南方监管局,2017.
- [3] 国家能源局华东监管局. 华东区域并网发电厂辅助服务管理实施细则[S]. 上海:国家能源局华东监管局,2018.
- [4] 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[EB/OL]. (2015-03-31)[2020-02-26]. <http://news.ncepu.edu.cn/xxyd/llxx/52826.htm>.  
The State Council of the PRC. Some opinions on further deepening the reform of electric power system [EB/OL]. (2015-03-31) [2020-02-26]. <http://news.ncepu.edu.cn/xxyd/llxx/52826.htm>.
- [5] 贺宜恒,周明,武昭原,等. 国外典型电力平衡市场的运作模式及其对中国的启示[J]. 电网技术,2018,42(11):3520-3528.  
HE Y H, ZHOU M, WU Z Y, et al. Study on operation mechanism of foreign representative balancing markets and its enlightenment for China [J]. Power System Technology, 2018, 42(11):3520-3528.
- [6] 何永秀,陈倩,费云志,等. 国外典型辅助服务市场产品研究及对中国的启示[J]. 电网技术,2018,42(9):2915-2922.  
HE Y X, CHEN Q, FEI Y Z, et al. Varieties of typical foreign ancillary service market products and enlightenment to China [J]. Power System Technology, 2018, 42(9):2915-2922.
- [7] 陈达鹏,荆朝霞. 美国调频辅助服务市场的调频补偿机制分析[J]. 电力系统自动化,2017,41(18):1-9.  
CHEN D P, JING Z X. Analysis of frequency modulation compensation mechanism in frequency modulation ancillary service market of United States [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18):1-9.
- [8] 陈中飞,荆朝霞,陈达鹏,等. 美国调频辅助服务市场的定价机制分析[J]. 电力系统自动化,2018,42(12):1-10.  
CHEN Z F, JING Z X, CHEN D P, et al. Analysis on pricing mechanism in frequency regulation ancillary services market of United States [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(12):1-10.
- [9] 喻洁,刘云仁,杨家琪,等. 美国加州辅助服务市场发展解析及其对我国电力市场的启示[J]. 电网技术,2019,43(8):2711-2717.  
YU J, LIU Y R, YANG J Q, et al. Analysis of development of California ancillary service market and its enlightenment to Chi-

- na's power market [J]. Power System Technology, 2019, 43(8):2711-2717.
- [10] 国家能源局南方监管局. 广东调频辅助服务市场交易规则(试行) [S]. 广州:国家能源局南方监管局, 2018.
- [11] 李明,焦丰顺,任畅翔,等. 新一轮电改下电力辅助服务市场机制及储能参与辅助服务的经济性研究 [J]. 南方能源建设, 2019, 6(3):132-138.
- LI M, JIAO F S, REN C X, et al. China's power auxiliary service market mechanism and the economics of energy storage system participating in auxiliary services [J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(3):132-138.
- [12] 易仕敏,陈青松,文福拴,等. 发电厂调节性能考核的新方法 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17):96-100.
- YI S M, CHEN Q S, WEN F S, et al. A new method for regulator performance assessment of generation units [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17):96-100.
- [13] 刘永奇,邹鹏,燕争上,等. 山西电力调频市场机制设计与运营实践 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(16):175-182.
- LIU Y Q, ZOU P, YAN Z S, et al. Mechanism design and operation practice of Shanxi power frequency regulation market in China [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16):175-182.
- [14] 董力,高赐威,喻洁,等. 考虑中长期电量合约分解的调频备用市场机制 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14):61-66+74.
- DONG L, GAO C W, YU J, et al. Frequency Regulation Reserve market mechanism considering decomposition of medium-term and long-term electricity contact [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14):61-66+74.
- [15] 宋栋. 新电改下我国辅助服务市场机制设计研究 [D]. 北京:华北电力大学(北京), 2018.
- [16] 董力. 适合我国电力市场发展不同阶段的调频备用市场设计 [D]. 南京:东南大学, 2018.
- [17] 朱继忠,叶秋子,邹金,等. 英国电力辅助服务市场短期运行备用服务机制及启示 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17):1-9+86.
- ZHU J Z, YE Q Z, ZOU J, et al. Short-term operation service mechanism of ancillary service in the UK electricity market and its enlightenment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17):1-9.
- [18] 屈伯阳,付立思. 基于ADQPSO-KELM风电功率短期预测模型的研究 [J]. 水电能源科学, 2019, 37(12):190-193+208.
- QU B Y, FU L S. Research on short-term wind power prediction model based on ADQPSO-KELM [J]. Water Resources and Power, 2019, 37(12):190-193+208.

#### 作者简介:



李舒佳

**李舒佳** (通信作者)

1996-, 女, 江西萍乡人, 华南理工电力学院硕士研究生, 主要研究方向为电力市场、虚拟电厂运营机制 (e-mail) 417520690@qq.com。

#### 谢敏

1978-, 女, 湖南衡阳人, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力市场、电力系统运行优化与控制 (e-mail) minxie@scut.edu.cn。

#### 李建钊

1993-, 男, 广西北海人, 华南理工硕士研究生, 主要研究方向为电力市场、电力系统运行优化与控制 (e-mail) 178048863@qq.com。

#### 黄彬彬

1997-, 女, 浙江温州人, 华南理工硕士研究生, 为主要研究方向为电力市场、电力系统运行优化与控制 (e-mail) hybn0708@163.com。

#### 林盛振

1997-, 男, 广西北海人, 华南理工硕士研究生, 主要研究方向为电力市场/电力系统运行优化与控制 (e-mail) 1045961396@qq.com。

(责任编辑 李辉)

## 广 告

- 粤港澳大湾区首座220千伏海上升压站成功安装 ..... 封二
- 国内首个电厂搬迁EPC总承包工程全面建成投产 ..... A5
- 《南方能源建设》学术品牌介绍 ..... 封三
- 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司 ..... 封四