

促进大规模风电消纳的双层调峰补偿机制研究

付亦殊¹, 陈红坤¹, 姜欣², 孙俊杰¹

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对目前常规机组在风电大规模并网时难以得到合理的调峰补偿、从而影响其调峰积极性的情况, 提出了一种基于 K-means 聚类的促进常规机组参与风电消纳的调峰补偿分摊方法。首先, 针对机组数量增多时计算“维数灾”的问题, 引入 K-means 聚类对机组进行分类, 分层对调峰补偿进行分摊。其次, 针对 Shapley 值法忽略了不同机组的调峰积极性存在差异的缺点, 引入机组调峰能力实现系数 α 对分摊方法进行修正, 将调峰补偿费用按照调峰机组的调峰能力实现情况进行分摊, 从而使补偿模型兼具公平性与激励性。最后, 结合算例证明了改进后模型对激励更多调峰机组参与调峰辅助服务的有效性。

关键词: 风电消纳; 调峰补偿; 合作博弈; K-means 聚类分析

A bi-layer peak-regulation compensation mechanism for large-scale wind power integration

FU Yishu¹, CHEN Hongkun¹, JIANG Xin², SUN Junjie¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: At present, it is difficult for conventional units to obtain reasonable peak-regulation compensation for large-scale wind power integration, thus affecting their peaking positivity. In response to this situation, a peak-regulation compensation allocation method aiming to promote the supply-side to better participate in wind power utilization is proposed based on K-means cluster method. Firstly, in the light of the problem of extremely large calculation when the number of units increases, K-means cluster method is introduced to classify the units, so that the peak compensations are apportioned hierarchically. Secondly, considering that Shapley value ignores the peaking motivation difference between each unit, the proposed method is modified with the realization coefficient of the peaking capacity (α) of each thermal unit, so that the compensation is allocated in accordance with it, and of both fairness and incentive. Finally, a numerical example proves the feasibility and validity of the proposed method to promote more units to participate in peak-regulation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507117).

Key words: wind power integration; peak-regulation compensation; cooperative game; K-means cluster analysis

0 引言

在我国现有能源结构下, 电力系统的主要调峰任务由火电机组承担^[1]。大规模风电并网时, 火电机组由于提供调峰服务不得不放弃普通市场下的电力交易机会, 频繁地调整出力也增加了机组的附加运行成本^[2]。而在我国现行的基于调度的考核和补偿机制下, 调峰成本完全由火电机组承担, 火电机组由于调峰产生的经济损失难以得到合理补偿, 故

而接纳风电的积极性不高, 风电场只能大量弃风^[3]。因此, 如何完善调峰补偿机制以激励火电机组的调峰积极性, 已成为电网运行中亟需解决的问题。

目前, 已有大量研究在机组调峰价值量化和调峰费用补偿方法方面取得了有效成果。调峰补偿费用的分摊问题本质上属于博弈问题, 在各种研究调峰辅助服务补偿费用分摊方法的文献中, 应用最广泛的当属合作博弈理论。文献[4-7]提出的水电机组调峰费用分摊方法是基于机组每天各时段的总出力变化量, 按比例计算调峰费用分摊量。文献[8-11]通过引入火电避让积极性、风电上网积极性等因素,

建立了风-火企业合作共生模型,对联盟整体收益增量在风电场和火电系统间的分配问题给出了最优解。文献[12-15]论证了调峰费用分摊问题的凸博弈特性,并利用核仁分摊法和 Shapley 值分摊法两种方法对调峰补偿费用的分摊进行了计算,但没有解决机组数量增多时计算的“维数灾”问题。

在此背景下,本文建立了计及弃风的风-火集中系统的机组组合模型,在此基础上引入 K-means 聚类对机组进行分类,分层对调峰补偿进行分摊;同时根据机组调峰能力实现系数 α 对双层分摊方法进行了修正;最后结合算例分析证明了改进后模型对激励更多调峰机组参与调峰辅助服务的有效性。

1 风-火集中系统的模型

本文以发电成本最低为向导,构建发电侧机组组合调度模型。

1.1 目标函数

在计算火电厂的调峰成本时,由于深度调峰会产生额外的成本,因而火电厂侧的总成本在煤耗成本的基础上还需考虑深度调峰的成本增加,表示如下。

(1) 基本调峰成本

将火电机组的出力在其最大和最小技术出力之间的部分作为基本调峰部分,计算这部分成本时主要考虑煤耗成本。当机组运行在基本调峰范围内时,其运行成本如式(1)所示。

$$C_1 = \sum_{i \in N} \sum_{t=1}^{24} u_{i,t} [a_i \cdot (P_{i,t})^2 + b_i \cdot P_{i,t} + c_i] \cdot P_{i,t} \cdot \Delta t \quad (1)$$

式中: C_1 为基本调峰成本; N 为火电机组总的集合; $u_{i,t}$ 为机组 i 在 t 时段的开停机状态值,为 0-1 变量,用于判断机组 i 的运行成本是否需要加入计算; a_i 、 b_i 和 c_i 均为耗量特性系数,是与机组特性和标煤价格有关的系数; $P_{i,t}$ 为机组 i 在 t 时段的输出功率, MW; Δt 为单位时段, h。

(2) 深度调峰成本

当机组出力降到最小技术出力以下进行深度调峰时,锅炉燃烧效率降低,需采取投油助燃措施,导致调峰成本增加^[16]。深度调峰时机组 i 比基本调峰时增加的成本表示如式(2)所示。

$$C_2 = \sum_{i \in N} \sum_{t=1}^{24} \mu_{i2} S_{i2} P_{i,t} \Delta t \quad (2)$$

式中: C_2 为深度调峰成本; μ_{i2} 为机组 i 是否深度调峰判断系数,为 0-1 变量,当机组 i 出力满足 $P_i \cdot R_{di} \leq P_{i,t} \leq P_i \cdot R_{bi}$ (P_i 是机组 i 的额定功率)时, $\mu_{i2} = 1$; R_{di} 为机组 i 允许的深度调峰下限百分比,

通常定为机组投油助燃都无法稳定运行时带负荷下限; R_{bi} 为机组 i 的基本调峰标准线; S_{i2} 为机组 i 深度调峰时单位电量增加的成本, 美元/kWh。

综上,一天内火电系统总的运行成本为

$$C = C_1 + C_2 \quad (3)$$

选择系统运行成本 C 最低为目标函数,即

$$\min C \quad (4)$$

1.2 约束条件

(1) 功率平衡约束

$$Pl = P_{wg1,t} + P_{wg2,t} + \sum_{i \in N} P_{i,t}, \forall t \in T \quad (5)$$

式中: Pl 为 t 时段总的负荷需求预测值, MW; $P_{wg1,t}$ 、 $P_{wg2,t}$ 为 t 时段接纳的风电量, MW。

(2) 机组出力约束

$$P_{i,\max} \cdot R_{d,i} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max}, i \in N \quad (6)$$

式中, $P_{i,\max}$ 为机组 i 的最大技术出力, MW。

(3) 风电接纳量约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{wg1,t} \leq P_{w1,t} \\ 0 \leq P_{wg2,t} \leq P_{w2,t} \\ P_{w1,t} = P_{wg1,t} + P_{loss1,t} \\ P_{w2,t} = P_{wg2,t} + P_{loss2,t} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $P_{w1,t}$ 为 t 时段风电场 A 出力的预测值, MW; $P_{w2,t}$ 为 t 时段风电场 B 出力的预测值, MW; $P_{loss1,t}$ 为 t 时段风电场 A 的弃风量, MW; $P_{loss2,t}$ 为 t 时段风电场 B 的弃风量, MW。

(4) 爬坡约束

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq r_{i,\text{up}} \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq r_{i,\text{down}} \end{cases}, i \in N \quad (8)$$

式中: $r_{i,\text{up}}$ 为机组 i 从 $t-1$ 时段到 t 时段功率最大增加值, MW; $r_{i,\text{down}}$ 为机组 i 从 $t-1$ 时段到 t 时段功率最大减小值, MW。

(5) 启停时间约束

$$\begin{cases} (u_{i,t-1} - u_{i,t})(T_{i,t-1}^{\text{on}} - M_i^{\text{on}}) \geq 0 \\ (u_{i,t} - u_{i,t-1})(T_{i,t-1}^{\text{off}} - M_i^{\text{off}}) \geq 0 \end{cases}, i \in N \quad (9)$$

式中: $u_{i,t}$ 为启停状态变量,为 0-1 变量,机组 i 处于开机状态时, $u_{i,t} = 1$; $T_{i,t-1}^{\text{on}}$ 和 $T_{i,t-1}^{\text{off}}$ 分别表示机组 i 截至 $t-1$ 时刻连续运行及停机时间; M_i^{on} 和 M_i^{off} 分别表示机组 i 允许的最小连续运行时间和停机时间。

(6) 备用容量约束

$$\sum_{i \in N} P_{i,\max} + P_{wg1,t} + P_{wg2,t} - Pl \geq P_R \quad (10)$$

式中, P_R 为系统旋转备用的一个确定值,一般采用最大负荷的 3%~5%。

2 双层调峰补偿分摊机制

调峰补偿分摊是指将风电场向调峰机组支付的调峰费用按一定的方法分摊至每台调峰机组上, 以促进获得补偿的机组积极参与调峰的过程。目前, 在调峰补偿分摊领域应用最为广泛的当属合作博弈理论^[17]。而 Shapley 值法是求解公共费用分摊博弈问题的估值解中应用最广泛的一种方法。

2.1 Shapley 值分摊

Shapley 值旨在提供一种合理分享合作博弈剩余的方案。按照 Shapley 值的思想, 参与人 i 所应分得的补偿值等于该参与人对每一个它所参与的联盟的边际贡献的平均值^[18]。Shapley 值解的具体表达式为

$$\phi_i(V) = \sum_{S \subseteq N \setminus i} \frac{s!(n-s-1)!}{n!} (V(S \cup \{i\}) - V(S)) \quad (11)$$

将 Shapley 值法应用于调峰补偿的分摊时, $\phi_i(V)$ 的实际意义是调峰机组 i 分得的调峰补偿; N 为所有调峰机组的集合; n 为系统中参与调峰的机组台数; S 为若干台机组(不含 i)组成的为促进风电消纳而调峰的联盟; s 为 S 中机组的数量; $V(S)$ 为调峰联盟 S 所能创造的调峰补偿收益(即火电系统调峰较基本调峰损失的收益); $V(S \cup \{i\}) - V(S)$ 为机组 i 加入 S 后对其调峰补偿的边际贡献。

2.2 调峰机组的聚类及调峰补偿组间分摊

由于不同容量的火电机组调峰能力存在较大差异^[19], 在研究火电机组有偿调峰补偿分摊机制的设计时, 需要考虑这种差异。同时, 在 Shapley 值法的计算过程中, 当调峰机组的数量 n 增大时, 联盟 S 的数量以指数关系随之增大; 对于任一调峰机组 i 来说, 为了准确计算其 Shapely 分摊值, 需要遍历 i 所有可能参与的 2^{n-1} 个联盟的调峰过程, 计算产生“维数灾”问题, 加之机组组合计算本身的复杂性, 调峰分摊问题变得难以求解; 为此, 本文采用 K-means 聚类分析法, 根据调峰机组调峰能力的差异性对其进行分类, 并在此基础上结合改进 Shapley 值法对调峰补偿的组间分摊进行计算。此时, $\phi_i(V)$ 是调峰类组 i 分得的调峰补偿; N 为所有调峰类组的集合。

对于火电机组的调峰聚类分析, 关键在于选取合理的调峰聚类指标。本文的主要目的是将火电机组按照调峰能力差异分为不同类别, 而机组的调峰裕度主要由其装机容量和最低不投油稳燃负荷状态下所对应的调峰率, 也即最高调峰率决定, 故本文选取额定容量 $P_{i,\max}$ 和最高调峰率 $(1-R_{di})$ 作为聚类分析的指标。

2.3 调峰补偿组内分摊

由于本文以调峰机组最高调峰率作为 K-means 聚类分析的指标, 故聚类后各类组内的调峰机组在调峰能力方面的差异很小, 因此本文按照类组内各机组的容量进行调峰补偿的组内分摊, 组内分摊结果可用式(12)表示。

$$\phi_{i,j}(V) = \frac{P_{j,\max}}{\sum_{j \in i} P_{j,\max}} \phi_i(V) \quad (12)$$

式中: $\phi_{i,j}(V)$ 为调峰类组 i 中的机组 j 分得的调峰补偿; $\phi_i(V)$ 为调峰类组 i 分得的调峰补偿。

由于调峰补偿机制的目的在于促进机组参与调峰, 故应能合理衡量不同机组提供调峰辅助服务的积极程度^[20]。然而, 根据前述方法对火电机组调峰损失进行补偿时只考虑了调峰类组对联盟收益的边际贡献及机组的容量区别, 忽略了其个体差异性。但不同容量的火电机组调峰能力存在着巨大的差异, 区域电网中每台机组调峰能力的实现程度也各不相同, 这对本身煤耗高、经济效益差的小机组是不合理的^[21]。因此, 这种一视同仁的分配方式对容量较小的调峰机组显然有失激励性。

本文提出一个考虑机组调峰能力实现程度的组内分摊改进方法, 调峰能力实现度高的机组分得的补偿金额也应相应地更高, 从而达到改善调峰补偿机制激励性和公平性的目的。

设类组 i 内机组 j 的新分摊权重为 $R_{i,j}$, 其计算公式为

$$R_{i,j} = \alpha_{i,j} / m_i \quad (13)$$

式中: m_i 为类组 i 中所含机组台数; $\alpha_{i,j}$ 为火电机组的调峰能力实现系数^[22], 代表机组 j 相对于所处类组平均调峰率的调峰实现情况, 用于评估其调峰能力的实现程度, 其计算公式如式(14)和式(15)。

$$\alpha_{i,j} = \frac{B_{i,j}}{B_i} \quad (14)$$

$$\begin{cases} B_{i,j} = \frac{\sum_{t \in K} (P_{j,\max} - P_{j,t}) \cdot \Delta t}{\sum_{t \in K} (1 - R_{dj}) P_{j,\max} \cdot \Delta t} \\ B_i = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} B_{i,j} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $B_{i,j}$ 代表机组 j 的实际调峰量占最高可调峰量的比例; B_i 是 $B_{i,j}$ 的平均值, 代表类组 i 内所有调峰机组的平均调峰能力实现度; K 代表调峰机组 j 开机调峰的时间集合; 显然, 所有权重 $R_{i,j}$ 满足和为 1, 则可得新权重与旧权重之差 $\Delta R_{i,j}$ 为

$$\Delta R_{i,j} = R_{i,j} - \frac{1}{m_i} \quad (16)$$

因为 $\Delta R_{i,j}$ 满足和为 0, 故可利用 $\Delta R_{i,j}$ 对双层分摊算法的结果进行修正, 新的组内分摊结果 $\phi'_{i,j}(V)$ 可以用式(17)、式(18)表示。

$$\phi'_{i,j}(V) = \phi_{i,j}(V) + \Delta \phi_{i,j}(V) \quad (17)$$

$$\Delta \phi_{i,j}(V) = \Delta R_{i,j} \times \phi_i(V) \quad (18)$$

当 $\Delta \phi_{i,j}(V)$ 大于零时, 表明机组 j 的调峰实现度

高于类组 i 内的平均水准, 故其分得的调峰补偿应该相对更高一些, 小于零时则相反。

3 算例分析

假设区域内有 17 台火电机组: 1~8 号机组为调峰机组, 可进行深度调峰以促进风电的消纳; 9~17 号机组为小容量启停机组, 不参与深度调峰(本文不考虑启停机组的补偿)。机组具体参数如表 1 所示。

表 1 机组参数

Table 1 Unit parameter

机组	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	7 号	8 号	9~13 号	14~17 号
$P_{i,\max}/\text{MW}$	600	550	363	350	300	180	162	150	80	55
$P_{\text{基本}}/\text{MW}$	330	302.5	200	192.5	165	100	89	82.5	20	10
$P_{\text{深度}}/\text{MW}$	200	184	145	140	120	90	81	75	20	10
$(r_{i,\text{up}}/r_{i,\text{down}})/(\text{MW/h})$	200	190	150	150	150	90	90	90	40	40
a_i	0.000 48	0.000 52	0.001 98	0.002 08	0.021 2	0.003 58	0.039 8	0.042 2	0.007 12	0.004 23
b_i	15.22	16.19	18	18	18	19.66	19.7	19.8	22.26	26.78
c_i	1 120	1 100	670	660	600	470	450	440	585	670
$(M_{i,\text{on}}/M_{i,\text{off}})/\text{h}$	8	8	6	6	6	3	3	3	1	1

其中: $P_{\text{基本}}$ 为有偿无偿基本调峰线的划分标准, $P_{\text{深度}}$ 为机组最小技术出力即深度调峰下限, 根据文献[23]的结论, 选取机组额定出力的 55%作为界限。

风电场装机容量为 1 550 MW, 该区域风电出力和负荷需求如图 1 所示。火电和风电上网电价分别取 0.36 元/kW·h 和 0.61 元/kW·h, 美元对人民币的汇率取 1 美元=6.287 元。

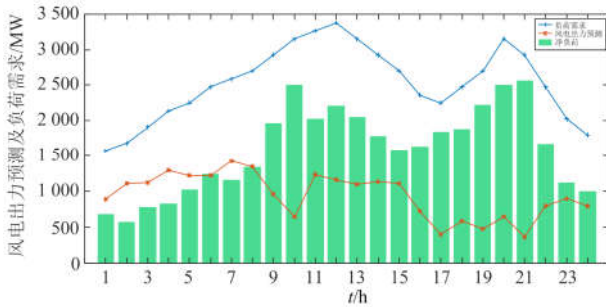


图 1 日内 24 h 风电出力及负荷预测

Fig. 1 24-hour wind power and system load forecasting curves

3.1 仿真优化结果

为了研究调峰机组采取不同调峰方式时系统的风电消纳情况及运行成本变化, 现分两个情景对模型进行仿真求解。

Case 1: 1~8 号机组采取基本调峰方式运行;

Case 2: 1~8 号机组采取深度调峰方式运行。

两种运行模式下的弃风量、风/火电侧收益及发电成本对比情况如表 2 所示。

表 2 风/火电侧收益及发电成本对比表

Table 2 Revenue and generation cost comparison

between two cases		
Case	1	2
风电场总弃风量/(MW·h)	4 215	123.75
风电侧总弃风率/%	18.56	0.54
风电侧并网总收益/美元	1 795 016	2 191 687
火电侧运行成本/美元	879 573	809 015
火电侧并网收益/美元	2 432 305	2 198 036
单位发电成本/(美元/MW·h)	20.71	21.08

对比 case 1 和 case 2 可知:

(1) 从整个系统的发电成本来看, case 1 中火电侧的平均发电成本为 20.71 美元/MW·h, case 2 中火电侧的平均发电成本为 21.08 美元/MW·h, 相对 case 1 增加了 0.37 美元/MW·h。

(2) 在 case 2 中, 一方面由于火电出力较少, 火电系统总的运行成本降低了 70 558 美元; 但另一方面因其减少的 4 092 MW·h 上网电量造成的收入损失为 234 269 美元, 综合看来其净收入减少 163 711 美元, 也即火电侧的调峰成本。

(3) case 2 中风电侧总的弃风量较 case 1 时减少 4 091.25 MWh, 风电并网总收益增加 396 671 美元。

(4) 若按现行的补偿机制, 调峰补偿费用由火电侧承担, 火电机组侧整体的收益损失为 163 711 美

元,显然有失公平;根据本文提出的调峰补偿机制,风电侧需向火电侧支付的调峰补偿费用(即火电厂侧的调峰成本)为 163 711 美元;此时,风电侧仍可因多并网风电而实现正收益 232 960 美元($=396\ 671-163\ 711$);而火电侧整体的收益由原来的-163 711 美元,变为 0,由此可见依据本文的分摊方法,可实现风电场侧和火电厂侧的利益双赢,更具公平性。

3.2 调峰补偿的组间分摊

采用 K-means 聚类分析方法对 1~8 号机组的调峰性能进行聚类分析,结果如图 2 所示,可知调峰机组分为三个类型。令 1~2 号为 A 组,3~5 号为 B 组,6~8 号为 C 组,则根据本文所提方法,采用 Shapley 值法在三组间进行调峰补偿的分摊。

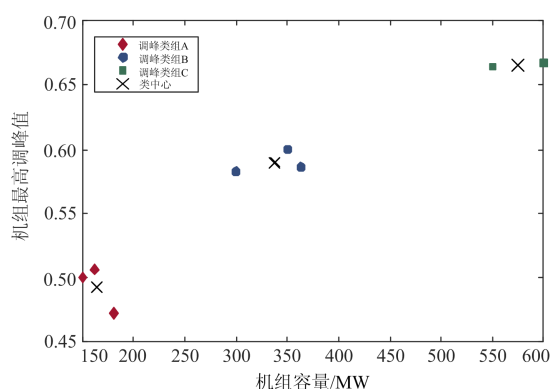


图 2 调峰机组 K-means 聚类分析图

Fig. 2 K-means cluster analysis of peaking units

将调峰类组 A、B、C 看作参与 Shapley 值分摊的 3 个局中人,可形成 8 个联盟(包括所有 S 和 $S \cup \{i\}$: $\{\emptyset\}$, $\{A\}$, $\{B\}$, $\{C\}$, $\{A, B\}$, $\{A, C\}$, $\{B, C\}$, $\{A, B, C\}$ (其中 $\{\emptyset\}$ 表示所有调峰类组均采用基本调峰运行方式,即 Case1)。对每一个联盟单

表 4 初步分摊结果及改进法分摊结果对比表

Table 4 Allocation result contrast of preliminary allocation and improved method

机组	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	7 号	8 号
调峰能力实现系数	0.225	0.775	0.313	0.207	0.480	0.246	0.388	0.367
现行补偿机制/美元	0	37 378.7	42 328.7	11 154.7	39 367.0	3 976.5	2 187.5	614.2
初步分摊/美元	38 097.4	34 922.6	43 927.7	42 354.5	36 303.8	14 145	12 730.5	11 787.5
改进法分摊/美元	17 991.6	55 028.4	41 407.1	26 885.2	54 293.7	10 773.6	14 830.5	13 058.9
改进法补偿价格/(美元/MW·h)	1.32	5.07	7.49	6.60	26.84	9.5	29.17	52.81

由图 3 和表 4 可以看出:

(1) 调峰能力实现度越高的机组获得的调峰费用补偿量越多。同时,调峰能力较弱的机组,如机组 4 和机组 6,在本文所提分摊机制下获得的调峰补偿多于现行补偿机制。

(2) 初步分摊结果中,虽然类组 B 中 3、4 号机

独进行深度调峰时对应的火电侧因深度调峰造成的收益损失值进行计算,结果如表 3 所示。

表 3 各联盟下的深度调峰费用

Table 3 Peak regulation fees of each alliance

联盟	深度调峰损失/美元	联盟	深度调峰损失/美元
$\{\emptyset\}$	0	$\{A, B\}$	234 269
$\{A\}$	137 427	$\{A, C\}$	186 743
$\{B\}$	211 651	$\{B, C\}$	211 651
$\{C\}$	91 332	$\{A, B, C\}$	234 269

根据式(11)计算可得 Shapley 值法的分摊结果为: A 组分得调峰补偿 73 020 美元, B 组分得调峰补偿 122 586 美元, C 组分得调峰补偿 38 663 美元。

3.3 调峰补偿的组内分摊

将改进算法应用于调峰补偿组内的计算,可得 1~8 号机组按容量比例分得的初步调峰补偿和计及其调峰能力实现系数的调峰补偿分摊结果,如图 3 和表 4 所示。其中,现行补偿机制采用调峰里程法^[24]计算,单位电量补偿价格取华中地区调峰补偿标准 100 元/MW·h,即 15 美元/MW·h。

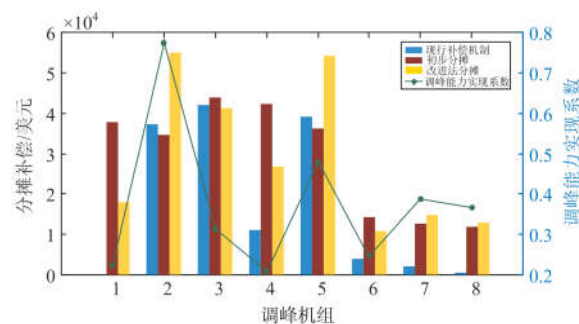


图 3 初步分摊结果及改进法分摊结果对比图

Fig. 3 Allocation result contrast of preliminary allocation and improved method

组在运行过程中调峰深度不同(3 号机组调峰能力实现度高于 4 号机组),但由于 Shapley 法将所有机组同一化,使得它们获得的初步组内调峰补偿与调峰能力实现系数不成正比。

(3) 改进法修正了 Shapley 值法在分摊时将调峰机组同化的缺点,提高了调峰能力实现度较高机组

(机组 2、5)的分摊权重,增加了其分得的调峰补偿费用;而调峰能力实现度相对较低的机组 4 和机组 6,在应用改进法之后分得的调峰补偿相应减少。因此,改进法能够从经济利益上刺激火电机组提高自身调峰深度,进而促进风电并网消纳。

4 结论

本文建立了计及弃风的风-火集中系统的机组组合模型,在此基础上引入 K-means 聚类对机组进行分类,分层对调峰补偿进行分摊;同时根据机组调峰能力实现系数 α 对双层分摊方法进行了修正;最后结合算例分析证明了改进后模型对激励更多调峰机组参与调峰辅助服务的有效性。

参考文献

- [1] 张顺, 葛智平, 郭涛, 等. 大规模新能源接入后系统调峰能力与常规电源开机方式关系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 106-110.
ZHANG Shun, GE Zhiping, GUO Tao, et al. Research on relationship between the capacity of systematic peak regulation and conventional power startup mode after access to large-scale new energy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 106-110.
- [2] 孙云涛, 宋依群. 基于调峰能力评估的省间调峰互济交易模式[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 86-91.
SUN Yuntao, SONG Yiqun. Peak load regulation trading mode for trans-provincial aid based on evaluation of system regulation capability[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 86-91.
- [3] 吴冠男, 张明理, 徐建源, 等. 适用于评估风电接纳能力的时序生产模拟算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 151-157.
WU Guannan, ZHANG Mingli, XU Jianyuan, et al. Time series production algorithm for evaluating wind power accommodation capacity[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 151-157.
- [4] 谢俊, 张晓花, 吴复霞, 等. 基于合作博弈论和工程方法的调峰费用分摊[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 16-23.
XIE Jun, ZHANG Xiaohua, WU Fuxia, et al. Peaking cost allocation using cooperative game theory and engineering concept[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 16-23.
- [5] 王献奇. 电力市场中水电厂间补偿效益分摊方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
WANG Xianqi. Allocation method of compensation benefits among hydropower plants in electricity market[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [6] 韩柳, 庄博, 吴耀武, 等. 风光水火联合运行电网的电源出力特性及相关性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 91-98.
HAN Liu, ZHUANG Bo, WU Yaowu, et al. Power source's output characteristics and relevance in wind-solar-hydro-thermal power system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 91-98.
- [7] 谢俊, 白兴忠, 魏建详, 等. 西北电网调峰成本补偿研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(3): 584-588.
XIE Jun, BAI Xingzhong, WEI Jianxiang, et al. Study on peaking cost compensation in Northwest China Power Grid[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2009, 43(3): 584-588.
- [8] 李伟, 杨强华, 张宏图, 等. 基于合作博弈的区域电力市场中消纳弃风激励机制研究[J]. 可再生能源, 2014, 32(4): 475-480.
LI Wei, YANG Qianghua, ZHANG Hongtu, et al. Incentive mechanism research on accommodation of wind power in regional electricity market based on cooperative game[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(4): 475-480.
- [9] 胡军峰. 风电接入引致电网辅助服务成本分摊机制及模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
HU Junfeng. The model of cost allocation mechanism of ancillary services for wind intergration[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [10] 周子程, 王海霞, 吕泉, 等. 计及主客体因素的火电机组深度调峰补偿模型[J]. 南方电网技术, 2017, 11(5): 47-55.
ZHOU Zicheng, WANG Haixiang, LÜ Quan, et al. Deep peak load regulation compensation model of thermal power units considering subjective and objective factors[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(5): 47-55.
- [11] ELA E, KIRBY B, NAVID N, et al. Effective ancillary services market designs on high wind power penetration systems[C] // Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, CA, USA: 1-8.
- [12] 胡佳. 基于合作博弈解的调峰成本补偿研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
HU Jia. Research on peaking cost compensation using cooperative game[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [13] XIE Jun, BAI Xingzhong, GAN Deqiang. Quantification and allocation of peaking costs of hydro-thermal power systems[C] // 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, July 20-24, 2008, Pittsburgh, PA, USA: 1-8.

- [14] 刘海波. 东北电网风电调峰辅助服务机制完善及交易优化模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
LIU Haibo. The study on mechanism improvement and transaction optimization model of peak-regulation ancillary service of wind power for northwest power grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [15] BALAGOPALAN S, ANOOJA V S. Cooperative game theory for sharing transmission charges in electricity markets[C] // IET Conference on Reliability of Transmission and Distribution Networks, November 22-24, 2011, London, UK: 1-6.
- [16] 卢洵, 左郑敏, 林勇, 等. 广东“十三五”电源调峰联合运行策略优化[J]. 广东电力, 2018, 31(7): 98-105.
LU Xun, ZUO Zhengmin, LIN Yong, et al. Strategy optimization for combined operation of power source and peak load regulation in the 13th five-year plan period of guangdong province[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(7): 98-105.
- [17] 王树东, 杜巍, 林莉, 等. 基于合作博弈的需求侧响应下光储微电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 129-137.
WANG Shudong, DU Wei, LIN Li, et al. Optimal allocation of photovoltaic energy storage microgrid under the demand side response based on cooperative game[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 129-137.
- [18] 武玉婧. 在 n 人博弈中局部合作和成本分摊方法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
WU Yujing. The research on cost allocation and partial of cooperation method in n -person game theory[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [19] 王鹏, 张灵凌, 梁琳, 等. 火电机组有偿调峰与无偿调峰划分方法探讨[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(9): 87-90.
WANG Peng, ZHANG Lingling, LIANG Lin, et al. A method for division of paid peak-regulation and free peak-regulation for thermal power units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(9): 87-90.
- [20] 张健, 曹志东. 发电侧电力市场辅助服务付费新模型[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(10): 9-12.
ZHANG Jian, CAO Zhidong. A novel model for ancillary service payment in generation market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(10): 9-12, 23.
- [21] 张轩, 陈雨果, 白杨, 等. 促进节能减排的中长期电力市场机制设计[J]. 广东电力, 2018, 31(6): 25-31.
ZHANG Xuan, CHEN Yuguo, BAI Yang, et al. Design on medium-term and long-term electric market mechanism to promote energy-saving and emission reduction[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(6): 25-31.
- [22] 赵晓丽, 王玫, 赵越, 等. 基于火电机组容量差异的调峰辅助服务补偿机制改进模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 57-61.
ZHAO Xiaoli, WANG Mei, ZHAO Yue, et al. A model of compensation mechanism on peak-regulating ancillary services based on capacity variance across thermal power units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 57-61.
- [23] 林俐, 邹兰青, 周鹏, 等. 规模风电并网条件下火电机组深度调峰的多角度经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 21-27.
LIN Li, ZOU Lanqing, ZHOU Peng, et al. Multi-angle economic analysis on deep peak regulation of thermal power units with large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 21-27.
- [24] 谢俊, 李振坤, 章美丹, 等. 机组调峰的价值量化与费用补偿[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 271-276.
XIE Jun, LI Zhenkun, ZHANG Meidan, et al. Peaking value quantification and cost compensation for generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 271-276.

收稿日期: 2018-03-11; 修回日期: 2018-04-19

作者简介:

付亦殊(1995—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划; E-mail: 924986066@qq.com

陈红坤(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统及其自动化、电力系统运行与控制; E-mail: chkinsz@163.com

姜欣(1991—), 女, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统规划、电力系统运行与控制。E-mail: 798008459@qq.com

(编辑 魏小丽)