



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2306095

引用格式:唐震,宋述停,白雪婷,等.基于主从博弈的多源调频容量分配策略[J].科学技术与工程,2024,24(18):7693-7700.

Tang Zhen, Song Shuting, Bai Xueting, et al. Capacity allocation strategy of multi-source frequency modulation via stackelberg game[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(18): 7693-7700.

基于主从博弈的多源调频容量分配策略

唐震¹, 宋述停², 白雪婷¹, 王凯丰^{3*}

(1. 国网山西省电力科学研究院, 太原 030001;
2. 国网山西省电力公司, 太原 030021; 3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要 随着新能源在电网中所占比例的不断增长,仅依赖火电机组难以满足新型电力系统的高质量调频需求,因此提出了一种基于主从博弈理论的风-光-水-火多源调频系统容量分配方法,该方法在确保电网调频安全性的同时兼顾了电网的经济性。该文所提方法将火电机组作为上层领导者,风-光-水机组作为下层跟随者,求解参与调频各机组在完成调频任务时的最优交互策略。首先,将参与调频各机组的调频特性嵌入到主从博弈框架下,建立风-光-水-火多源调频系统的主从博弈模型。其次,通过求解主从博弈模型得到参与调频各机组的最优调频容量。然后,采用改进的Shapley值法对风-光-水机组的调频收益进行优化。最后,通过算例验证该文所提方法的有效性。结果表明,与已有方法相比主从博弈方法能够使参与调频各机组的调频容量分配更加合理同时增加了参与调频各机组的调频收益。

关键词 多源调频; 主从博弈; 调频容量; 改进Shapley值; 调频收益

中图分类号 TM732; 文献标志码 A

Capacity Allocation Strategy of Multi-source Frequency Modulation via Stackelberg Game

TANG Zhen¹, SONG Shu-ting², BAI Xue-ting¹, WANG Kai-feng^{3*}

(1. State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, China;
2. State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030021, China;
3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

[Abstract] With the increasing proportion of new energy in the power grid, it is difficult to meet the high-quality frequency modulation requirements of the power system only relying on traditional thermal power units. A capacity allocation method of the wind-photovoltaic-hydropower-thermal multi-source frequency modulation system based on the stackelberg game theory was proposed. This method ensures the safety of power grid frequency regulation while also taking into account the economy. Firstly, the thermal power unit was taken as the leader and the wind-photovoltaic-hydropower units were regarded as the followers. Secondly, by solving the stackelberg game model, the optimal frequency regulation capacity of each unit participating in frequency regulation was obtained. Then, the improved Shapley value method was used to optimize the revenue of the wind-photovoltaic-hydropower units. Finally, the effectiveness of the proposed method was verified. The result indicates that, compared with existing methods, the stackelberg game model can improve the allocation of frequency regulation capacity for each unit participating in frequency regulation, making it more reasonable and increasing the revenue of the frequency regulation.

[Keywords] multi-source frequency modulation; stackelberg game theory; frequency modulation capacity; improved Shapley value; frequency modulation revenue

新能源机组装机容量的日益增长推进了高效低碳的能源体系转型,然而光伏、风力发电的不稳定性使得完全依赖新能源发电无法保证电网的安全稳定运行,因此中外学者对新能源并网前提下电网的安全运行问题展开了广泛的研究。文献[1]针

对新能源并网条件下产生电网输出功率不稳定问题,提出了一种计及正负双序电流的优化控制策略。文献[2]从供电可靠性和发电经济性等方面评价了韩国新能源并网安全问题,并基于能源利用效率最大化提出了新能源结构的改进方法。由此可

收稿日期: 2023-08-08 修订日期: 2024-04-08

基金项目: 国网山西省电力公司科技项目(52053022000G)

第一作者: 唐震(1966—),男,汉族,陕西潼关人,硕士,正高级工程师。研究方向:继电保护、电力电子化电力系统风险防控。E-mail: tang-zhen@sx.sgcc.com.cn。

* 通信作者: 王凯丰(1994—),男,汉族,北京人,硕士。研究方向:大规模储能运行控制技术。E-mail: wkf9987@126.com。

见,新能源发电装置的大规模并网给系统带来了大量的功率扰动,使得系统的调频需求增加。目前,多源调频系统已经成为缓解电网频率波动问题的主要措施,文献[3]针对新能源大规模并网背景下系统调频能力不足的问题,提出一种考虑新能源场站动态减载参与系统调频的电力系统调度方案。文献[4]针对电动汽车在丹麦西部电力系统中参与自动发电控制(automatic gain control, AGC)调频的应用基础上提出了一种按照汽车可用容量定比例分配调频指令的控制策略,可以减少系统调频容量需求,缓解系统频率波动。文献[5]提出双馈风电机组附加转速优化虚拟惯性控制策略通过快速释放或吸收能量来减弱电网频率波动。因此,多源调频系统具有可以在完成调频任务的同时最大程度地保证电网安全稳定运行。

目前关于多源调频系统的研究主要集中在单机调频领域。文献[6]提出了随机条件下风电机组参与调频的能量联动分配机制,但在此过程中没有考虑参与调频机组的经济特性。文献[7]提出光伏可以通过减载控制等策略参与电力系统调频,但并未研究传统能源和新能源机组配合参与调频。文献[8]研究了一种火储联合调频方案,但未考虑调频的成本及利润。文献[9]研究了多源联合调频的调频偏差最小化问题,但同样未考虑各机组的调频性能及参与调频各机组的经济特性。已有结果大多仅考虑由传统能源或者新能源参与的调频系统,并没有考虑新能源与传统能源综合参与的多源调频问题。此外,已有结果也没有考虑参与调频各机组的经济特性。

博弈理论已经广泛应用于电力系统的交互决策问题中^[10-13]。文献[10]利用非合作博弈理论建立了能源侧和负荷侧的相互作用关系模型。文献[11]借助非合作博弈理论分析多微电网的交易模式。文献[12-13]应用主从博弈理论建立了微电网与用户间的最优定价博弈模型。已有结果显示,与其他方法相比博弈理论在处理电力系统交互问题时能够充分利用博弈参与者的经济特性。

综上所述,本文研究利用主从博弈理论研究风光-水-火多源调频系统的容量分配问题。此外,鉴于收益分配与各机组参与调频积极性之间的关系,本文研究利用改进的 Shapley 值法对风光-水机组的内部收益进行调整优化。

1 基于主从博弈的多源调频模型构建与求解

1.1 主从博弈理论

主从博弈属于动态非合作博弈,博弈模型分为上

层领导者和下层跟随者,上层领导者通过自身的策略引导下层跟随者的决策,下层跟随者以上层领导者的策略信息作为参数结合自身因素进行方案决策。首先,上层领导者将可能选择的策略形式传递给下层跟随者,下层跟随者在已知信息的基础上按自身利益最大化做出决策,得到策略需求曲线函数。然后,上层领导者根据下层跟随者的策略需求曲线函数对预选策略进行调整。最后,求出主从博弈的均衡解,从而使上层领导者和下层跟随者获得的利益最优^[14]。

1.2 多源调频系统主从博弈模型求解

在多源调频系统中,风电、光伏、水电、火电的调频特点与经济性特点各不相同。一方面,火电机组具有充足的可调容量和可调范围,能够满足电网最大的负荷增减变量需求,火电机组作为传统调频能源凭借其可靠性担负着电网调频中压舱石的作用。另一方面,风电、光伏、水电机组基于火电机组申报的调频容量来确定自身的申报调频容量,而它们的优化结果又会反作用于火电机组的申报调频容量。这种交互过程符合主从结构的动态博弈情况,因此,本文研究选择火电机组作为上层领导者,其他参与调频机组(风-光-水机组)作为下层跟随者,根据参与调频各机组的单位成本、功率平衡、调频容量等约束条件,建立如图1所示的风-光-水-火多源调频系统主从博弈模型。

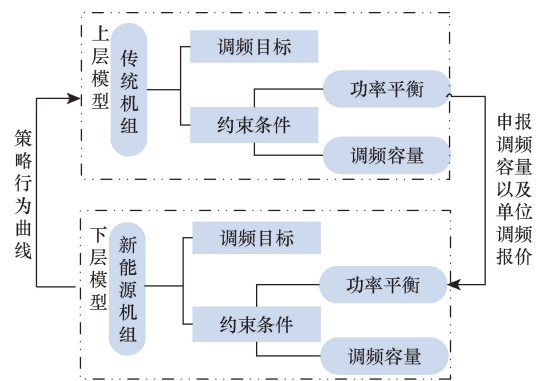


图1 多源调频系统主从博弈模型

Fig. 1 Stackelberg game model of multi-source frequency modulation system

1.2.1 策略需求曲线函数

根据风-光-水-火多源调频系统中各机组的调频特性以及主从博弈的基本结构,风-光-水机组在已知火电机组调频信息的前提下给出决策,得到主从博弈模型上下层间的策略需求曲线函数,即

$$S(x_T, x_{NE,i}) = D_1 - D_2 \left(x_T + \sum_{i=1}^3 x_{NE,i} \right) \quad (1)$$

式(1)中: $S(x_T, x_{NE,i})$ 为主从博弈模型上下层间的

策略需求曲线函数; D_1 、 D_2 为需求参数且 $D_1 > 0$, $D_2 > 0$; x_T 为火电机组在决策下的调频功率; $x_{NE,i}$ 为风-光-水机组 i 在对应策略下的调频功率。

1.2.2 上层领导者(火电机组)调频模型

(1) 火电机组的目标函数

火电机组的目标函数(调频收益函数)为

$$\max f_T = S(x_T, x_{NE,i})x_T - c_T x_T \quad (2)$$

式(2)中: f_T 为火电机组的调频收益; c_T 为火电机组的调频单位成本费用。

(2) 火电机组的约束条件为

$$\begin{cases} x_T \leq \min \{2(P_{t,\max}^T - P_t^T), 2(P_t^T - P_{t,\min}^T), P_c^T\} \\ x_T + x_{NE,i} \geq x_L \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: P_t^T 为火电机组在 t 时刻出力; $P_{t,\max}^T$ 为火电机组在 t 时刻最大出力; $P_{t,\min}^T$ 为火电机组在 t 时刻最小出力; P_c^T 为火电机组申报的调频容量; x_L 为 t 时刻风-光-水-火多源调频系统所需负荷的调频容量。

1.2.3 下层跟随者(风-光-水机组)调频模型

(1) 风-光-水机组的目标函数(调频收益函数)为

$$\max f_{NE,i} = S(x_T, x_{NE,i})x_{NE,i} - c_{NE,i}x_{NE,i} \quad (4)$$

式(4)中: $f_{NE,i}$ 为风-光-水电机组 i 的调频收益; $c_{NE,i}$ 为风-光-水电机组 i 的辅助调频单位成本费用。

(2) 风-光-水机组的约束条件为

$$\begin{cases} x_{NE,i} \leq \min \{2(P_{t,\max}^{NE,i} - P_t^{NE,i}), \\ 2(P_t^{NE,i} - P_{t,\min}^{NE,i}), P_c^{NE,i}\} \\ x_T + x_{NE,i} \geq x_L \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: $P_t^{NE,i}$ 为风-光-水机组 i 在 t 时刻出力; $P_{t,\max}^{NE,i}$ 为风-光-水机组 i 在 t 时刻的最大出力; $P_{t,\min}^{NE,i}$ 为风-光-水机组 i 在 t 时刻的最小出力; $P_c^{NE,i}$ 为风-光-水机组 i 申报的调频容量。

1.2.4 多源调频系统主从博弈的均衡解

将需求曲线函数式(1)代入风-光-水机组的调频收益函数式(4),在策略空间范围内更新决策,从而调整在决策下的调频功率 $x'_{NE,i}$,使风-光-水机组的调频收益函数式(4)更新为

$$\max f'_{NE,i} = \left[D_1 - D_2 \left(x_T + \sum_{i=1}^3 x'_{NE,i} \right) \right] x'_{NE,i} - c_{NE,i}x'_{NE,i} \quad (6)$$

根据式(6),风-光-水电机组 i 基于主从博弈理论反复更新策略,直至达到最优调频容量 $x_{NE,i}^*$,即

$$x_{NE,i}^* = \frac{D_1 - D_2 \left(x_T + \sum_{j=1, j \neq i}^3 x_{NE,j} \right) + c_T - c_{NE,i}}{2D_2} \quad (7)$$

风-光-水-火多源调频系统的功率平衡条件为

$$x_T^*(t) + x_{NE,i}^*(t) = x_L(t) \quad (8)$$

火电机组根据风-光-水电机组更新的最优调频容量 $x_{NE,i}^*$ 更新自身决策,采用更新后的决策得到最优调频容量 x_T^* ,即

$$x_T^* = \frac{D_1 x_L - D_2 \left(x_T + \sum_{i=1}^3 x_{NE,i}^* \right) - c_T}{2D_2} \quad (9)$$

风-光-水电机组与火电机组分别根据式(7)和式(9)确定主从博弈的均衡解即为参与调频各机组的最优调频容量。

1.3 多源调频系统主从博弈模型求解

通过使用 MATLAB R2020a 中 CPLEX 求解器对多源调频系统主从博弈模型进行求解,具体步骤如下。

步骤1 根据多源调频系统主从博弈模型,设置参与调频各机组的调频模型参数和约束条件。

步骤2 初始化参与调频各机组的功率分配方案,开始多源调频系统主从博弈过程。

步骤3 风-光-水机组根据火电机组申报的调频容量确定风-光-水机组的调频容量并建立策略需求曲线函数,火电机组根据风-光-水电机组更新的申报调频容量进一步更新自身的申报策略。

步骤4 对式(7)和式(9)进行求解,最终确定参与调频各机组的最优调频容量。通过设定最大迭代次数,判断主从博弈模型是否达到均衡,若达到均衡,则输出最优调频容量,否则重复步骤3。

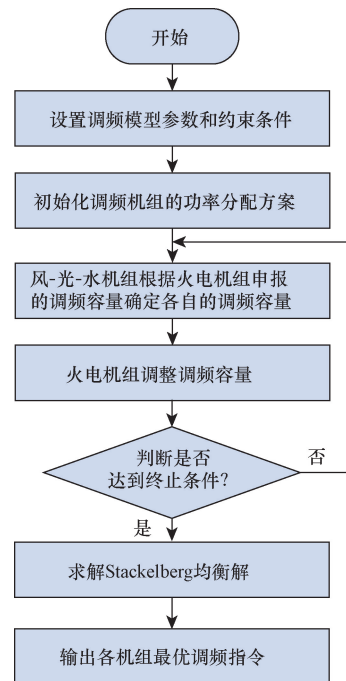


图2 主从博弈模型求解流程图

Fig. 2 Flow chart of solving stackelberg game model

2 改进 Shapley 值法优化风-光-水机组的调频收益

2.1 Shapley 值理论

由 Shapley 值理论^[15]可知,合作关系中各方的 Shapley 值为

$$\varphi_i(f) = \sum_{M \subset N - \{i\}} \frac{M!(N-M-1)!}{N!} [f(M \cup \{i\}) - f(M)] \quad (10)$$

式(10)中: f 为定义在 N 的特征函数; N 为玩家总个数集; $f(M)$ 为子集 M 的贡献量; $f(M \cup \{i\})$ 为子集 M 加上个体 i 后所取得的贡献; $f(M \cup \{i\}) - f(M)$ 为成员 i 在联盟中的贡献,即成员 i 的边际贡献量; $\varphi_i(f)$ 为成员 i 的 Shapley 值。

通过式(10)可知,Shapley 值的原理是根据合作关系中各方的贡献使收益分配更加公平合理。

合作关系中成员 i 的 Shapley 值是成员 i 对于一个合作项目贡献量的平均值,合理分配是否公平主要考察边际贡献。成员 i 加入合作关系 S 的边际贡献公式为: $f(M \cup \{i\}) - f(M)$,进一步地,成员 i 的 Shapley 值公式为: $\varphi_i = \sum_{r \in R} f_i[S_i(r)]/S!$ ^[16]。

根据风-光-水机组参与调频的出力情况,设风电机组、光伏机组、水电机组的出力分别为 P_W 、 P_{Pv} 、 P_H ,参与调频的各机组合作时的出力为 $P_{W,Pv}$ 、 $P_{W,H}$ 、 $P_{Pv,H}$ 、 $P_{W,Pv,H}$,则合作过程需要考虑以下 6 种情况,如表 1 所示。

根据表 1 可以得到风电机组出力的 Shapley 值为

$$\varphi_W = \frac{1}{6} [P_W + (P_{W,Pv} - P_{Pv}) + (P_{W,Pv,H} - P_{Pv,H}) + (P_{W,H} - P_H) + (P_{W,Pv,H} - P_{Pv,H}) + P_W] \quad (11)$$

光伏机组出力的 Shapley 值为

$$\varphi_{Pv} = \frac{1}{6} [(P_{W,Pv} - P_W) + (P_{W,Pv,H} - P_{W,H}) + P_{Pv} + P_{Pv} + (P_{W,Pv,H} - P_{W,H}) + (P_{Pv,H} - P_H)] \quad (12)$$

水电机组出力的 Shapley 值为

$$\varphi_H = \frac{1}{6} [(P_{W,Pv,H} - P_{W,Pv}) + (P_{W,H} - P_W) + P_H + (P_{W,Pv,H} - P_{W,Pv}) + (P_{Pv,H} - P_{Pv}) + P_H] \quad (13)$$

式(13)中: φ_W 、 φ_{Pv} 、 φ_H 分别为风电机组、光伏机组和水电机组出力的 Shapley 值。

因此,风电、光伏、水电机组收益分别为

$$f_W = \frac{\varphi_W}{\sum_{i=1}^3 x_{NE,i}} \sum_{i=1}^3 f_{NE,i} \quad (14)$$

$$f_{Pv} = \frac{\varphi_{Pv}}{\sum_{i=1}^3 x_{NE,i}} \sum_{i=1}^3 f_{NE,i} \quad (15)$$

$$f_H = \frac{\varphi_H}{\sum_{i=1}^3 x_{NE,i}} \sum_{i=1}^3 f_{NE,i} \quad (16)$$

式中: f_W 、 f_{Pv} 、 f_H 分别为风电机组收益、光伏机组收益和水电机组收益。

2.2 改进 Shapley 值法优化风-光-水机组的调频收益

为了更好地调动风电机组、光伏机组和水电机组参与调频的积极性,在 2.1 节给出的 Shapley 值理论基础,本文研究提出一种改进 Shapley 值法来优化风-光-水机组的调频收益。鉴于边际贡献值与参与调频各机组的相关性配适情况有关,因此设计一个综合考虑风-光-水机组的各自的平均调频速度,响应时间和平均调频精度,同时根据风电机组、光伏机组和水电机组的实际调频特性的综合性能指标 K_W^* 、 K_{Pv}^* 、 K_H^* ,通过结合综合性能指标 K_W^* 、 K_{Pv}^* 、 K_H^* 与 Shapley 值法得到改进 Shapley 值,能够更好地调动风电机组、光伏机组和水电机组参与调频的积极性,并且风-光-水机组收益的分配更加合理和均衡。

首先,引入如下指标:平均调频速度 k_1 、响应时间 k_2 和平均调频精度 k_3 。

平均调频速度 k_1 为机组响应调度指令的速度与调频机组的调频速度之比,其公式为

表 1 风-光-水机组出力边际贡献值

Table 1 Output marginal contribution value of the wind-photovoltaic-hydropower units

可能性	合作顺序	风电机组出力的边际贡献值	光伏机组出力的边际贡献值	水电机组出力的边际贡献值
1/6	W, Pv, H	P_W	$P_{W,Pv} - P_W$	$P_{W,Pv,H} - P_{W,Pv}$
1/6	W, H, Pv	P_W	$P_{W,Pv,H} - P_{W,H}$	$P_{W,H} - P_W$
1/6	Pv, W, H	$P_{W,Pv} - P_{Pv}$	P_{Pv}	$P_{W,Pv,H} - P_{W,Pv}$
1/6	Pv, H, W	$P_{W,Pv,H} - P_{Pv,H}$	P_{Pv}	$P_{Pv,H} - P_{Pv}$
1/6	H, W, Pv	$P_{W,H} - P_H$	$P_{W,Pv,H} - P_{W,H}$	P_H
1/6	H, Pv, W	$P_{W,Pv,H} - P_{Pv,H}$	$P_{Pv,H} - P_H$	P_H

注:W 为风电机组;Pv 为光伏机组;H 为水电机组。

$$\begin{cases} v = \frac{P_E - P_S}{T_E - T_S} \\ k_1 = \frac{|v|}{v_N} \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中: P_S 、 P_E 分别为机组开始和结束响应过程时的出力; T_S 、 T_E 分别为机组开始和结束的时刻; v_N 为所有调频机组调频速度的平均值。

响应时间 k_2 为调频机组的响应时间与调频指令响应时间之比,其表示形式为

$$k_2 = \frac{t_N}{t} \quad (18)$$

式(18)中: t 为机组调频指令的响应时间; t_N 为所有调频机组响应时间平均值。

调频精度 k_3 为机组进入稳定阶段后,机组调频功率和目标指令的偏差,计算公式为

$$k_3 = \frac{\sum_{i=1}^N |P_1 - P_i|}{N} \quad (19)$$

式(19)中: P_1 为调频目标; P_i 为不同时间功率采样值; N 为采样点个数。

然后,给出风电机组、光伏机组、水电机组的如下指标:调频速率 k_{W1} 、 k_{Pv1} 、 k_{H1} , 响应时间 k_{W2} 、 k_{Pv2} 、 k_{H2} , 调频精度 k_{W3} 、 k_{Pv3} 、 k_{H3} 。

在此基础上,根据风电、光伏、水电机组的实际调频特性构造修正系数矩阵 B 为

$$B = \begin{bmatrix} k_{W1} & k_{W2} & k_{W3} \\ k_{Pv1} & k_{Pv2} & k_{Pv3} \\ k_{H1} & k_{H2} & k_{H3} \end{bmatrix} \quad (20)$$

权重系数 τ 为

$$\tau = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3]^T \quad (21)$$

设 K^* 为综合性能指标,则有

$$K^* = B \cdot \tau = \begin{bmatrix} K_W^* \\ K_{Pv}^* \\ K_H^* \end{bmatrix} \quad (22)$$

式(22)中: K_W^* 、 K_{Pv}^* 、 K_H^* 分别为风电、光伏和水电机组的综合性能指标。

根据综合性能指标 K^* 对式(14)~式(16)进行优化,得到修正后的风电、光伏、水电机组收益分别为

$$\begin{cases} f_W^* = f_W + \left(K_W^* - \frac{1}{n}\right) f_{NE,W} \\ f_{Pv}^* = f_{Pv} + \left(K_{Pv}^* - \frac{1}{n}\right) f_{NE,Pv} \\ f_H^* = f_H + \left(K_H^* - \frac{1}{n}\right) f_{NE,H} \\ f_{NE,W} + f_{NE,Pv} + f_{NE,H} = \sum_{i=1}^3 f_{NE,i} \end{cases} \quad (23)$$

式(23)中: f_W^* 、 f_{Pv}^* 、 f_H^* 分别为修正后风电、光伏和水电机组收益; n 为风-光-水-火多源调频系统中成员个数。

通过求解主从博弈模型并应用改进的 Shapley 值法,得到参与调频各机组的最优调频容量及收益分配。与已有结果相比,本文所提方法具有以下优势:①本文所提出的多源调频系统主从博弈模型充分考虑了参与调频各机组的调频出力特性、单位调频成本、平均调频速度和平均调频精度,能够实现参与调频各机组调频容量的合理分配;②本文研究在处理调频收益分配时所应用的改进 Shapley 值法充分考虑了参与调频各机组的经济特性,使得参与调频各机组的调频收益增加以及最大限度地实现新能源消纳。

3 算例分析

针对风-光-水-火多源调频系统,在主从博弈理论下研究调频容量分配策略。首先,根据参与调频各机组的功率平衡和调频容量等约束条件,提出了风-光-水-火多源调频系统的主从博弈模型,该模型利用 MATLABr2020a 的 CPLEX 求解器进行求解,通过设定最大迭代次数,得到多源调频系统主从博弈模型的均衡解,即调频各机组的最优调频容量。然后,采用改进 Shapley 值法对风-光-水机组调频收益进行优化。最后,将文中所提方法与已有方法(按照装机容量比例进行调频容量分配^[17])进行对比分析,说明本文所提方法的有效性和优越性。

3.1 数据信息与分析

为验证本文所提方法的有效性,参考中国中部内陆地区各场站数据(表2),其为不同类型电源的调频信息,包含风-光-水-火机组的单位调频成本、平均调频速度和平均调频精度。

表2 各场站的数据

Table 2 Datas from different stations

场站名称	单位调频成本/(MW·元 ⁻¹)	平均调频速度/(MW·min ⁻¹)	响应时间/min	平均调频精度	装机容量/MW
火电厂1	13.338 4	11.34	3.26	0.003 3	320
火电厂2	12.594 4	8.50	3.53	0.003 7	340
风电场1	12.000 0	1.92	0.32	0.006 1	120
风电场2	12.000 0	2.26	0.46	0.002 5	100
光伏电站1	12.659 1	2.23	0.45	0.055 7	80
光伏电站2	12.659 1	2.25	0.42	0.046 2	80
水电厂	10.621 3	5	0.93	0.014 4	500

根据表2可知:火电机组具有调频精度较高的优势,但是其调频成本相对较高且调频速度和响应时间较慢。风-光-水机组中风电机组和光伏机组具有调频速度和响应时间较快的优势,水电机组则具有调频速度和调频成本较低的优势,风-光-水机组存在的优势恰好可用来弥补火电机组在电网系统调频中的不足。

3.2 比例分配法和主从博弈的对比分析

本节分析了不同场景下的调频容量分配方法。

场景1: 电网总调频功率为100 MW,使用表2中各场站1数据,各参与调频机组按照装机容量比例进行调频容量分配。

场景2: 电网总调频功率为100 MW,使用表2中各场站1数据,各参与调频机组按照文中提出的主从博弈模型进行调频容量分配。

场景3: 电网总调频功率为100 MW,使用表2中各场站2数据,各参与调频机组按照装机容量比例进行调频容量分配。

场景4: 电网总调频功率为100 MW,使用表2中各场站2数据,各参与调频机组按照文中提出的主从博弈模型进行调频容量分配。

将场景1与场景2进行对比分析,火电1-风电1-光伏1-水电机组调频容量分配如图3所示,火电2-风电2-光伏2-水电机组调频收益分配对比如图4所示。

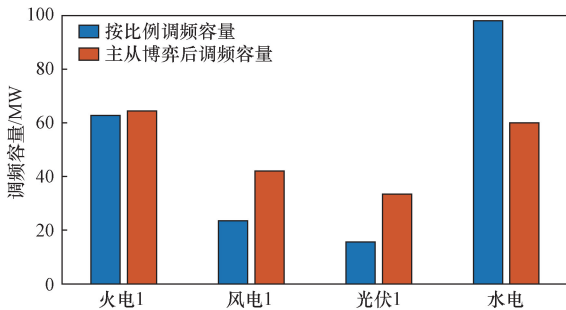


图3 火电1-风电1-光伏1-水电机组调频容量分配对比图
Fig.3 Comparison of frequency modulation capacity allocation for the wind1-photovoltaic1-hydropower-thermal 1 units

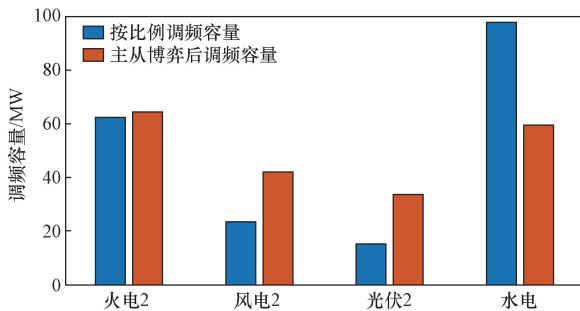


图4 火电2-风电2-光伏2-水电机组调频容量分配对比图
Fig.4 Comparison of frequency modulation revenue for the wind1-photovoltaic1-hydropower-thermal 1 units

示。将场景3与场景4进行对比分析,火电2-风电2-光伏2-水电机组调频容量分配如图5所示,火电1-风电1-光伏1-水电机组调频收益分配对比如图6所示。

根据图3和图4可知,经过主从博弈后,火电机组的调频容量略微增加,风电机组和光伏机组的调频容量大幅增加,水电机组的调频容量下降,这与案例的实际情况相符合。由于地理位置导致中部地区降水量不稳定,因此按照本文方法所得到的调频容量分配能够在保证调频经济性和质量的同时兼顾调频系统整体的稳定性。

根据图5和图6可知,与按照装机容量比例进行调频容量分配相比,经过主从博弈后的火电机组与风-光-水机组调频收益均增加。由于风电机组和光伏机组相较于水电机组调频速度与调频精度更高,因此当风电机组和光伏机组调频容量增加时,风-光-水机组整体收益增加。应用主从博弈模型后,火电机组与风-光-水机组进行更加科学合理的容量配置,尤其是对风-光-水机组容量配置的调整,使其针对不同机组的特性进行容量配置的调整。

由图5数据分析可得,按照装机容量比例进行调频容量分配时火电机组1调频收益为1203.2元,经过主从博弈后火电机组1调频收益为1259.5元,两者相比调频经济收益提高4.68%;按照装机容量

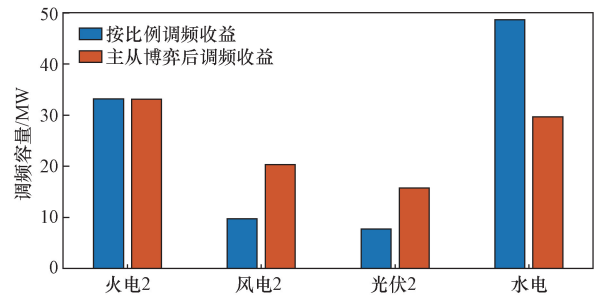


图5 火电2-风电2-光伏2-水电机组调频容量分配对比图
Fig.5 Comparison of frequency modulation capacity allocation for the wind2-photovoltaic2-hydropower-thermal 2 units

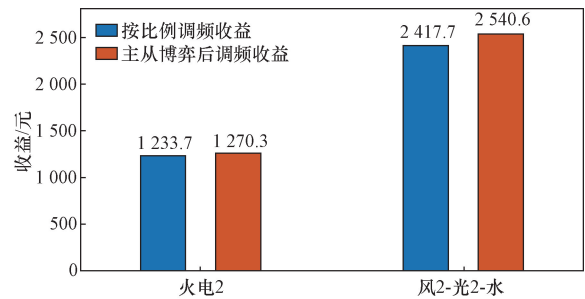


图6 火电2-风电2-光伏2-水电机组调频收益对比
Fig.6 Comparison of frequency modulation revenue for the wind2-photovoltaic2-hydropower-thermal 2 units

量比例进行调频容量分配时风 1-光 1-水机组调频收益为 2 258.2 元,经过主从博弈后风 1-光 1-水机组调频收益为 2 567.7 元,两者相比调频经济收益提高 13.71%。由图 6 数据分析可得,按照装机容量比例进行调频容量分配时火电机组 2 调频收益为 1 233.7 元,经过主从博弈后火电机组 2 调频收益为 1 270.3 元,两者相比调频经济收益提高 2.97%,按照装机容量比例进行调频容量分配时风 2-光 2-水机组调频收益为 2 417.7 元,经过主从博弈后风 2-光 2-水机组调频收益为 2 540.6 元,两者相比调频经济收益提高 5.08%。

3.3 改进的 Shapley 值法优化风-光-水机组调频收益

针对场景 2 中的场景,由于风 1-光 1-水机组部分为主从博弈的跟随者,但是风-光-水机组内部属于合作关系,所以对风 1-光 1-水机组部分进行利益再分配时应用改进的 Shapley 值法进行优化,充分考虑风电、光伏、水电的调频指标,对利益分配进行系数修正与调整,可进一步增大调频经济收益,有利于实现新能源的充分消纳。

改进的 Shapley 值法会本着最大化各参与调频机组收益的原则下,保证风 1-光 1-水机组内部调频收益分配的均衡与合理。在给定调频容量需求下的风 1-光 1-水各机组调频收益对比结果如图 7 所示。

根据图 7 可知,改进的 Shapley 值法减少了水电调频收益,增大了风电 1、光伏 1 机组的调频收益。应用 Shapley 值法时风电 1、光伏 1 机组和水电机组调频收益分别为 745.27、893.45、928.98 元;应用改进的 Shapley 值法后风电 1、光伏 1 机组和水电机组调频收益分别为 852.36、796.10、919.24 元;两种方法对比结果为风电机组 1 调频经济收益提高 4.92%,光伏机组 1 调频经济收益减少 7.54%,水电机组调频经济收益提高 3.29%。根据以上数据分析可知,应用改进 Shapley 值法进行调频收益分配时充分考虑了风电 1、光伏 1、水电的综合调频指

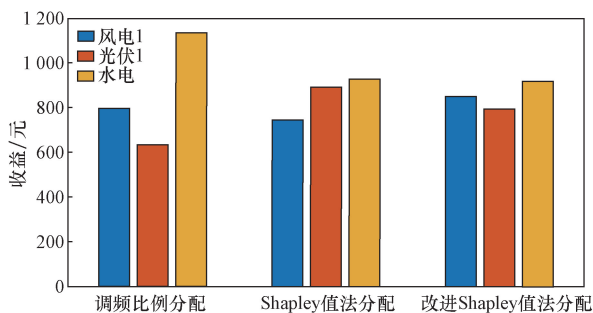


图 7 调频收益分配

Fig. 7 Frequency modulation revenue distribution

标,对调频收益分配进行系数修正与调整,使得风 1-光 1-水机组内部调频收益分配更为合理和均衡。

4 结论

为有效解决新能源并网的多源调频容量分配问题,提出了风-光-水-火多源调频系统的主从博弈模型,所得结论如下。

(1)应用主从博弈理论将火电机组作为领导者,将风-光-水机组作为追随者,通过主从博弈达到纳什均衡。与按照装机容量比例进行调频容量分配相比,应用主从博弈后火电机组 1 调频经济收益提高 4.68%,火电机组 2 调频经济收益提高 2.97%;风 1-光 1-水机组调频经济收益提高 13.71%,风 2-光 2-水机组调频经济收益提高 5.08%。因此,基于主从博弈理论的风-光-水-火多源调频系统容量分配方法可以使参与调频各机组的容量分配更加合理,有利于最大限度实现新能源消纳,以及保证电网安全有效运行。

(2)通过结合综合性能指标与 Shapley 值法得到改进的 Shapley 值法,对风 1-光 1-水机组的调频收益分配进行系数修正与调整,使风电机组 1 调频经济收益提高 4.92%,光伏机组 1 调频经济收益减少 7.54%,水电机组调频经济收益提高 3.29%。通过应用改进的 Shapley 值法能够使风-光-水机组内部调频收益分配更为均衡,有利于提高各机组参与电力系统调频的积极性与经济性。

参 考 文 献

- [1] 程静,赵振民,岳雷. 不平衡负荷下 PET 输出级电能质量优化控制[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(32): 14252-14258.
Cheng Jing, Zhao Zhenmin, Yue Lei. Output stage optimal control of power electronic transformer under unbalance load[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(32): 14252-14258.
- [2] Chung W S, Kim S S, Moon K H, et al. A conceptual framework for energy security evaluation of power sources in South Korea[J]. Energy, 2017(137): 1066-1074.
- [3] 朱姝林,王海云,常喜强,等. 考虑新能源场站动态减载调频的电力系统调度研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(8): 3295-3305.
Zhu Shulin, Wang Haiyun, Chang Xiqiang, et al. A scheduling strategy considering new energy power plants participating in system frequency regulation by dynamic output derating[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(8): 3295-3305.
- [4] Pillai J R, Bak Jensen B. Integration of vehicle to grid in the western Danish power system[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2021, 2(1): 12-19.
- [5] 徐鹏超,李琰,田新首,等. 附加转速优化虚拟惯性控制的双馈风机一次调频研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(23): 9400-9407.
Xu Pengchao, Li Yan, Tian Xinshou, et al. Primary frequency regula-

- tion of doubly-fed induction generator based on additional speed optimization virtual inertia control[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(23): 9400-9407.
- [6] 张峰, 李柏慷, 丁磊. 考虑风电调频能量联动分配的时变调频参数设定方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 188-197. Zhang Feng, Li Baikang, Ding Lei. Parameter setting method of time-varying frequency regulation considering linked energy distribution of wind power for frequency regulation[J]. Automation of Electric Power System, 2022, 46(16): 188-197.
- [7] 付文启, 杨鑫, 管飞, 等. 光伏减载驱动新能源同步机参与电力系统调频的研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(5): 79-85. Fu Wenqi, Yang Xin, Guan Fei, et al. Research on photovoltaic driving motor-generator pair to participate in frequency regulation under load shedding control[J]. Motor and Control Application, 2021, 48(5): 79-85.
- [8] 魏振华, 王黎黎, 郑亚锋, 等. 基于主从博弈的含电动汽车综合能源系统运行策略[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(88): 12417-12423. Wei Zhenhua, Wang Lili, Zheng Yafeng, et al. Stackberg game based operational strategy of integrated energy system with electric vehicles[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(88): 12417-12423.
- [9] 杨悦, 王丹, 胡博, 等. 基于改进多智能体 Q 学习的多源最优联合调频控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 135-144. Yang Yue, Wang Dan, Hu Bo, et al. Multi-source optimal joint frequency modulation control strategy based on improved multi-agent Q-learning[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 135-144.
- [10] 李晨迪, 陈渊睿, 曾君, 等. 基于非合作博弈的微电网能量管理系统优化算法[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 387-395. Li Chendi, Chen Yuanrui, Zeng Jun, et al. Research on optimization algorithm of microgrid energy management system based on non-cooperative game theory [J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 387-395.
- [11] 赵敏, 沈沉, 刘锋, 等. 基于博弈论的多微电网系统交易模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 848-857. Zhao Min, Shen Chen, Liu Feng, et al. A game-theoretic approach to analyzing power trading possibilities in multimicrogrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 848-857.
- [12] Fu B C, Chen M K, Fei Z A, et al. Research on the stackelberg game method of building micro-grid with electric vehicles[J] Journal of Electrical Engineering & Technology, 2021 (16): 1637-1649.
- [13] 潘虹锦, 高红均, 杨艳红, 等. 基于主从博弈的售电商多元零售套餐设计与多级市场购电策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(13): 4785-4800. Pan Hongjin, Gao Hongjun, Yang Yanhong, et al. E-commerce multi-retail package design and multi-level market power purchase strategy based on master-slave game [J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2022, 42 (13): 4785-4800.
- [14] 缴傲, 胡臻, 向萌, 等. 考虑综合需求响应的社区综合能源系统主从博弈策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(9): 94-102. Jiao Ao, Hu Zhen, Xiang Meng, et al. Master-slave game strategy of community integrated energy system considering comprehensive demand and response [J]. Journal of Electric Power System and Automation, 2021, 33(9): 94-102.
- [15] 邹正兴, 张强, 李美苓. 具有结盟限制的合作对策的加权 Shapley 值[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(1): 145-163. Zou Zhengxing, Zhang Qiang, Li Meiling. The weighted Shapley value for games with restricted cooperation [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2018, 38(1): 145-163.
- [16] Sun P F, Hou D S, Sun H. The Shapley value for cooperative games with restricted worths [J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2021, 495(2): 124762.
- [17] 孙婧卓, 江全元, 程中林, 等. 大规模电储能参与调峰辅助双边交易容量及价格区间优化模型[J]. 电网技术, 2019, 43(6): 1995-2001. Sun Jingzhuo, Jiang Quanyuan, Cheng Zhonglin, et al. Capacity and price range optimization model for large-scale electric heat storage participating in auxiliary peaking service in bilateral transactions [J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 1995-2001.