

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241284

电力系统发电侧惯量支撑责任分摊方法

史黎阳¹, 王海云¹, 房忠²

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 金风科技股份有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830015)

摘要: 在新型电力系统低惯量的背景下, 发电侧惯量支撑责任的合理分摊可以公平地补偿惯量辅助服务的参与者, 激励其技术革新的同时降低辅助服务的总成本。因此, 设计了考虑惯量补偿的日内经济调度模型, 通过合作博弈理论的方法探索了发电侧惯量支撑责任的分摊问题。然后, 具体运用 Aumann-Shapley 法进行分摊并阐述其公理化标准。最后, 以不同配置的 IEEE 30 节点系统为例, 对发电侧惯量支撑责任分摊方法的可行性、公理化标准、效果以及适应性进行分析论证。结果表明, Aumann-Shapley 法具有一定合理性且不同配置系统均适用, 在满足效率和公平性等分摊标准的同时能有效激励发电机组提高惯量支撑, 相较于对比分摊方法在降低生产成本上也具有一定优越性。

关键词: 发电侧; 惯量支撑责任; 分摊; 合作博弈; Aumann-Shapley 法

Responsibility allocation method for inertia support on the generation side of power systems

SHI Liyang¹, WANG Haiyun¹, FANG Zhong²

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;
2. Goldwind Sci & Tech Co., Ltd., Urumqi 830015, China)

Abstract: In the context of low inertia conditions in modern power systems, a fair allocation of inertia support responsibilities on the generation side can ensure equitable compensation for participants providing inertia related ancillary services. This not only incentivizes technological innovation but also reduces the overall cost of such services. Therefore, an intra-day economic dispatch model incorporating inertia compensation is proposed, and the allocation of inertia support responsibilities is explored using cooperative game theory. Specifically, the Aumann-Shapley method is applied to perform the allocation, with its axiomatic standards discussed in detail. Finally, the feasibility, axiomatic consistency, effectiveness, and adaptability of the proposed allocation method are analyzed using case studies based on the IEEE 30-bus system with different configurations. The results indicate that the Aumann-Shapley method is both rational and widely applicable. It satisfies allocation standards such as efficiency and fairness, effectively incentivizes generators to enhance their inertia support capabilities, and offers advantages over comparative methods in reducing production costs.

This work is supported by the Key Research and Development Program of the Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. 2023B01025-2 and No. 2022B01020-3).

Key words: generation side; inertia support responsibility; allocation; cooperative game theory; Aumann-Shapley method

0 引言

随着电力行业低碳化转型以及新能源在电力系统中的渗透率不断提高, 高惯量缺额问题变得愈发突出^[1-3]。低惯量运行风险是电力低碳转型过程中的重大问题, 已成为制约以新能源为主体的新型电力

系统可持续发展的痛点和关键瓶颈^[4-5]。惯量在电网出现频率波动时能瞬间提供有功能量支持, 为后续频率的安全稳定控制提供反应时间。因此, 惯量在保障电网频率安全方面发挥着不可替代的重要作用。

目前电力行业正从各方面探索适应自身特性的方法来提升系统惯量。文献[6]提出发电机组与大規模储能电站协同参与日前调度, 构建了保障惯量支撑能力的最优组合模型; 文献[7]设计了一种基于在线学习的构网型逆变器参数设置方法, 使虚拟电厂

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划资助 (2023B01025-2、2022B01020-3)

能够提供惯量支持；文献[8]提出幅值-锁相环控制技术来实现电池储能系统快速响应电网的频率波动，从而提供虚拟惯量支撑能力；文献[9]对需求侧异步电动机的惯量响应进行数学建模，证明了其同样具有惯量支撑能力。电力市场相对成熟的西方国家则开始尝试惯量的市场化运行。英国采取与传统发电商签订双边协议并购买惯性服务合同的方法来保证系统惯量支撑能力^[10]；北欧、加拿大魁北克等地区陆续推动快速频率响应服务的市场化^[11]；澳大利亚电网正探索构建惯量辅助服务的市场机制^[12]；中国六大区域电力系统开展了针对惯量辅助服务的补偿机制研究。惯量辅助服务补偿机制的探讨或市场化研究对增强电力系统的惯量支撑能力至关重要，因此进一步研究惯量支撑责任的分摊具有重要意义。

一些学者认为发电侧的故障往往是触发辅助服务的主要因素。文献[13]首次讨论发电机断电应急准备金的成本分配问题，提出基于发电单元容量和不可用性来进行分配；文献[14]综合考虑往年发电机故障次数以及每小时的调度规模，提出按照比例和顺序对成本进行分配。国内辅助服务目前主要采取“谁引发，谁承担”的分摊原则^[15]，其中惯量这类电力系统公共物品是根据其贡献进行补偿。以上研究并没有关注成本分配机制的理想属性^[16]，例如公平性意味着成本分摊应避免出现某一市场参与者群体为另一群体无偿承担其成本的情况，即不存在交叉补贴，一致性意味着没有任何子群体有动力离开大联盟^[17]。因此，为了追求这些理想属性，Aumann-Shapley和核仁这样更复杂的合作博弈分配方法值得考虑^[18]。

Aumann-Shapley法是Shapley值法在成员数量趋于无穷的扩展，其分配结果符合有效性、虚拟性和可加性的公理标准^[19]，克服了Shapley值因成员数量的增加导致计算复杂度呈指数增长以及分配结果缺乏公平性的问题。Aumann-Shapley法普遍用来处理具有大量参与者和连续变量的复杂情境。文献[20]探讨了如何用Aumann-Shapley法分配供电侧与需求侧间的传输费用；文献[21]考虑所有阻塞消除顺序并采用Aumann-Shapley法实现了阻塞线路费用的公平分配；文献[22]采用Aumann-Shapley法对网损责任分摊问题进行数学建模分析。文献[23]提出一种修正Aumann-Shapley积分初值的方法并研究了考虑电力系统主要安全约束的安全成本分摊；文献[24]提出了从成本角度应用Aumann-Shapley法对备用服务进行定价；文献[25]通过合作博弈理论进行数学建模与分析，提出应用Aumann-Shapley法

将电网的碳责任共同分配给发电侧机组和负荷端用户。

现有文献中还未有针对发电侧惯量支撑责任分摊的同类型探索。发电侧机组占转动惯量支撑来源的绝大多数，且发电机故障触发的欠频率遏制是大多数电网的主要关注点，因此，未来对惯量辅助服务的需求将主要聚焦于应对频率下降引起的系统稳定性问题。因此，基于欠频率遏制以及合作博弈的角度，本文认为应该是发电侧的各个成员共同承担系统所需惯量的支撑责任，从而获得对应比例的惯量补偿。

在这种背景下，本文设计了考虑惯量补偿的日内经济调度模型。通过合作博弈理论将发电侧惯量支撑责任的分摊问题进行数学建模分析，介绍了采用Aumann-Shapley法公平分配发电侧惯量支撑责任的过程，并阐述其公理化标准。最后通过算例分别进行了惯量支撑责任在发电侧分摊的可行性分析、公理化标准的论证分析、分摊机制的效果分析以及不同配置系统的适应性分析。

1 发电侧惯量支撑责任的分摊和建模

惯量属于电力系统的固有属性，可视为保证电力系统频率安全时电力消费能够调用的公共有功资源。我国目前更侧重于挖掘系统本身的惯量支撑潜力^[26]，即在辅助服务市场中增添惯量服务品种并固定补偿。在辅助服务市场中增添惯量服务品种有助于缓解系统惯量缺额问题，体现惯量的经济价值，同时可用于评估发电侧机组的惯量支撑能力。考虑惯量补偿的主辅联合出清过程如图1所示。

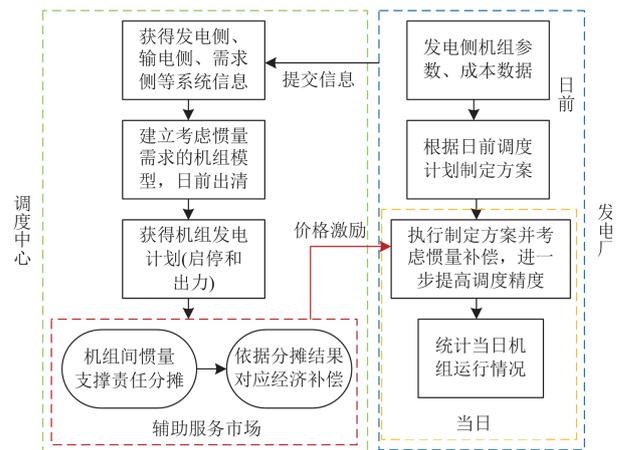


图1 考虑惯量补偿的主辅联合出清过程

Fig. 1 Main-auxiliary combined clearing process considering inertia compensation

针对发电侧惯量支撑责任分摊问题，本文设计了考虑惯量补偿的日内经济调度模型。首先，对满

足生产调度时电力系统的实际惯量需求进行数学建模。然后,基于合作博弈理论,将发电侧惯量支撑责任的分配问题建模为一种成本分摊问题。

1.1 满足生产调度时电力系统的实际惯量需求

由于风光等新能源机组的惯量支撑能力很小,其对系统惯量支撑视为没有边际贡献,因此惯量支撑责任分摊实际上只针对发电侧的传统同步机组。在主要由同步发电机组构成的电力系统中,满足生产调度运行时电力系统实际惯量需求的具体建模过程如下。

1.1.1 个体实际惯量支撑贡献

为了衡量机组储存旋转动能的能力,经常在时间尺度下解释惯量的作用,如同步机的惯性时间常数 T_J 、惯量常数 H ,这有利于不同类型机组间进行比较分析。从能量关系出发,惯量常数反映了在特定功率基准下,物体所蕴含的有功能量抑制系统状态改变的持续时间。其中惯量常数 H 通常定义为额定转速下转子存储的有功能量除以额定容量,单位为s,即

$$H = \frac{E_K}{S_B} = \frac{J\omega^2}{2S_B} \quad (1)$$

式中: E_K 表示同步发电机转子的额定动能,单位是 $\text{MW}\cdot\text{s}$; S_B 表示传统发电机的额定容量,单位是 MW ; J 表示转动惯量,单位是 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$; ω 表示传统发电机的转速,单位是 rad/s 。

$$E_{Ki} = H_i \times P_i = E_K \times \frac{P_i}{S_B} = E_K \times \alpha \quad (2)$$

式中: E_{Ki} 表示机组 i 惯性支撑的“有功贡献”; H_i 表示机组 i 的惯量常数; P_i 表示机组 i 实际运行功率; α 表示满足生产调度时的负荷率。发电机的惯量常数 H 是基于额定功率的,虽然它提供了统一标准,但在实际工况下发电机的输出功率会有所不同,用 P_i 来修正机组实际工况下的惯量响应能力。 E_{Ki} 严格意义下并不能表征发电机的旋转动能贡献,但可理解为并网发电机组生产调度时满足频率偏差自适应过程中的能量贡献。

1.1.2 电力系统实际惯量需求

在主要由同步发电机组构成的电力系统中,电力系统在满足生产调度运行时,电力系统实际的惯量需求可由式(3)进行计算。

$$E_{\text{sys}} = \sum_{i=1}^N E_{Ki} = \sum_{i=1}^N H_i P_i \quad (3)$$

式中: N 表示机组数; E_{sys} 表示所有并网机组满足负荷单元需求时个体实际惯量支撑的有功能量之和,即系统实际所需的总旋转动能,单位是 $\text{MW}\cdot\text{s}$ 。

传统机组并网运行时与系统频率同步旋转, E_{sys} 是系统为了维系并网机组安全稳定运行时实际所需要的惯量,明显小于系统同步惯量的最大支撑能力。从满足生产运行调度的角度考虑,当系统实际惯量需求小于系统可利用总惯量时,才能保证并网主体调度运行时系统惯量水平能调整至惯量安全域内的任意运行点^[27]。

1.2 考虑惯量补偿的日内经济调度模型

1.2.1 目标函数

目标函数即为最小化调度成本,其中包含机组实际出力导致的发电成本和机组启停成本。

$$\min \sum_{i=1}^N \left(\sum_{t=1}^T f(P_{it}) + C_i^U + C_i^D \right) \quad (4)$$

式中: T 表示调度时间的小时数; $f(P_{it})$ 表示机组 i 在 t 时刻的发电成本; C_i^U 表示机组 i 的启动成本; C_i^D 表示机组 i 的关停成本。由于煤耗成本与实际惯量贡献均与机组个体实际出力有关,惯量补偿又依据其实际惯量支撑贡献进行经济激励,故 $f(P_{it})$ 反映了煤耗成本与惯量补偿的综合影响,其中机组的发电成本函数如式(5)所示。

$$f(P_{it}) = a_i P_{it}^2 + b_i P_{it} + c_i \quad (5)$$

式中: a_i 、 b_i 、 c_i 表示成本函数的系数; P_{it} 为机组 i 在 t 时刻的出力值。

1.2.2 约束条件

1) 系统的功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_{it} = \sum_{d=1}^{N_L} P_{dt} \quad (6)$$

式中: N_L 表示负荷节点数; P_{dt} 表示节点 d 在 t 时刻的负荷需求。

2) 惯量需求约束

$$\frac{f_B |\Delta P|}{2 |M_{\text{RoCoF}}|} \leq \sum_i H_i P_i \leq \sum_i H_i S_B \quad (7)$$

式中: f_B 表示系统的额定频率; ΔP 表示发生 $N-1$ 扰动故障时的功率缺少额度; M_{RoCoF} 表示保护系统频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)安全的设定值。

3) 机组出力约束

$$u_{it} P_{i\text{min}} \leq P_{it} \leq u_{it} P_{i\text{max}} \quad (8)$$

式中: u_{it} 表示机组 i 在 t 时刻的启停状态; $P_{i\text{max}}$ 、 $P_{i\text{min}}$ 分别表示机组 i 的最大、最小出力限制。

4) 热备用约束

$$\sum_{i=1}^N (u_{it} P_{i\text{max}} - P_{it}) \geq \rho \sum_{d=1}^{N_L} p_{dt} \quad (9)$$

式中: ρ 表示热备用系数; p_{dt} 表示节点 d 在 t 时刻的负荷需求。

5) 机组爬坡约束

$$-R_d \leq P_{it} - P_{i(t-1)} \leq R_u \quad (10)$$

式中: R_u 、 R_d 分别表示机组的上、下爬坡速率; $P_{i(t-1)}$ 表示机组 i 在 $t-1$ 时刻的出力值。

6) 机组启停时间约束

$$\sum_{k=t}^{t+T_s-1} (1-u_{ik}) \geq T_s(u_{i(t-1)} - u_{it}) \quad (11)$$

$$\sum_{k=t}^{t+T_0-1} u_{ik} \geq T_0(u_{it} - u_{i(t-1)}) \quad (12)$$

式中: T_s 、 T_0 分别表示机组最小关机、启动时间; u_{ik} 、 $u_{i(t-1)}$ 分别表示机组 i 在 k 、 $t-1$ 时刻的启停状态。

7) 启停费用约束

$$\begin{cases} C_{it}^U \geq Q_i(u_{it} - u_{i(t-1)}) \\ C_{it}^U \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} C_{it}^D \geq J_i(u_{i(t-1)} - u_{it}) \\ C_{it}^D \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: Q_i 、 J_i 分别表示机组 i 单次的启动、关停成本; C_{it}^U 、 C_{it}^D 分别表示机组 i 在 t 时刻的启动、关停总成本。

8) 潮流安全约束

$$-P_{l\max} \leq P_l \leq P_{l\max} \quad (15)$$

式中: P_l 表示线路 l 在 t 时刻的功率传输量, 具有方向性; $P_{l\max}$ 表示线路 l 的最大传输容量。

1.3 从合作博弈的角度建模

研究发电侧惯量支撑责任分摊, 根据正确的分摊比例公平合理地补偿能够提供惯量辅助服务的参与者, 可以有效激励它们技术革新, 在提高惯量支撑同时降低辅助服务的总成本。因此发电商不会因为提高惯量支撑增加了生产成本而提高报价, 负荷侧的消费者最终也并不会支付更多的电费。需要澄清的是, 本文关注的是更常见的欠频遏制问题, 因此侧重于发电侧的成本分配, 但负载断开导致的过频事件可以采用对称方式建模。本文所讨论的方法可等价延展于负荷端的成本分配。

并网发电侧机组之间的惯量支撑贡献是互相关联的, 类似于成本分配问题中的公共成本部分。因此, 本文采用合作博弈理论对发电侧惯量支撑责任的分配问题进行数学建模与分析。用元组 (A, c) 表示多个参与者之间的合作博弈, 其中 A 表示所有参与者构成的群体, $c(\cdot)$ 为体现合作博弈关系的函数

方程, 用来描述不同参与者组合对系统的贡献。在实际数学建模中, 分配供电侧惯量支撑义务的全部参与者就是供电侧全部的机组成员; 特征函数具体含义是计算电力系统惯量需求量。 $c(A)$ 表示所有群体集合所属电网的实际惯量总需求, $c(S)$ 表示只有子群体 S 中的成员存在于系统中时所对应的惯量需求, S 表示子群体, 即 A 的非空真子集 ($S \subset A$), 当没有成员存在于系统中时, 惯量需求是 0, 即 $c(\emptyset) = 0$ 。

2 基于 Aumann-Shapley 法的惯量支撑责任分摊

Aumann-Shapley 值相对于 Shapley 值的主要优势在于其对连续变量的处理能力和计算效率的提升。Aumann-Shapley 值通过积分形式计算边际贡献, 适用于连续可微的成本或收益函数, 特别适合于处理大量参与者和连续变量的复杂场景。相比之下, Shapley 值主要针对离散贡献的场景, 在处理大规模系统时计算复杂度较高。本节将对基于 Aumann-Shapley 法的惯量支撑责任分摊的具体计算过程进行介绍, 并分析比较该方法的公理化标准。

2.1 分摊计算方法的介绍

采用积分形式的 Aumann-Shapley 法进行具体求解, 其中机组 i ($0 \leq i \leq N_G$) 分配到的惯量支撑责任是其真实发电出力从 0 到 P_i 的积分结果。

$$x_i = \int_0^{P_i} \left[\frac{\partial E(t\mathbf{P}/P_i)}{\partial P_i} \right] dt = P_i \int_0^1 \left[\frac{\partial E(t\mathbf{P})}{\partial P_i} \right] dt \quad (16)$$

式中: \mathbf{P} 表示电网发电侧所有参与机组形成的功率向量; $E(\cdot)$ 表示计算电网实际惯量需求的函数, 其具体求解过程见附录 A。

由式(16)得, 机组 i 分配到的惯量支撑责任是实际发电功率 P_i 与 $\int_0^1 (\partial E(t\mathbf{P})/\partial P_i) dt$ 的乘积结果, 其中 $\int_0^1 (\partial E(t\mathbf{P})/\partial P_i) dt$ 表示机组 i 分摊到的单位功率惯量支撑责任, 用 U_i 表示。

$$U_i = \int_0^1 \left[\frac{\partial E(t\mathbf{P})}{\partial P_i} \right] dt \quad (17)$$

由于实际电力系统是高度非线性且复杂的, 系统惯量需求的计算函数通常不是连续可微的, 需要在离散处理的情形下求解, 即惯量支撑责任分摊通过离散化的方法等价替代连续可微函数的积分计算。基于 Aumann-Shapley 法, 机组 i 离散化处理后分摊到的惯量支撑责任可以表示为

$$x_i = P_i U_i = P_i \sum_{i=1}^N \left(\frac{E\left(\frac{kP}{Z} + \Delta P_i\right) - E\left(\frac{kP}{Z}\right)}{\Delta P_i Z} \right) \quad (18)$$

式中： Z 表示离散化的区间总数，即将发电侧参与机组的功率划分为 Z 个离散区间； ΔP_i 表示机组 i 实际功率的边际增量，用于逼近其对系统惯量需求函数的边际影响， $[E(kP/Z + \Delta P_i) - E(kP/Z)]/(\Delta P_i Z)$ 表示机组 i 在第 k 个离散化区间针对电力系统实际惯量需求所分摊到的单位边际惯量支撑责任。

采用 Aumann-Shapley 法计算的发电机组 i 惯量支撑责任分配结果呈现了各个机组对于电网实际惯量支撑的平均边际效益。在该理论框架下需要强调的是，不具备惯量支撑能力或不达标的风光等新能源机组对系统实际惯量支撑没有边际贡献，故不需要分配惯量支撑责任。因此，采用 Aumann-Shapley 法的惯量支撑责任分摊实际上只针对发电侧传统的同步机组。

2.2 关于分摊方法的讨论

Aumann-Shapley 法的连续特性在电力系统的实际应用中需要离散化处理，这可能引入近似误差导致分摊精度下降，进一步影响责任划分的公平性和经济补偿的合理性。在边际贡献变化剧烈的区间，离散化会缺失原函数中的细节信息，导致难以准确映射原始连续函数的特征。同时分段计算的误差会在多个区间逐步累积，造成整体误差显著增大，这一局限性在复杂电力系统的责任分摊计算中尤为显著。此外，大型系统中离散化精度与计算量之间的权衡也构成挑战，增加分段数虽能提升精度，但计算资源消耗与时间成本将大幅增加，难以满足大型系统的精确计算需求。

针对 Aumann-Shapley 法在实际应用时的局限性，可采用多种误差控制或优化手段来提高分摊精度。离散化处理阶段可采用自适应分割法，根据边际贡献变化的剧烈程度调整离散步长，对快速变化的区间采取更小步长以捕捉原函数的细节特征。其次在数值积分计算时，可使用高阶积分方法替代常规的梯形法，以减少离散化误差的累积效应。为了更好地权衡计算量与精度，可结合误差估计模型对每步计算进行误差量化分析，使计算资源集中于误差较大的区间，确保整体误差控制在预设范围内。在获得初步的分摊结果后，可通过最小二乘误差校正法优化系统性误差，提高分摊的整体准确性。通过上述手段的综合应用，可以在计算资源有限的情况下显著提升 Aumann-Shapley 法在惯量责任分摊

中的适用性，实现精度与效率的合理平衡。

2.3 公理化标准分析

追求满足所有公理标准的方法往往是理想化的，真正研究惯量支撑责任分摊问题时需要结合实际情况对相关公理进行分析取舍^[28-29]。本节解释了相关基本公理，并论证了在实际惯量责任的分摊中如何体现公理化标准，并进一步评估了这些公理化标准的重要等级和适用性。

1) 效率

这个公理要求发电机组总的惯量支撑责任分配值等于系统的惯量支撑总需。数学表达式为

$$\sum_{i=1}^N x_i = E(tP) \quad (19)$$

2) 对称性/公平性

如果两个发电侧机组成员对系统惯量支撑责任的边际贡献相同，它们应分配相同的惯量支撑责任以保证公平性，并将其视为合作博弈问题中的对称成员。

3) 线性

线性要求当惯量支撑责任是两个独立惯量支撑贡献的线性组合，那么分摊结果应该是对应分摊值的线性组合，即 $E(tP) = \alpha E_1(tP) + \beta E_2(tP)$ ，其中 α 、 β 是常数，那么 $x_i(c) = \alpha x_i(E_1) + \beta x_i(E_2)$ ，该公理确保当系统惯量需求为多个独立贡献的线性组合时，各参与者的分摊结果也保持线性一致性。

4) 无关假设

无关假设要求分配只依赖发电侧机组成员的实际惯量支撑贡献，而不受其他外部因素影响。这保证了分配的公平性和独立性，避免不相关因素的干扰。

5) 匿名性

每个发电侧成员所分得的惯量支撑责任量不因参与成员的编码变化而改变，即

$$x_{\pi(i)}(\pi(N), \pi(E)) = x_i(N, E) \quad (20)$$

式中： π 表示新的编码准则； $\pi(N)$ 、 $\pi(E)$ 分别表示依据新准则重新构建的合作博弈模型。

6) 虚拟性

原分配结果不会因为任意添加虚拟的参与者而改变。其中，虚拟的参与者象征着对任意大小联合群体的边际效益都是0的机组。比如尚不能提供惯量支撑的风电、光伏等新能源机组。

7) 个体理性/群体理性

个体理性定义每个参与的发电机组惯量支撑责任量，在决定是否加入某个联盟群体时，必须确保该机组参与群体后所分摊的惯量支撑量不小于其

单独行动。群体理性定义每个子集合的发电侧机组所分配的惯量支撑义务总量应与电网总惯量需求相同, 避免任何多余或不足的分摊。

8) 合理性

发电侧机组任意参与者所分配得到的惯量支撑责任量应维持在一个确定的合理区间之中, 即该机组成员惯量支撑边际贡献应属于其最大值和最小值区间范围内。

9) 边际贡献

Aumann-Shapley 值是基于参与者的边际贡献进行分配, 即每个发电侧机组的惯量支撑实际贡献与系统边际贡献成正比。每个参与者的分配 x_i 是其单位功率惯量支撑责任的积分形式 $\int_0^1 (\partial E(tP)/\partial P_i) dt$ 与其出力 P_i 的乘积, 该公理确保分配的值直接反映参与者在不同功率水平上的边际贡献。

本节陈述的公理在不同情景下优先级会有所区别, 需要结合具体问题具体分析。发电侧机组惯量支撑责任的分摊考虑了机组实际运行功率, 显然不是事前议价而是根据其实际运行情况追求公平合理的事后责任分配。其中效率和合理性是最重要的, 因为它们关注了整个分摊机制的合理性和参与者的个体利益。对称性、线性、无关假设、匿名性和虚拟性也是研究发电侧惯量支撑分摊的必要条件, 其重要性也不容忽视。其他公理标准虽然适用但作用单一, 具有一定的局限性, 故将剩余标准作为相对低的优先级。

3 算例分析

本节在 IEEE 30 节点标准测试系统中, 采用 Aumann-Shapley 法对发电侧惯量支撑责任进行分摊研究。系统中包含 30 个节点、6 台发电机组, 其中机组数据改编自文献[30-31]。接线图、机组详细情况和日单位负荷曲线见附录 B。

3.1 分摊机制的可行性分析

本小节分别探究各发电机组实际出力和社会效益影响, 检验了发电侧分摊机制的可行性。基于 Aumann-Shapley 法的结果如表 1 所示, 考虑供电侧惯量支撑责任分配结果的机组发电功率对比如图 2 所示。

给发电侧提供惯量补偿导致发电机组发电综合成本降低, 其中发电机组 G6 由于惯量时间常数小, 分摊到的惯量支撑责任少, 获得的惯量补偿也相对较少, 导致当以生产成本最低进行经济调度时, G6 发电出力降低。大型机组 G1 往往承担了系统主要的电力供应, 同时也分摊了主要的惯量支撑责任,

故惯量补偿与否并不会明显影响其发电出力。此外对比分析机组 G3、G4 可知, 惯量时间系数接近, 但在满足约束条件安全稳定运行时 G4 出力更高, 最终分摊到的惯量支撑责任明显大于 G3, 但由于 G3 的综合发电成本显著低于 G4, 因此其边际调度优势更强, 故在获得惯量补偿的激励时, 综合生产成本更低的 G3 增加了发电出力。综上所述, 发电侧惯量支撑责任分摊机制对发电机组有直接激励作用, 提供惯量补偿能够促进综合生产成本降低且惯量时间常数较大的机组竞争力增强, 从而促进系统满足生产调度时实际惯量需求降低, 增加系统惯量裕度, 提高了应对频率波动的响应能力。

表 1 IEEE 30 节点系统发电侧惯量支撑责任分摊结果

Table 1 Inertia support responsibility allocation results of IEEE 30 node system power generation side

	机组					
	G1	G2	G3	G4	G5	G6
单位功率支撑责任/s	9	8	6	7	5	5
分摊结果/(MW·s)	216.0	73.6	65.82	103.6	0	2.50

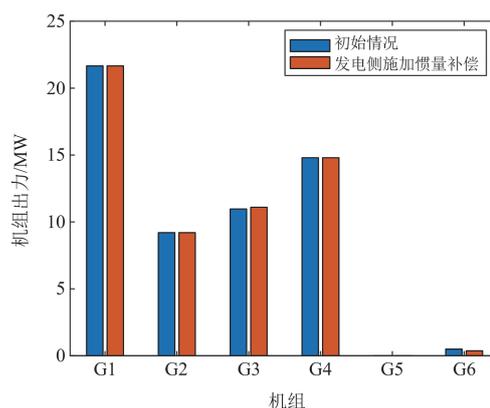


图 2 考虑供电侧惯量支撑责任分配结果的机组发电功率对比

Fig. 2 Comparison of unit power generation considering the allocation of inertia support responsibility on the generation side

3.2 分摊机制公理化标准的论证分析

发电侧机组惯量支撑责任分摊是根据机组实际运行情况进行事后责任分配, 旨在实现公平合理的激励机制, 并不属于事前议价, 故公理化标准中效率和合理性是最重要的。本节通过加入其他方法进行分摊结果的对比, 验证了 Aumann-Shapley 法在责任分配中符合公理化标准所要求的合理性和效率特性。该对比方法具体是发电侧各机组直接采用实际惯量支撑贡献进行分摊, 其分摊结果如表 2 所示。

表 2 IEEE 30 节点系统发电侧惯量支撑责任分摊结果(对比方法)

Table 2 Inertia support responsibility allocation results (comparison method) of IEEE 30 node system

	机组					
	G1	G2	G3	G4	G5	G6
单位功率支撑责任/s	9	8	6	7	5	5
分摊结果/(MW·s)	216	73.57	65.8	103.6	0	2.5

对照表 1 基于 Aumann-Shapley 法的分摊结果, 分析上述分摊结果, 使用 Aumann-Shapley 法分摊的惯量支撑责任与直接按照机组对系统的实际支撑贡献分摊数值几乎一致, 体现出其对机组实际发电出力的良好响应能力。由此可见每个发电单元的惯量分摊能够根据其实际发电量进行公平分配, 并且发电机组总的惯量支撑责任分配值等于系统的惯量支撑总需, 具有合理性和一定效率。由图 3 可见, 基于 Aumann-Shapley 法的分摊结果进行生产调度的成本要略低于对比方法的生产成本, 由此体现本文采用的 Aumann-Shapley 法在提高系统惯量支撑和降低机组生产成本上具有一定优越性。

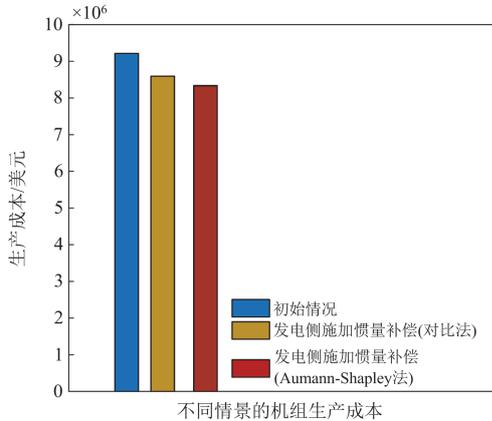


图 3 机组生产成本对比

Fig. 3 Comparison of unit production costs

3.3 分摊机制的效果分析

本节根据日负荷曲线, 使用 Aumann-Shapley 法对发电机组日内 24 h 的责任进行具体的分摊, 并对分摊效果进行分析。详细处理过程如下所述。

首先考虑机组的启停、爬坡、潮流以及热备用等安全稳定运行约束, 以系统调度总成本最小为目标进行机组组合优化, 然后采用 Aumann-Shapley 法对发电机组在日内 24 h 责任进行具体分摊。本文研究设定热备用系数为 0.2, 日负荷曲线见附录 B 图 B2。图 4 为各个机组在日内 24 h 的具体启停结果, 图 5 为各机组在各时间段的实际出力情况, 惯

量支撑责任分摊结果如图 6 所示。

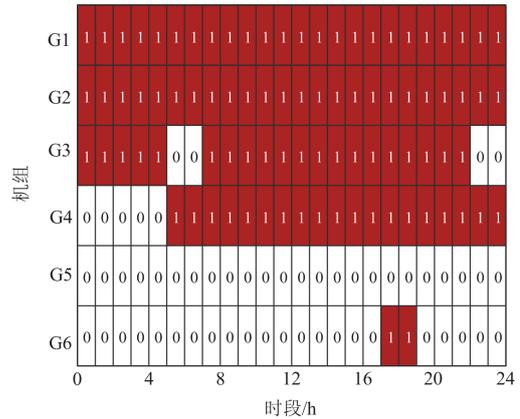


图 4 一天中机组组合情况

Fig. 4 Unit combination situation in a day

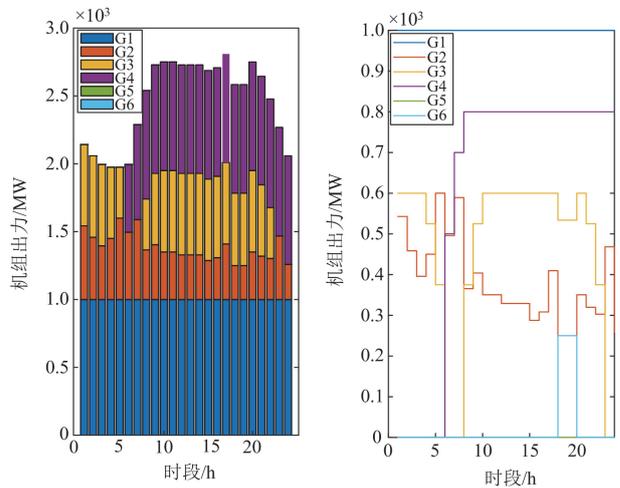


图 5 一天中机组实际出力情况

Fig. 5 Actual output of the unit in a day

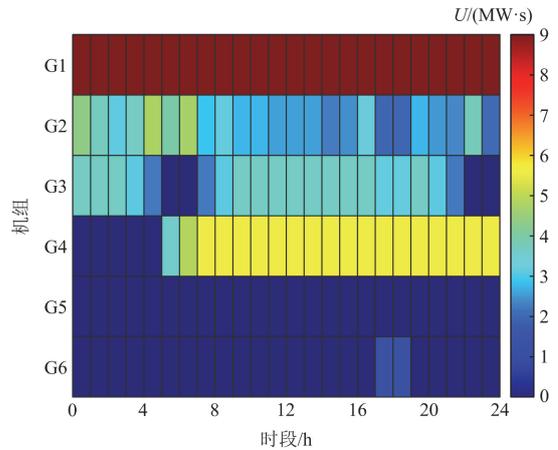


图 6 一天中发电侧机组惯量支撑责任分摊结果

Fig. 6 Allocation of responsibility for inertia support of generator units in a day

由图 4 分析可知, 机组 G5、G6 大部分时间是未被调用关机的状态, 尤其是机组 G5 全天停机。这一方面是因为机组所在节点和潮流约束的原因, 另一方面是机组 G5、G6 惯量支撑能力较差, 所能获得的惯量补偿经济激励并不足以覆盖其高额的启停成本和爬坡成本, 当其他综合生产成本更低的机组可以满足负荷需求和安全稳定的约束条件时, 机组 G5、G6 只能被迫选择停机。

综合观察图 4—图 6 可知, 对于发电机组 G1, 全天候都是开启的状态且分摊了最大的惯量支撑责任, 这是因为大型机组 G1 的综合性能决定了其要承担全天候主要的电力供应, 理所当然也承担了最大的惯量支撑责任。显然基于 Aumann-Shapley 法分摊到的惯量支撑责任能够映射机组对系统的实际惯量支撑贡献, 符合机组实际运行状态, 由此可见分摊结果能够真实反映各机组对系统惯量支撑的实际贡献。以 08:00、09:00 为例, 发现这两个时刻负荷大小不同且机组 G2、G3 皆是开机状态, 而且两个机组分配到的惯量支撑责任也不同。这表明时间因素能够影响机组的惯量支撑责任分摊结果, 即使发电侧的各个机组处于相同的启停状态, 由于系统实际惯量需求随时间变化导致参与机组分担惯量支撑责任也随时间改变。

3.4 分摊机制的适用性分析

本文对 IEEE 30 节点标准测试系统的机组配置进行改进, 新增两台传统机组和两台风电机组。研究采用正热备用系数为 0.05 和负热备用系数为 0.04 的传统机组, 不考虑风电机组备用系数。根据日负荷曲线采用 Aumann-Shapley 法分摊发电侧惯量支撑责任, 从而验证分摊机制的普适性。风电机组基于负荷需求的预测出力和实际出力见附录 C 图 C1, 各机组 24 h 的具体启停结果见附录 C 图 C2, 各机组在各时间段的实际出力见附录 C 图 C3, 24 h 内各个机组惯量支撑责任分摊结果见附录 C 图 C4。

表 3 IEEE 30 节点系统发电侧惯量支撑责任
分摊结果(不同配置系统)

Table 3 Inertia support responsibility allocation results (systems with different configurations) of IEEE 30-node system power generation side

	机组							
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
单位功率支撑责任/s	9	8	6	7	5	5	6	6
分摊结果/(MW·s)	35.46	39.36	55.68	0	0	35.1	68.1	0

对比分析分摊结果和效果图, Aumann-Shapley 法在新配置的系统, 仍然能够根据不同机组的惯量贡献, 公平地分配惯量支撑责任, 具有一定优越性和普适性。此外, 比较图 6 和附录 C 图 C4 可知, 当风电的实际发电量占系统总负荷需求的 39.61% 时, 虽然传统机组需要承担的工作负荷减少, 机组本身满足生产调度时所需惯量减少, 机组个体能够提供的惯量备用裕度增大, 但系统引入风电机组造成整体惯量资源相对更稀少, 传统机组需要额外承担风电机组本身应该履行的惯量支撑责任以应对频率稳定性需求, 所以承担惯量支撑的同步机组应给予更高的经济补偿。

4 结论

本文提出以合作博弈的理论进行数学建模, 并基于积分形式的 Aumann-Shapley 法, 对发电侧系统惯量支撑责任进行计算。结合案例, 验证得到以下结果和论点。

1) 在特定系统中, 与未进行惯量支撑义务分配和采用对比方法分摊的两种模式相比, 基于 Aumann-Shapley 法的发电侧惯量支撑责任分摊机制对发电机组有更明显的激励效果, 能够增大惯量支撑能力强且综合生产成本低的机组的竞争力, 从而使系统在满足生产调度时提高惯量支撑, 增强了系统应对频率波动的响应能力, 具有一定的可行性。

2) 采用 Aumann-Shapley 法能够合理地分配机组间惯量支撑责任, 且分配的责任十分接近于各个供电机组对电网的真实惯量支撑贡献。

本文研究初步探讨了发电侧惯量支撑责任分摊的可行性。在新型电力系统低惯量背景下, 本研究可为电力辅助服务中惯量补偿机制的设计提供有益的思路借鉴。后续研究拟采用同样的建模方法, 站在受益方角度, 基于 Aumann-Shapley 法研究不具备转动惯量的发电企业、新型储能企业、电力用户之间的惯量辅助服务成本的分摊问题。

附录 A

系统的实际惯量需求量主要受正文机组组合模型的发电机组的惯量常数和实际出力影响, 结合正文式(18)的离散化处理, 在第 k 个离散化区间系统的实际惯量需求的详细计算过程如式(A1)所示。

$$E\left(\frac{kP}{Z}\right) = \sum_i^N H_i P_i \quad (\text{A1})$$

将供电侧全部参与者的实际发电出力等分为 Z 个离散化区间，负荷对应需求侧负荷的实际大小。

附录 B

表 B1 IEEE 30 节点系统的机组信息

Table B1 Unit information for IEEE 30-node system

机组编号	所在节点	最大出力/ MW	最小出力/ MW	惯量时间 常数/s
G1	1	100	50	9
G2	2	100	25	8
G3	5	60	15	6
G4	8	80	20	7
G5	11	40	10	5
G6	13	40	10	5

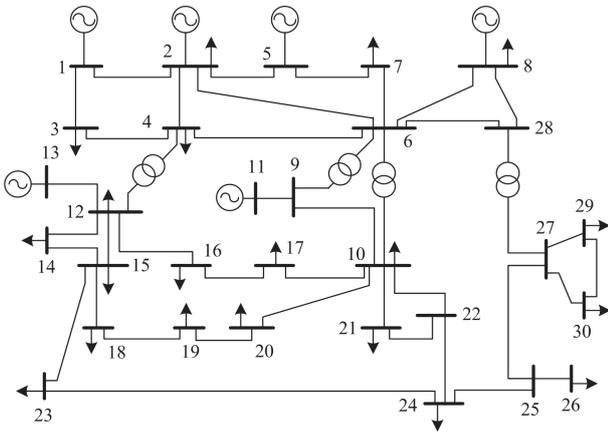


图 B1 IEEE 30 节点系统

Fig. B1 IEEE 30-node system

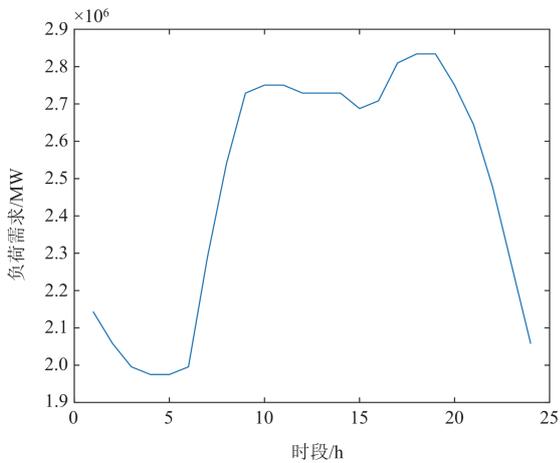


图 B2 单位日负荷曲线

Fig. B2 Unit daily load curve

附录 C

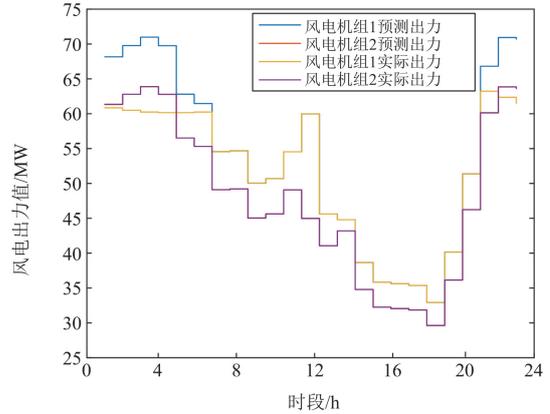


图 C1 风电预测出力和实际出力

Fig. C1 Wind power forecast output and actual output

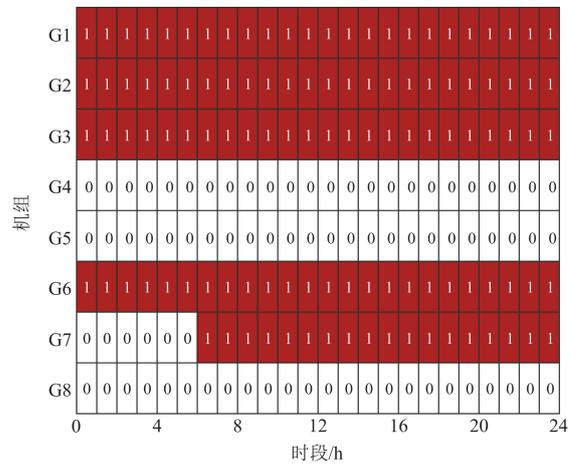


图 C2 一天中机组组合情况

Fig. C2 Unit combination situation in a day

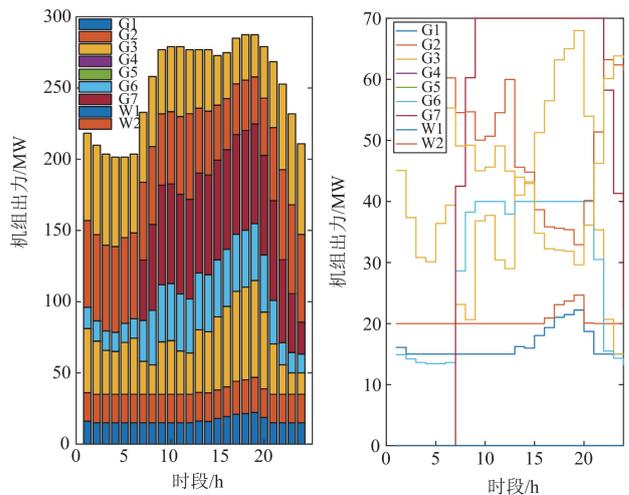


图 C3 一天中机组实际出力情况

Fig. C3 Actual output of the unit in a day

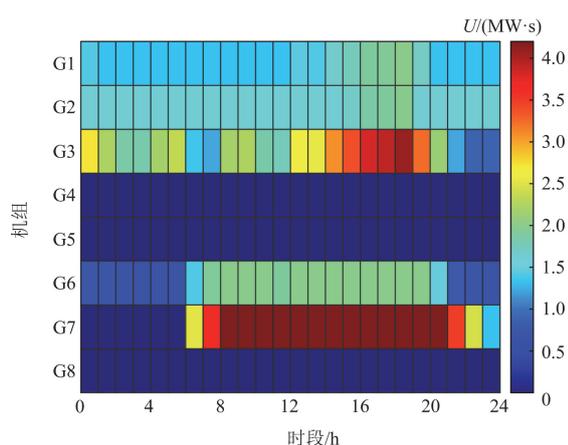


图 C4 一天中发电侧机组惯量支撑责任分摊结果

Fig. C4 Allocation of responsibility for inertia support of generator units in a day

参考文献

- [1] 林顺富, 张琪, 沈运帷, 等. 面向灵活爬坡服务的高比例新能源电力系统可调节资源优化调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 90-100.
LIN Shunfu, ZHANG Qi, SHEN Yunwei, et al. Optimal dispatch model of adjustable resources in a power system with high proportion of renewable energy for flexible ramping product[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 90-100.
- [2] 杨力, 朱晓纲, 李勇, 等. 规模化储能虚拟同步控制策略及其惯量分析[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(2): 190-197.
YANG Li, ZHU Xiaogang, LI Yong, et al. Virtual synchronous control strategy and inertia analysis of large-scale energy storage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 190-197.
- [3] 裴铭, 叶林, 罗雅迪, 等. 计及频率响应时空相关性的新能源电力系统惯量估计方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(8): 53-66.
PEI Ming, YE Lin, LUO Yadi, et al. Inertia estimation method for power system with renewable energy considering spatio-temporal correlation of frequency response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(8): 53-66.
- [4] 叶婧, 杨莉, 张磊, 等. 计及暂态频率稳定约束的同步惯量经济价值评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8): 50-62.
YE Jing, YANG Li, ZHANG Lei, et al. Economic value evaluation of synchronous inertia considering frequency transient stability constraints[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 50-62.
- [5] 王浩祥, 秦小宇. 新型电力系统背景下基于自适应参数估计电力系统惯量快速估计方法[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(1): 18-28.
WANG Haoxiang, QIN Xiaoyu. A fast estimation method of power system inertia based on adaptive parameter estimation under the background of new power system[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1): 18-28.
- [6] ZHANG M, LI W, YU S, et al. Optimal day-ahead large-scale battery dispatch model for multi-regulation participation considering full timescale uncertainties[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 189.
- [7] HU Q, HAN R, QUAN X, et al. Grid-forming inverter enabled virtual power plants with inertia support capability[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(5): 4134-4143.
- [8] SHANG L, DONG X, LIU C, et al. Fast grid frequency and voltage control of battery energy storage system based on the amplitude-phase-locked-loop[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 13(2): 941-953.
- [9] CHEN L, WANG X, MIN Y, et al. Modelling and investigating the impact of asynchronous inertia of induction motor on power system frequency response[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 117.
- [10] National Grid ESO. The enhanced frequency control capability project closing down report[EB/OL]. (2019-02-13) [2020-05-20]. <https://www.nationalgrideso.com/document/144441/download>.
- [11] KONTIS E O, DEL NOZAL Á R, MAURICIO J M, et al. Provision of primary frequency response as ancillary service from active distribution networks to the transmission system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 4971-4982.
- [12] AEMC. National electricity amendment (inertia ancillary service market) rule 2018[EB/OL]. [2021-11-20]. <https://www.aemc.gov.au/rule-changes/inertia-ancillary-service-market>.
- [13] STRBAC G, KIRSCHEN D S. Who should pay for reserve?[J]. The Electricity Journal, 2000, 13(8): 32-37.
- [14] HIRST E, KIRBY B. Allocating costs of ancillary services: contingency reserves and regulation[J]. ORNL/TM, 2003, 152.
- [15] 国家能源局南方监管局. 南方区域电力辅助服务管理实施细则[EB/OL]. (2020-12-25) [2022-06-13]. <http://nfgj.nea.gov.cn/adminContent/initViewContent.do?pk=4028811c80b7744a01815cbdb9a4006e>.
National Energy Administration Southern Regulatory Bureau. Implementation rules for southern regional

power auxiliary service management[EB/OL]. (2020-12-25) [2022-06-13]. <http://nfj.nea.gov.cn/adminContent/initViewContent.do?pk=4028811c80b7744a01815cbdb9a4006e>.

[16] MOULIN H. Axioms of cooperative decision making[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.

[17] HU Z, CHEN L, GAN D, et al. Allocation of unit start-up costs using cooperative game theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 653-662.

[18] YOUNG H P. Cost allocation: methods, principles, applications[M]. North Holland Publishing Co., 1985.

[19] HOUGAARD J L. An introduction to allocation rules[M]. Springer Science & Business Media, 2009.

[20] MOLINA Y P, SAAVEDRA O R, AMARIS H. Transmission network cost allocation based on circuit theory and the Aumann-Shapley method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4568-4577.

[21] 杨洪明, 段献忠. 双边交易模式下基于 Aumann-Shapley 值的阻塞费用分摊方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 60-64.
YANG Hongming, DUAN Xianzhong. A study of the Aumann-Shapley value based allocation method for congestion cost in bilateral transaction environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 60-64.

[22] 王峥, 刘创华, 魏珍, 等. 基于叠加定理和 Aumann-Shapley 法的发电权交易网损分摊[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 13-22.
WANG Zheng, LIU Chuanghua, WEI Zhen, et al. Losses allocation resulting from generation rights trade based on superposition principle and Aumann-Shapley method[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 13-22.

[23] 余贻鑫, 王艳君, 陈晓明. 基于实用安全域的电力系统安全成本分摊[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 1-7.
YU Yixin, WANG Yanjun, CHEN Xiaoming. Practical security region based security cost allocation of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(19): 1-7.

[24] GE J, ZHANG L. A study of reserve Aumann-Shapley pricing mechanism in a competitive electricity market[C]// 2006 International Conference on Power System Technology, October 22-26, 2006, Chongqing, China: 1-4.

[25] 陈丽霞, 孙弢, 周云, 等. 电力系统发电侧和负荷侧共同碳责任分摊方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 106-111.
CHEN Lixia, SUN Tao, ZHOU Yun, et al. Method of carbon obligation allocation between generation side and demand side in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 106-111.

[26] 鲁刚, 元博, 赵琮皓, 等. 计及系统惯量需求的发电容量市场定价方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(14): 12-20.
LU Gang, YUAN Bo, ZHAO Conghao, et al. Pricing method for generation capacity market considering system inertia demand[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(14): 12-20.

[27] 林晓煌, 文云峰, 杨伟峰. 惯量安全域: 概念、特点及评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 3065-3078.
LIN Xiaohuang, WEN Yunfeng, YANG Weifeng. Inertia security region: concept, characteristics, and assessment method[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3065-3078.

[28] HU Z, CHEN L, GAN D, et al. Allocation of unit start-up costs using cooperative game theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 653-662.

[29] 吴政球. 关于网损分摊公平性的思考[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 24-26.
WU Zhengqiu. Notes on the reasonableness of loss allocation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 24-26.

[30] 张嘉琪, 胥国毅, 王程, 等. 考虑同步机调差系数灵敏度与频率约束的机组组合[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13): 102-110.
ZHANG Jiaqi, XU Guoyi, WANG Cheng, et al. Unit commitment considering the sensitivity of the synchronous generator adjustment coefficient and frequency constraint[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 102-110.

[31] MOKRED S, WANG Y, CHEN T. A novel collapse prediction index for voltage stability analysis and contingency ranking in power systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 1-27.

收稿日期: 2024-09-22; 修回日期: 2024-11-26
作者简介:

史黎阳(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场、电力系统规划与可靠性; E-mail: 1131312571@qq.com
王海云(1973—), 女, 通信作者, 博士生导师, 研究方向为可再生能源发电与并网技术。E-mail: 327028229@qq.com

(编辑 张颖)