

计及成本回收与灵活性调节的双差异化容量补偿方法

金耀杰¹, 常广隆¹, 徐江¹, 陈雨¹, 徐青贵¹, 王海利¹, 李重春¹, 欧阳浩文²

(1. 内蒙古电力交易中心有限公司, 呼和浩特 010020; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 100096)

摘要: 随着新能源在我国能源供应中占比的逐渐增加, 其固有波动性会给电力系统带来电力电量不平衡的严峻挑战, 系统需要更多灵活性资源来应对系统平衡需求。常规火电机组作为一种优质的灵活调节性资源, 对新能源高比例入网至关重要。鉴于火电机组保障性收益下降的情况, 我国目前对煤电机组实行两部制电价政策来保障常规火电机组的基本收益, 但并不能有效激励火电机组进一步提高调节性能。在对比分析国内外典型容量补偿方法在我国市场环境下的适用性基础上, 提出了一种计及成本回收与灵活性调节的双差异化容量补偿方法, 具体包括保障型成本回收容量补偿和激励型灵活调节容量补偿两种补偿方式, 并建立了相应的补偿强度计算模型。该方法采用通用性评估指标帮助火电机组更精准地回收成本, 而且能激励其进一步提高灵活调节性能。最后, 通过 IEEE 30 节点系统模拟, 验证了该补偿方法在固定成本回收、灵活调节能力激励以及支持系统稳定运行方面的有效性。

关键词: 常规火电机组; 双差异化容量补偿; 成本缺额; 灵活调节能力; 综合性灵活价值

Double-Differentiated Capacity Compensation Method Considering Cost Recovery and Flexibility Adjustment

JIN Yaojie¹, CHANG Guanglong¹, XU Jiang¹, CHEN Yu¹, XU Qinggui¹, WANG Haili¹, LI Chongchun¹, OUYANG Haowen²

(1. Inner Mongolia Electric Power Trading Center Co., Ltd., Hohhot 010020, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 100096, China)

Abstract: With the increasing proportion of new energy in China's energy supply, its inherent volatility will bring severe challenges to the power system, and the system needs more flexible resources to meet the demand of system balance. As a kind of high-quality flexible regulating resource, conventional thermal power unit is crucial for integrating a high proportion of renewable energy. In view of the decline in the guaranteed income of thermal power units, China currently implements a two-part electricity price policy for coal-fired power units to ensure the basic income of conventional thermal power units, but it cannot effectively encourage thermal power units to further improve their regulation performance. Based on the comparative analysis of the applicability of typical capacity compensation methods at home and abroad in China's market environment, a double-differentiated capacity compensation method considering cost recovery and flexible adjustment is proposed, including two compensation methods: guaranteed cost recovery capacity compensation and incentive flexible adjustment capacity compensation, and the corresponding compensation intensity calculation model is established. This method uses universal evaluation index to help thermal power units recover costs more accurately, and can also motivate them to further improve their flexible regulation performance. Finally, simulations using the IEEE 30-node system validate the effectiveness of this compensation method in fixed cost recovery, flexible regulation capability incentives, and supporting system stability.

Key words: thermal power units; double-differentiated capacity compensation; cost gap; flexible adjustment ability; comprehensive and flexible value

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52277095); 内蒙古电力交易中心有限公司科技项目(202404)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China(52277095); the Science and Technology Project of Inner Mongolia Electric Power Trading Center Co., Ltd.(202404).

0 引言

在“双碳”目标驱动下,高比例新能源接入将成为电力系统的基本特征和发展形态^[1]。新能源渗透接入电网的比例日益提高,助力实现能源低碳转型目标的同时也给电力系统带来新一轮挑战^[2-4]。新能源发电的固有随机波动性将导致电力系统面临电力电量平衡的严峻挑战^[5]。火电机组以其稳定性和灵活性对新能源的高比例接入起到支撑作用^[6]。因此,在高比例新能源占比的新型电力系统中亟需激励火电机组主动进行灵活性改造,以提升系统整体的灵活调节能力,保障电力系统的可持续健康发展。

火电的提前退役将削弱系统的发电和调节能力,不利于电力系统的可持续健康发展^[7]。针对上述问题,国内外众多学者提出多种不同的容量成本回收方式来应对常规火电机组固定成本缺额问题。文献[8]以智利地区为例,分析了在电力批发市场中容量补偿机制对成本回收的显著效果。文献[9]引入有效容量的概念,以单位有效容量下的成本缺额均值作为容量补偿电价,确保了机组成本缺额的回收。文献[10]针对电能量市场上“缺失收入”,设计了一种基于电能量市场收益和容量补偿的内部收益率经济模型。文献[11]建立了双层决策模型,分析不同新能源渗透率下,容量补偿价格对火电企业决策以及市场的影响。文献[12]研究提出了一种适应新型电力系统发展初期的发电容量补偿机制,充分体现了不同容量资源的价值。2023年11月10日,国家发展改革委、国家能源局印发《关于煤电容量电价机制的通知》^[13],将各地的经济承受差异性考虑在内,提出了煤电容量电价机制。自《通知》印发以来,广东、山东、江苏、河南、陕西、重庆、新疆等各个省份陆续开始落实煤电两部制政策;2024—2025年,多数地方通过容量电价回收固定成本的比例为30%左右,部分煤电功能转型较快的省份回收固定成本的比例为50%左右。

总体来看,目前对容量补偿机制的研究存在以下两个方面的问题。一是现行容量补偿机制的补偿标准较为单一,并未充分考虑到各类机组成本回收程度的差异;二是缺乏对常规火电机组为促进新能源消纳而提供灵活调节能力的价值度量,导致火电挖掘自身灵活调节性的积极性不足。

为此,本文提出了计及成本回收与灵活性调节

的双差异化容量补偿方法,包括保障型成本回收和激励型灵活调节两方面容量补偿。建立了IEEE 30节点系统,通过算例分析验证了双差异化容量补偿方法的补偿效果,该方法能够更好地满足新型电力系统的发展需求,特别是在未来新型电力系统中新能源比例不断增大的趋势下,该机制能够显著提高市场运行效率,具有更强的市场适应性和前瞻性。

1 现行协助火电机组回收成本的方法适用性分析

新能源因其较低的边际成本在电力市场中具有竞价优势,占据了常规火电机组的部分市场份额,导致常规火电机组的发电小时数下降,这给常规火电机组的固定成本回收带来了挑战。为了应对这一问题,国内外电力市场采取了不同的方式帮助火电机组回收成本。典型的几种方式包括:稀缺定价机制、容量市场机制、容量补偿机制和两部制电价机制4种。

1) 稀缺定价机制:该机制是一种在系统电能和备用电力稀缺的情况下,通过提高电力现货市场的电能价格来支持常规火电机组回收成本的方法^[14-15]。目前,应用稀缺定价机制的地区包括美国德州、加拿大阿尔伯塔和意大利等^[16-17],这些地区的电力市场的共性反映了稀缺定价机制实施的基本特征:用户侧对时段性高电价风险承受度较高、市场监管机制健全、电力市场具备一定的供需弹性。

2) 容量市场机制:该机制主要是基于长期平均成本竞争发现容量价格,实现公平化回收机组容量成本,需要独立于电能量市场之外设立一个新的容量竞价市场^[18]。目前,意大利、美国PJM、英国等地建立了容量市场机制^[19-21]。同时美国德州电力市场也在稳妥推进容量控制(power capacity management, PCM),在容量市场机制领域正在进行有力探索。该机制实施的基础特征有:需求预测能力精准、市场透明度较高、市场监管能力较强。

3) 容量补偿机制:该机制是一种在监管部门的指导下进行的行政化补偿手段,其核心是通过核算补偿标准以及确定可补偿容量,在容量交付年为发电企业提供容量补偿,以回收固定成本^[22]。在国际上,智利已经积累了容量补偿机制的相关实施经验,国内的山东和广东地区曾经也对容量补偿机制进行了探索。该机制的基本特征为:设计复杂度不

高、可操作性强、电源投资风险较低。

4) 两部制电价机制:该机制通过市场化方式形成电量电价反映市场供需,通过行政化方式形成容量电价,充分体现煤电对电力系统的支撑调节价值^[23]。目前,我国对煤电实行两部制电价政策^[24],其中电量电价仍然是通过市场供需定价,容量电价则是对火电机组的固定成本进行补偿,所以该机制的容量电价部分本质上是容量补偿机制的延续。该机制的典型特征为:需与地方电力规划和市场机制相协同。两部制电价政策作为一种过渡措施具有较高的可操作性和较低的电源投资风险,这使得它在当前我国电力市场发展阶段具有一定的适用性,但是该机制容量电价标准较为固定单一,没有考虑到不同类型机组的实际建设和运营情况,导致其补偿效率不高,同时也不能有效激励火电机组进行灵活性改造来提升系统的灵活调节能力。

2 计及成本回收与灵活性调节的双差异化容量补偿方法

2.1 双差异化容量补偿机理

随着新能源高比例渗透并入电网,电力系统的实时平衡问题日益显著。为应对这一难题,电力系统必须配备充足的灵活性资源进行有效调节^[25]。解决该问题的核心在于,需要通过合理的市场机制来确保这些灵活性资源的价值得到认可,并激发市场主体提供灵活调节服务的积极性^[26]。如图1所示,本文提出了一种计及成本回收与灵活性调节的双差异化容量补偿方法,具体包括保障型成本回收容量补偿方式和激励型灵活调节容量补偿方式。该方法不仅对常规火电机组的成本差额进行差异化补偿,还对机组的灵活调节能力进行量化评估。通过充分回报火电机组的灵活调节服务产生的外部成本,引导市场主体提升其调节能力。

1) 保障型成本回收容量补偿方式:这部分补



图1 双差异化容量补偿方法设计框架

Fig. 1 Double-differentiated capacity compensation method design framework

偿旨在确保火电机组的固定成本缺额得以高效且精准的补偿。与传统均一化的容量补偿方式不同,该方式采用通用性评估数据指标,细致考量不同类型机组在基数电量占比、市场化收益能力和非计划停运小时数等多个维度的差异。通过设定差异化补偿修正参数,对补偿强度进行进一步修正调整,并在年度周期内对各机组进行差异化补偿。

2) 激励型灵活调节容量补偿方式:这部分补偿旨在鼓励火电机组提供更多的灵活调节服务,以应对新能源的波动性和不确定性。基于各类型机组的灵活性量化数据指标(如灵活调节容量、调节速度、可持续时间等),计算出机组的综合性灵活价值,再对综合性灵活调节价值进行评级。在月度周期内,根据评级结果对各机组进行差异化补偿。

2.2 保障型成本回收容量补偿标准

2.2.1 通用性评估数据指标

通用性评估数据指标旨在评估不同类型火电机组的成本缺额情况,该数据指标具有一定的普适性,代表着行业内、同一机组类型或者地区内各指标的平均数据水平。保障型成本回收容量补偿方式下建立的通用性评估数据指标具体包括九个数据指标,可按类分为分机组类型数据指标以及分地区性数据指标,如图2所示。

1) 分机组类型数据指标:机组单位容量年化投建成本折旧、单位容量平均运维成本、年利用小时数、总上网电量、度电燃料成本;

2) 分地区型数据指标:火电机组月度集中交易平均电价、基数电量、台年平均停用小时数以及台年平均停运次数^[27]。

通用性评估数据指标		
分机组类型 数据指标	单位容量年化投建成本折旧	年利用小时数
	单位容量平均运维费用	总上网电量 度电燃料成本
分地区型 数据指标	月度集中交易平均电价 基数电量	台年平均利用小时数 台年平均停用次数

图2 通用性评估数据指标

Fig. 2 Generic evaluation data index

2.2.2 保障型容量补偿强度计算模型

基于通用性评估数据指标对不同类型机组的成本缺额进行评估计算后,保障型成本回收容量补偿方式引入了3类差异化补偿修正系数:市场化电量修正系数、成本缺额修正系数以及容量充裕度修正

系数。这些修正系数用于描述不同机组类型在基数电量、市场盈利能力以及非计划停运时间上的差异,在此基础上建立了保障型成本回收容量补偿强度计算模型,如式(1)–(6)所示。

$$C_m = f_a f_c f_e C \sum_{j \in i} v_{ins,j} \quad (1)$$

$$f_e = 1 - \frac{N_i E_{base,i}}{E_{on,i}} \quad (2)$$

$$f_c = \frac{I_i V_{ins,i} + C_{o,mi} + C_{p,i} - C_{m,i}}{I_i V_{ins,i}} \quad (3)$$

$$I_i = C_i^{inv} \frac{r(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} \quad (4)$$

$$f_a = \frac{\sum_{k=1}^{n_m} a_k}{n_m} \quad (5)$$

$$a_k = \begin{cases} 0, & \text{非计划停运状态} \\ 1, & \text{其他状态} \end{cases} \quad (6)$$

式中: C_m 为机组类型 i 第 m 年获得的补偿强度; $v_{ins,j}$ 为机组类型 i 中第 j 台机组的装机容量; f_a 为容量充裕度修正系数; f_c 为成本缺额修正系数; f_e 为市场化电量修正系数; $E_{on,i}$ 为机组类型 i 的总上网电量; $E_{base,i}$ 为该机组类型的平均基数电量; N_i 为机组类型 i 的总机组数量; I_i 为机组类型 i 的单位容量年化投建成本折旧; $V_{ins,i}$ 为这一类型机组的装机容量总和; $C_{o,mi}$ 为机组类型 i 年度运维费用; $C_{p,i}$ 为该机组类型下的平均发电成本; $C_{m,i}$ 为机组类型 i 在电能市场的年度平均收益; C_i^{inv} 为该类型机组的单位容量投资建设造价; r 为贴现率; t 为该机组类型的运营年限; n_m 为第 m 年划分的时段数量; a_k 为机组在时段 k 的状态量。

三类修正参数的设定原则如下。

1) 市场化电量修正系数 f_e : 目前, 市场化机组的上网电量由市场化电量和一定比例的基数电量组成, 其中基数电量按照标杆上网电价结算, 已经将机组的固定成本考虑在内。因此, 提出了市场化电量修正系数的概念, 将基数电量排除在补偿范围之外。

2) 成本缺额修正系数 f_c : 该修正系数的设置旨在体现不同类型机组市场盈利能力的差异, 将机组在其他市场回收的成本排除在补偿范围之外。

3) 容量充裕度修正系数 f_a : 当机组在补偿周期内出现非计划停运情况时, 会影响机组容量的实际

可用率, 因此设置了容量充裕度修正系数, 将机组不可用的容量排除在补偿范围之外。

2.3 激励型灵活调节容量补偿标准

2.3.1 灵活性量化数据指标

依据常规火电机组平抑净负荷曲线波动的行为, 选取灵活调节容量、调节速度、可持续时间3个灵活性量化指标来度量机组的灵活调节能力。

1) 灵活调节容量 S : 火电机组降低出力至50%核准容量以下的可用容量, 如式(7)所示。

$$S = 50\%P_N - P_{\min} \quad (7)$$

式中: P_N 为机组的额定容量; $P_{\min}$ 为机组的最小出力容量。

2) 调节速度 V : 机组向上和向下爬坡速度的最小值, 如式(8)所示。

$$V = \min\{R_u, R_d\} \quad (8)$$

3) 可持续时间 T : 火电机组在系统灵活性调节需求时段, 以一定调节功率提供可调节容量所能持续的时间长度, 如式(9)所示。

$$T = \frac{\sum_t S_t}{P_{actual}^{flex}} \quad (9)$$

式中: S_t 为 t 时段机组的灵活调节容量; P_{actual}^{flex} 为火电机组实际调节功率。

2.3.2 激励型容量补偿强度计算模型

通过灵活性量化数据指标对不同类型机组的实际灵活调节能力进行量化计算后, 激励型灵活调节容量补偿方式致力于对机组综合性灵活调节价值进行计算和评级。最终得到激励型灵活调节容量补偿强度计算模型, 实现灵活调节能力的差异化补偿。

1) 综合性灵活价值计算

不同的灵活性量化指标可以从不同视角刻画机组的灵活性。然而, 各个量化指标之间难以进行客观的横向对比, 必须将多个量化指标的结果耦合, 才能对机组的整体灵活性进行评判。激励型灵活调节容量补偿机制首先对各项量化指标的观测数据进行归一化处理, 然后采用层次分析-熵权法对3个量化指标进行赋权, 反映它们在系统灵活供应中的相对重要性。最后, 将赋权处理后的各项指标进行线性汇总, 得到机组的综合灵活性价值, 实现了利用多个灵活性量化指标对机组灵活调节价值进行综合评价的目标, 具体的计算公式如(10)–(12)所示。

(1) 归一化数据处理

$$X_{kj} = \frac{x_{kj} - \min_j(x_k)}{\max_j(x_k) - \min_j(x_k)}, k = 1, 2, 3 \quad (10)$$

式中: x_{kj} 为机组 j 第 k 个灵活性量化指标的观测值; X_{kj} 为 x_{kj} 的归一化结果; $\max_j(x_k)$ 、 $\min_j(x_k)$ 分别为个体机组 j 所属机组类型中灵活性量化指标 k 的最大观测值以及最小观测值。

(2) 层次分析-熵权法赋权

$$z_k = \sqrt{p_k q_k} / \sum_{m=1}^3 \sqrt{p_m q_m}, k = 1, 2, 3 \quad (11)$$

式中: z_k 为指标 k 的综合权重系数; p_k 和 q_k 分别为指标 k 在层次分析法和熵权法下的主观权重和客观权重。

(3) 综合性灵活价值计算

$$f_k = \sum_{k=1}^n z_k x_{kj} \times 100 \quad (12)$$

式中: f_k 为机组 j 的综合性灵活价值评价得分; n 为评价指标数量。

2) 综合性灵活价值评级

本文基于综合性灵活价值的数值范围,将机组分为优质型、中等型和普通型灵活调节机组,在该补偿方式结算时可以直接按照3个灵活性等级进行差异化补偿,具体的分类如表1所示。

表1 常规火电机组综合性灵活调节价值评级

Tab. 1 Comprehensive flexible adjustment value rating for

thermal power units

灵活调节等级	灵活调节容量	调节速度	可持续时间	归一化综合性灵活价值	机组数量
优质型	大	快	长	80以上	a_1
中等型	较大	中等	较长	50~80	a_2
普通型	较小	较慢	较短	50以下	a_3

综上所述,激励型灵活调节容量补偿方式将根据每一灵活性等级下机组平均综合灵活价值在3类机组平均综合灵活价值总和占比,基于机组灵活性功能价值的差异给予差别化“阶梯式”分段补偿,补偿强度计算模型公式如式(13)~(14)所示。

$$x_s = \frac{\bar{f}_s}{\sum_{l=1}^3 \bar{f}_l} \frac{I_{\text{fix}}}{a_s}, s = 1, 2, 3 \quad (13)$$

$$\bar{f}_s = \frac{\sum_{j=1}^{a_s} f_j}{a_s}, s = 1, 2, 3 \quad (14)$$

式中: I_{fix} 为灵活性容量补偿费用的总额; x_1 、 x_2 、 x_3

分别为优质型、中等型和普通型灵活调节等级下单个机组获得的补偿费用; a_1 、 a_2 、 a_3 分别为系统内属于优质型、中等型以及普通型灵活调节机组的数量; $\bar{f}_1$ 、 $\bar{f}_2$ 、 $\bar{f}_3$ 分别为优质型、中等型和普通型灵活调节机组的综合灵活价值的平均值。

3 算例分析

3.1 基础数据设置

本文选取 IEEE 30 节点系统作为网络拓扑结构,其系统网架结构如图3所示。算例系统包含风电、光伏以及4种典型燃煤机组作为发电资源,具体技术参数列于表2。煤电机组成本相关的基本数据参数将根据某省在营煤电机组的实际情况设定:折现率为8%,服役年限为20 a。在完成基础数据的设定后,利用电力市场基础出清模型,并结合安全约束机组组合(security constrained unit commitment, SCUC)模型以及CPLEX求解器^[27],仿真时间跨度为8 760 h,每小时出清一次,以获取各时段机组的出力情况和系统的边际电价。这些数据对于计算火电机组的发电成本、年度运行净收益,以及评估补偿机制实施前后火电机组灵活调节空间的变化情况至关重要。

表2 燃煤机组技术参数

Tab. 2 Technical parameters of coal-fired units

机组类型	$P_{i,\max}$ /MW	$P_{i,\min}$ /MW	a_i	b_i	c_i	R_u/R_d ((p. u.)·h ⁻¹)
A	1 500	460	0.152	38.540	786.799	0.38
B	1 000	280	0.106	38.859	945.633	0.30
C	600	150	0.028	38.397	1 049.100	0.15
D	400	100	0.021	36.328	1 058.570	0.15

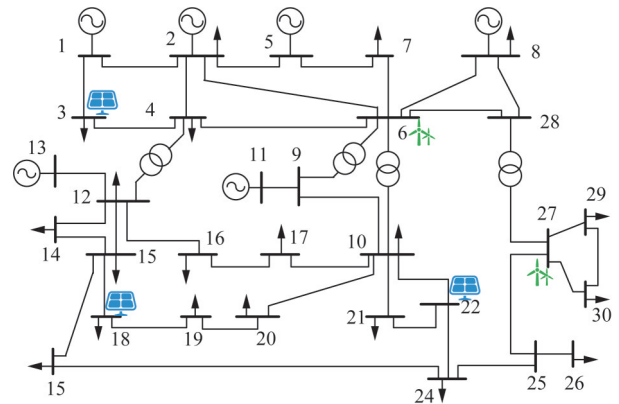


图3 IEEE 30节点测试系统拓扑图

Fig. 3 IEEE 30-node test system topology

3.2 保障型成本回收容量补偿强度计算

3.2.1 通用性评估数据指标设置

参考 2.2.1 小节,在本文的算例情境下,具体的通用性评估数据指标设置可以参考表 3—4。

表 3 分机组类型数据指标

Tab. 3 Extension group type data indicators

分机组类型数据指标	单位容量造价(元·kW ⁻¹)	单位容量运维费用(元·kW ⁻¹)	年利用小时数/h	年度总上网电量/kWh	度电燃料成本/(元·kWh ⁻¹)
A	2 771	132	6 760	9.501×109	0.251
B	2 884	133	5 475	5.130×109	0.286
C	3 271	117	1 617	9.642×108	0.278
D	2 700	106	1 460	5.472×108	0.268

表 4 分地区类型数据指标

Tab. 4 Regional type data indicators

分地区类型数据指标	月度中长期交易平均直接交易电价/(元·kWh ⁻¹)	基数利用小时数/h	台年平均停运利用小时数/h	台年平均停运次数/次
	0.437	810	39.570	0.510

3.2.2 保障型成本回收容量补偿强度

各类型机组获得的保障型成本回收容量补偿强度,计算结果如表 5 所示。

表 5 保障型成本回收容量补偿强度

Tab. 5 Capacity compensation strengths of guarantee-type cost recovery capacity compensation way

机组类型	A	B	C	D
补偿强度/(元·kW·a) ⁻¹	40	40	108	124

如表 5 所示,保障型容量成本回收补偿方式能根据机组的投资造价、市场化收益来动态决定补偿的强度,实现了对四类机组固定成本的差异化回收。其中机组 A、B 的市场化收益能够有效回收机组固定成本,而机组 C、D 难以通过市场化收益来回收机组固定成本,因此机组 A、B 的保障型补偿强度较小,而机组 C、D 的保障型补偿强度较大。

3.3 激励型灵活调节容量补偿强度计算

3.3.1 通用性评估数据指标设置

四类机组的灵活性量化指标数据如表 6 所示。

3.3.2 激励型灵活调节容量补偿强度

各类机组获得的单位容量灵活调节补偿强度,如表 7 所示。

表 6 灵活性量化数据指标

Tab. 6 Flexibility quantifies data indicators

机组类型	灵活调节容量/MW	调节速度/(MW·h ⁻¹)	可持续时间/h
A	312	29	8
B	141	33	5
C	67	5	4
D	13	13	3

表 7 激励型灵活调节容量补偿强度

Tab. 7 Capacity compensation strength of incentive-type flexible adjustment capacity compensation way

机组类型	A	B	C	D
灵活调节等级	优质型	中等型	普通型	普通型
补偿强度/(元·kW·a) ⁻¹	55	51	9	9

在激励型灵活调节补偿方式作用下,不同类型机组获得的激励型补偿强度与自身的灵活调节等级密切相关。如表 7 所示,机组 A 的灵活调节等级最高为优质型,因此获得的激励型补偿强度最大;而机组 C、D 的灵调节等级为普通型,所以其激励型补偿强度较小。

3.4 双差异化容量补偿方法补偿效果分析

各类型机组获得的双差异化容量补偿强度,计算结果如表 8 所示。

表 8 双差异化容量补偿强度

Tab. 8 Double differential capacity compensation intensity 元/(kW·a)

机组类型	保障型补偿强度元	激励型补偿强度	双差异化补偿强度
A	40	55	95
B	40	51	91
C	108	9	117
D	124	9	133

由表 8 和图 4 分析得出,区别于我国目前单一固定的容量补偿标准,双差异化容量补偿方法不仅能够差异化回收常规火电机组的成本缺额,而且能够激励常规火电机组主动进行灵活性改造,实现了对常规火电机组容量补偿方法的双重优化。算例仿真结果显示:机组 A 因其较强的市场盈利能力,在保障型容量补偿方式下获得的补偿很少,但由于自身灵活调节等级较高,获得的激励型容量补偿强度最大;机组类型 D 虽在保障型成本回收容量补偿方式下获得了最多的

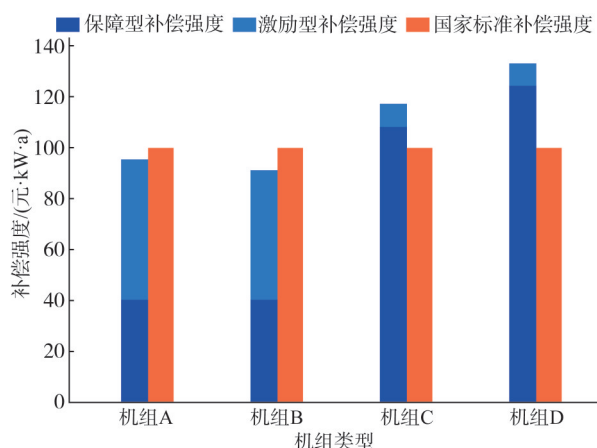


图4 不同补偿方法下机组补偿强度对比示意图

Fig. 4 Comparison diagram of unit compensation intensities under different compensation methods

补偿,但是其灵活性等级不高,导致获得的激励型容量补偿强度较小。该方法针对不同机组的补偿强度可以动态调整,能够更好地满足未来新型电力系统的发展需求,保障系统的安全稳定运行。

4 结论

本文提出了一种计及基本成本及灵活调节能力的双差异化容量补偿方法。通过算例仿真结果证明了该方法的有效性。主要结论如下。

1)本文构建的火电机组通用性评估指标体系,能够从多层面针对机组固定成本缺额情况进行分析,满足了对不同机组差异化分析的需要,是一套适合当前市场环境且相对完善的评估指标体系。

2)本文通过比较两类补偿方法对常规火电机组的成本缺额回收实施效果以及补偿前后机组灵活调节行为进行对比分析,证明了补偿方法更符合“因缺而补、不缺不补”的补偿原则。双差异化容量补偿方法能够有效回收常规火电机组的成本。同时,该补偿方法激励了常规火电机组提供灵活调节服务,从而推动了火电机组灵活性改造的进程,有助于为新型电力系统配备充足优质的灵活调节资源。

后续,将基于以上研究,将研究重点放在如何将补偿费用分摊传导在终端用户身上,探索更精细化的分摊机制,以更好地保证电力市场的公平性和合理性。

参考文献

[1] 康重庆,姚良忠.高比例可再生能源电力系统的关键科学问

题与理论研究框架[J].电力系统自动化,2017,41(9):2-11.

KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for high proportional renewable energy power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.

[2] 叶小宁,王彩霞,时智勇,等.国外高比例新能源消纳分析及对中国新能源可持续发展的建议[J].中国电力,2025,58(6):137-144.

YE Xiaoning, WANG Caixia, SHI Zhiyong, et al. Analysis of high proportion of new energy consumption abroad and suggestions for sustainable development of new energy in China [J]. Electric Power, 2025, 58(6): 137-144.

[3] 沈赋,曹旸,徐潇源,等.高比例可再生能源电力系统惯量预测方法研究综述[J].电力建设,2025,46(8):116-128.

SHEN Fu, CAO Yang, XU Xiaoyuan, et al. A review of inertia prediction methods for power system with high penetration renewable energy sources [J]. Electric Power Construction, 2025, 46(8): 116-128.

[4] 朱泽安,潘廷哲,孟子杰,等.基于决策树的含高比例光伏低压配网非参运行优化[J].南方电网技术,2025,19(12):135-145.

ZHU Zean, PAN Tingzhe, MENG Zijie, et al. Non-parametric optimal operation for low-voltage distribution networks with high penetration of PV generation based on decision tree [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(12): 135-145.

[5] 康重庆,杜尔顺,张宁,等.可再生能源参与电力市场:综述与展望[J].南方电网技术,2016,10(3):16-23.

KANG Chongqing, DU Ershun, ZHANG Ning, et al. Renewable energy trading in electricity market: review and prospect [J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(3): 16-23.

[6] MILSTEIN I, TISHLER A. On the effects of capacity payments in competitive electricity markets: capacity adequacy, price cap, and reliability [J]. Energy Policy, 2019(129): 370-385.

[7] 刘双全,谢蒙飞,陈清贵,等.适应云南电力市场的火电搁置成本补贴机制[J].南方电网技术,2020,14(6):40-46.

LIU Shuangquan, XIE Mengfei, CHEN Qinggui, et al. Subsidy mechanism of thermal power stranded costs for Yunnan electricity market [J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(6): 40-46.

[8] GALETOVIC A, MUÑOZ C M, WOLAK F A. Capacity payments in a cost-based wholesale electricity market: the case of Chile [J]. The Electricity Journal, 2015, 28(10): 80-96.

[9] 刘硕,于松泰,孙田,等.面向高比例可再生能源电力系统的容量补偿机制研究[J].电网技术,2022,46(5):1780-1789. LIU Shuo, YU Songtai, SUN Tian, et al. Capacity compensation mechanism for highly-proportional renewable energy power systems [J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1780-1789.

[10] FU K, WANG M, SUI B, et al. Capacity compensation price evaluation considering economic benefit of energy market in a power spot market [C]//2023 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia). July 07-09, 2023, Chongqing, China. New York: IEEE, 2023: 2031-2037.

[11] 武昭原,周明,王剑晓,等.激励火电提供灵活性的容量补偿机制设计[J].电力系统自动化,2021,45(6):43-51.

- WU Zhaoyuan, ZHOU Ming, WANG Jianxiao, et al. Mechanism design of capacity payment for incentivizing flexibility of thermal power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(6): 43–51.
- [12] WANG H, HAN Y, WANG H, et al. Design of generation capacity cost recovery mechanism for the early stage development of new power system [C]//2023 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia). July 07–09, 2023, Chongqing, China. New York: IEEE, 2023: 27–34.
- [13] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于建立煤电容量电价机制的通知 [EB/OL]. (2023–11–10) [2024–02–26]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202311/t20231110_1361897_ext.html.
- [14] 于松泰, 刘硕, 李国栋, 等. 适应我国电力市场发展的容量充裕性机制研究 [J]. 价格理论与实践, 2023(9): 130–136.
- YU Songtai, LIU Shuo, LI Guodong, et al. Study on capacity sufficiency mechanism based on China's power market environment [J]. Price Theory & Practice, 2023(9): 130–136.
- [15] 刘泽扬, 荆朝霞, 孙启星, 等. 基于系统动力学的发电容量充裕度机制分析 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14): 109–118.
- LIU Zeyang, JING Chaoxia, SUN Qixing, et al. Analysis on generation capacity adequacy mechanism based on system dynamics [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 109–118.
- [16] HOGAN W W. Electricity scarcity pricing through operating reserves [J]. Economics of Energy & Environmental Policy, 2013, 2(2): 65–86.
- [17] 朱继忠, 喻芸, 谢平平, 等. 美国稀缺定价机制及对我国现货市场建设的启示 [J]. 南方电网技术, 2019, 13(6): 37–43, 75.
- ZHU Jizhong, YU Yun, XIE Pingping, et al. Scarcity pricing of United States and its enlightenment to China [J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(6): 37–43, 75.
- [18] 李琪瑞, 杨知方, 李文沅. 面向差异化电源成本结构的容量市场机制设计 [J]. 电工技术学报, 2024, 39(23): 7498–7511.
- LI Qirui, YANG Zhifang, LI Wenyuan. Capacity market mechanism design for power sources with differentiated cost structures [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(23): 7498–7511.
- [19] STODDARD R, ADAMSON S. Comparing capacity market and payment designs for ensuring supply adequacy [C]//2009 42nd Hawaii International Conference on System Sciences, January 5–8, 2009, Waikoloa, HI, USA. New York: IEEE, 2009: 1–8.
- [20] HOBBS B F, HU M C, IÑÓN J G, et al. A dynamic analysis of a demand curve-based capacity market proposal: the PJM reliability pricing model [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 3–14.
- [21] 王子强, 李豹, 杜哲宇, 等. PJM 电力市场风险管控措施及对南方区域的建议 [J]. 南方电网技术, 2024, 18(1): 28–37, 68.
- WANG Ziqiang, LI Bao, DU Zheyu, et al. Risk management and control measures in PJM power market and suggestions for southern region [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(1): 28–37, 68.
- [22] 黄海涛, 贾秀锋, 程凯, 等. 新型电力系统下多元资源发电容量充裕性评估与保障机制 [J]. 电力系统自动化, 2024, 48(11): 77–87.
- HUANG Haitao, JIA Xiufeng, CHENG Kai, et al. Sufficiency evaluation and guarantee mechanism of generation capacity for diversified resource in new power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(11): 77–87.
- [23] 赵峰, 李清龙, 王伟. 电力市场中热电联产机组两部制电价机制的研究 [J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(6): 56–60.
- ZHAO Feng, LI Qinglong, WANG Wei. Research on two-part electricity price of combined heat and power plant in the electricity market [J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(6): 56–60.
- [24] 郝玲, 陈磊, 黄怡涵, 等. 新型电力系统下燃煤火电机组一次调频面临的挑战与展望 [J]. 电力系统自动化, 2024, 48(8): 14–29.
- HAO Ling, CHEN Lei, HUANG Yihan, et al. Challenges and prospects of primary frequency regulation of coal-fired thermal power units for new power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(8): 14–29.
- [25] 吴滇宁, 卢佳, 李刚, 等. 清洁能源占比高的电力市场环境下火电辅助服务补偿方法 [J]. 南方电网技术, 2018, 12(12): 78–85.
- WU Dianning, LU Jia, LI Gang, et al. Compensation method of thermal auxiliary service under electricity market environment with high proportion of clean energy [J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(12): 78–85.
- [26] 李建锋, 周宏, 吕俊复. 中国 1 000 MW 等级火力发电机组可靠性分析 [J]. 中国电力, 2017, 50(11): 1–7.
- LI Jianfeng, ZHOU Hong, LÜ Junfu. Reliability analysis of 1000MW thermal power units in China [J]. Electric Power, 2017, 50(11): 1–7.
- [27] WANG Z, WANG J, LI G, et al. Generation-expansion planning with linearized primary frequency response constraints [J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(4): 346–354.

收稿日期: 2024-06-26; 网络首发日期: 2024-12-08

作者简介:

金耀杰(1989), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力交易和能源经济分析, j278505897@126.com;

常广隆(1982), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力交易和能源经济分析, Guanglong2004@163.com;

欧阳浩文(2000), 女, 通信作者, 硕士, 研究方向为能源经济与电力市场分析, 867576759@qq.com。