

考虑浙江省电力市场发展的容量补偿机制设计研究

李俊杰¹,王坤¹,杨侃¹,孙秋洁¹,叶玲节¹,林明熠²,明昊²

(1. 国网浙江省电力有限公司经济技术研究院,杭州 310000;2. 东南大学电气工程学院,南京 210096)

摘要:在中国大力推进“2030年碳达峰、2060年碳中和”的“双碳”目标建设的过程中,风电、光伏等新能源得到了广泛的应用,但同时也导致了以燃煤发电为代表的火电利用小时数持续降低,难以在电能市场中回收成本的问题。针对浙江省的电力结构和市场现状,在多种容量补偿机制中选用直接容量补偿机制帮助浙江省燃煤发电机组回收成本,并设计了一套浙江省现实可行的直接容量补偿计算流程,对机组的有效容量、各类成本、市场收益和需补贴量进行计算。通过结合浙江省实际机组数据和未来发展预测,计算得到2025年和2030年不同入炉煤炭价格和上网电价情况下浙江省1000 MW机组和600 MW机组的直接容量补贴电价标准,并对其特点和差异进行了分析,可以对浙江省及其他尝试建立直接容量补偿机制的省份提供借鉴参考作用,从而有效保障火电企业收益,提高电网安全性和灵活性。

关键词:容量补偿;容量成本回收;燃煤机组;电力市场

Capacity compensation mechanism design research considering electricity market development in Zhejiang Province

LI Junjie¹, WANG Kun¹, YANG Kan¹, SUN Qiuji¹, YE Lingjie¹, LIN Mingyi², MING Hao²

(1. Economic Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;
2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: With China vigorously promoting the “Dual Carbon” targets of “striving to peak CO₂ emission by 2030 and achieving carbon neutrality by 2060”, renewables such as wind power and solar power have been widely used, but at the same time it also leads to the continuous reduction of thermal power utilization hours represented by coal-fired power generation, and it is difficult to recover the cost in the electricity energy market. According to the current situation of power structure and market in Zhejiang Province, a direct capacity compensation mechanism is selected to help recovering coal-fired power's costs, and a series of realistic compensation calculation process for Zhejiang Province is designed to calculate the effective capacity, various costs, market revenue and compensation price required for the unit. Combining the real unit data and future development forecast of Zhejiang Province, the direct capacity compensation price for 1000 MW and 600 MW units in 2025 and 2030 with different coal prices and on-grid prices are calculated and their characteristics and differences are analyzed. The results provide reference for Zhejiang and other provinces who want to establish direct capacity compensation mechanism, so as to effectively protect the revenue of thermal power enterprises and improve grid security and flexibility.

Key words: capacity compensation; capacity cost recovery; coal-fired units; electricity market

0 引言

2021年,全国煤炭等一次能源价格呈现了先波动上行后快速回落的走势。煤炭资源的价格高涨,大幅增加了燃煤机组的发电成本,造成了发电企业利润的急剧下降,甚至导致部分地区出现电力供应紧张的现象。

同时,我国为实现“2030年碳达峰、2060年碳中和”的“双碳”目标,提出构建以新能源发电为主体的新型电力系统,进一步提高了对电力系统运行灵活性、供电可靠性和充裕性的要求^[1]。一方面,传统的燃煤发电机组作为电力系统碳排放的主要来源,未来利用小时数将持续降低^[2];另一方面,其稳定可控的特性又不得不承担保障电力供应和电网安全稳定运行,难以直接被弃用^[3]。传统煤电机组若长期难以回收成本,会导致煤电企业亏损增高、经营困难,降低常规机组的投资期望,难以保证发电容量的充裕性^[4]。因此,有必要建立燃煤发电机组补偿机制来保障煤电机组回收固定成本。

燃煤发电机组的补偿机制多种多样,目前主流

收稿日期:2023-09-09;修回日期:2023-12-12

基金项目:国网浙江省电力有限公司经济技术研究院科技项目(JY02202281)

的补偿机制有稀缺定价机制、直接容量补偿机制和容量市场机制等^[5]。其中,直接容量补偿机制是通过计划方式制定容量补偿标准并直接对发电机组给予相应补贴以保障其回收成本的方法。该方法的规则简单,不确定性低,主要适用于电力市场发展初期、经济社会发展和金融市场欠发达的地区。

目前,国内外已有较多文章对直接容量补偿机制进行了相关研究。文献[6]介绍了智利全容量电价补偿机制中容量电价和充裕容量的核定方法,并与其他容量补偿机制的进行了对比,分析了直接容量补偿机制的优缺点。文献[7]对火电机组在现货市场的收入缺失问题进行了分析,论证了建立容量补偿机制的必要性,并针对直接容量补偿机制梳理了具体的执行流程、定价方法以及机制设计中的关键问题,对中国直接容量补偿机制的建设提供了建议。文献[8]针对四川省电力市场的特性制定了燃煤机组的直接容量补偿机制,并设计了具体的容量确定、成本核算和补偿分摊方法,使用“容量电价+电量电价”的原则重构了四川省的电价体系。文献[9]提出了一种定量计算发电机组充裕容量和系统发电容量充裕度的方法,并基于边际成本定价原理设计了一种以容量电价和补偿容量为基础的发电容量充裕性保障机制,保证了机组在计划投资回收期内能够回收固定成本。文献[10]通过双层决策模型分析了不同可再生能源渗透率下,直接容量补偿价格对火电企业运行决策和市场出清电价、辅助服务成本等因素的影响,结果表明制定合理的容量补偿机制能够有效保证火电企业收益,并激励其提供灵活性,从而提升电网整体经济性和运行效率。

上述文献均对直接容量补偿机制的原理和方法进行了分析,但缺乏完整的补偿价格计算流程,且未涉及煤炭价格、上网电价等市场因素变动对补贴价格带来的影响。由于不同省份市场化程度和电源组成结构差异较大,在其他地区适用的政策未必可以完全在浙江省内实施,且对浙江省进行容量成本回收机制的研究较少。本文在上述研究成果基础上,设计并建立了一套完整的容量补偿价格计算方法,并结合浙江省燃煤发电机组的具体情况计算了不同场景下保障燃煤机组成本回收的容量补偿价格,为浙江省进行容量补偿进行了参考建议。

1 浙江省容量补偿机制的必要性和可行性

1.1 浙江省面临的问题

浙江省是经济大省,但却是能源资源禀赋小省,发电企业燃料采购和供应存在较大压力,一次

能源资源自给率偏低,能源资源安全保障问题一直是困扰浙江发展的重要问题。“十三五”以来,浙江电力供需发生了深刻变化,电力发展面临多种新的形势。电源结构的迅速调整过快,给电网安全稳定运行带来巨大挑战。一是春秋小负荷月份,午间光伏大发导致负荷曲线在午间形成新的低谷,电网调峰压力增大;二是光伏实现平价上网后,光伏发电装机有望迅速增加,仅仅依靠火电参与调峰无法满足大规模新能源消纳;三是浙江省最大负荷发生在晚高峰,光伏发电无法顶峰,夏季高峰时段受进电力规模不断扩大,即便考虑吉泉直流等特高压受进和核准在建煤电,中长期电力供应缺口将持续扩大,电力供应偏紧状态难有改观。随着电力市场的建设步入现货阶段,为解决调峰压力、新能源参与市场、负荷服务商合理竞争等问题,迫切需要有效的容量补偿机制来保障系统容量充裕度。

1.2 国内外容量补偿机制概述

目前在国内和国际上,稀缺定价机制、直接容量补偿机制、容量市场机制等容量成本回收机制已经经过大量的理论探索和成功实践,具有较高的应用前景。

稀缺定价机制意味着要求市场需要设置极高的价格上限,允许系统在电能和备用稀缺的情况下现货市场价格急剧飙升。考虑到我国目前的电力市场整体协同与电价稳定、社会价值与政治环境等现实因素,目前的市场用户还难以承受极高电价的风险,同时市场监管机制也尚未完备,稀缺定价机制的风险过高,不宜采用。

战略备用机制是指通过合同,对一部分仅在容量短缺情况下使用的发电容量和需求响应进行约定。在该机制下,一些面临退役或停用的发电机组将与电网运营商签订合同,保持在备用状态以应对电力紧缺的情况。虽然快速可靠,但完全不具备对远期新增容量投资的激励,在未来电网波动性增加的大背景下,完全依靠电网运营商来支付容量成本是不现实的。

容量市场机制通过市场成员决定的供给曲线和监管机构制定的需求曲线来产生价格,反映长期边际发电容量成本,适用于市场机制与监管体系较完善的电力市场^[11]。然而,容量市场价格有效性很大程度上依赖于需求曲线,对运营商的系统可靠性计算能力要求较高^[12]。在现阶段失负荷价值和电量不足期望值等数据难以真实获取的情况下,容量市场也不能准确反映容量可靠性的实际价值,因此目前暂不适宜开展容量市场。

直接容量补偿机制通过监管机构制定的容量价格为发电企业提供容量补偿,固定的容量费用既能保障发电企业保持机组的可用性,又能在一定程

度上促进电能量市场竞争。相比于容量市场,直接容量补偿机制计算简单、易于实现,其补贴标准由监管机构决定,虽然难以准确及时地反映容量价值,但却易实现各类调控目标,能够有效保障国内火电机组的可持续运营能力,有序引导电源投资,并减小现货电能量价格波动。

1.3 浙江省容量补偿机制选择

浙江省目前尚处于容量成本回收机制初级探索阶段,直接容量补偿机制直接由政府确定待补偿容量和补偿成本的方式可操作性强,便于开展和推广。等到未来市场条件成熟时,可以考虑继续建立与浙江地区特点相适宜的容量市场,通过市场化方式形成容量电价及容量电费,反映容量真实价值。

综上所述,浙江省现阶段情况最适合采用直接容量补偿机制来开展容量成本回收,保障电网安全可靠运行,积极推动新型电力系统建设,助力“双碳”目标实现,下文着重讨论该方法的设计思路。

2 直接容量补偿机制流程设计

2.1 确定待补偿机组类型

根据机组历史的成本回收情况,筛选出市场中符合补偿条件的机组候选集合。考虑到不同规模、不同类型的机组单位投资成本、市场盈利能力差别较大,例如大型燃煤机组相比小型燃气机组发电成本更低、年发电量更多、在现货市场中的盈利能力更强,因此有必要针对不同机组进行分类,分别计算补贴价格。按照机组容量规模可将火力发电机组分为1 000 MW、600 MW、300 MW、300 MW以下等,按机组类型分为燃煤和燃气机组等。此外,对于水煤浆机组、煤矸石机组等低成本机组,实际补偿时应单独考虑。

2.2 核定机组有效容量

直接容量补偿的本质是电力用户为了维持系统的发电容量裕度而支付给发电商的费用,当发电商的机组在补偿周期内因机组自身原因出现非计划停运或限高等情况时,其可用发电容量会降低,从而减少对系统发电容量裕度的贡献,此时对应补贴周期内的容量补贴费用也应该减少,即机组获得的补贴与机组实际可用容量(以下称为有效容量)直接相关。

为了衡量机组对系统容量的贡献度,引入机组的等效可用系数。机组的等效可用系数(equivalent availability factor, EAF)是表征发电设备可靠性的一个数量指标,用发电设备的等效可用小时与统计期间小时之比表示为

$$k_T = \frac{\sum_{t=1}^{n_T} a_t}{n_T} \quad (1)$$

$$a_t = \begin{cases} 0 & \text{停运状态} \\ P_{\text{lim}} & \text{限高状态} \\ P_{\text{max}} & \text{正常状态} \end{cases} \quad (2)$$

式中: n_T 为统计期间小时数; a_t 为机组在时段 t 的状态; 停运状态为机组因自身事故或检修维护而停机,限高状态为机组因自身原因导致实际最大出力 P_{lim} 不能达到并网调度协议中规定的额定有功功率 P_{max} , 正常状态为机组随时可以听从调度安排进行正常工作(哪怕此时正处于停机状态,例如冷备用)。

机组的等效可用系数反映了机组在补贴周期内可用状态的时间长短,通过等效可用系数修正得到的有效容量可以等效看作为机组在整个补贴周期内的实际可贡献容量,但使用这种方法计算机组的有效容量需要真实的机组计划检修时间、非计划停运时间和限高状态时间统计,数据需求高,计算难度高。在实际运算中如果无法获得准确的机组可用状态时间长短,可以简单令 $k_T = 1$ 。

使用机组的等效可用系数来确定机组的有效容量

$$P_v = k_T P_0 (1 - L_{\text{ley}}) \quad (3)$$

式中: P_0 为机组的额定装机容量; k_T 为补贴周期 T 内机组的可用系数; L_{ley} 为厂用电率。

2.3 计算机组年化投资成本

根据总投资成本计算年化投资成本的过程主要考虑资金的时间成本,有净现值测算、内部收益率测算等多种方法。其中,净现值测算被美国 PJM、智利等电力市场广泛采用。使用净现值测算将机组总投资成本换算为机组年化投资成本可表示为

$$C_i = \frac{r(1+r)^N}{(1+r)^N - 1} C \quad (4)$$

式中: r 为贴现率; N 为机组的服役寿命,年; C 为机组的总投资成本,元。

2.4 计算发电成本

燃煤发电机组的发电成本主要可分为固定成本和可变成本两部分。固定成本是与机组发电量基本无关的固定支出,例如新电源投资、现存电源还贷、工资、奖金、保险、办公支出、运输费、技术转让、土地使用等企业经营所需支付的成本;固定成本需要均摊到机组的每度发电量中,机组的发电量越大,则每度电均摊的固定成本越小。可变成本是与机组发电量直接关联的成本,燃煤发电机组的可变成本以燃料成本为主,包含煤炭费用、水费、材料费等。燃煤

发电机组的单位发电成本可表示为

$$C_g = C_f + \frac{bC_c}{1-L_{fcy}} \quad (5)$$

式中： C_f 为分摊到每度电的固定成本，元/kWh； b 为火电机组的单位煤耗，g/kWh； C_c 为入炉煤炭价格，元/g，用于反映机组实际发电过程中的煤炭成本。

2.5 计算市场化净收益

机组的单位容量市场化净收益可表示为

$$R_c = (C_m - C_g)W_s - R_{tax} \quad (6)$$

式中： C_m 为火电机组平均上网电价，元/kWh； W_s 为电能市场售电量，kWh； R_{tax} 为税费，元。

2.6 计算成本回收缺额(需补贴量)

机组的容量成本回收缺额可表示为

$$L_c = C_i - R_c \quad (7)$$

2.7 制定容量补贴标准

针对某一具体类型的机组，容量补贴费用可以由单位有效容量的平均成本缺额确定，即单位有效容量的基本补贴量可表示为

$$\lambda = \frac{\sum_{i \in S} L_{c,i}}{\sum_{i \in S} P_{v,i}} N \quad (8)$$

式中： S 为一类机组的集合； $L_{c,i}$ 为机组 i 的单位容量成本回收缺额； $P_{v,i}$ 为机组 i 的有效容量。其中， N 为补贴因子，可根据各地区实际情况，考虑用户价格承受能力、投资激励需要等，在一定范围内进行调整。

则机组 i 获得的实际补贴量可表示为

$$L_i^{real} = \lambda P_{v,i} \quad (9)$$

在该制定方式下，市场中一类机组获得的补偿总额等于这一类机组的总成本缺额。但是，单位有效容量的成本缺额低于市场平均值的机组获得的补偿将大于成本缺额，处于盈利状态；反之，单位有效容量成本缺额较高的机组将处于亏损状态。因此该方式实际上在市场成员之间引入了竞争，削弱了市场成员虚报成本缺额、做高投资成本的动机，并激励其降低单位有效容量的成本缺额，例如优化机组降低煤耗率、降低投资运维成本，提高能量市场收益等。

2.8 容量补贴价格的影响因素

基于上述直接容量补偿机制流程，容量补贴价格的影响因素主要可分为机组成本、机组运行情况和市场价格3类。第1类是机组成本因素，包括机组的投资成本和固定成本：所有机组的成本总和越大，需要的容量补贴价格也越大。第2类是机组的运行情况，包括机组的服役寿命、机组等效可用系数、厂用电率、机组煤耗和售电量：机组的平均服役

寿命越长，年化投资成本越低，补贴价格越低；1台机组的等效可用系数增大会导致补贴价格的降低，但对这台机组来说其获得的补偿总量会增加；厂用电率的降低、机组煤耗的减少和售电量的增大都能够增加机组在电能市场的收益，从而降低补贴价格。第3类是市场价格，包括入炉煤价、火电机组平均上网电价和税费：昂贵的入炉煤价和税费会增加发电成本，减少机组收益，导致机组需要更高的补贴价格；而平均上网电价的作用相反，更高的平均上网电价能够增加机组收益，降低补贴价格。

在3类影响因素中，第1类和第2类因素在机组建设初期就已经确定，往往变化不大且规律性较强，而第3类因素中的入炉煤价和平均上网电价往往会随市场情况发生难以预测的波动，进而影响容量补贴电价，因此接下来的探讨将以入炉煤价和平均上网电价作为主要变量展开。

3 算例分析

3.1 基础参数

以浙江省1 000 MW级和600 MW级燃煤发电机组的实际数据为参考构造算例，在不考虑容量市场的情况下计算浙江省合理的容量补贴价格，以此分析浙江省具体的补贴情况。算例中的机组基本参数如表1所示，其中年化投资成本是参考造价在贴现率为7%的情况下折算得出的。

表1 浙江省1 000 MW和600 MW燃煤发电机组基本参数
Table 1 Basic parameters of 1 000 MW and 600 MW coal-fired units in Zhejiang Province

机组类型	1 000 MW	600 MW
年化投资成本/(元·kW ⁻¹)	164.73	196.17
固定成本/(元·kW ⁻¹)	179.62	257.19
发电煤耗率/(g·kW ⁻¹)	276.18	286.21
厂用电率/%	4.72	
等效可用系数	0.96	
机组寿命/年	30	

考虑2025年和2030年两个关键场景。由于无法准确预测未来所有需补贴机组的参数，使用浙江省燃煤发电机组的平均数组代替进行计算。

根据预测，浙江省“十四五”、“十五五”期间电力发展情况如表2所示。2025年，浙江省全社会最大负荷估计值为12 430万kW，估计1 000 MW机组有23台左右，600 MW机组有45台左右；2030年，全社会最大负荷将达到15 600万kW，估计1 000 MW机组有25台左右，600 MW机组有47台左右。

表2 浙江省电力发展情况

Table 2 Electricity development in Zhejiang Province

年份	全社会最大负荷/ 万kW	煤电装机/ 万kW	煤电利用小时 数/h
2024	11 880	5 323	4 791
2025	12 430	6 223	3 931
2026	13 010	6 423	3 904
2027	13 620	6 623	3 645
2028	14 280	6 623	3 467
2029	14 940	6 623	3 356
2030	15 600	6 623	3 352

3.2 多场景下1 000 MW和600 MW机组回收成本容量补贴价格

根据容量补贴机制设计思路,结合浙江省具体机组数据和未来形式预测,可以计算出2025年和2030年,在不同入炉煤炭价格和上网电价的情况下,浙江省1 000 MW和600 MW燃煤发电机组能够刚好回收成本的容量补贴价格如图1所示。

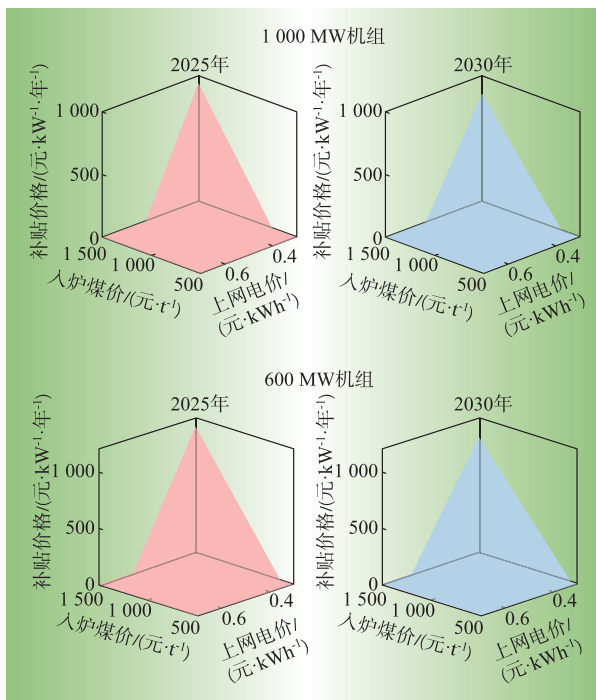


图1 燃煤发电机组容量补贴费用

Fig. 1 Direct capacity compensation prices for coal-fired unit

由图1可见,1 000 MW机组和600 MW机组在补贴价格的变化趋势上保持一致,随着入炉煤炭价格的上升和上网电价的下降,燃煤发电机组的成本缺额增大,保证回收成本所需要的容量补贴费用也逐渐上升。但在同等条件下,600 MW机组所需的容量补贴费用基本高于1 000 MW机组,虽然600 MW机组的投资成本略低,但其较高的年平均固定发电成本和发电煤耗率使其在同发电量的情况下依靠

能量电价回收的成本低于1 000 MW机组,因此需要更高的补贴费用才能完全回收成本。

对比同一类型机组在不同年份的容量补贴费用,发现2025年容量补贴费用的敏感性更强(2025年斜面斜率大于2030年斜面斜率)。在机组投资成本不变的情况下,容量补贴费用与机组的市场化收益直接相关,机组通过容量电价从市场中回收的成本越大,需要的容量补贴成本就越小。2025年,机组的年平均利用小时数较大,即在市面上的售出电量更大,当入炉煤炭价格或上网电价发生波动时,其市场化收益也将受到更大的影响,进而影响容量补贴费用,因此其容量补贴费用对入炉煤炭价格和上网电价的变化更加敏感。

2025年斜面与2030年斜面的斜率差异将产生一条交界线,是机组度电市场化收益的临界线,如图2所示。容量补贴费用高于临界线价格后,由于过高的入炉煤炭价格和过低的上网电价,导致燃煤发电机组的度电收益为负,即燃煤机组只要发电就会产生亏损,因为2025年机组的年平均利用小时数大于2030年,产生的亏损更大,所以才需要更高的容量补贴费用以回收成本;而2030年的利用小时数较低,亏损小,容量补贴费用低于2025年。容量补贴费用低于临界线价格时的情况正好相反,度电收益为正意味着发电可以通过电量电价回收更多成本,因此2025年的容量补贴价格更低。

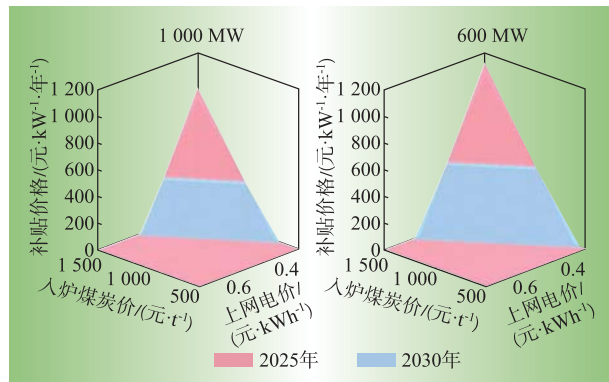


图2 机组市场化收益临界线

Fig. 2 Critical lines of return on unit marketization

4 结束语

在浙江,应分阶段建立与电力市场发展相适应的容量充裕性保障机制,以保障电力安全可靠供应,推进电力市场发展。在目前煤电机组已全面进入市场的环境下,可因地制宜着重建立容量补贴机制。容量补贴机制通过按照机组容量直接给予火电机组补贴的方式,保证了煤电机组固定成本的回收,初步解决煤电机组发电量低带来的固定成本回收与投资激励问题,保障了市场投资激励和长期有序发展,比

较适合当前中国电力市场建设初期阶段。本文研究了容量补贴电价机制的设计思路 and 具体方案,包括核定机组有效容量、计算机组各类成本、结算市场化收益和设计容量补贴电价等过程,对过程中设计的计算原理和方法进行了详细说明,得到了一套实用性广、可操作性强的容量补贴机制计算方法。基于浙江省燃煤发电机组实际情况和电力发展情况预测,对2025年和2030年不同入炉煤炭价格和上网电价情况下1 000 MW机组和600 MW机组容量补贴电价水平的特点和差异进行了分析。结果可见,直接容量补贴机制的补贴价格在不同入炉煤炭价格、上网电价等市场因素下有着不同的结果,能够间接反映燃煤发电机组的成本结构。设置合适的补贴价格,将能够提升了燃煤机组经营回报率,有利于燃煤企业回归良性发展。在我国当前能源革命转型的过程中,本文的研究结果能够对浙江省及其他尝试建立容量补贴机制的省份提供借鉴参考作用,保障未来燃煤发电机组合理发展,促进电力能源绿色转型。D

参考文献:

- [1] 马莉,范孟华,曲昊源,等. 中国电力市场建设路径及市场运行关键问题[J]. 中国电力,2020,53(12):1-9. MA Li, FAN Menghua, QU Haoyuan, et al. Construction path and key operation issues of electricity market in China[J]. Electric Power, 2020, 53(12):1-9.
- [2] 屈博,刘畅,李德智,等. “碳中和”目标下的电能替代发展战略研究[J]. 电力需求侧管理,2021,23(2):1-3,9. QU Bo, LIU Chang, LI Dezhi, et al. Research on the development strategy of electricity substitution under the target of “carbon neutral” [J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(2):1-3, 9.
- [3] 陈郑波,刘继春,刘俊勇,等. 电力市场下两部制容量电价与电量电价形成机制研究[C]. //中国电机工程学会电力市场专委会2018年年会论文集. 2018:1-7. CHEN Zhengbo, LIU Jichun, LIU Junyong, et al. Research on the formation mechanism of capacity electricity price and electricity price in the two-part electricity price in electricity market [C]. //Proceedings of the 2018 Annual Meeting of the Electricity Market Special Committee of the Chinese Society of Electrical Engineering. 2018:1-7.
- [4] PETITET, MARIE, FINON, DOMINIQUE, JANSSEN, TANGUY. Capacity adequacy in power markets facing energy transition: a comparison of scarcity pricing and capacity mechanism[J]. Energy Policy, 2017, 103(4):30-46.
- [5] NEWBERY D. Missing money and missing markets: reliability, capacity auctions and interconnectors[J]. Working Papers, 2015.
- [6] 黄海涛,许佳丹,郭志刚,等. 发电容量充裕性保障机制国际实践与启示[J]. 中国电力,2023,56(1):68-76. HUANG Haitao, XU Jiadan, GUO Zhigang, et al. International practice of generation capacity adequacy guarantee mechanism and its implications for china’s electricity market[J]. Electric Power, 2023, 56(1):68-76.
- [7] 王一,朱涛,张玉欣,等. 适应中国电力现货市场发展的容量补偿机制初探[J]. 电力系统自动化,2021,45(6):52-61. WANG Yi, ZHU Tao, ZHANG Yuxin, et al. Preliminary study on capacity compensation mechanism adapted to development of electricity spot market in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(6):52-61.
- [8] 覃琳,陈恩洲,刘阳,等. 水电富集区燃煤机组容量补偿机制研究[J]. 电网与清洁能源,2021,37(6):127-133. QIN Lin, CHEN Enzhou, LIU Yang, et al. Research on the capacity compensation mechanism of coal-fired units in hydropower-rich areas [J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(6):127-133.
- [9] 张粒子,许通,宋少群,等. 电力市场中发电容量充裕性评估方法及保障机制[J]. 电力系统自动化,2020,44(18):55-63. ZHANG Lizi, XU Tong, SONG Shaoqun, et al. Evaluation method and guarantee mechanism of power generation capacity adequacy in electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18):55-63.
- [10] 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.
- [11] 陈颖,王蓓蓓,黄文渊,等. 北美容量市场增量拍卖和容量转移权机制及对中国的启示[J]. 全球能源互联网,2023,6(4):417-427. CHEN Ying, WANG Beibei, HUANG Wenyuan, et al. Mechanism of north american incremental auction & capacity transfer right and enlightens to China [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(4):417-427.
- [12] 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.

作者简介:

李俊杰(1995),男,浙江杭州人,硕士,工程师,主要从事电力市场与电价研究工作。

(责任编辑 王 蕊)