

电力可靠容量评估机制路径探讨

王轩

睿博能源智库

简介¹

2025年1月，国家发展改革委、国家能源局发布了《电力系统调节能力优化专项行动实施方案（2025—2027年）》²要求“加快建立市场化容量补偿机制，以市场为导向确定容量需求和容量价值，对有效容量合理补偿，引导各类资源向系统提供中长期稳定容量”。其中“对有效容量合理补偿”是建立容量市场的一个重要出发点。

最近，《电力现货连续运行地区市场建设指引》³重申了这一点，并进一步要求建立容量评估机制。“探索建立发电机组可靠容量评估机制，综合考虑发电机组类型、出力特性、厂用电率、检修停机等因素，科学评估各类型机组及新型储能的容量系数，客观反映其对电力系统发电容量充裕度的实际贡献。”合理评估有效容量或可靠容量是实施容量市场的前提，有助于科学比较不同资源的容量

¹ 感谢睿博能源智库的Max Dupuy, 高驰，段婧琳对文章内容的补充和完善，以及何泉对文字和格式的编辑和修改。

² 国家发展改革委 国家能源局. (2025年1月). 关于印发《电力系统调节能力优化专项行动实施方案（2025—2027年）》的通知. <https://www.nea.gov.cn/20250106/6a9d8a6e621d495db0ca2ba14196f00f/c.html>

³ 国家发改委,国家能源局.(2025年9月).《电力现货连续运行地区市场建设指引》第四条 建立可靠容量补偿机制. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202509/P020250912610548270912.pdf>

价值，以在市场中经济高效地获取充足的、满足技术要求的容量资源，并为其系统服务提供合理的补偿。

但是，如何制定科学的有效容量评估方法以支持容量市场？能源监管部门可以考虑在之前的政策基础上发布更详细的规则，指导各省区科学评估可靠容量。本文梳理了若干国际经验，分析欧美在容量评估方面的探索和改革。采用更加公开透明的流程，有助于让虚拟电厂、储能和分布式资源等多元化市场主体共同参与讨论，加深对有效容量的理解，为未来容量资源投资提供有依据的判断，也为正在开展容量市场试点的省（区）市提供参考。

有效容量的评估方法及应用

有效容量评估用于衡量一类资源对系统可靠性的贡献，旨在考查系统供需紧张时资源是否具备可用性。目前国际上的主要计算方法包括⁴：

- **资源充足性评估模型。** ELCC（有效负荷承载力）方法测算的是维持同一可靠性标准不变的情况下，在系统中增加某一资源后系统可额外承载的负荷容量，其核心思路是通过模拟衡量新增某项资源对特定电网的实际贡献量。ELCC隐含的视角是，新增资源的贡献值不仅取决于资源自身的技术参数和发电能力，也包括能否配合电网的已有资源在供需紧张时出力。

具体而言，ELCC方法通常是在对未来电力系统发电资源组合和需求曲线的预测基础上，分情景模拟得到的结果。平均ELCC方法计算的是资源对可靠性的平均贡献，而边际ELCC方法考虑的是新增边际资源对系统容量充裕度和可靠性的贡献。通过边际ELCC方法计算有效容量，通常更能反映未来电力系统的变化，如随着可再生能源渗透率增加，边际可再生发电资源对可靠性的贡献递减。

ELCC方法也可以用于检测一个资源组合对可靠性的贡献。单个资源的有效容量取决于系统的发电组合、需求状况、电网结构等因素，将在同一个并网点的几种有互补性的资源捆绑评估所得到的结果可能会大于单个资源有效容量的简单叠加。因此，通过评估风光+储能等资源组合可以更全面地反映其对系统可靠性的互补作用。除了ELCC方法，其他通过资源充足性评估模型计算有效容量的常用方法还包括等效可靠容量（EFC）、边际可靠性改善（MRI）等。

⁴ 更多有关容量评估方法的讨论，请参考：ESIG (Energy Systems Integration Group). 2023a. Ensuring Efficient Reliability: New Design Principles for Capacity Accreditation. <https://www.esig.energy/new-design-principles-for-capacity-accreditation/>

平均ELCC和边际ELCC应如何选择？

目前，各国在采用 ELCC方法评估资源的有效容量时，普遍面临采用平均 ELCC方法还是边际 ELCC方法的问题。

在北美的实践中，在 2010 年前后，PJM、NYISO和 MISO⁵等主要区域电网运营商普遍采用平均 ELCC方法。随着风光等可再生能源渗透率提高，上述运营商逐渐转向采用边际 ELCC方法，以更准确地反映资源在高渗透场景下的边际可靠性贡献。

两种方法背后反映的是不同的理念与应用逻辑：

- 平均 ELCC方法的出发点更接近调度视角。在同一类别资源之间，任意一个资源在某一时段的出力特性与对系统可靠性的贡献被视为基本一致，因此应当给予统一的容量价值。该方法强调在系统运行层面，同类资源的贡献不应区分先后或个体差异，以便于管理和补偿。
- 边际 ELCC方法来自优化投资的视角。即便是同一种资源，由于建设时系统中其他发电资源、负荷结构和储能配置等条件已发生变化，每新增 1 兆瓦资源的可靠性价值也随之不同。因此，边际 ELCC方法力图反映新建资源对系统可靠性所提供的真实“增量贡献”，并据此形成更精准、更具激励效果的容量价值信号。

表1：边际ELCC与平均ELCC比较

	优点	缺点
边际 ELCC	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 真实反映新增资源的边际可靠性贡献 ▪ 提供更准确的投资决策信号 ▪ 更适合高可再生能源渗透场景的系统 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 计算复杂度高，对模型要求高 ▪ 与利益相关方的沟通成本较高 ▪ 年度间数值波动较大，可能影响投资的确定性 ▪ 导致同类资源不同“批次”获得差异化补偿，易引发争议
平均 ELCC	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 计算相对简单，实施成本低 ▪ 给同类资源统一容量系数，更易管理，透明度高 ▪ 易于与利益相关方沟通 ▪ 容量贡献值较为稳定，有利于降低投资不确定性 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 在可再生能源高渗透率情况下与真实边际价值相差较大 ▪ 难以提供有效的投资引导信号，可能导致资源错配 ▪ 无法及时反映资源建设的饱和效应

⁵ CAISO. (2024年11月). Mid-Term and Long-Term Study Results Year-Ahead Study Update.

<https://stakeholdercenter.aiso.com/InitiativeDocuments/Presentation-Resource-Adequacy-Modeling-and-Program-Design-Modeling-Workshop-Nov-19-2024.pdf>

- **历史可靠性风险小时法**。这种方法考查历史可靠性风险最大的小时中，各种资源对于可靠性的贡献，如在夏天下午的时段观察资源的实际出力情况。这种方法相对简单，可以得到每个资源的历史数据，从而更加客观地反映真实情况。由于开展评估需要预先判断可靠性风险最大的时间段，有可能无法应对未来电力系统的挑战。
- **综合方法**。由于资源充足性评估模型法主要基于对未来的假设，且对数据质量和建模有较高的要求，而历史可靠性风险法无法捕捉到未来系统中各个元素的变化和气候变化等极端情况，有的地区通过结合两种方法计算有效容量。例如，对于波动性可再生能源，MISO通过ELCC模型模拟出未来系统高风险时段各类资源的可用容量，并结合过去三年在备用率最低时段中一类资源的平均实际出力来决定有效容量⁶。这样可以简化计算步骤，并更好地反映同一类资源的实际运行情况。

表2. 有效容量评估方法比较

	数据来源	结果	优势	缺点
资源充足性评估模型	基于历史数据和未来多种情景模拟	概率性的结果反映资源边际或者平均有效容量	针对可靠性风险大的时段，不仅是峰值时段的资源贡献 能够考虑到未来天气变化、供应需求和电网的互相作用	需要高质量的数据、假设和算力 无法精确到单个资源的容量贡献 缺乏对实际提高可靠性的激励
历史可靠性风险小时法	基于历史数据的计算	固定结果一般反映资源的平均有效容量	执行简单明了 对未来的可靠容量有较稳定的预期	无法捕捉未来电力系统的变化，如高比例可再生能源和高电气化的情景 对除历史负荷峰值以外时段的可靠性风险评估不足

⁶ ISO Bot.(Februray 2025).How MISO Determines Capacity Accreditation for Resources.

<https://www.pcienergysolutions.com/2025/02/25/how-miso-determines-capacity-accreditation-for-resources/#:~:text=MISO%20conducts%20system-wide%20ELCC%20studies%20to%20determine%20the,peak%20hours%2C%20to%20allocate%20the%20system-wide%20ELCC%20value>

综合方法	结合两者	结合两者	可以将模拟结果应用到设置高风险小时数，并且能够更简单地计算每种资源的有效容量	有可能仍然无法准确地估计有效容量和激励提高可靠性
------	------	------	--	--------------------------

可靠容量评估结果可以广泛应用到容量义务和容量补偿的计算中；无论在电力市场区域还是垂直一体化的电力公司辖区，容量评估结果都是电力资源投建决策的重要参考。可靠容量评估也是容量市场建设的一个关键步骤，通过衡量各资源对可靠性的贡献，为后续通过公平竞争筛选容量资源打下基础，并直接影响各资源所能获得的容量补偿。由于特性不同，每种资源所能提供的容量价值有很大的差异，欧洲一些国家也在讨论如何将灵活性反映到有效容量的计算中⁷。例如，储能、需求响应机制虽然提供的能量有限，但可以快速响应；煤电虽然在燃料供应充足时可以持续发电，但启停时间长且易受设备故障等因素制约，因此可以根据资源灵活性的相关属性对有效容量系数进行调整。

不管选择哪种容量评估方法，都需要采用统一的方法进行资源评估并充分考虑可能的影响，如是否能更好地激励资源响应系统需要、是否会导致某种资源的过度支付或支付不足、是否会对终端电价造成太大压力等。

随着可再生能源发电比例和需求侧多样性不断提高，以及气候变化加剧，系统面临的可靠性风险日趋复杂，需要采用前瞻性的思维，根据系统情况的变化不断更新数据来源和假设，将可再生能源和电气化的发展、运行调度约束等方面的变化反映到模型的数据库和假设中。另外，由于容量评估可能影响的实体逐渐增多，电力系统转型步伐加快，有必要公开评估方法的数据、假设和结果，提高评估过程的公众参与度和透明度，帮助市场主体更好地理解、判断各种资源的容量价值，从而更有效地解决系统资源充裕度的问题。

⁷ Johnny Gowdy, Ellie Brundrett. (March 2023). Capacity Market reform – greater resilience and value for money, with less carbon. Regen REMA Insight Paper. <https://www.regen.co.uk/insights/rema-insight-paper-capacity-market-reform>

美国区域输电组织（RTO）容量评估机制的新动向

2000年初，各RTO就普遍实施容量评估机制，并在实践中不断演进。随着可再生能源渗透率提升、负荷结构变化和极端天气事件增多，传统的容量评估方法面临新的挑战，也推动了评估框架持续更新。

- 区域输电组织在容量评估时倾向于采取技术中立的原则，对可再生能源、火电和储能、虚拟电厂等新型资源使用统一的容量评估方法，以合理分析各类资源在系统面临可靠性风险时所起的作用。此前，ELCC方法没有应用于火电的容量评估，而是采用装机容量减去平均非强迫停机率，近似计算可靠容量。这种方法忽视了火电机组停机在时间上的相关性。由于燃料供应、设备故障、极端天气连锁效应引发的大规模同时停机事件，已经暴露出传统容量评估方法对火电机组可靠性贡献的高估。例如，在2022年冬季风暴期间，PJM区域曾有近四分之一的装机容量处于强迫停机状态，其中约70%为燃气机组⁸。因此，无论何种资源都应该放在同一系统条件下，利用同一方法重新评估。从2024年开始，PJM转向使用跨所有资源的边际ELCC方法，这被认为是更公平和更符合经济原理的办法。
- 随着电力系统风险来源扩大，各RTO从仅关注峰值时段的资源表现，转向在全年全时段评估容量与灵活性风险。业界普遍认为，仅关注高峰负荷时刻的资源表现已经不能全面概括电力系统多变的特点。由于发电成本、技术发展、发电预测难度增大、需求侧电气化、极端天气频发等原因，可靠性风险不再局限于峰值负荷的时段，而是在全年多个时刻都有可能因容量充裕度和灵活性不足导致的可靠性风险。
- 为了更好地衡量可靠性风险，可靠性标准也在逐步演化，从之前只能反映停电频率和概率的失负荷指标（LOLE或LOLP），发展到包括可能出现的持续停电时间、最大失负荷程度和期望未满足的需求（EUE）等综合的评估指标。然而，如何将这衡量标准反映到有效容量的计算中，还没有非常成熟的方法⁹。
- 气候变化和季节因素被越来越多地考虑到资源充足性规划和容量市场中。之前，容量市场主要解决资源充裕度问题，针对未来一段时间的年度最大负荷预测，吸引更多资源满足新增负荷。但这可能会忽略季节性发用电两侧资源的变化，如可再生能源发电的季节性波动、空调或采暖用电等季节性负荷变化、极端气候条件下可能导致的火电停机等。近年来，越来越多的RTO采用更精确的季节性容量充裕度和灵活性评估。
- 边际ELCC方法更能反映新进入资源对未来整个系统的影响，有助于投资决策，减少系统的总成本。RTO开始基于边际资源的贡献评定同一类资源的可靠容量，以激励新建资源更好地响应系统需求。例如，NYISO，PJM、MISO转向使用边际容量评估方法，随着光伏饱和度增加，系统净

⁸ PJM. (July 2023). Winter Storm Elliott. https://eec.ky.gov/Energy/Documents/20230717-winter-storm-elliott-event-analysis-and-recommendation-report.pdf?utm_source=chatgpt.com

⁹ ESIG (Energy Systems Integration Group). 2024b. New Resource Adequacy Criteria for the Energy Transition: Modernizing Reliability Requirements. <https://www.esig.energy/new-resource-adequacy-criteria/>

负荷最大时段有所转移，使其有效容量降低¹⁰。同时，RTO也允许多个资源组合进行整体评估，以充分考虑其互补性。

对我国的参考意义

煤电容量电价机制已经在全国范围内实施了近两年。最近，一些省区开始尝试建立容量评估方法，对多种资源进行容量评价，并支付相应的容量电价。目前，各地的做法不一，且对于衡量有效容量的方法尚未有清晰、公开的说明。各省区正加快建立多种资源公平竞争的市场化容量补偿机制，相应的容量评估方法也将不断完善。

评估有效容量是为了更好地比较各个资源对可靠性的贡献，避免对未提供系统服务的资源支付容量费用，市场参与者、电网公司和政府部门也能对各个资源如何满足系统可靠性做出充分的判断。美国虽然还没有统一的有效容量计算方法，但是各RTO重视容量评估并公开计算方法和结果，以鼓励更多的利益相关方参与评估体系建设。欧洲输电系统运营商联盟（ENTSO-E）根据欧盟委员会和欧洲能源监管合作机构（ACER）的要求，在最近发布的欧盟资源充足性规划（ERAA）方法修改建议中，增加了可靠容量系数的计算公式和说明，以非强制性的形式实施规定，帮助成员国简化容量市场快速申请流程¹¹。

我国最近出台的文件多次提到建立可靠容量评估机制和容量市场的相关要求。相关部门可制定具体的规范，指导地方设立容量评估机制。在条件成熟时，可以利用市场化的方式决定容量服务的提供方和容量支付的价格，这将改善目前根据煤电申报的最大出力和行政确定的固定容量电价决定容量支付的现状¹²。欧美容量评估机制的历史演进和政策调整经验，值得借鉴。

1. 统一有效容量评估法。编制全国统一的有效容量评估方法指导意见，作为各地区建立容量市场的基础，促进容量市场各个资源广泛参与公平竞争。这种方法应建立在科学充足的分析和公开透明的评估流程上，提高市场主体对容量评估的理解。同时，它应具有可重复性和可追溯性，能够支持每年、每季度的容量评估工作，并确保其结果相对稳定、具有良好的可预期性。

2. 从评估方法的设计细节来说，统一的有效容量评估方法应该具备以下特征¹³：

¹⁰ Sam Newell, Andrew Levitt, Ragini Sreenath. (June 5, 2025). Developments in Capacity Accreditation. Brattle. <https://www.brattle.com/wp-content/uploads/2025/06/Developments-in-Capacity-Accreditation.pdf>

¹¹ ENTSO-E. (Nov 2025). Proposed revision of the methodology for the European Resource Adequacy Assessment (ERAA). Annex 1. <https://www.entsoe.eu/eraa/methodology-revision/>

¹² 胡军峰,黄少中,段婧琳,王轩. (2025年11月03日).完善煤电容量电价机制，助推灵活性资源发展.《中国能源报》
https://paper.people.com.cn/zgnyb/pc/content/202511/03/content_30113325.html

¹³ ESIG (Energy Systems Integration Group). 2023a. Ensuring Efficient Reliability: New Design Principles for Capacity Accreditation. <https://www.esig.energy/new-design-principles-for-capacity-accreditation/>

- 制定并不断完善可靠性风险评估指标，失负荷期望（LOLE）等单一的可靠性指标需要向未满足的需求期望（EUE）、最大失负荷（MW）等综合的指标体系发展。对未来可能出现缺电的频率、持续时间和规模做更精准的风险测算，以此作为评估资源有效容量的基础。
 - 平等对待所有容量资源，用同一种方法测算所有可用资源（包括煤电、气电、需求响应、可再生能源、储能、虚拟电厂）对可靠性的贡献。跨省跨区输电同样也能起到维持可靠性和提供灵活性的作用，因此外来电也应该作为容量资源考查有效容量。
 - 不仅关注系统紧张时期各个资源的容量贡献，还要考虑各类资源的响应速率、响应时长、爬坡速率等能力，以全面反映其对系统可靠性的实际贡献。例如，一些欧盟国家考虑让储能、需求响应等能量有限的资源，基于可用性和持续时长更多参与制定各自的可靠容量系数¹⁴。
 - 持续更新评估气候变化对系统可靠性的影响。对于部分火电，需要考虑到极端气候条件下燃料供应中断和设备故障等的连锁反应。
 - 允许在同一节点并网的、有互补性的资源组合进行有效容量评估，以充分显示其整体容量价值。例如，风电+光伏+储能的综合有效容量将大于资源单独有效容量的加成。
 - 避免区别对待现有和新增资源，虽然区分新旧资源的做法有可能会兼顾各个时期投产资源的利益，但可能会导致市场扭曲。
3. 容量评估方法是容量市场运作的基础，其选择将影响市场对不同资源的价值判断、投资激励、退出信号和支付分配方式：
- 政策制定和市场监管者需要认识到每种方法的局限性和对容量市场的影响，特别是要对新旧资源的激励、市场的高效与公平以及社会可接受度等方面进行权衡。
 - 在容量市场中，确保资源只能按照其有效容量申报可参与的容量量值，防止资源虚高填报名义容量，确保容量市场支付与资源的真实贡献一致。
 - 容量市场可能会随着可靠性风险诱因变化而演变。在可再生能源和新型主体渗透率不断提高的情况下，系统对调节能力/灵活性容量的需求也会不断增加。目前一些前沿讨论尝试拓展传统“容量”的内涵，将资源的灵活性特征纳入评估框架，如探索如何量化资源向下调节的能力（如减少发电或增加用电帮助消纳可再生能源），有助于激励对灵活资源的投资，确保调节能力的长期充裕和短期可靠运行。
 - 需要定期评估各个资源在系统实际运行中的表现，通过现货市场和辅助服务市场机制激励其在供需紧张时期发挥积极的调节作用。容量市场支付应该根据实际绩效进行考核，奖励超出核定有效容量期望的资源，惩罚接受容量支付但没有发挥可靠性作用的资源。同时，容量绩效考核应在技术特性和可用性时段方面保持一致，仅在资源具备提供可靠性贡献的时段考核，确保不同类型的资源在统一、公平的规则下参与市场。

¹⁴ EPICO. (September 2024). Central vs. hybrid capacity markets: What's in it for flexibility? <https://epico.org/en/central-vs-hybrid-capacity-markets-whats-in-it-for-flexibility>

总结

科学地评估各个资源的有效容量，并根据其对于可靠性的贡献进行合理补偿是容量市场的关键要素。我国在可靠容量评估方面已经做出了一些尝试。鉴于电力系统转型节奏加快和维持可靠性所面临的挑战，应慎重选择并统一有效容量评估方法，并坚持采用公开透明的流程以兼顾多重目标。在此基础上，将可靠容量评估结果应用于容量竞标和容量支付中，会有助于各市场主体在系统供需紧张时提供有效容量，从而提高系统可靠性和灵活性。



睿博能源智库 (RAP)[®]
比利时 · 中国 · 德国 · 印度 · 美国

中国北京市建国门外大街 19 号
国际大厦 2504 室
100004

+86 10 8526 2241
china@raponline.org
raponline.org

© 睿博能源智库 (RAP)[®] 本作品采用知识共享署名-非商业性使用许可 (CC BY-NC 4.0) 进行许可。