

浅谈电力资源容量补偿机制

国际经验

Zachary Ming, 李若水(E3)

Max Dupuy, 高驰 (睿博能源智库)



引言

2022年初，中国国家发展和改革委员会和国家能源局印发的《关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见》（即118号文件）要求，所有现货电力市场地区应“建立市场化的发电容量成本回收机制”，并提出了几种“方式”，包括“容量补偿机制，容量市场、稀缺电价等。”¹ 这些都是非常重要的问题，并且其具体实施细节可能会对系统成本、可靠性和排放带来重大影响。

在之前的文章中，睿博能源智库（RAP）讨论了稀缺电价，并提出了以下几点：

- 一个包含了设计完善的稀缺电价（即随时间和地点浮动的现货市场价格）的现货市场，对于支持可靠的新型能源系统非常重要。
- 也就是说，现货市场价格应当根据当地电力供需条件随时间和地点波动。这一点有助于创造合适的激励条件，鼓励电力资源能够在系统需要的时间、地点出力。
- 国际经验和分析表明，我们可以成功设计一个“单一电能量”的现货市场（即，不包含任何容量电价的市場）来支持合理的容量成本回收²。

然而，鉴于选择什么方式的成本回收机制在中国的电力行业仍然是一个热点话题，本文在此探讨中国发改委和能源局提到的其他“方式”：容量补偿机制和容量市场，为简单起见，我们不妨将它们一起称为容量补偿机制。

我们根据国际经验，主要从美国的例子出发，来阐明若干要点。我们提出的几个主要观点是，无论任何容量补偿机制或容量市场，都需要非常仔细地设计，以避免产生过高的系统成本和多余的排放。我们特别建议，如果得到实施，一种容量补偿机制应：

- 要经过科学稳健的资源充足性评估过程，坚决避免对不必要的发电资源进行补偿。
- 要根据减排和新能源转型目标发出合理的信号，支持所需的资源投资和适当的资源退役。一个合理的机制不应该担保资本成本的回收。
- 要让所有的资源在一个公平的环境下竞争，包括需求侧资源，如对节能的投资。

¹ 中国国家发展和改革委员会 国家能源局（2022）. 关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见. https://www.ndrc.gov.cn/xxqk/zcfb/tz/202201/t20220128_1313653.html

² 见睿博能源智库(2020). “能源革命”与电力行业改革: 从国际对比视角看中国南方电网面临的挑战. <https://www.raonline.org/knowledge-center/energy-revolution-power-sector-%20reform-insights-%20challenges-china-southern-grid-region-from-comparative-international-%20perspective-cn/>; 也可参见睿博能源智库(2022). 国际视野: 对创建“全国统一电力市场”的下一步工作建议. <https://www.raonline.org/knowledge-center/next-steps-for-a-national-unified-electricity-market-system-cn/>

- 通过绩效评估要求资源对收到的容量电费负责，对绩效差的资源实施严格惩罚。

接下来我们将更详细地探讨这些主题。

科学稳健的资源充足性评估过程

合理的容量补偿机制需要通过建立资源充足性评估过程来判断系统所需电力容量。一个设计合理的资源充足性评估过程将根据预期需求、现有资源组合、以及为合理管控停电风险所需的额外容量，以确定总的新增容量需求³。如果这一规划过程做的不好，或者如果没有将容量补偿机制很好地纳入到规划过程中，就可能会导致过度投资、造成高成本和高排放⁴。

资源充足评估要从一个稳健、透明的负荷预测开始。负荷预测要给出一天中的不同时间、不同的季节和不同的天气条件等各种可能发生的系统条件下的期望负荷水平。负荷预测同时也应包含未来的各种预期负荷，包括电动汽车和电力供热，还应考虑由于气候变化带来的未来天气条件的变化对负荷的影响。按照各“最佳实践”的案例，负荷预测往往要关注未来至少5年的负荷情况，并且每年进行滚动更新（即，每年开展对未来5年的预测）。

由于不同的天气条件和其他因素，系统需求在不同时段和不同地点会有很大的变化。决策者需要分析这种每小时的需求变化，并确定所需的发电容量，以确保满足极端天气在内的各种情况下系统的需求。在美国，通常要规划出一定的备用容量，以达到某个预先确定的可靠性标准。可靠性标准也不是一成不变的，目前美国的电力行业从业人士和学者正在努力探索改进在高比例可再生能源的系统中如何衡量系统的可靠性⁵。

为资源的投资和退役发出合理信号

假若要实施容量电费机制，则该机制需要经过仔细设计，确保为资源的退役和投资发出合理的信号。这些信号应有利于可靠性目标（如上一节所述）和政策目标（如减排目标）的实现。容量电费仅应补偿满足必要电力需求且有利于系统脱碳的资源，同时推

³ 对本节论题的更多讨论，请见睿博能源智库(2021). 电力现货市场风险管理—资源充足性规划. <https://www.raonline.org/knowledge-center/rap-resource-adequacy-planning-memo/>; 以及睿博能源智库(2021). 电力资源充足性规划：国际经验和对中国的建议. <https://www.raonline.org/knowledge-center/rap-resource-adequacy-planning/>.

⁴ 规划框架设计得不好也可能造成投资不足及可靠性问题。

⁵ 举例可见Stenclik, D. (2021). *Redefining Resource Adequacy for Modern Power Systems*. The Energy Systems Integration Group. <https://www.esig.energy/wp-content/uploads/2021/08/ESIG-Redefining-Resource-Adequacy-2021.pdf>

动妨碍实现排放目标（和其他政策目标）的过剩产能和资源退役。必须指出的是，容量电费机制通常并非是影响对各种资源的投资和退役的唯一政策机制。在这种情况下，容量电费机制可以被认为是一种“微调”政策，虽不寻求补偿所有的投资成本，但这种机制可以提供额外的合理激励，以确保政策和可靠性的目标得以实现。

原则上，一个设计先进、发送合理经济信号的容量补偿机制的关键在于容量电价水平的确定，其确定方法有以下特点：

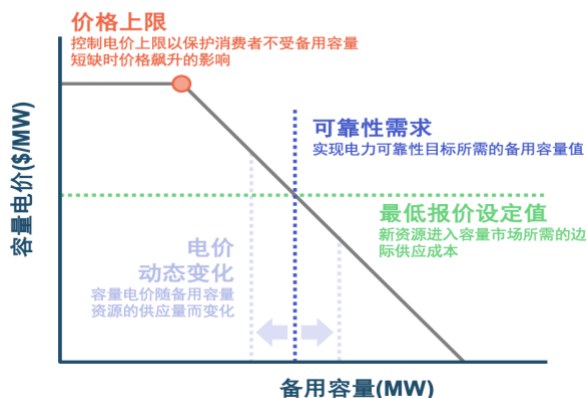
- 当容量（在规划周期内）明显过剩时，**价格为零或接近于零**，从而有助于阻止新的产能进入市场和/或鼓励现有的发电容量退役⁶；
- 当容量刚好或出现稀缺时采用**正的容量价格**（从而引导新产能进入市场和/或维持现有的发电设施）。

典型的容量补偿机制的设计要根据需求曲线来设定市场价格。需求曲线的设计应实现以下关键目标：

- 实现可靠性目标；
- 当供应高于可靠性目标导致价格下降，或当供应低于可靠性目标导致价格上涨时，可实现自我纠正。

如下图所示，可以构建一个向下倾斜的需求曲线来实现这些目标。该需求曲线需要实现以下设计：当规划指出系统需要额外的单位容量来实现目标可靠性时，容量补偿机制就会让边际容量资源有足够多的收益来进入系统。“足够的收益”往往按照“最低报价设定值”来计算，它等于成本最低的容量资源的成本减去它在电能量和辅助服务市场上可能期望获得的任何收入。为了实现第二个目标，当系统供应过剩时，容量电费应该降低，如果过剩严重，可能降至零，为多余资源的退役提供价格信号。

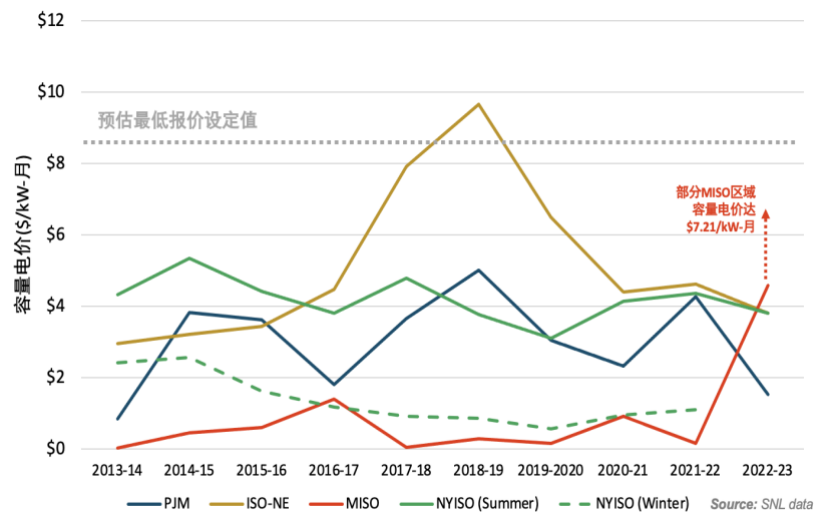
图1.需求曲线图



⁶ 进一步说明这一逻辑，一种变通的办法是设计一种机制，对不符合政策目标的某些类型的过剩产能支付负补偿。

容量电费**不应**保证对现有资源的固定成本回收。这样做有风险，可能会延长不经济资源的使用寿命，增加系统成本，取代更低成本的其它资源，并阻碍脱碳和空气质量目标的实现。在美国2010年代的大部分年份中，电力系统都出现了容量过剩，超出了满足可靠性目标的需要。产生这样结果的部分原因来自于2000年代天然气发电装机容量的大规模扩张，投资能效带来的接近零负荷增长，以及其他政策驱动引起的可再生能源的增加。最终的结果是，容量电价往往明显低于最低报价设定值，如下图所示。在这方面，美国容量市场的“自我纠正”目标表现符合预期。

图2.容量电价及预估最低报价设定值示意图



容量电价持续走低的一个可能的影响是，经济效益差的资源面临退出电力系统的巨大财务压力，从2012年到2021年，平均每年有近1万兆瓦的煤炭发电机组退役⁷。虽然是多种因素合力作用的结果，包括日益严格的环境法规，促使一些外部成本内化，但燃煤发电经济性其他方面的因素起了主导作用。燃煤发电的固定成本高、相对不灵活，使得它越来越难以与更低成本、更灵活的资源竞争，而这些资源所需的容量电费更低。

让所有资源在公平的环境中竞争

设计合理的容量机制应该让所有的电力资源在一个公平的环境中竞争。要想找到最经济的电力资源来满足可靠性目标，这种方法是必要的。在美国，现有的容量补偿机制正在不断地被修订，以确保这些规则更好地支持各种资源参与容量补偿机制，例如：

⁷ U.S. Energy Information Administration. (2022). *Nearly A Quarter of the Operating U.S. Coal-fired Fleet Scheduled to Retire by 2029*. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=54559#:~:text=Between%202012%20and%202021%2C%20an,to%20us%20proceed%20as%20scheduled.>

需求响应、分布式发电和能效（节能）资源等。在设计容量补偿机制时，须确保所有这些资源都能够与传统资源公平竞争，以提供“有效容量”（“effective capacity”）。例如，与投资于传统的燃煤或燃气发电厂相比，通过节能投资来维持的可靠性的成本往往更低⁸。

一个重要的原则是，对每种资源都应该根据它能作出的贡献和它所具有的局限性来进行评估。将每种资源对系统所需可靠性的贡献加以量化的过程，应在科学的建模基础上，并且对各个资源进行横向比较。在美国，一套稳健的评估资源对可靠性贡献（即有效容量）的量化方法脱颖而出，称为**有效载荷能力**（“effective load carrying capability”，以下简称“ELCC”）⁹。在美国六个设有容量补偿机制的电力市场中，有两个应用了ELCC（CAISO¹⁰ and MISO¹¹），两个正在向ELCC过渡（PJM¹²和SPP¹³），两个正在制订ELCC的相关程序（NYISO¹⁴和ISONE¹⁵）。

ELCC测算出等量的“完美”容量（即随时可用的容量）。ELCC的具体定义为：在保证同等系统可靠性的情况下，ELCC的数值可以被一定容量的实际资源所代替。例如，50%的太阳能ELCC表示一个100兆瓦太阳能发电设备的电力系统可达到用50兆瓦“完美”资源的电力系统相同的可靠性水平。计算每个资源的ELCC可以衡量各种资源之间的可替代性，提供了公平竞争的容量补偿机制。迄今为止，ELCC经常被用来量化可再生资源为系统提供的可靠性贡献。然而，越来越多的人认识到计算**所有资源**——包括储电¹⁶和需求响应¹⁷——ELCC的重要性。

同样，计算传统火力发电¹⁸的ELCC也很重要，而不是假设火电资源都应该按照平

⁸ K. Spees et al. (2021). *The Benefits of Energy Efficiency Participation in Capacity Markets*. <https://www.americanefficient.com/wp-content/uploads/2022/07/The-Benefits-of-Energy-Efficiency-Participation-in-Capacity-Markets1.pdf> 以及 睿博能源智库 (2014). *Energy Efficiency Participation in Electricity Capacity Markets-The US Experience*. <https://www.raponline.org/wp-content/uploads/2016/05/rap-nemecowart-ee-participation-in-electricity-capacity-markets-2014-sept-12.pdf>

⁹ 有关中国ELCC及相关问题的讨论，见 睿博能源智库2021年的2篇文章，上面已有引用。

¹⁰ California Public Utilities Commission. (2021). *Incremental ELCC Study for Mid-Term Reliability Procurement*. https://www.cpuc.ca.gov/-/media/cpuc-website/divisions/energy-division/documents/integrated-resource-plan-and-long-term-procurement-plan-irp-tpp/20210831_irp_e3_astrape_incremental_elcc_study.pdf

¹¹ Midcontinent Independent System Operator. (2022.) *Planning Year 2022-2023 Wind and Solar Capacity Credit*. <https://cdn.misoenergy.org/2022%20Wind%20and%20Solar%20Capacity%20Credit%20Report618340.pdf>

¹² PJM. (2021). *Effective Load Carrying Capability (ELCC) Report*. <https://www.pjm.com/-/media/planning/res-adeq/elcc/elcc-report-december-2021.ashx>

¹³ Southwest Power Pool, Inc. (2021). *2020 ELCC Wind and Solar Study Report*. <https://www.spp.org/documents/65169/2020%20elcc%20wind%20and%20solar%20study%20report.pdf>

¹⁴ E3. (2021). *ELCC Concepts and Considerations for Implementation*. https://www.nyiso.com/documents/20142/24172725/NYISO%20ELCC_210820_August%2030%20Presentation.pdf

¹⁵ ISO New England. (2021). *Technical Information Session: Resource Capacity Contributions to Resource Adequacy*. <https://www.iso-ne.com/static-assets/documents/2021/08/20210820-tech-info-session.pdf>

¹⁶ PJM. (2022). *Effective Load Carrying Capability Measures Capacity Contribution of Renewables, Storage*. <https://www.pjm.com/-/media/about-pjm/newsroom/fact-sheets/elcc-measures-capacity-contribution-of-renewable-and-storage-resources.ashx>

¹⁷ California ISO. (2021). *Effective Load Carrying Capability Study Results for Demand Response Resources*. <http://www.caiso.com/Documents/Presentation-ELCCStudyResults-DemandResponseResources-Jun24-2021.pdf>

¹⁸ Advanced Energy Economy. (2022). *Accrediting Resource Adequacy Value to Thermal Generation*. <https://www.astrape.com/wp-content/uploads/2022/10/Accrediting-Resource-Adequacy-Value-to-Thermal-Generation-1.pdf>

均事故停机率（即10%的故障率导致90%的ELCC）进行降级。最近的几起引人瞩目的事件表明，传统的“可靠”火电资源也可能会遭受连带故障。例如，2021年2月，得克萨斯州的低温导致天然气生产井口冻结，使得大约20吉瓦的天然气发电机组无法获得燃料。这种连带影响意味着，一个由许多单个机组事故停机率仅为10%的机组所组成的整个发电机群，其ELCC可能小于90%。对PJM¹⁹的历史分析显示，在低温条件下会出现火电停机率显著升高的类似趋势，许多观察人士认为，ISO-NE²⁰市场也存在类似的风险，因为该市场最近对天然气发电的依赖程度有所增加，而燃料输送能力（管道或液化天然气）却并没有提高。

下图给出了测算ELCC时所涵盖的因素以及各资源类型的示例值。必须注意的是，这些ELCC值并不代表或实际上与资源的容量系数或资源的利用小时数有任何显著联系。事实上，那些利用率可能很低，但在系统需要获得可靠性时可以完全依赖的资源（如需求响应、储能或调峰机组），实际上可能被认为具有较高的ELCC值。

图3. ELCC涵盖的因素



让各种资源在一个公平的环境下竞争，不仅要考虑资源的物理特征，还要将资源的所在地纳入考虑范围之中。经过输电系统将电力从资源地点输送到需求地点的能力是可靠性的一个关键要素。受输电约束影响而限制了输电能力的发电机组，对系统可靠性的贡献相对较低，而相反，输电能力高的发电机组对系统可靠性的贡献相对较高。美国的每个容量市场都通过发展“区域” (zonal) 或“本地”容量需求 (local capacity requirement) 来反映这些因素。按照这种概念，ISO/RTO 在每个区域内都要设置不同的最低发电量，

¹⁹ PJM. (2022). Responses to RASTF Data Analysis Requests submitted by AEE and Roy Shanker. <https://www.pjm.com/-/media/committees-groups/task-forces/rastf/2022/20220922/item-02---rastf-data-analysis---september-2022.ashx>

²⁰ ISO-NE. (2018). *Operational Fuel Security Analysis*. https://www.iso-ne.com/static-assets/documents/2018/01/20180117_operational_fuel_security_analysis.pdf 第37-42页。ISO-NE. (2021). *Assessment of the ISO New England Electricity Markets*. Potomac Economics. <https://www.iso-ne.com/static-assets/documents/2022/06/iso-ne-2021-som-report-full-report-final.pdf>

以确保该地区的可靠性，而这往往导致有输电堵塞的地区的容量价格较高。这大概类似于在输电约束的影响下，各区节点边际电价中产生的价格差异²¹。下表展示了几个容量市场的这一设计。

表1. ISO/RTO的容量价格设计

区域	最新市场容量价格 (\$/kW-月)	说明
ISO-NE²²	新英格兰北部: \$2.53 新英格兰东南部: \$2.64 电力市场其他部分: \$2.59	ISO-NE每年建立容量子区域，每次竞拍时的容量区域会不同
PJM²³	系统: \$1.04 地区最高价: \$2.13	由于进口限制和高负荷通常导致PJM的东部地区出清价格高于西部地区
CAISO²⁴	系统: \$4.75 地区最高价: \$7.75	虽然系统资源充裕度需求是由CPUC设定的，但本地容量需求是由CAISO输电研究结果确定的
NYISO²⁵	更新价: \$3.32 地区最高价: \$6.71	州下游的限制导致了哈德逊河谷、纽约市和长岛的本地容量需求
MISO²⁶	北部地区: \$7.22 南部地区: \$0.09	MISO的10个负荷资源地区，每个都分摊了MISO整个市场需求的一定比例，尽管大多数区域通常在组中出清

资源绩效问责制

对于任何一种设计合理的容量机制，都应确保在系统需要可靠性的关键时刻，接受补偿的资源能够按照容量补偿设计好的方式发挥应有的作用。这种特性对于构建同时具备经济性和可靠性的电力系统都是必要的，因为如果资源不能合格地发挥作用的话，这就意味着1)负荷为不存在的容量付费，2)系统没有获得实现可靠性所需的容量。

美国的几个区域输电组织最近加强了评估资源绩效的项目，包括对表现不佳的资源实施严格的经济惩罚²⁷。在此类项目下，接受补偿的资源必须在系统需要保持可靠性

²¹ 实际中一个重要区别是，节点边际电价通常比区划定价给出一个更详细的信号。

²² ISONE (2022) FCA #16 in 2022 for CCP 2025/2026. <https://www.iso-ne.com/about/key-stats/markets#fcaresults>

²³ PJM (2022) Capacity Auction Results for 2023/2024 Delivery Year, <https://www.pjm.com/-/media/about-pjm/newsroom/2022-releases/20220621-pjm-capacity-auction-secures-electricity-supplies-at-competitive-prices.ashx>

²⁴ CPUC (2022) 2020 Resource Adequacy Report. https://www.cpuc.ca.gov/-/media/cpuc-website/divisions/energy-division/documents/resource-adequacy-homepage/2020_ra_report-revised.pdf

²⁵ NYISO (2022) Spot Capacity Market Results, http://icap.nyiso.com/ucap/public/auc_view_spot_detail.do

²⁶ MISO (2022) 2022/2023 PRA Results, <https://cdn.misoenergy.org/2022%20PRA%20Results624053.pdf>

²⁷ 例如，ERCOT “Performance Credit Mechanism” program <https://www.utilitydive.com/news/texas-regulators-adopt-performance->

（即系统出现容量不足）时提供容量。无法按其核定容量水平提供服务的资源，将根据其相对于核定容量水平的表现予以财政处罚。这套制度还有利于提高资源认证容量的准确性，因为碍于处罚，所有资源都不会虚报超于自身发电水平的认证容量。

运行良好的资源绩效评估项目有以下几个主要特点：

- **绩效评估要针对可靠性风险最大时段**
 - 资源的绩效评估应针对系统最需要资源来保证可靠性的几个小时（即满足系统总需求和资源的单个容量认证的时段）内。不应在系统有足够的和/或过量的供应时段来对资源进行评估。
- **绩效评估应与资源自身特性保持一致**
 - 绩效评估应根据资源自身特性来确定。例如，构建随季节或时间而变化的性能要求很重要，这样像太阳能这样的资源就不会因为无法在夜间出力而受到惩罚，这样一来，其认证的 ELCC 一开始就并未假设它可以在夜间使用。
- **加大经济处罚力度**
 - 对绩效不佳资源应施加足够大的经济罚款，包括绩效极端不佳的情况下的罚款额可以超过原来支付的容量费。这种经济激励措施是必要的，以确保资源 1) 不虚报认证容量，2) 做出所有必要的投资和运营决策，以确保这些资源能够在需要时发挥作用。绩效评估的另一个特点也可能是，比认证值表现更好的资源也可能因此获得经济奖励（通常可以将对表现不佳资源的罚金用来奖励）。对这种经济奖惩设定的资金额度值通常可比典型的能源价格高出两个数量级：例如，PJM 和 ISONE 的绩效罚款在 3000-5000 美元/MWh 之间。
- **稳定一致地开展绩效评估**
 - 每年必须以稳定和一致的方式开展资源的绩效评估。如果不能保证每年开展绩效评估，就有可能会让资源运营商铤而走险，认为不一定会受到评估，从而寻求过度认证。

结论

若实施容量补偿机制，就要对其进行精心设计，以避免释放低效和适得其反的信号。若设计得不好，反而会严重加大系统成本，妨碍排放目标的实现，这一点在中国尤为重要。中国在加大电力系统和其他基础设施行业投资方面效果显著，但有时会导致对某些资源的过度投资。在本文中，我们讨论了设计容量补偿机制和容量市场都需要考虑的几个重要因素，包括完善资源规划，允许需求侧资源参与竞争，以及建立对表现不佳资源的处罚。最重要的是，必须确保容量补偿机制不承诺对发电资源的资本成本回收，否则的话将会使新能源转型更加困难，代价更大。



RAP[®]

Energy Solutions for a Changing World

Regulatory Assistance Project (RAP)[®]

Belgium · China · Germany · India · United States

CITIC Building, Room 2504

No. 19 Jianguomenwai Dajie
Beijing, 100004

中国北京市建国门外大街 19 号

国际大厦 2504 室

邮编: 100004

raponline.org

© Regulatory Assistance Project (RAP)[®]. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial License (CC BY-NC 4.0).