

如何结合规划和市场激活电力系统调节能力

王轩，高驰

睿博能源智库

简介¹

在可再生能源快速发展和电气化进程加速的当下，调节能力的作用凸显，其重要性在电力系统中持续提升。2025年上半年，全国可再生能源发电量约占总发电量的40%，风电、太阳能占全社会用电量的比例约为23.7%，电力系统中的间歇性资源比例逐步提高²。同时，各行业的电气化进程加快，成为电力需求增长的主要驱动力之一。这些趋势叠加气候变化等因素增加了电力系统供需预测的不确定性，对系统调节能力和规划水平提出了更高要求。

在这一背景下，国家发改委和能源局于2024年底出台的《电力系统调节能力优化专项行动实施方案（2025—2027年）》从规划的角度入手，明确提出要“以保障电力系统安全稳定运行和新能源合理消纳利用为目标，科学确定调节能力需求。”该政策要求统筹可再生能源发展、技术经济性等因素，系统开展发电侧、电网侧、需求侧和储能等调节能力的需求测算，“通过生产运行模拟和基于市场的长周期仿真测试合理确定逐年调节能力需求、建设目标和布局。”

该政策的出台，为构建更系统、更全面的调节能力规划奠定了坚实基础。在此基础之上，调节能力规划仍有进一步拓展和深化的空间。结合国际上有关调节能力规划的前沿讨论，本文将从以下三个层面展开探讨：（1）从调节能力需求测算入手，优化现有规划流程；（2）多元调节能力的差异化规划；（3）通过市场化手段落实并激励调节能力建设。进一步完善这些方面，将为

¹ 感谢睿博能源智库Max Dupuy、段婧琳、何泉对本文提出的建议和贡献。

² 国家能源局.(2025年7月).2025年第三季度新闻发布会文字实录. <https://www.nea.gov.cn/20250731/83ffa46373ec42dd99e0e3271028c151/c.html>

我国新型电力系统建设提供有力支撑，助力电力系统实现新能源大规模接入和安全稳定运行的目标。

从调节能力需求测算入手，优化现有规划流程

调节能力是指电力系统能够根据发用电的变化以及电网资源的可用性，在不同时间尺度上进行调整的能力³。在短期内，由天气变化导致的风电、光伏等可再生能源实时出力与预测值之间的偏差，会对秒至分钟级的调节能力提出更高要求。在小时至日这一时间维度上，调节能力主要用于应对发电设备和输电线路的意外故障与负荷波动，保障电力系统的稳定运行。而在更长时间尺度上（如月度、季度或年度），调节能力则关系到可再生能源和负荷季节性波动的平衡和消纳，需要系统具备足够的多日或长期调节资源，以保障系统安全。

电力系统规划需以适度超前视角，主动纳入未来能源转型的合理发展路径。

规划工作应覆盖短期、中期及长期多尺度，采用滚动式动态分析，持续优化策略以适应系统演变和不确定性。

将现有的省级调节能力测算提升为跨多省的区域容量充裕性和调节能力规划。

传统意义上的资源充足性规划（容量充裕度规划），其主要目标是为了满足一年当中负荷最高、供电最紧张时段有足够的顶峰容量来保证可靠性，但这一规划流程在支持新型电力系统中仍有所不足，需要通过调节能力规划进行补充。传统的充足性规划通常关注峰值电力需求时段，并预留一定的系统备用以达到资源充裕度目标，而灵活性规划则更加重视在各个时间尺度上调节能力的需要，以保障电力系统每时每刻的安全可靠和供需平衡。因此，调节能力规划可以作为电力充足性规划的重要组成部分⁴，对新型电力系统规划从时间维度上进行细化。

为推进容量充裕度与调节能力的科学规划，下面就以下几点进行分析和探讨：

电力系统规划，无论是容量充裕性还是调节能力规划都需前瞻性地考虑各种情况。未来几年，电力系统将面临一系列深刻变化——可再生能源和新技术的发展、化石能源价格波动、各行业电气化进程（包括电动汽车和热泵的普及速度以及市场参与程度），以及气候变化和极端天气的频发，都会相互作用并影响系统运行。设置合理的情景和敏感性分析是科学的容量规划中不可或缺的组成部分。为了更好地支持新型电力系统，还需要在情景分析中考虑既有政策目标的要求，例如可再生能源的合理利用率，储能和虚拟电厂的规模配置，以及电力系统的可靠性目标。然而，也需要综合考虑经济性、社会可承受性等局限，增加规划的可行性。

³ ENTSO-E. (April 2025). Definition of the type and format of data and the methodology for the analysis by transmission system operators and distribution system operators of the flexibility needs at national level. https://consultations.entsoe.eu/system-development/public-consultation-on-flexibility-needs-assessment/supporting_documents/160425_FNA%20methodology_ENTSOE_DSO%20Entity.pdf

⁴ 王轩. (2023年11月). 建立以资源充足性规划为基础的容量补偿机制. 睿博能源智库. <https://www.raponline.org/knowledge-center/resource-links-to-capacity-payment/>

从不同时间尺度出发，电力系统规划应涵盖短期、中期及长期的多层次分析，以充分识别和应对主要变动因素在各时间跨度上的变化⁵，并为新容量资源预留足够的建设周期。这些主要变动因素包括可再生能源发展进度，电气化和需求增长趋势，以及电网基础设施扩容等。例如，欧盟的灵活性需求要求每两年评估未来5-10的中长期发展情况，这和容量充裕度规划的时间跨度一致。加州则是每年对未来三年进行灵活性需求测算。在我国已经建立的五年规划制度的基础上，可以拓宽规划时间尺度，每年以未来3-5年为时间跨度开展滚动式调节能力评估规划，并同时以10年为跨度进行远景展望。这不仅有助于2025-2027年调节能力优化专项行动的延续和调整，更便于及时根据形势变化对后续年份做出科学判断，更好地利用规划指导市场达到理想的目标。

在规划过程中，若以省（区、市）为主体测算灵活性需求，易削弱统一电力市场的优势，降低跨省跨区调节资源的利用效率，进而造成对省内资源的不必要依赖，提升系统成本和排放。在国家发改委和能源局的监督和统筹下，可将现有的省级调节能力测算提升为跨多省的区域容量充裕性和调节能力规划。该流程将有利于跨省跨区调节资源的充分利用，减少对省级备用和调峰资源的依赖，增加可靠性⁶。

然而，这并不意味着不需要关注省级及以下行政区的调节能力需求，电网公司可以考虑当地实际情况——例如，输配电网阻塞和电压波动、分布式能源、需求响应、电网承载力的特点——展开更为细致的测算，作为对区域和省级调节能力规划的补充。以欧洲为例，每个欧洲成员国监管机构会指定其下属输电运行商采用欧盟能源监管机构合作署（ACER）所批准的方法开展电力灵活性测算。随后欧洲输电运营商联盟（ENTSO-E）和配电运营商联盟（DSO ENTITY）会协调各个输电和配电运行商提供相关的数据，欧盟成员国在各报价分区层级开展定量化测算。在各国的规划完成后，ACER会汇总各个成员国的灵活性规划报告，在充分考虑欧盟跨境灵活性和输电规划的前提下，预测欧盟范围的灵活性需求，并提出改善电力市场和系统运行的建议⁷。

另外，容量充裕度/调节能力规划过程的透明和公开是保证规划良好实施的重要前提条件。相关的规划部门应该尽量鼓励市场相关方参与规划过程，并主动倾听各相关利益者的意见，最好是有专业的第三方机构来审核规划报告后，再提交由能源监管部门批准。最后，报告的结果以及相关的数据、假设和方法等予以公开发表。提高规划的透明度有助于行业机构和市场参与者在关键问题上达成一致，并基于规划做出更好的判断和决策。

⁵ 更多关于电力系统规划分类及其时间跨度的讨论见李若水, Zachary Ming, 王轩. (July, 2023). 电力系统规划：国际视野. <https://www.raonline.org/knowledge-center/law-to-support-planning/>

⁶ 一个区域电网季节性容量充裕度规划的例子可见：UCSD; RAP; NCEPU. (July 6, 2023). *Northeast China Grid Winter Resource Adequacy Report*. <https://emtracker.org/research/northeast-china-winter-resource-adequacy-report-brief/>

⁷ EU Parliament and the Council. (July 2024). *Regulation (EU) 2019/943 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the internal market for electricity, Article 19e*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02019R0943-20240716>

针对多元调节能力进行差异化规划

如上所述，中长期灵活性能够捕捉到太阳能、风电等间歇性资源在日内、周内的变化，以及负荷在各个小时、周和季度的变化；而短期灵活性则用来反映源于预测误差以及机组运行约束和非计划停运等所导致的调节能力需求。

根据灵活性需求的成因、响应时间和调节方向，电力系统短期灵活性可以进一步细分。在欧盟，调节能力需求的测算除了在容量充裕度规划所要求的时间尺度（如季度、日和小时），还进一步包括以下方面：

1. 每小时的爬坡需求（**ramping needs**）以更完善地考虑各个资源的最低出力水平以及启停限制等约束；
2. 短期的灵活性需求以反映预测误差和非计划停运等因素，包括超快灵活性（**5-15m**）快速灵活性（**15-60m**）以及慢速灵活性（**1-5小时**）。

针对系统短期灵活性需求，建议根据调节方向、响应时长和响应时间等因素进行差异化规划。

供给侧的调节能力评估应遵循技术中立的原则，依据调节方向、响应时间、响应时长、爬坡速率等技术特征来分类衡量不同资源的调节能力贡献。

另外，欧盟对于灵活性的需求还体现在输电和配电系统运行商在管理电网阻塞和维持电压稳定方面所需的电网灵活性⁸。

比利时最近的一项容量充裕性和灵活性研究，在满足欧盟相关规定的前提下，将短期灵活性分为超快速爬坡、快速和慢速灵活性三类来区别不同的灵活性需要⁹。结果显示，在未来的十年内，比利时电力系统对于这三种短期上下调节能力的需求都在不断升高，特别是对于超快速和快速调节能力的需求也不可忽视。这主要是由于可再生能源的波动和预测偏差以及传统发电资源的非计划停运所引起的¹⁰。

表1 比利时的灵活性服务类型

调节能力类型	调节方向	响应时间	灵活性需求的成因	可提供灵活性的资源类型
超快速爬坡	上和 下	< 5 分钟	最后一次日内预测和实时的偏差	超灵活的发电, 需求响应和储能
快速灵活性	上和 下	5-15 分钟	非计划停运 + 日内预测和实时偏差	灵活的发电, 需求响应和储能

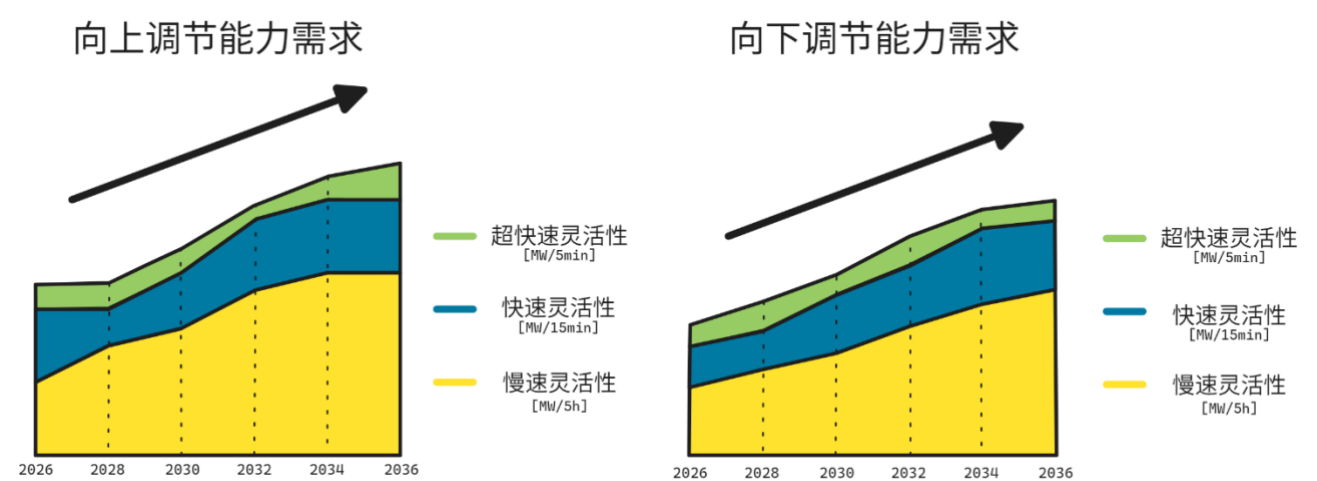
⁸ 同脚注7。

⁹ Elia group. *Adequacy and Flexibility study for Belgium 2024-2034*. Page 51-52.
https://issuu.com/eliagroup/docs/adequacy_flexibility_study_for_belgium_2024-203?fr=sOTBhNDYxOTUwMTY

¹⁰ 同脚注9, 见268页

慢速灵活性	上和 下	至多 5 小时	非计划停运+日前和日内预测的偏差	除了波动性资源和核电以外所有资源
-------	---------	---------	------------------	------------------

图1 比利时电网灵活性资源需求预测示例¹¹



本图为作者自制概念图，改编于 Elia Group. (2025, June). Adequacy and Flexibility Study for Belgium 2026-2036.

借鉴国际经验，调节能力规划中可以进一步明确调节能力的定义和分类。不同类型的调节能力对于系统的作用各异。国家能源监管机构可以根据系统需要，基于调节速率、响应时间、调节时长、调节精度等细分性能来区分调节服务，监督指导各能源主管部门开展调节能力需求测算并设计市场机制，以反映不同灵活性资源的价值。此外，在测算各种资源所提供的调节能力时，各能源主管部门也应根据资源特性来确认其可以提供s的具体调节能力类型和调节空间。

通过市场化手段激活调节能力

在资源充裕度分析的基础之上，可通过容量市场等方式，为能够在关键时段内提供可用容量的资源给予除电能量市场收入外的额外激励。这些激励可以鼓励投资提前布局容量资源，确保在系统供求关系紧张时段的供电安全。这一设计以市场化手段，补足充裕度分析所指出的容量短缺问题，从而以成本有效的方式降低可靠性风险¹²。

类似的，可以在调节能力规划的基础上，根据不同时段的调节需求，利用电能量市场以及辅助服务市场等手段，保障规划中的调节能力能够在关键需求时段被激活，从而保障系统有充足的调节能力以应对各种系统不确定性。加州CAISO的例子中，经过调节能力规划后确定了每个季度中最需要调节能力的时段(Availability Assessment Hours)，并且对能够在这些时段提供调节能力

¹¹ Elia Group. (2025, June). Adequacy and Flexibility Study for Belgium 2026-2036. Page 22. https://issuu.com/eliagroup/docs/adequacy_and_flexibility_study_for_belgium_2026-2?fr=sZGQ5NjQ2NiM5NTQ

¹² Zachary Ming, 李若水 · Max Dupuy,高驰.(2023年3月).容量补偿机制设计应如何“扬长避短”？睿博能源智库. https://www.raponline.org/knowledge-center/capacity-mechanisms-whitepaper_cn/

的资源给予额外的补偿。欧盟也允许成员国对于非化石能源灵活性(non-fossil flexibility)提供额外的支持，以激励储能和需求响应的应用¹³。

通过调节能力规划研判调节能力需求较高时段，通过容量电价/市场提前布局灵活资源，并结合电能量市场、辅助服务市场等市场化手段激活调节能力，提供额外激励以鼓励调节性资源在这些时段发挥系统调节作用。

很多国家仍在探索为调节资源建立提供额外补偿的机制并积累了初步的实践经验，关键在于如何在综合考虑现货、辅助服务市场以及容量市场的相互作用前提下，为系统所需的调节资源提供充足（却不重复）的激励。在美国，现有的集中容量市场更多是考虑容量的充裕度，而缺乏对调节能力的激励。加州CAISO虽然没有集中竞价的容量市场，但是在对每个负荷平衡区（Balancing Authority Area）的容量要求中考虑了灵活性，并且也在其实时市场中增加了向上和向下方向的灵活爬坡产品（flexible ramping products）以对那些无法在电能量市场中获得充足补偿的灵活性资源进行额外的激励¹⁴。然而，鉴于一些灵活性容量资源需要提前布局，并且随着可再生能源渗透率的增加，系统对各个时段灵活性需求会逐渐增加，有学者认为可以建立前瞻性的涵盖灵活性要求的容量市场以有针对性地吸引更多灵活和清洁资源的投资，例如虚拟电厂、储能等¹⁵。中国西北地区曾尝试建立灵活调节容量市场，但最终并未实施¹⁶。基于国际经验，区域现货市场将仍然是激励灵活性的主要渠道，在此基础上，通过容量市场/容量支付来进一步刺激灵活资源，在规划判断出的特定时间和地点发挥调节能力，可能是一种适合我国的发展方向。

表2. 系统充裕度容量和调节能力比较

	系统充裕度容量	系统调节能力
科学、基于实证和模型演算的展望	资源充裕度分析	系统调节能力规划
通过价格激励达成系统目标	容量市场需求曲线、容量竞价、电能量市场稀缺电价、容量资源问责制 ¹⁷	激励调节能力的容量市场、区域现货市场、辅助服务市场、灵活调节时段容量问责制（flexibility hours must-run offer）

¹³ EU Parliament and the Council.(July 2024). *Regulation (EU) 2019/943 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the internal market for electricity, Article 19e.* <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02019R0943-20240716>

¹⁴ CAISO. *Flexible Ramping Product final proposal.* (April, 2012). <https://www.caiso.com/Documents/DraftFinalProposal-FlexibleRampingProduct.pdf>

FERC. (Sep 2016). *Order on Tariff Revision.*https://www.caiso.com/Documents/Sep26_2016_OrderAcceptingFlexibleRampingProductTariffAmendment_ER16-2023.pdf

CAISO. (May 2024). *Final Flexible Capacity Needs Assessment for 2025.* <https://stakeholdercenter.caiso.com/InitiativeDocuments/Flexible-Capacity-Needs-Assessment-Final-2025.pdf>

¹⁵ Xin Fang, Qinran Hu, Rui Bo, Fangxing Li. (June 2021). *Redesigning capacity market to include flexibility via ramp constraints in high-renewable penetrated system.* <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106677>

¹⁶ 王轩, Max Dupuy, 胡军峰.(Sep, 2023).西北电力市场的最优选择：灵活调节容量市场或区域现货市场？<https://www.raonline.org/knowledge-center/rap-china-northwest-capacity-market/>

¹⁷ 这里指的是对于接收容量补偿的资源，需要定期对其进行绩效评估，根据实际出力相对于核定容量水平进行奖励或惩罚。这样做有助于保证容量资源为充裕度和可靠性做出实际贡献，并减少资源虚报容量的行为。问责制同样适用于提供调节能力的资源。

具体来说，我们认为可以基于充分考虑调节能力需求的规划来指导容量市场的建设。通过灵活性规划指出电力系统可能存在调节能力不足的时段，以及具体的上下调节的容量需求（MW）。面向所有能够满足系统对调节速度、时长要求的资源，在各自的置信容量区间内竞价来提前锁定灵活性资源，并为其支付容量电价。这可以理解是对目前其他国家和地区已经存在的集中性容量市场的扩展，从单一地满足容量充裕度需求，发展成为满足多种调节能力容量需求为目的的容量市场，以更好地保障电力可靠性，并支持电力系统向清洁灵活的方向转变。可以要求这些资源在电能量市场中相应的时段必须报价，来完成容量市场中锁定调节容量的履约，同时获取在电能量市场中的收入。对于中标但并未在实际运行中完成履约的容量资源，将会面临相应的惩罚。

我国已经实施了煤电容量电价，并在地方层面开始着手制定市场化的容量补偿电价政策。下一步可以利用调节能力规划的结果来更好地指导容量市场，对能够在特定时段满足系统调节需要的资源给予额外的补偿和支持，鼓励多种资源的市场竞争，以成本有效地解决由于调节能力不足而导致的系统可靠性问题。

总结

随着新能源发电装机快速扩容，鸭子曲线等净负荷形态对电力系统调节能力提出了更高要求，带来了诸多挑战。当前我国调节能力建设在总体规划、资源统筹及激励机制上仍存在不足，难以满足高比例新能源消纳及系统安全稳定的需求，亟需加强顶层设计和系统优化。

《电力系统调节能力优化专项行动实施方案（2025—2027年）》提出了科学测算调节能力需求、明确调节资源建设规模与布局、优化调用机制等具体举措。方案覆盖煤电灵活性改造、抽水蓄能、新型储能、气电、水电和光热等多个领域，着力提升调节能力和调用水平，为新能源的合理消纳和电力系统可靠运行奠定了坚实基础。

基于此，应更好地结合整体电力发展规划，将调节能力规划纳入常规电力发展规划体系，系统区分并测算不同性质调节能力的需求。通过技术中立的原则，依据精准的技术指标，对系统调节资源合理分类并有效利用。与此同时，通过市场化机制提前布局调节能力建设，为多样化调节资源提供更充分的激励，提升系统灵活性和可靠性，为新型电力系统建设和能源转型提供有力支撑。



Regulatory Assistance Project (RAP)®
Belgium · China · Germany · India · United States

CITIC Building, Room 2504
No.19 Jianguomenwai Dajie
Beijing, 100004

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

中国北京市建国门外大街 19 号
国际大厦 2504 室
100004