

电力资源充足性规划

国际经验和对中国的建议

睿博能源智库

Fredrich Kahrl, 王轩

概述

中国电力行业正在发生显著改变：越来越多的可再生能源发电并网、现货市场的建设和发展、尖峰负荷不断增长、以及气候变化导致的极端天气的增多，使得人们对电力系统的可靠性产生担忧。如何在满足低碳减排、煤炭控制、空气质量等国家能源环境政策目标的同时，确保经济可靠地运行电力系统是目前中央政府关注的一个重点。这个复杂的问题涉及到电力规划改革在内的电力体制改革的多个方面。我们最近的一篇文章¹在借鉴国际经验的基础上，提出了一系列电力行业转型的政策和监管策略，其中包括对系统可靠性进行严格分析的建议。电力资源充足性规划应该作为中国近期电力行业改革的一个关键环节。这是因为，资源充足性规划可以帮助：

- 解决电力行业转型过程中对可靠性担忧；
- 对电力市场进行宏观监管，以保障电力市场（包括电力现货市场）良性运行；
- 提高电力系统韧性以应对气候变化带来的挑战；
- 合理化电力系统投资水平，避免产能过剩问题。

世界上各个国家和地区在资源充足性规划方面积累了一些经验，但是仍然面临着和中国类似的在能源转型和气候变化新形势下的挑战，中国和世界上其他国家也都存在对于系统可靠性的担忧，只是在程度和驱动因素的组成上有所差异。我们希望国家能源局和发改委能够在接下来的几年关键时期，抓住机遇，制定和完善资源充足性规划相关的政策和规则。我们的建议包括：

- 在严格的备用容量研究的基础上，建立透明科学的资源充足性规划流程；
- 以区域为基础开展资源充足性规划，充分发挥区域供应和需求侧资源的多样性，减少不必要的系统备用；
- 充分考虑输电阻塞等电网运行限制，保证区域电网中局部地区的资源充足性；

¹ 睿博能源智库（2021年5月）. 中国西北地区电力行业转型和煤电退出路线图：政策和监管策略. 建议9 第25页. 文中使用的系统可靠性规划和这里的资源充足性规划是类似的概念。 <https://www.raonline.org/knowledge-center/rap-road-map-power-sector-transition-coal-generation-retirement-northwest-china-2021-may-cn/>

- 分年度和季度衡量资源充足性，尽可能地反映天气变化等不确定因素对发电、输电和用电情况的改变。

下面我们通过概括美国资源充足性规划的经验，结合我们对中国现阶段电力规划实践的理解，在中国低碳政策和发展电力现货市场背景下，提出我们对中国实施资源充足性规划的具体建议。

美国经验

在美国，资源充足性规划是电力系统和电力市场不可或缺的组成部分。2000年的加州电力危机，使得联邦政府和各州政府重新认识到资源充足性规划在管理电力市场风险，避免电价高涨和缺电等方面的作用。简单地说，资源充足性规划可以确定所需不同资源—发电、储能、需求侧资源—的总量，以可靠地满足未来一段时间（季节、年）的电力需求。这样做的目的是1）确保有足够的可用资源来满足需求，防止在供应短缺的时候出现市场力操纵的情况。2）通过采取一定满足资源充足性要求的机制来减少市场参与者对电力系统可靠性“搭便车”的行为。3）在越来越多波动性可再生能源的前提下，谨慎地决定为满足可靠性所需的其他资源的总数量。4）为加强电力系统韧性，应对极端天气等气候变化的挑战提供科学量化，统筹考虑需求侧和发电侧资源投资的框架。

在美国，所有七个区域输电组织²（RTO）都建立了备用容量研究和资源充足性规划流程以保证系统可靠性。备用容量研究包括失负荷概率分析，计算现有备用容量和预测未来所需要的“规划”备用容量³。在许多情况下，备用容量研究以满足一定的大电网可靠性指标⁴为目标，计算所需的备用容量，大部分RTO以每十年一天的失负荷预期（LOLE）⁵作为充足性资源规划的可靠性指标。规划备用容量有助于应对来自负荷预测误差，以及发电机组，输电线发生故障的风险。举一个例子，美国中部大陆电力市场MISO在2021/2022规划年，通过细致的数据分析和模拟计算，MISO决定需要18.3%的规划备用容量来满足每十年一天失负荷预期

² 在美国，独立系统运营商（ISO）和区域输电组织（RTO）几乎同义，这里统一用RTO来描述在美国电力现货市场负责市场运营和系统调度的组织。

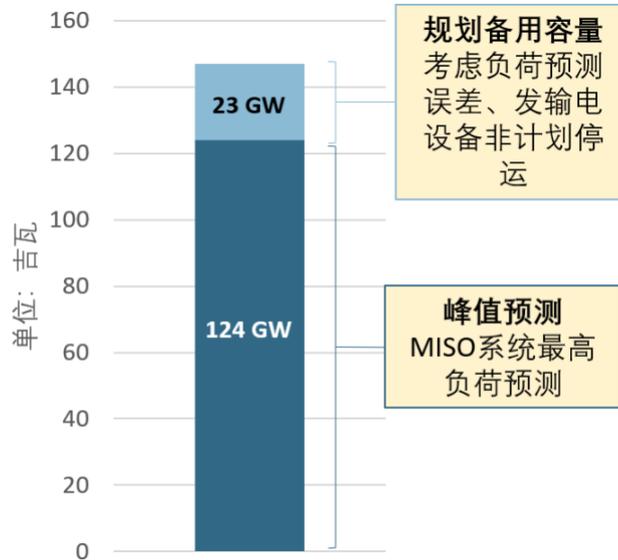
³ 规划备用容量是指为满足一定程度的失负荷预期（LOLE），通过分析确定出在预测峰值负荷之上所需的备用容量。这区别于实际的备用容量，通常以百分率表示，计算公式为（可用资源容量-峰值负荷）/峰值负荷。

⁴ 大电网指的是高压输电线（大于约220千伏）级别的可靠性，不考虑配电导致的停电。

⁵ 失负荷预期被定义为在一段时间内负荷超过可用资源的总时间。在美国所有的RTO/ISO中，只有ERCOT没有制定可靠性目标。

⁶，也就是说，MISO需要比预测的峰值需求（124 GW）多18.3%（23 GW）的备用资源来确保充足性（见图1）。

图 1. MISO 2021/2022年度基于装机容量的规划备用容量



规划备用容量需要保证系统在一整年中都有足够的资源来满足峰值电力需求，因此，备用容量研究需要对几个方面进行系统的分析：

- 发电资源，包括对火力发电、核电、水电、储能、波动性可再生能源（径流水电、风电和光伏）以及需求侧资源（例如，分布式发电、需求响应，储能）进行可用容量的分析。具体的细节需要考虑到发电机组的计划停运和维护、非计划停运、旧机组退役和新机组投运。天气的影响对于燃气、煤电、核电、风电、光伏的作用不同，而储能根据电力系统情况的改变充放电模式也随之改变，这些因素都需要尽可能地纳入可用容量分析中。在美国，有不同的方法来计算这些资源对可靠性的贡献。越来越多的 RTO 采用有效负荷承载能力（ELCC）方法⁷来计算风电和光伏的容量可信度；在

⁶ 这个规划的备用容量是基于装机容量。MISO2021/2022规划年的计划停运备用容量是9.4%，计划停运备用容量根据峰值负荷时间段的平均计划停运率对装机容量进行了调整。MISO (2020) Planning Year 2021-2022 Loss of Load Expectation Study Report, <https://cdn.misoenergy.org/PY%202021%2022%20LOLE%20Study%20Report489442.pdf>.

⁷ 例如已经应用的案例，见 Midcontinent Independent System Operator (2019, December). Planning year 2020 wind & solar capacity credit. <https://cdn.misoenergy.org/2020%20Wind%20&%20Solar%20Capacity%20Credit%20Report408144.pdf> 也可见 Milligan, M., & Porter, K. (2008). Determining the capacity value of wind: An updated survey of methods and Implementation (NREL/CP-500-43433). National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/43433.pdf> 以及 Madaeni, S. H., Sioshansi, R., & Denholm, P. (2012). Comparison of capacity value methods for photovoltaics in the Western United States. National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/54704.pdf>

这之前，通常是利用系统负荷高峰时期该资源出力数据来测算的。计算储能贡献额度的方法包括 ELCC 和最大连续出力法。

- 负荷预测，尽可能考虑到导致负荷预测失误的原因（例如，由于经济发展以及天气变化）。美国的备用容量研究通常基于中位数温度，但是随着气候变化对电力需求的影响愈来愈明显，RTO 和规划机构已经开始讨论是否需要更新这个方法，以便更好地将极端天气事件反映在资源充足性规划中。这可以通过情景分析，考量负荷预测中与天气相关的不确定性⁸，未来可能会通过改变规划的尺度（例如，不在是两年中的一年而是十年中的一年）来更多反映天气变化。
- 区域对外部其他地区的进出口情况，可以在历史电力交易的基础上做出假设和模拟，根据具体情况，点对网的资源可以作为本地资源对待。
- 备用容量研究在考虑输电限制的基础上进行分区的资源充足性规划，结果可能比在区域性规划情形下要求更多的资源分布在特定的地区。一些 RTO 以区域为基础来制定资源充足性规划，这样做的好处是可以充分利用负荷多样性的优势来节省成本。负荷多样性指的是在区域中各地的不同时峰值负荷的总和（例如，不同的电网管辖区或行政边界）总要比区域的同时峰值负荷大。如果有相应的机制允许各地分享资源，则一个区域所需要持有的资源总量就比每个地方各自需要持有的资源总和要小导致成本节约⁹。这也是推动更大的资源平衡区和区域电力市场的一个重要因素。

大部分美国RTO的备用容量要求包括（1）总的区域资源充足性要求，即一定时间段为满足区域可靠性目标所需要的资源总量。在MISO的例子中，2021/2022年总的资源充足性要求是147GW（124GW峰值预测+23GW规划备用容量）2）分区的资源充足性要求，即在输电存在限制的前提下，通过电网拓扑结构和潮流分析得出的每个辖区最小需要持有的资源量。

这些区域总的和分区的资源充足性要求通常会根据历史或预测的负荷服务实

⁸ 由于气候变化导致的极端天气情况增多，一些RTO/ISO也考虑通过对发电和输电可用容量的调整来更多地反映极端天气的不确定性对资源充足性的影响。

⁹ 例如，电网公司A和B的不同时峰值负荷分别为5GW，以区域作为整体的同时峰值负荷为8GW。这个区域作为整体只需要持有8GW（加上备用）资源，每个电网公司持有4GW（按50/50等比例分配）。当电网公司A达到峰值负荷5GW时，它需要从电网B进口1GW并依靠运行备用，反之亦然。（此时电网B至少还有1GW剩余容量，因为区域同时峰值负荷为8GW。）

体所占的峰值需求比例，分配给区域中各负荷服务实体（LSE）¹⁰。各RTO（加州是州政府）为保证负荷服务实体满足这些资源充足性要求的机制各不相同。在一些RTO和州（加州，SPP）负荷服务实体必须证明他们已经自行拥有或者签署了双边购电合同，有足够的资源来满足下一年或未来几年资源充足性要求，否则需要支付罚款。在另一些市场（ISO-NE, MISO, NYISO, PJM）RTO开展容量市场竞标。负荷服务实体可以自行提供所要求的资源充足性容量或委托RTO在容量市场购买容量¹¹。ERCOT没有约束性的资源充足性要求¹²。

在美国，为保证满足资源充足性要求的机制在不断地改善，具体设计还存在争论，到目前为止还没有找到完美的解答。世界上其他国家也在探索确保资源充足性的不同机制。然而，从美国的经验可以认识到严谨的资源充足性规划在增加电力可靠性、提高电力市场安全和电力系统韧性方面发挥着巨大的作用。

对中国的建议

在中国，省级政府通过五年规划来平衡发用电，这是资源充足性规划的主要体现。2015年电改“9号文”提出要进一步强化电力统筹规划的目标，并将其作为电改重点任务之一。2016年国家能源局颁布的《电力规划管理办法》，为更好地建立各类电力规划之间以及中央和地方电力规划之间的协调机制搭建了整体的框架¹³。然而，总的来说，中国的电力规划改革进程缓慢。在“十四五规划”的开局之年，中国迫切需要适应电力市场改革和能够支持双碳目标的规划模式。电力规划改革有多个方面，其中一个重要的部分是随着电力现货市场的发展，更多非化石能源发电并网和极端天气的出现，建立更科学，更透明和有效的资源充足性规划流程。这有助于建立市场信心，保证个别时间和地区的资源短缺时不会导致不必要的高市场电价。在中国能源转型的大背景下，也有助于在非化石能源发电增长的情况下，煤电退出不影响电力可靠性，还能够通过合理化资源投资减少成

¹⁰ 负荷服务实体一般包括电力公司，电能服务供应商和社区负荷集成商等。

¹¹ ERCOT有备用容量的目标，但是却并没有相应的机制来确保达到目标备用容量水平。最终实际的备用容量，根据市场价格的情况，可能会高于或低于目标备用容量。

¹² ERCOT通过备用容量分析来改善稀缺性价格信号。详见Carden, K., & Dombrowsky, A. K. (2021, January 1). Estimation of the market equilibrium and economically optimal reserve margins for the ERCOT region for 2024: Final. Electric Reliability Council of Texas. <http://www.ercot.com/content/wcm/lists/219844/2020-ERCOT-Reserve-Margin-Study-Report-FINAL-1-15-2021.pdf>. 相关版本和资料可在此获得：<http://www.ercot.com/gridinfo/resource>.

¹³ 国家能源局(2016). 关于印发《电力规划管理办法》的通知. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto84/201606/t20160606_2258.htm 更多讨论详见 Dupuy, M., & Xuan, W. (2016). 从电力规划看煤电产能过剩和可再生能源弃电的问题. <https://www.raponline.org/blog/excess-coal-generationcapacity-and-renewables-curtailment-in-china-getting-with-the-plan-cn/>

本并帮助解决极端天气问题。

虽然在应对极端天气方面，资源充足性规划遇到了前所未有的挑战，美国的经验表明资源充足性规划应该基于严格的备用容量研究，这需要考虑负荷预测的不确定性，发电和输电线的计划和非计划停运，输电限制，天气相关的因素对火力发电和核电的影响，风电、光伏、储能和径流水电的年和小时可出力情况，水库水电的运行限制。

由于这种分析的复杂性，特别是需要考虑输电限制，最好由RTO（电网公司）而不是政府机构来开展这项研究。国家能源局和地方能源监管机构可以起到宏观指导、协调规划流程并监督保障实施的作用。为更好地发挥各省的资源和负荷多样性，备用容量研究应该在区域范围内开展，研究结果可以包括：1）现有备用容量 2）预测未来规划备用容量（例如，未来五年）3）为整个区域和每个省份计算资源充足性要求。另外，备用容量研究应该透明并公开发表。不仅仅是研究结果，整个资源充足性规划流程应该有利益相关者的参与，并在国家能源局和地方能源监管部门的监督下定期（例如，每年两次）发表相关主题研究报告并组织专题讨论。

鉴于中国电力行业的特殊性，特别是政府在投资决策方面的决定性作用，以及国有发电集团的评价标准和满足供电可靠性方法的差异，中国可以采取和美国不同的机制来保障资源充足性。资源充足性要求可以在现有五年规划过程中被加强，并通过能源投资项目批准机制来确保实施。例如，发电商、需求响应集合商可以利用资源充足性要求来进行商务分析，决定资源投资的规模，五年规划可以进一步决定新的资源投资的组成。随着电力市场的成熟，政府机构可以考虑是否可以采用更市场化的方式决定投资，新资源和现有资源的不同供应商为满足资源充足性要求共同竞争，或者，类似美国的做法，将资源充足性要求分配到供电公司、售电公司等负荷服务实体。

无论保障资源充足性的机制如何演变，近期最重要的步骤是建立一个精心设计的资源充足性流程，从而可以支持电力现货市场，帮助电力行业向清洁发电转型并加强电力系统韧性以更好地适应气候变化。



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).