

电力系统规划

国际视野

李若水, Zachary Ming, 王轩

E3, 睿博能源智库

背景和讨论¹

随着双碳目标的持续推进，中国的能源和电力行业正面临新的发展形势。全球变暖带来的极端天气也给电力系统的安全运行带来巨大挑战。长期以来，中国的电力行业以五年规划为核心，为各种资源的投资（和淘汰）数量和类型提供高层指导。在能源转型和气候变化的双重挑战下，世界上的许多国家和地区都在进一步完善规划框架。一些最佳实践为中国提供了有益的借鉴，改善五年规划并辅以对电力行业滚动式、评估性的展望将有助于监测电力系统在不同时间尺度下满足可靠性的需求及脱碳进程，为中长期的电力规划奠定基础。在日益市场化的电力系统中，建立统一、完善的规划流程并公开发布相关的电力规划报告也有助于识别市场规则和市场设计的问题，达到实现清洁能源转型的最优路径。

本篇文章旨在聚焦市场化改革下的电力系统规划，对不同类型、不同时间尺度的规划及展望流程进行介绍。通过分享一些国际上的经验，希望对中国相关法律法规的制修订提供有益的参考。

完善电力系统在不同时间尺度上的展望与规划流程

目前，中国电力行业的许多部门，包括电网公司和研究机构，已经建立了详细的规划流程。如何进一步完善当前的规划体系，以确保系统在维持可靠性的前提下加快实现双碳目标的进程是未来的挑战。以下的章节将对不同类型的展望与规划流程作具体介绍。

¹ 感谢睿博能源智库Max Dupuy, 高驰, 何泉对本文的贡献。

图一.不同时间尺度电力系统规划概览



短期系统展望：电力系统可靠性评估

在能源转型和气候变化新形势的挑战下，维持电力系统可靠性对世界各国都是一个重要的议题。以季度或年为周期对系统的资源充足性进行评估将有助于增加市场参与者和利益相关者对电力系统状态的了解，对潜在的季节性资源供给问题发出预警，以保证电力系统的平稳运行。具体来说，此类评估通过比较未来一段时间的尖峰电力需求与可用资源总量（包括发电侧，需求侧，及储能资源）来衡量系统是否有充足的资源以保障安全可靠的运行。一个完善的系统可靠性评估方法应将以下因素纳入考量：

- 在**负荷端**：对尖峰电力需求的预测应充分考虑不断变化的天气条件带来的不确定性。相较于单一情景下的点值估计，多情景预测能够更好地满足极端气候条件下的电力需求波动。即使在各种不利条件下（超预期负荷，短时需求震动等），也能保持系统安全可靠地运行。此外，电力需求的预测还应考虑经济发展和政策推动带来的电气化负荷，包括电动汽车的推广及热泵在建筑中的普及带来需求增量等。
- 在**资源端**：对系统可用资源总量的分析同样应尽可能地将天气的影响纳入其中。资源可用容量的裁定是量化其对系统可靠性贡献的过程，代表该资源满足负荷需求的能力。因此，应考虑到该资源在不同气候条件下的出力特征²。例如，对于风电和光伏，传统的方法是利用系统负荷高峰时期该资源发电数据来测算可用容量；但在冬季极端气候事件频发的情况下，对此类由天气决定出力的电源的可用容量分析应考虑到其在长期阴沉、无风，甚至是极端气温下的出力局限性。对于火力发电的资源亦是如此，极端气候导致的非计划性停产、燃料供应问题等都可能显著提高火电机组的停机率。因此，将不同气候情景纳入可用资源容量分析是系统可靠性评估的关键一环。

值得强调的是，不管是对尖峰电力需求还是可用资源容量的预测，都应运用严谨的、科学的、基于概率的方法，而非仅基于确定性的历史数据。后者有助于量化和了解特定事件发生的频率（如火电宕机，超预期负荷等），但当着眼于未

² 在美国的电力市场，ELCC (有效载荷能力, effective load carrying capability)是目前常用的资源可用容量量化框架。

来时间段内电力系统的可靠性，这些数据应根据气候变化态势下预期天气模式的变化进行调整，从而更好地反应未来气候条件下的预期电力需求和可用资源容量。失负荷概率模型 (loss of load probability modeling) 是目前常用的为此类可靠性展望提供概率基础的工具。在此框架下，电力系统保持供需平衡的能力在多种气候环境、负荷曲线、及电源出力情景下被不断测试。在每个情景下，电力负荷的预测误差或气候导致的风电光伏出力不理想等都可能使得电力需求超过系统的承载能力，从而造成失负荷事件。因此，通过对未来一季度或一年的电力供需进行全面多情景的仿真和分析，规划者可以对当前系统性能有更深刻的了解，判断短期存在资源短缺风险的概率，以及当供需失衡时，系统潜在失负荷事件的量级等。

总之，无论是对系统运营者、政策制定者或是市场中的其他利益相关者来说，一份详细的系统可靠性报告都具有很强的指导作用：若确保系统在多种极端条件下都有足够的可用资源来满足尖峰需求，人们对于转型期间电力系统可靠性的争论则可以得到澄清，对电力系统状态的信心也可以得到增强；而若展望下系统可能存在短期资源短缺，市场参与者们也可以提前为即将到来的季节性挑战做出准备，提出预先管控风险的方案，以及更好地规划投资等。例如，在美国，联邦能源监管委员会（FERC）888号法令³全权授予了区域输电组织（RTO）和独立系统运营商（ISO）⁴电力系统可靠性问题的管辖权，因此，各RTO机构会定期对所属区域短期电力系统可靠性进行展望分析，并公开报告和数据。当报告得出系统资源充裕度不足的结论时，尽管其不拥有实物发电资产，RTO有权利、也有义务与发电供应商直接签订合同以保障系统的稳健运行。其它管控方案包括与发电商协调新的维护停运日程，延缓部分机组退役时间，以及加快批准新产能的投运等。例如，美国德州的RTO ERCOT 每年在夏季和冬季两次公布资源充足性评估报告⁵，对系统在不同情景下维持供需平衡的能力进行评估。当预测系统存在资源不足的风险时，ERCOT可以与区域内的发电商签订“可靠性必须运行”

（Reliability must run）的合同以确保系统有足够的资源储备。两年前，

³ U.S. Federal Energy Regulatory Commission, Docket Nos. RM95-8-000 and RM94-7-001, Order No. 888 on April 24, 1996.

<https://www.ferc.gov/industries-data/electric/industry-activities/open-access-transmission-tariff-oatt-reform/history-oatt-reform/order-no-888>

⁴ 下文对RTO及ISO统一简称RTO。

⁵ ERCOT. (ND). *Seasonal Assessment of Resource Adequacy (SARA)*. <https://www.ercot.com/gridinfo/resource>

ERCOT由于错估了冬季资源出力的局限性（不仅是可再生能源，也包括火电机组）而没能对2021年冬季的极度资源稀缺进行预警，这次能源短缺事件之后ERCOT和监管者已经分析了原因，逐步完善了季节性评估的过程以更严谨地评估各种资源的可用资源容量⁶。

在中国，为确保电力可靠性，政府已经开展了卓有成效的工作。每年夏、冬两季例行的迎峰度夏工作旨在积极应对天气变化，平衡电力供应，并保障用电安全。当面对电力供需总体偏紧的局面，一系列电力保供措施（如有序用电）也有助于缓解风险，使能源供应总体上保持平稳有序。2023年2月，国家能源局发布了《关于加强电力可靠性管理工作的意见》⁷，进一步完善了上述的框架。国际经验表明有必要更进一步对电力可靠性工作的规划流程、机构和职责进行统一的规定和管理。具体地说，下一步可能包括要求各区域（现货市场覆盖的区域，或者电网管辖的区域）制定资源充足性评估过程，每年两次发布季度性用电需求和可用资源展望。如果发现有短期资源短缺风险，可以要求电网调度作出反应尽可能减少风险，其他市场参与者也可采取针对性的预防措施。

中期系统展望：对市场设计改革及政策调整需求的评估

与短期可靠性展望不同，中期展望着眼于五到十年内电力系统的负荷和资源，并聚焦于对未来潜在资源组合的分析。随着电力行业市场化的推进，发布此类展望是对市场机制进行“检查和调整”的基础。具体地说，中期系统展望有助于决策者评估现有的各种市场机制是否以统一合理的方式运作，以及是否能达到指导资源配置的预期效果。这些机制可以是针对特定资源的激励机制，如储能和需求侧资源；也可以是对灵活性基荷资源的投资引导。具体实施评估的方式有多种，其中之一就是与区域的“最优资源组合”进行对比（“最优资源组合”详见下一节）。简单来说，如果系统中期展望预测的资源组合与规划者“最优组合”的愿景不一致，或者预测的资源配置没有达到双碳目标设定的减排要求，相关机构或监管者可以提出对市场设计进行微调或其他政策进行改革，以此调整市场预期，尽力确保新建的资源组合（包括集中式和分布式资源）在满足系统可靠性、减排要求的同时实现最经济的成本效益。

⁶ ERCOT. (23 January, 2023). *Roadmap to Improving Grid Reliability*.

(<https://www.ercot.com/files/docs/2022/03/07/Roadmap%20to%20Improving%20Grid%20Reliability%20-%20Jan%2026%202023.pdf>)

⁷ 国家能源局（2023），国家能源局关于加强电力可靠性管理工作的意见。http://zfxqk.nea.gov.cn/2023-02/14/c_1310699307.htm

在美国，RTO不拥有实物的发电或输电资产，也不具有直接的规划权，因此并不能控制发电资源的采购过程。实际的决策权通常掌握在市场中的私人投资开发商或受到州委员会监管的公用电力公司手中。基于这些具有采购权的实体的决策，RTO可以作出对未来五到十年内区域电力系统资源组合的预测，并与最佳组合进行比较，以此判断市场是否正常运转。美国的电力市场正是在这些持续的评估和校对中不断调整，以确保实现对资源投资决策的有效指导。

美国东部RTO PJM系统中期展望实例：

2023年2月，PJM发布了一篇题为《能源转型中的PJM》的报告⁸，旨在对未来十年电力系统转型可能带来的影响进行深度剖析。通过对电力需求增长趋势及电网接入新采购发电资产（主要是风电，光伏，和储能项目）的预测，该报告指出，随着火电厂退役进程的加快（一方面是囿于减排政策；另一方面是火电机组经济效益不足选择退役），新发电资源的增加可能不足以支撑系统负荷的增长，因而可能导致供需失衡。换句话说，根据PJM的展望，在2030年左右，电网运营商可能会因新资源上线步伐与火电厂退役速度的不匹配而面临可靠性风险。

为应对该报告中指出的潜在发电资源不足的问题，在报告发表当日，PJM董事会便同时启动了专门的流程（Critical Issue Fast Path）⁹，发出提案邀请书，号召市场参与者和利益相关群体共同寻求对当前电力容量市场进行改进的方案¹⁰。对不同方案的分析和研判预计会持续至2023年10月，届时，PJM董事会便可向FERC递交提案，对特定容量市场的规则设计实施变更，以期解决潜在的可靠性危机。

中期系统规划：新资源组合的最低成本规划

中期电力系统规划是通过模型分析发掘能够以最低成本满足中长期系统可靠性和碳排放等政策目标的资源组合的过程。不同于基于市场趋势的中期展望，系统规划本质上是形成一个路线图。履行规划职能中央或地方机构以此路线图为基准，即可建立合理的资源投资决策框架，并与上一节所述的前景展望进行对比。

⁸ PJM. (24 February, 2023). *Energy Transition in PJM: Resource Retirements, Replacements & Risks*. <https://www.pjm.com/-/media/library/reports-notice/special-reports/2023/energy-transition-in-pjm-resource-retirements-replacements-and-risks.ashx>

⁹ PJM. (ND). *Critical Issue Fast Path - Resource Adequacy*. <https://www.pjm.com/committees-and-groups/cifp-ra>

¹⁰ PJM. (ND). *Resource Adequacy Senior Task Force*. <https://www.pjm.com/committees-and-groups/task-forces/rastf>

在传统的规划流程中，通常规划者只着眼于有限的发电技术，如燃煤发电、天然气发电等，考虑最小化成本的资源组合以满足电力需求。因此，对新资源组合的决策往往集中在投资哪种类型的天然气发电机或系统是否需要新的煤电或核电基荷机组等。然而，随着转型工作的展开，系统规划的复杂性在不断加强：一方面，新兴技术和终端电力使用场景的发展大大拓展了规划者可选择的资源类型，从传统的火电机组到风电光伏，从集中式发电资源到分布式能源（需求响应和节能项目等），规划流程中需要评估的资源种类在不断增加；另一方面，当下电力系统的规划除了考虑最小化成本，同时还寻求保障系统可靠性、实现扩展可再生能源规模或减排的多重目标，因而传统的规划方式已无法有效的对资源的成本效益、出力特性及对系统可靠性的影响进行全方位的评估。如何建立更加严谨的中期系统规划流程，确定所需的最佳资源组合，这是世界各国都在面临的挑战。

通常来说，国际经验表明一个严谨的中期系统规划应考虑到以下几点要素：

- **将气候政策和气候变化的影响纳入规划：**这类影响可能是极端天气下发电设备性能下降导致的物理风险，碳排放政策变化对火电资产运行的监管风险，以及气候政策对潜在电力负荷来源和规模的影响。
- **将所有类型的可用资源视作候选（可再生能源、储能、需求侧资源和新兴清洁发电技术等），并在一个公平的环境中对其进行评估：**这是确保资源间协同效应被准确衡量，并发现真正成本最低组合方案的前提。
- **运用严谨的数学模型，**如失负荷概率模型，来确定总资源需求以及量化不同类型资源对系统可靠性的贡献。
- **考虑不同情景下的资源配置，**并对潜在的风险进行分析。

综合资源规划（IRP）是美国许多公用电力公司进行中期系统规划的方式。通过IRP，电力公司将深入了解区域内用电群体的分布和潜在需求的演变，建立评估各类资源成本、效益和可靠性的模型，分析不同情境下的风险，由此确认未来十年或更久的时间内能以最低成本满足系统多重要求的发电组合。例如，美国加利福尼亚州公共事业委员会（CPUC）定期展开IRP综合流程¹¹，追踪州减排目标的进展情况，并对新增资源的投资需求进行评估，以确保该州拥有符合环境及可靠性等多重要求的电力供应。通过运用一个对成本、可靠性和环境影响同时评

¹¹ CA Public Utilities Commission. (ND). *Integrated Resource Plan and Long Term Procurement Plan (IRP-LTPP)*.

<https://www.cpuc.ca.gov/irp/>

估的优化模型¹²，多种资源选项得以在一个公平的环境中被评估和选择。

在中国，电力行业长期以来以五年规划为核心，为各种资源的投资（和淘汰）数量和类型提供高层指导。然而，随着转型工作的加速，完善五年规划中对不同发电资源的评估，寻求一个不仅具有成本效益，而且能够满足减排、可再生能源目标和系统可靠性的最佳资源组合，是未来面临的挑战。2016年能源局发布的《电力规划管理办法》制定的原则，已经为实现这些工作奠定了基础。从国际经验来看，可能需要进一步完善规划流程，制定详细的规则来确定满足未来五至十年内电力需求增长所需的最低成本的新资源组合，并每年滚动更新，以反映市场上技术成本和减排能力的迭代。在一个市场化的电力系统内，这也可以作为一种测试，检验新的市场机制是否发出合理的投资信号。

长期系统规划：对输电系统的协调规划

前文所述的中短期展望和规划多是针对发电资产，但在一个庞大的电网中协调资源互联，输电系统的规划和扩容是必不可少的一部分。相对于发电资产，输电系统的规划具有一定的特殊性。首先，输电产业本身具有自然垄断性，因此由单一实体提供服务并进行合理规划十分有必要。其次，在理想情况下，输电规划决策应在系统确认所需开发的可再生能源组合之前就拟好。然而，由于新上线资源部署位置的不确定性，这在实践中难度较大，因此给输电规划带来了一定的复杂性。最后，风力和光伏电站的施工建设时间通常较短，而输电线架设所需的时间则相对较长。尤其是当新发电资源建设在远离用电负荷中心的多风、多光区域时，建设用于连接这些高产能资源的输电线有时需要十年之久。这种项目周期上的矛盾通常导致的结果就是新发电资源部署与电网扩容之间存在时滞。随着可再生能源份额增速加快，这些问题给电网规划者带来了越来越大的挑战。

一个完善的输电规划流程将有助于应对这些问题，在协调发电资源部署与输电基础设施建设的同时，确定最适宜、成本最低的输电项目。例如，在美国，FERC授权RTO进行输电系统的长期规划并决策何时、何地投资建设新的输电资产。这些资产通常不仅仅是依据发电量和需求量直接进行扩容的结果，而是电网规划者通过一系列流程确认的最佳输电投资。具体地说，新架设的输电线必须满

¹² CA Public Utilities Commission. (2021). *RESOLVE Preferred System Plan (PSP) Modeling Results*. <https://www.cpuc.ca.gov/-/media/cpuc-website/divisions/energy-division/documents/integrated-resource-plan-and-long-term-procurement-plan-irp-ltpp/2019-2020-irp-events-and-materials/psp-resolve-ruling-presentation.pdf>

足以下三点要求中的至少一点：1) 对维持区域电力系统可靠性至关重要；2) 有助于以最低的成本为消费者提供电力；以及3) 符合特定政策的要求。多年来，FERC关于如何进行这些输电规划实践的指导方针不断发展。FERC第890号令（2006年发布）¹³规定了任何规划程序都应遵守的原则，包括与发电资源部署的协调、维持全过程的公开透明和跨区域统筹协作等。FERC第1000号令¹⁴在2010年对这一基本框架又进行了进一步扩展，并强调了区域间协调输电系统开发的重要性。虽然目前各区域规划流程还是没有得到很好的整合，FERC也承认现有法规由于成本分配方式的问题可能导致了次优的输电计划¹⁵，但相关机构已经在努力解决这些缺陷。

美国中西部RTO MISO输电系统规划实例：

MISO在输电规划及促进可再生能源并网方面的经验或许值得借鉴。其管辖范围内的美国中西部是全美风力资源最佳的区域之一，因此，确保遍及多个州的风电开发项目可以有序地并入输电网络十分重要。MISO采取的应对措施是建立一个长期的输电规划过程（LRTP）¹⁶，对未来二十年区域输电网的预期扩容需求进行前瞻性的评估。在此过程中，电网规划者从确认预期的最佳资源组合开始，到对区域电网可能面临的阻塞问题进行深度评估，在多方利益相关者的共同参与下，最终决策出最利于可靠性标准、经济效益和其他政策目标的输电方案，并提出项目投资建议。

图二.MISO长期输电规划流程的具体步骤

¹³ U.S. Federal Energy Regulatory Commission, Docket Nos. RM05-17-000 and RM05-25-000, Order No. 890 on February 16, 2007. <https://www.ferc.gov/sites/default/files/2020-06/OrderNo.890.pdf>

¹⁴ U.S. Federal Energy Regulatory Commission, Docket No. RM10-23-000, Order No. 1000 on July 21, 2011. <https://www.ferc.gov/electric-transmission/order-no-1000-transmission-planning-and-cost-allocation>

¹⁵ U.S. Federal Energy Regulatory Commission.(2022). *Building for the Future Through Electric Regional Transmission Planning and Cost Allocation and Generator Interconnection*. [Proposed rule].

¹⁶ MISO.(2023). Long Range Transmission Planning-Reliability Imperative. <https://www.misoenergy.org/planning/transmission-planning/long-range-transmission-planning/>



总之，基于国际经验的最佳实践，我们认为有必要以统筹协调的方式进行长期的输电规划，以保障系统最佳资源组合的部署不因输电基础设施的匮乏而流产。为达到这个目的，其他国家和地区的监管机构需要对电网规划者确定的最佳输电投资进行审核，在分析项目的成本、效益和可靠性影响后，授权运营商进行输电线的架设。

建立公开、透明的利益相关方参与体系

对上述提到的各种的展望和规划来说，能够与系统的利益相关方以公开和透明的方式进行沟通是十分重要的一环。相关群体和第三方机构的有效参与能够提高评估的准确性，增强规划流程的共识，对系统成功转型做出重大贡献。

良好的利益相关方沟通实践通常包含以下两点。第一，要以适当的、可获取的方式向利益群体公布有关评估和规划模型的信息。这里的信息包括具体的模型算法、建模过程中运用的假设和输入的数据集等。有相关经验的业内专家或第三方机构通过审查该信息，便能识别模型的严谨程度，分析该模型是否能客观的反映系统的运行特征或资源的出力特性，并以此提供反馈和改进意见。国际上可借鉴的案例有很多，例如，欧洲输电系统运行商合作协会—电力部门（ENTSO-E）作为整个欧洲大陆的规划机构，在每次发布季节性可靠性展望时都会在网站提供关于每小时系统需求、输电容量、水力条件、风力发电和其他输入的详细数据¹⁷；在美国，CAISO在进行长期输电规划的过程中，也会在每个阶段召集会议，提供关于输电计划发展的最新情况，更新具体的建模输入和数据假设，并征求利益相关者的反馈意见。

良好沟通实践的第二点是确保利益相关群体的参与是贯穿评估和规划流程全

¹⁷ ENTSO-E季节性报告及数据，可见 <https://www.entsoe.eu/outlooks/seasonal/>.

周期的一个包容性的过程。这是因为在愈发市场化的电力系统下，越来越多的利益群体涉及其中，监管机构、电网运营商、不同类型资源的项目开发商都有各自的观点和角度。使所有利益相关方（不管是个人、群体还是机构）都能充分参与评估和规划的全流程中，提供专业的知识和见解，有助于增强群体的共识，管理潜在的社会风险等。

2016年的《电力规划管理办法》和2023年《电力可靠性管理办法》为完善电力规划打下了坚实的基础，中国可以建立利益相关方参与的系统方法，提高各类展望和规划的透明度，以有效支撑逐渐市场化的电力行业。

总结

中国的脱碳进程不断深化，政策制定者也为电力部门制定了指导性的顶层设计方案。正如世界上的其他国家，中国电力行业的改革依旧面临挑战，完善五年规划的框架对于建立可靠、高效的商业化电力体系至关重要。国际上的经验和教训可能为中国提供有益的指导，特别是：

- 对短、中、长期三种规划的流程、机构、和职责进行统一的规定和管理，构建相关的法律基础。
- 对于各类规划或展望，以下列指导原则为基础：
 - 运用严谨的、科学的、基于概率的方法进行规划，将不同情境下电力系统可能面临的风险纳入考虑范围（包括系统的负荷、资源以及输电资产）
 - 将电力行业中所有类型的可用资源视作候选（可再生能源、储能、需求侧资源和新兴清洁发电技术等），并在一个公平的环境中对其成本效益和可靠性贡献进行评估。
 - 定期发布有关模型假设和数据输入等详细信息的报告供业内专家或政府部门审查，以增加规划透明度，提高评估的准确性。
- 为规划流程中利益相关方的参与建立系统的方法，确保各方群体可以充分参与到评估和规划的全流程中，以有效支撑逐渐市场化的电力行业。



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).