



中国电力圆桌  
POWER SECTOR ROUNDTABLE



专题报告

# 美国电力规划的经验借鉴

中国电力圆桌项目课题组

---

2017年11月

---

## 中国电力圆桌项目

( Power Sector Roundtable , PSR )

中国电力可持续发展圆桌(简称中国电力圆桌)项目于2015年9月启动,旨在紧扣应对气候变化、调整能源结构的国家战略,邀请业内专家和各利益方参与,探讨中国电力部门低碳转型的路径和策略。电力部门涉及到不同的利益主体,需要综合考虑各方利益的参与,共同实现电力部门的成功转型。

中国电力圆桌项目将各方关心的、有争议的、目前决策困难的关键问题提交到同一个平台上进行讨论,广泛征求意见,为电力部门的决策提供支撑,提高决策质量,从而确保决策得到最大限度的实施和执行。

### 中国电力圆桌项目课题组



自然资源保护协会  
NATURAL RESOURCES DEFENSE COUNCIL

自然资源保护协会(NRDC)是一家国际公益环保组织。自然资源保护协会拥有近500名员工,以科学、法律、政策方面的专家为主力;以及约200万会员及支持者。自1970年成立以来,自然资源保护协会一直在为保护自然资源、生态环境及公众健康而进行不懈努力。自然资源保护协会在美国、中国、印度、加拿大、墨西哥、智利、哥斯达黎加、欧盟等国家及地区开展工作,并在中国的北京、美国的纽约、华盛顿、芝加哥、洛杉矶、旧金山以及蒙大拿州的波兹曼等地有常设办公室。



RAP® 睿博能源智库

睿博能源智库(The Regulatory Assistance Project (RAP)®)是一个全球性专家咨询机构,长期致力于为欧洲、美国、中国、印度等国的电力行业改革所面临的挑战提供解决方案。我们在广泛的能源领域从事专业的技术和经济分析,特别是在电力行业规划和市场设计、能效和电力需求侧管理、空气质量管理、可再生能源并网、排放交易等方面有着资深的国际经验。睿博能源智库自1999年开始在中国工作,旨在促进可持续经济发展、增加电力系统可靠性、改善空气质量和公众健康,从而为中国大量和长期地减少温室气体排放作出贡献。

# 1

## 概述

电力行业规划的制定和施行，是确保电力项目投资具有成本效益和环境可持续的基础。电改9号文正是强调了改革规划的重要性。其中最主要的挑战，是如何促使中国电力部门摆脱以满足快速增长的需求为主要考虑因素的传统模式，转而采用充分权衡利弊和多重目标的新型模式，包括结合中国的可再生能源、环境质量、价格水平和可靠性等目标。国家能源局2016年5月印发的《电力规划管理办法》（以下简称“《办法》”）是迈向这一框架的重要一步。

目前中国面临的挑战就是要充实这一新的框架，并重点确保电力规划与电力行业改革的其他方面，尤其是与新推出的电力市场协调一致。为此，《办法》规定，在采购电力资源时要使用“市场机制”的原则，从而与规划中提出的“指导意见”保持一致<sup>1</sup>。这一原则也符合其他国家的广泛经验。例如，即使在已经实行电力市场化的美国部分地区，电力规划在评估资源充足性、发现市场设计的调整需要、以及统筹协调发输电和需求侧资源投资方面，仍发挥着至关重要的作用。

仔细分析中国现状，发现，改善规划模式有助于解决以下相互关联的四种挑战：

- 发电产能过剩。中国大部分省份的发电容量相对于电力需求均出现过剩，目前，大多数地区的发电装机容量比峰荷需求要高出10%至40%（包括合理的可靠性充裕度）。<sup>2</sup>
- 实现空气质量目标。到2030年，中国所有城市都需符合PM2.5每立方米35微克（年平均值）的国家标准。臭氧调控也将成为城市地区越来越重要的考核指标。电力部门可以在这些污染物的减排方面发挥重要作用。
- 实现温室气体减排目标。“十三五”规划的目标是到2020年，中国经济的二氧化碳强度在2015年水平的基础上下降18%。中国已经承诺将在2030年达到二氧化碳强度在2015年水平的基础上下降18%。中国已经承诺将在2030年达到二氧化

<sup>1</sup> 第三十八条。

<sup>2</sup> Lin et al. (2016) and Kahrl (2016).

碳排放总量的峰值。要实现后一个目标，需要到2030年将非化石燃料发电占总发电量的比例（从2015年的29%）提高到40%。<sup>3</sup>

整合波动性可再生能源发电。风能和太阳能发电量的不断提高给中国的省级电网造成了冲击，导致弃风弃光水平远远高于其他国家。中国六大风力发电省份中的五个，弃风率均超过20%，而美国的弃风率通常不到5%<sup>4</sup>。

根据美国的经验，我们提出，中国的电力规划工作应重点关注以下四个方面：

- （1）明确政府机构之间以及政府与电网公司、发电公司和其他实体之间的规划角色和责任；
- （2）明确电力规划在投资决策中的作用；
- （3）建立协调各种投资选择（需求侧资源、发电、储能和输电）的机制，以确定最低成本的资源组合；
- （4）持续开发和应用量化建模工具；
- （5）将风险管理纳入规划分析和投资决策。

---

<sup>3</sup> 可参见 Liu et al. (2015). 有关非化石燃料发电的比例数据来自中国电力企业联合会 (CEC).

<sup>4</sup> 关于中国弃风的数据来自国家能源局 (NEA), "2015年风电产业发展情况", [http://www.nea.gov.cn/2016-02/02/c\\_135066586.htm](http://www.nea.gov.cn/2016-02/02/c_135066586.htm). 这里“风电大省”是按照占总发电量的比例来确定的。有关美国弃风的更多信息可参见美国能源部 DOE (2015). 关于更多中国弃风的原因分析, 可参见 Kahrl and Wang (2014).

# 2

## 美国电力规划的经验

美国部分地区也面临着与中国类似的挑战：产能过剩，环境目标，以及波动性可再生能源上网等。<sup>5</sup>美国在电力规划流程和经济分析方法方面具有多年经验，或许可为中国提供有益的参考。

### 2.1 电力市场设计的关键目标

美国经验表明，运作良好的规划流程对于解决前面提到的诸多挑战非常关键。美国电力规划流程的制定涉及到以下问题：

- 如何将环境目标和其他公共政策目标纳入规划流程；
- 由哪些机构负责制定不同类型的规划；
- 地方和区域规划如何互动；
- 哪些利益相关部门、在何时、以及如何参与规划流程；
- 州政府和联邦监管机构如何监督监管对象制定的规划；
- 规划过程中不同的监管部门，例如电力和空气质量监管部门，如何进行协调；
- 规划将如何影响项目投资、淘汰落后产能、以及审批的决策。

表1概述了美国电力规划流程中所针对的几类问题。在不同地区，参与规划的机构有所不同，在某种程度上取决于该地区<sup>6</sup>是否属于ISO/RTO市场的一部分<sup>7</sup>。在美国，在这些不同的规划流程之间进行协调是一种“最佳实践”——例如，在资源、输电和配电规划中所采用的信息应做到统一，以确保规划结果的一致性。

<sup>5</sup>关于美国电力规划挑战的最新概述，请见 Kahrl et. al (2016).

<sup>6</sup>这里“地区”指某个州或电力公司的服务范围。

<sup>7</sup>ISO/RTO 指“区域输电组织和独立系统运营商”。请参见本系列之“美国电力市场设计与实施的经验以及对中国的借鉴”，其中介绍了 ISOs/RTOs 及其重要意义。

表1. 美国电力规划解决的问题和参与机构

问题类型	要解决的问题	主要参与部门	
		非-ISO/RTO	ISO/RTO部门
分布式能源资源(DER)	相对于其他资源的投资，多大规模的DER投资具有成本效益？哪种DER资源最具成本效益？	电力公司，州政府	州政府，电力公司
资源充足性与资源投资	根据预测的电力需求，需要多少发电容量和需求侧资源来维持未来的电网可靠性？何种资源组合最能平衡成本和风险？如何调整市场机制设计，以确保建成所需的发电产能，并以合理方式淘汰不必要的产能？	电力公司，州政府	系统运营商，州政府，电力公司
风电和太阳能发电并网	为消纳不同比例的风电和太阳能发电需要哪些运行方式的改变、多少运营成本和输电系统投资？	电力公司，	系统运营商，电力公司
输电	在什么区域、需要多少输电能力来维护电网可靠性，最小化发电成本，并实现公共政策目标，包括与可再生能源有关的目标？	电力公司，州政府	系统运营商，电力公司
配电	何时何地需要对配电系统进行投资，以维持配电运营充裕度；哪些投资可以推迟？	电力公司，州政府	电力公司，州政府，系统运营商
环境	如何以综合规划以及成本最低的形式实现空气质量目标，包括综合考虑多种污染物？	电力公司，州政府	州政府

图1给出了美国电力规划方法的一个概念图。该流程的第一步是负荷预测以及对影响规划的监管要求（如可靠性标准，排放标准）和公共政策目标（如能效和可再生能源目标）进行评估。在此基础上，规划部门制定各种潜在投资组合并评估其经济性，通常会进行敏感度分析。依此形成的电力规划将提出新的投资项目，有时也包括淘汰落后产能的决定，力图以最低成本、最低风险来实现可靠性和环境目标。通常，在规划出台之前要向利益相关部门公开征求意见。

这里“最低风险”的概念值得强调。理想情况下，规划应包括在比较投资方案时对不确定性和风险进行认真评估。在美国，不确定性和风险的来源包括：需求预测，燃料成本，投资成本，施工延误，管制变化，以及排放（SO<sub>2</sub>，NO<sub>x</sub>，CO<sub>2</sub>）价格。此外，规划部门还可能要考虑到尚未决议或实施的政策或法规的变更 - 例如，可预见的更加严格的排放标准<sup>8</sup>。

<sup>8</sup> 可参见报告 <http://www.raonline.org/knowledge-center/practicing-risk-aware-electricity-regulation-what-every-state-regulator-needs-to-know/>

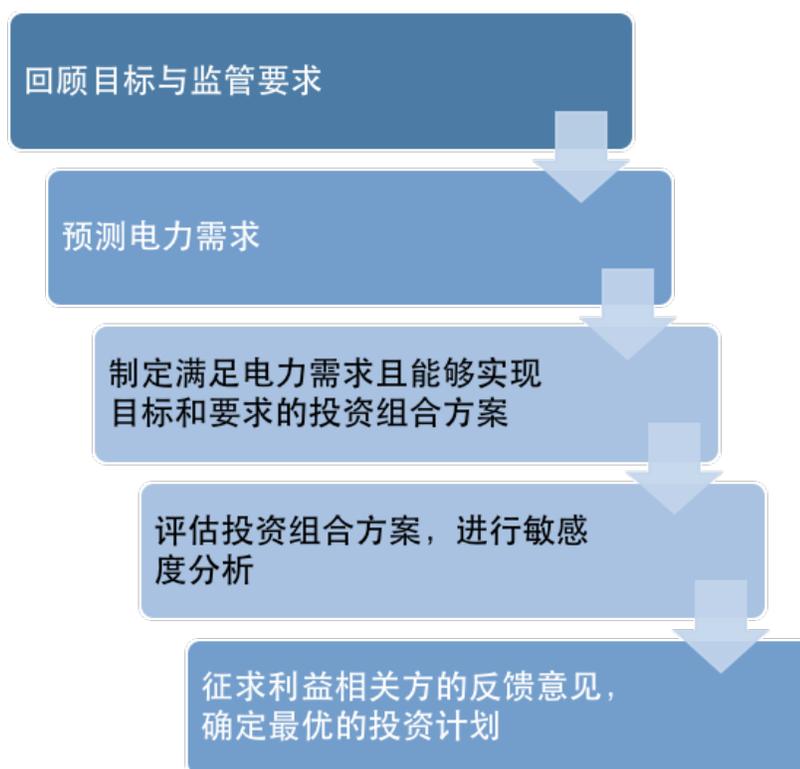


图 1. 典型的电力投资规划流程

规划部门和监管机构需要在不同类型的规划之间进行协调。例如，电力公司的能效规划往往需要将有关发电和输配电成本的最新信息纳入考量，以便电力企业和监管机构能够确定能效投资的成本效益水平。RTO输电规划力图将有关发电投资、淘汰落后产能和需求的最新信息纳入其中，以便提出输电系统的升级改造方案，进一步提高输电可靠性或降低成本。做好这类综合性规划需要投入大量的工作，但这有助于找到满足电力需求和环境目标的低成本方案<sup>9</sup>。

规划的频率和时间尺度可能根据规划类型和行业结构而有所不同。表2 显示了加州和PJM（宾州-新泽西-马里兰区域输电组织）地区的例子。在加州，州立监管机构——加州公共事业委员会（CPUC）对资源充足性拥有管辖权，并协调全州各投资者所有的电力公司（IOU）的投资规划流程，以确定长期的资源需求。然后各电力公司根据长期采购计划，在得到进一步批准的前提下，按照要求采购新的资源。加州独立系统运营商（CAISO）负责监督单独的输电规划流程。

<sup>9</sup> 请参见 <http://www.raonline.org/document/download/id/6608/> 也可参见报告的2.3节, 英文报告网址: <http://raonline.org/document/download/id/7432> , 中文版请参见: <http://www.raonline.org/document/download/id/7482>

PJM为参与其中的负荷服务实体<sup>10</sup>开展资源充足性和输电系统规划工作，但这些负荷服务实体的额外规划以及额外规划年限存在显著的差异。表2中的所有规划都由监管对象来制定，并接受联邦或州政府的监督。

表2. PJM和CAISO地区的规划机构和规划特点 <sup>11</sup>

### PJM地区电力规划

规划机构	规划名称	规划范围	机构类型	更新频率	规划年限
Dominion Power	综合资源规划	弗吉尼亚州	垂直一体化电力公司	年度	25年
PECO Energy Compan	默认服务项目申请 <sup>12</sup>	仅宾夕法尼亚州	垂直一体化电力公司	年度	2年
PJM	地区输电扩容规划	PJM 全地区	系统运营商	年度	
	资源充足性规划	PJM 全地区	系统运营商	年度	3年

### 加州电力规划

规划机构	规划名称	机构类型	更新频率	规划年限
CPUC	长期采购计划	州监管机构	两年	10年
	资源充足性	州监管机构	年度	1年
PG&E	捆绑式采购计划 <sup>13</sup>	电力公司	两年	10年
加州独立系统运营商	输电系统规划	系统运营商	年度	10年

<sup>10</sup> 参与PJM的负荷服务实体包括垂直一体化的电力公司和PJM内部的具有零售竞争的各州中提供默认服务的电力企业。

<sup>11</sup> 弗吉尼亚州和宾夕法尼亚州是PJM区域内的两个州，作为PJM地区不同情况的例子。

<sup>12</sup> 该申请是为获得对PECO能源公司的默认客户所缴纳的零售电价水平的批准。作为申请书一部分，PECO概述了其采购策略。

<sup>13</sup> 这种“捆绑采购计划”概述了投资者拥有的电力公司的能源采购战略，以及如何管理能源有关的风险。通过审批该战略，CPUC实际上也就批准了采购计划。

## 2.2 量化规划方法

美国电力规划流程中的定量分析包括以下几种：

- 可靠性模型：根据电力不足期望值（LOLE）目标，测算全系统和本地规划所需的备用容量，并确定风电、太阳能和径流式水电（run of river）的容量可信度。随后，用测算出的备用容量来确定满足此目标所需的总装机容量。

- 容量扩张模型：确定最低成本投资组合所需的发电、需求侧和输电资源，以满足未来规划的备用容量和电厂或区域空气质量以及二氧化碳排放标准。

- 模拟生产模型：检验不同资源组合的经济性和运行效果。

一些电力公司利用容量扩张模型和模拟生产模型进行复杂的风险分析。这些电力公司运用容量扩张模型，找出在各情景（包括不同的需求增长、监管要求和燃料成本等）下能够满足可靠性和环境约束的最低成本投资组合；然后再对这些投资组合做进一步更详细的生产模拟建模，利用灵敏度（Monte Carlo蒙特卡罗法）分析来生成各种可能的成本分布。这种资产组合风险分析为每个投资组合生成一个成本均值和方差，可用来评估投资组合风险。图2显示了该分析可能产生的结果。具有低均值、高方差的投资组合可能风险过高，而具有低方差、高均值的投资组合可能太昂贵。通过这个过程，规划部门可设法找出具有低均值（低成本）和低方差（低风险）的投资组合。

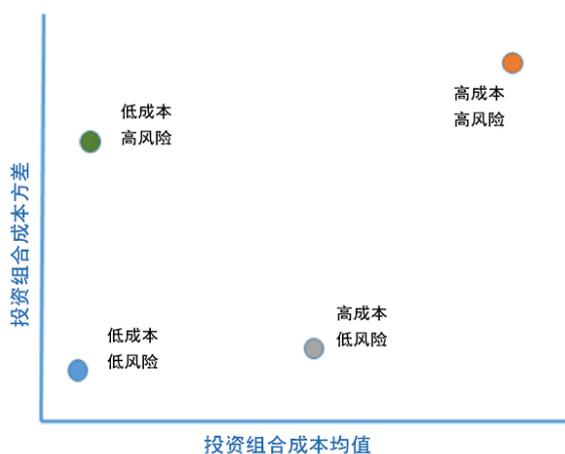


图2. 资源组合风险分析结果图示

值得注意的是，运用定量分析方法可以给出重要的分析结果，并为决策提出指导意见，但这并不能代替规划中的主观判断，而且对分析结果的利用一定要有清晰的流程。

# 3

## 结论及需要进一步研究和讨论的问题

长期以来，中国非常重视电力规划工作，1995年的电力法中明确了规划工作的核心作用。不久前，国家能源局在2016年发布的《电力规划管理办法》中，强调了电力规划对支持科学决策的重要意义，并规定了新的规划流程、作用和责任分工<sup>14</sup>。然而，许多重要细节尚未决定。美国电力部门规划过程具有多样性，可为中国提供有益的参考。

定量分析工具可以在中国电力行业科学决策中发挥更重要的作用，尤其是通过更加严格的经济性评估。一个重要的考量是如何在决策过程中运用这些工具。美国在电力规划过程中开发和使用经济分析工具历史已久，这些工具的设计和使用会对中国有借鉴作用。

因此，我们建议中国的电力规划要做好以下五个方面的工作：

- 明确规划角色和责任，包括不同政府机构（例如，能源，电力，环境，工业，建筑）之间和不同电力供应商（例如电网公司，发电公司，零售商）之间的角色和责任。
- 明确电力规划在投资决策中所发挥的作用，尤其是如何将规划得出的结果运用到有关投资和淘汰落后产能的决策中。
- 建立协调不同电力规划流程的机制，确保不同的规划流程能够形成发电、分布式资源、输电、大容量储能以及配电等各种资源的最低成本组合方案。
- 继续开发量化建模工具，提高规划分析的严谨性和权威性，同时提高透明度。
- 将不确定性分析和风险管理纳入规划分析和投资决策，管理好持续变动的电力需求、煤炭和天然气燃料成本、可再生能源发电成本以及输电能力等方面的不确定性和相关风险。

<sup>14</sup>. NEA (2016).



自然资源保护协会 (NRDC)  
中国北京市朝阳区东三环北路 38 号泰康金融大厦 1706  
邮编: 100026  
电话: +86-10-5927 0688  
[www.nrdc.cn](http://www.nrdc.cn)