



中国电力圆桌
POWER SECTOR ROUNDTABLE



专题报告

美国可再生能源并网的经验和借鉴

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(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。



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。

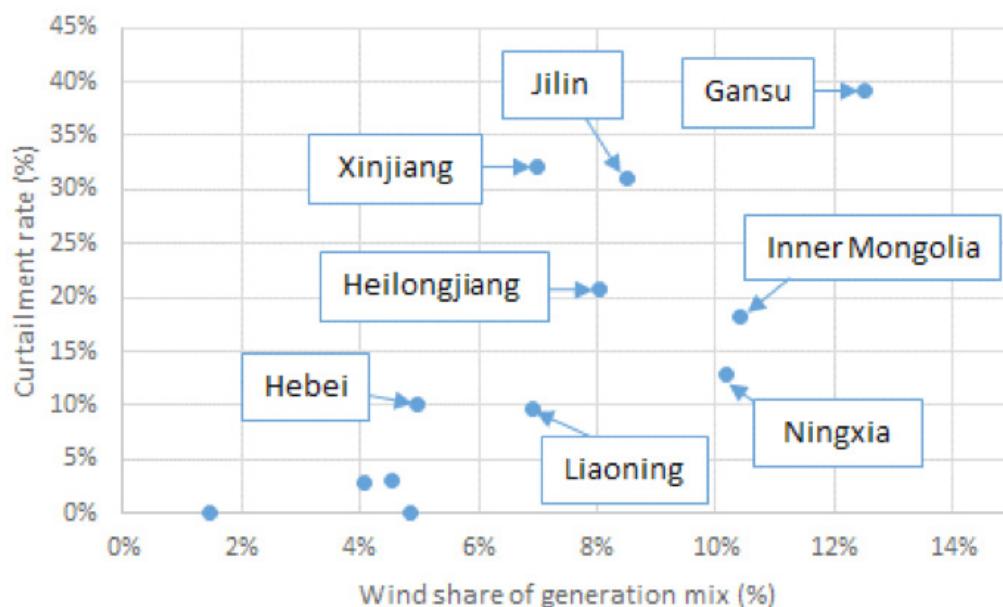
1

概 况

世界各国正面临着一大挑战，即如何将越来越多的可再生能源并入现有电力系统。由于风能和太阳能发电量随天气条件而发生变化，各国面临的挑战主要集中在提高电力系统灵活性方面，以支持可再生能源的利用，避免可再生能源的浪费（弃电）。

遗憾的是，在中国可再生能源的弃电现象十分严重，并很有可能成为妨碍可再生能源进一步发展的瓶颈（图 1）。这已然是一个棘手的问题，其根源错综复杂，包括电力调度效率低下、电力和供热部门协调困难、输电系统能力不足等。

图1.2015年中国的弃风率与各省风电比例¹



¹. 中国的弃风数据来自能源局《2015年风电产业发展情况》，
http://www.nea.gov.cn/2002/02/c_135066586.htm。“风电比例”中的发电量数据来自多个网上数据源；
 宁夏和河北的发电量数据为估算数据。

中国政府认识到这个问题的重要性，在《电力发展“十三五规划”》中提出将弃风、弃光率控制在合理水平。国家发改委和能源局出台了一系列促进可再生能源上网的政策，并在高弃电率的省份推出了一些相应的试点。这些政策和试点一起组成了若干双管齐下的措施，其中一些措施已经向前推进，而另一些措施尚未得到充分实施。具体措施包括保障可再生能源的最低发电小时数，推广电采暖和增加其他有助于消纳可再生能源的用电负荷，以及在东北电网地区实施“辅助服务市场”，通过分摊一部分辅助服务成本风电企业可以多发电。

提高灵活性和降低弃电率，需要在监管、市场设计、规划和激励措施等诸多方面进行创新。随着中国电改的推进，其他国家应对类似挑战的经验将持续提供有价值的参考。与本系列其他报告一样，我们在此介绍国际上的发展情况，鉴于篇幅所限，重点介绍美国的经验，然后简要讨论对中国的一些启示和问题。

美国的可再生能源并网经验

2.1 提升可再生能源并网率

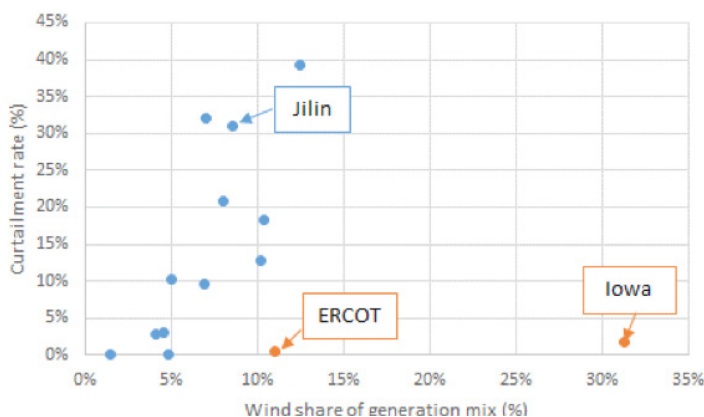
美国的很多地区（虽然还不是全国）对可再生能源提出了积极的目标。这些州在市场设计、系统运行和管制方面都对提升风能和太阳能发电率提出了要求。一些传统上独立控制运行的区域，也正在经历战略变化，通过改善协调运行，来应对风能和太阳能发电的多样性和不确定性。

美国弃风率和弃光率较低的原因主要在于两方面：

其一，美国长期以来实行的“经济”调度法——即优先调度运营成本低的发电资源——成为维持低水平弃电率的主要因素。这是因为波动性可再生能源发电（VRG：风电，太阳能和径流式水电）的运营成本接近于零，因此应优先进行调度。例如，德克萨斯州（ERCOT）和科罗拉多州采用的风力发电的经济调度，使得弃风率低于5%，尽管两个州与邻近各州的电网互联不多，而风电的比例也与甘肃省相当。

其二，与电力系统调度协调开展日益精准的风电和太阳能发电预测，也是低弃风率的一个重要原因。

图 2. 2015年中国十二个风电大省、德克萨斯州（ERCOT）和爱荷华州弃风率与风电比例对比图



². 中国的数据见图1。ERCOT 的数据是2014年的；弃风数据来自美国能源部DOE (2015)；RE比例数据来自 ERCOT, “2015年ERCOT地区的能源利用增长 2.2%,” <http://www.ercot.com/news/releases/show/86617>. 爱荷华州的风电比例摘自爱荷华州电力公司董事会, “爱荷华州的风力发电,” <https://iub.iowa.gov/wind-powered-electricity-generation>; 爱荷华弃风数据来自MISO.

2.2提升电力系统灵活性

政策制定机构和监管机构面临的一个重要问题是，如何在提高系统灵活性的两大途径之间进行平衡：（1）改变监管方式和市场设计，（2）投资建设燃气发电或储能等新的灵活性资源。在美国，一个最新的共识是，提高现有系统的灵活性比投资新的资源来增加灵活性更经济有效，虽然迄今为止一些对新的输电资源的投资发挥了十分重要的作用。表1给出了增加现有系统灵活性与投资新建资源来提高系统灵活性的各项措施的示例。

表1.提高现有系统灵活性与增加新的资源来提高系统灵活性的措施示例

提高现有系统灵活性	增加新的资源来提高灵活性
• 修订电网规范、运行流程、监管条例、市场设计 • 要求VRG 提供可靠性服务/辅助服务 • 鼓励VRG组合的多样性，鼓励VRG • 选址分布的多样性 • 修改零售电价，提高需求侧灵活性 • 扩大平衡区范围	• 增加储能设备 • 建设新的输电线路 • 投资建设新的更灵活的发电厂

在提高现有系统的灵活性的措施中，有三项内容尤其重要：

- 拥塞管理；
- 地区平衡；
- 灵活性激励政策。

2.2.1拥塞管理

拥塞是指输电系统中某一部分发电减去外送超出需求时的状态。发生拥塞时，系统运营商必须确保输电系统不会过载（即，维持频率），因此通常采取行动来限制某些发电机组的出力。在任何给定的时刻，系统运营商可以采取多种方式来应对这一问题，而问题是如何确保以最有效和最低成本的方式实现拥塞管理。换种说法即，应该以“经济”的方式管理拥塞。

任何国家都有可能对VRG有关的拥塞采用“非经济”的管理，一般出以下几个原因：

- 软件 and 控制系统能力不足：系统运营商对系统的了解或控制不足以实现经济调度³；
- 对VRG的预测质量差 (或利用不好)：预测外的VRG发电量，意味着系统运营商无法让最经济的发电机组上网来支持VRG；
- 存在利益冲突：在系统运营商拥有发电资产（或存在附属关系）的情况下，该系统运营商很可能愿意调度自己的电厂，而不是调度其他更具成本效益的发电机组；
- 市场规则：针对竞价和发电计划的市场规则，可能会导致一些特殊情形下的机组调度没有经济性。

在美国，联邦能源监管委员会(FERC)的“开放市场准入”法规是拥塞管理的主要监管框架，主要针对解决上述问题中的第三项和第四项⁴。FERC的规定要求输电系统的所有者（可能是同时拥有发电和输电资产的电力公司），应不论所有权，允许所有的发电厂以平等的地位接入该输电系统。

美国部分地区已经实施了一种基于实时的(“现货”)市场（具有区域边际价格）的调度系统，该系统的特点是允许电网上的不同地点（“节点”）具有不同的价格。⁵如果不是基于节点实施调度，当输电线路发生阻塞（例如系统中某部分出现风电充裕而负荷较低的时段）时，系统运行商将不得不选择一个机组来重新调度。有了节点调度，这些再调度决策将通过满足安全约束的经济调度软件得以自动实现。在阻塞事件发生时减少对人工再调度的需求，可以促使VRG的调度更具有经济性。

³. 这在美国通常不成问题。大多数系统运营商（除一些较小的平衡区域以外）都已经实施了足够的技术手段，包括满足安全性约束的机组组合和经济调度（SCUC / SCED）软件及能源管理系统（EMS）等。

⁴. 详见联邦能源监管委员会指令 888, 889, 890, 2000.

⁵. 这些区域被称为 ISO/RTO 区域。更多信息，请见本系列报告之电力市场设计专题。

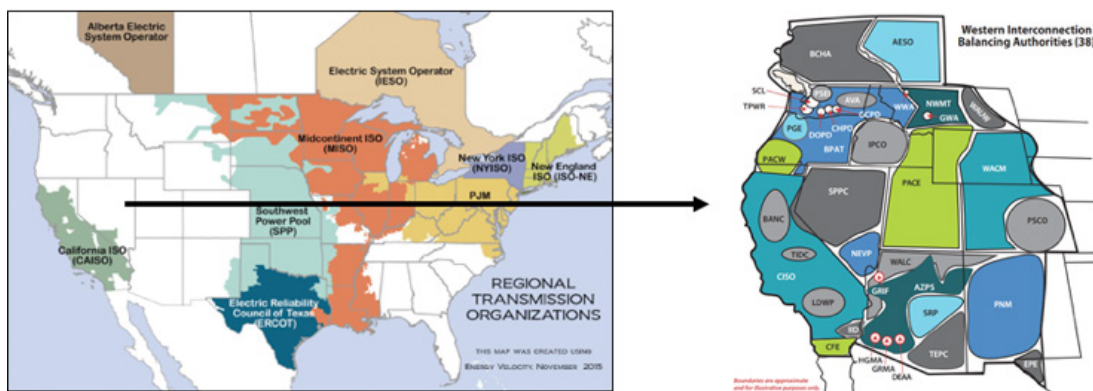
2.2.2地区平衡

美国西部有超过35个平衡区域——通常都比较小。在每个平衡区域，系统运营商传统上独立地平衡其系统。西部地区更高的VRG比例促使该地区开展更好的协调工作，以便利用更大的平衡区域使VRG的波动性得到平滑。

这项改革包括：

- 美国西部地区的电能不平衡市场（EIM）是一种实时平衡机制，其特点是采用由加州独立系统运营商（CAISO）和PacifiCorp创建的竞价方法（图3）。2014年投入运营的EIM将在2019年至少覆盖美国西部的9家电力公司。这是一个小时内的平衡市场，意味着它将影响到电力公司的日前或小时前的电力调度安排。

图 3. 美国西部地区电能不平衡市场的形成



- **联合调度服务 (JDS)** 是基于科罗拉多州公共服务公司 (PSCo) 创建的基于成本预估的实时平衡机制。JDS 目前涵盖三个电力公司，其中包括 PSCo。它也是一种小时内的平衡机制，只影响到发电厂在小时内的运行。

这种EIM本质上是CAISO现有实时市场软件向相邻平衡区域的延伸。因此，它是一个复杂的系统，已经反映了CAISO在实时市场上长达数十年积累的经验。另一方面，JDS更加基础，也更易使用。

按照JDS，电力公司上报每台发电机组的热耗曲线、燃料价格和可变运行维护（O&M）成本。这些信息提交给网络门户，并直接进入PSCo的优化软件，而PSCo则看不到电力公司上报的信息。每个电力公司在该小时前向PSCo报送一个平衡方案，然后PSCo实时地对所有符合条件的发电厂进行一次符合安全条件的最低成本调度。按照从PSCo实时优化计算出的边际系统成本，对调度安排发电量与实际发电量之间偏差进行价格结算。

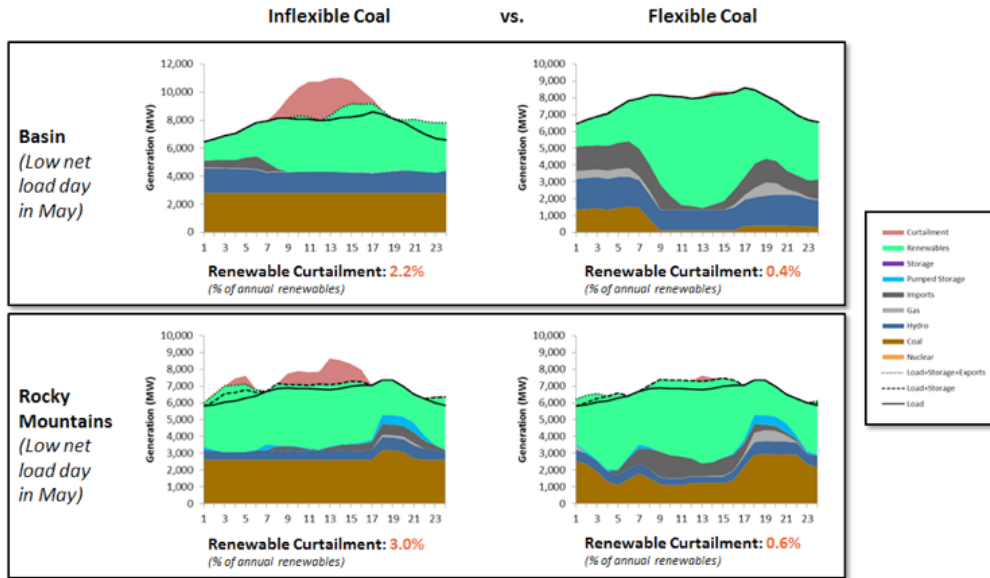
2.2.3 灵活性提高激励机制

美国各地的政策制定部门纷纷推出新的激励机制，鼓励火电发电机组更灵活地运行、引入更多需求侧灵活性资源。从历史上看，煤电机组在美国发挥基荷的作用，也就是说，系统运营商对电力系统的调度，是为了让这些煤电机组的出力始终保持相对稳定。在尚未出现大量VRG装机容量且天然气燃料价格尚未下跌之前，这样做具有一定的经济意义：因为煤电机组往往是运营成本最低的资源。然而，不断加大的VRG比例要求有更多的爬坡能力，更低的最低技术出力，以及对仍在运行的燃煤机组可能需要更频繁的启停。这种运行方式对于燃煤机组而言可能成本巨大，许多燃煤机组在这方面的能力有限。提高燃煤机组的灵活性有助于降低VRG的弃电率。

根据对美国西部电力协调委员会地区开展的一项研究，图4总结出了提高煤电机组灵活性对降低VRG弃电量所带来的收益。该图显示了某一天

（图中的示例为5月份，呈现出低负荷）的调度，以两个子区域（盆地和落基山脉）为例。左侧的图假设煤电机组是不灵活的（具体来说最低出力限值较高），这导致了VRG弃电量较大（红色阴影区域）。在右侧，煤电机组的最小出力限值较低，使得有更多的VRG发电上网。

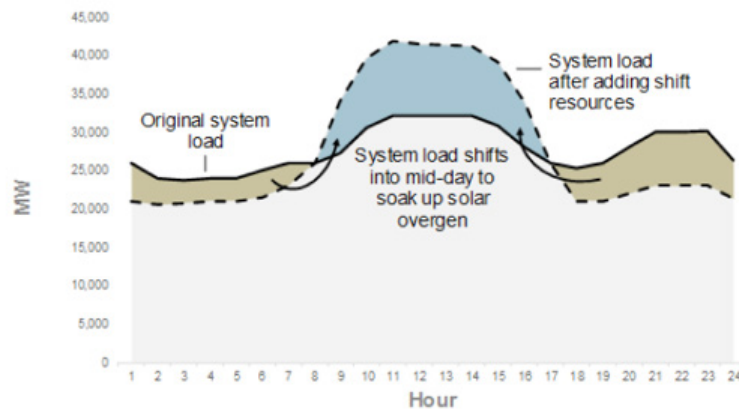
图 4. 不灵活的和灵活的煤电机组运行示例⁵



要让煤电机组实现更加灵活的运行，需要进行升级改造，可能会增加运营成本，并可能减少发电机的使用寿命。因此，鼓励煤电机组更加灵活的运行，需要向发电厂或电力公司提供足够的补偿。

需求侧灵活性最早由“应急”需求发展而来。近年来，已经实施了新的需求响应（负荷转移）方案，以更好地支持VRG⁶。（图 5）

图 5. 加州实施的负荷转移以支持VRG上网⁷



⁶ E3 (2016).

⁷ 也请参见本系列报告关于需求响应的文章。

⁸ LBNL (2016).

在美国已有的一些讨论是，如何设计激励机制，以鼓励需求侧资源能够转移一些净负荷（电动汽车，储能和分布式发电），便于全天利用VRG。如何以最佳方式提供这些激励措施，是一个持续争论的话题。在纽约和夏威夷，有一项建议是采用一种可自愿选择参与的“全价值电费”机制，它跟踪系统边际成本的变化，但仍允许对用于输配电基础设施的综合成本进行固定成本回收。在VRG高出力的时段，边际成本（因此零售价格）将会很低，鼓励用电消费。在VRG低出力期间，边际成本和零售价格将会较高，从而鼓励降低负荷，或分布式电源增加发电量。

结论及进一步研究和讨论的问题

- 中国的可再生能源弃电是一个紧迫而复杂的问题，需要从规划、政策、市场设计、监管、运营（调度）和资源灵活性多方面提供解决方案。这些角度都与提高系统灵活性密切相关，以支持更高的VRG比例。

- 在美国，出现了一项新的共识，即现有的电力系统可以以相当低的成本大幅度提高灵活性。这些低成本解决方案包括更大的平衡区域，更快的排序和调度，通过政策和定价提高需求侧灵活性，以及鼓励已有的传统发电机组更加灵活地运行。虽然在输电、储能、和灵活性燃气发电方面的新投资也有助于可再生能源并网，但通常成本效益不高。

- 中国可能也面临同样的问题。确定在哪里以及如何最大限度地提高中国现有电力系统的灵活性，是一个至关重要的调研领域。

- 改进调度，实行更合理的短期批发定价机制，是对中国非常有利的改革方向。事实上，这些在9号文件已经有所提及——虽然尚未形成足够详细的改革路线。电力市场的设计工作需要非常仔细地进行，重点是提高灵活性，支持VRG上网。

- 更具体地说，随着中国电力行业改革和新电力市场的实施，我们建议认真考虑以下问题：

- 随着年度发电计划即发电小时数分配制度的逐步淘汰，调度中心何时且如何开始实施经济调度？

- 如何改进 (并更好地运用) VRG 预测？

- 如何合理设计现货市场，以助于降低弃电率？

- 东北辅助服务市场可以为鼓励燃煤发电机组提高运行灵活性提供一个有用的模式。

- 通过市场提供的激励措施是否足以鼓励实质性减少燃煤发电机组的最低出力水平？

- 让负荷服务实体支付燃煤发电机组提高灵活性的成本（或许只是部分），是否恰当？

- 中国在提高需求侧灵活性方面有很大的潜力，但目前零售电价构成和激励措施缺失。

- 分时电价能否在提供激励方面发挥更大作用？

- 还需要哪些激励措施？



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