

需求响应对电力系统的经济价值

作者：王轩，Fredrich Kahrl

2014 年 11 月

前言

需求响应对中国并不陌生，90 年代已经开始通过行政、经济和技术手段对部分终端用户负荷进行控制。传统的需求响应项目主要以有序用电方式来缓解电力供应紧张的情况，应对电力突发事件。具体的措施有错峰、避峰、限电、拉闸。除了有序用电，一些地区还制定了较为完善的电价体系来调节供需，例如，峰谷电价、季节电价、阶梯电价、差别电价等。

有序用电在保障电网安全运行和维护用电秩序方面发挥了重要的作用，但是需求响应作为电力系统相比供应侧更低成本和清洁的资源，它的价值并未得到充分体现。参与者也未能得到足够的经济补偿，因而没有动力将需求响应的效益扩大化。

本文在简要回顾美国需求响应项目的历史背景之后，介绍电力公司开展的需求响应项目和市场化条件下的需求响应的情况，从而揭示美国需求响应的经济学原理和监管方法。中国目前正在进行需求响应试点并开始探索各种补偿方式，虽然开展项目的出发点有所不同，美国需求响应经济学的讨论对中国同样适用，可以为中国起到很好的借鉴作用。

美国的需求响应

历史背景

需求响应在美国兴起于 20 世纪 70 年代，当时中央空调的普及使得用电负荷曲线出现了明显的夏季高峰。而美国七八十年代“综合资源规划”使得电力公司和监管机构更关注高峰时段供电的昂贵成本，这促使电力公司寻找新增发电容量的替代方案，从而减少所需的发电成本。基于分时电价和基于激励的需求响应项目在许多州快速发展起来。

当时的电力公司主要是垂直一体化的，由于其所有的合理成本都可以回收，电力公司没有动力去鼓励用户降低负荷，而当时的需求响应项目主要使用于紧急状况，用户降低负荷也没有得到与其系统价值相应的补偿，因而需求响应项目的参与度不高。这种情况随着 90 年代许多州的电力系统向竞争性市场发生转变而改变。

市场条件下需求响应的作用被进一步扩大化，它被用于整个时段维护电力系统平衡，增加发电



The Regulatory Assistance Project™ • 睿博能源智库

中国 • 欧盟 • 美国 • 印度

Beijing, China • Berlin, Germany • Brussels, Belgium • Montpelier, Vermont USA • New Delhi, India

北京市朝阳区建国门外大街19号国际大厦2504室 • 邮编:100004 • 电话: +86-10-8526-2241

CITIC Building, Room 2504 • No 19 Jianguomenwai Dajie • Beijing 100004 • phone: + 86-10-8526-2241

www.raponline.org

及输电的需求弹性，减少价格波动。特别是 2005 年联邦能源监管委员会（FERC）的能源政策行动为鼓励需求响应充分参与市场运作（包括容量市场，能源市场和辅助服务市场）扫除了障碍，需求响应被视为与传统发电类似的资源进行运营。

电力公司开展的需求响应项目

在美国，从 20 世纪以来，电力公司一直有义务在其服务区域内为用户提供电力服务。监管机构要求电力公司以预测的峰值需求加上规划备用要求（通常是峰值的 15%）为基准拥有或购买足够的发电容量。电力公司应该在可靠性，有效性，经济性的指导下以最低的成本采购充足的资源，确保用户以低廉的电价享受所需要的服务。

在这样的前提下，当电力系统出现峰值时电力公司需要运行或购买调峰机组，通常是燃气轮机。这些发电机组仅仅为了满足全年少数小时的用电需求，因此运营成本及折算为每千瓦时的固定成本都很高。同样，在用电高峰时期，需要为部分超载的输配电系统扩容来保障电网安全。电力公司实施的需求响应项目，主要是在电力供应紧张的时段减少发电和输配电的容量需求，并降低可变成本（燃料和维护成本）及废气排放量。

美国各个电力公司对需求响应项目的设计各有侧重，这里主要对他们共同关注的几点进行综述：

	基于激励型	基于电价型
推动因素	可靠性	价格
描述	对电网的紧急情况做出响应，	对电价做出响应，
类型	直接负荷控制、可中断负荷、 紧急电力需求响应	分时电价（TOU），实时电价（RTP）， 尖峰电价（CPP）
对参与者的要求	强制执行，通知时间短	自愿执行，不具有调度性，提前通知
激励/处罚	较高的资金奖励或电价折扣， 有处罚	较低的奖励，无处罚

电力公司的需求响应项目必须经过监管机构的批准，主要是以不同角度对成本效益的评估，最常见的角度包括：项目参与者、电力公司、电力用户和电力系统总成本。对电力系统而言，需求响应的效益包括电力公司可避免的发电和输配电容量成本、可变成本（发电燃料及维护、输配电的线损）、环境成本和辅助服务成本。参与者的成本包括设备成本、交易成本和机会成本（失去的电力服务）。电力公司的成本主要是项目管理成本。¹

¹加州的电力公司需求响应项目比较成熟，详细情况可参阅 <http://www.cpuc.ca.gov/PUC/energy/Demand+Response/>。

市场条件下的需求响应

容量市场

在美国大多数的电力市场，电力公司同样必须达到电力资源充足标准，可以通过远期容量市场（双方或集中市场）购买发电或需求响应容量。容量市场中的需求响应在保证系统资源充足、提供应急储备方面起着重要的作用。相比起传统的调峰资源，需求响应具有成本低、响应快、清洁高效等特点。为了有效地获得这些资源一些市场（如 ISO-NE, PJM, New York ISO, MISO）允许需求响应资源如同其他供应侧资源一样在市场上竞标用于满足资源充足要求。系统运营商根据市场形成的价格来补偿需求响应提供者。其他一些地区例如 California ISO 虽然没有建立完善的容量市场，也制定了相应的机制，通过支付月度定额容量费用来鼓励用户改变用电需求提供类似的容量资源。

电能市场

在电能市场中，需求响应可以替代供应侧资源从而抑制供需紧张导致电能市场价格过高，避免通常是小机组的昂贵运行（燃料和维修）成本以及环境污染。一些电能市场（如 PJM, ISO-NE）允许需求响应参与电能市场，并在价格达到预先设定的上限时按当地边际价格（LMP）来补偿。由于电能市场无法像容量市场为需求响应提供可预期且固定的收入，对需求响应集成商和参与用户的风险较大，因此电能市场上需求响应参与度并不是很高。目前，大部分需求响应主要通过容量市场采购。²

需求响应对电力系统的经济价值 - 美国

无论是电力公司实施的需求响应项目还是在电力市场中获取的需求响应资源，需求响应对电力系统的经济价值较为相似，目前主要体现为容量价值。下面通过一个简化的例子来介绍需求响应容量价值相关的概念和计算方法。

需求响应容量价值的例子

假如某个电力公司营业区内现有包括自有和从市场购买的总发电容量为 1300 MW 的三台机组，其特征如下：

	机组种类	名牌容量 (MW)	边际容量成本 (\$/kW-年)	边际电能成本 (\$/MWh)
机组 A	联合循环汽轮机	600	23	38

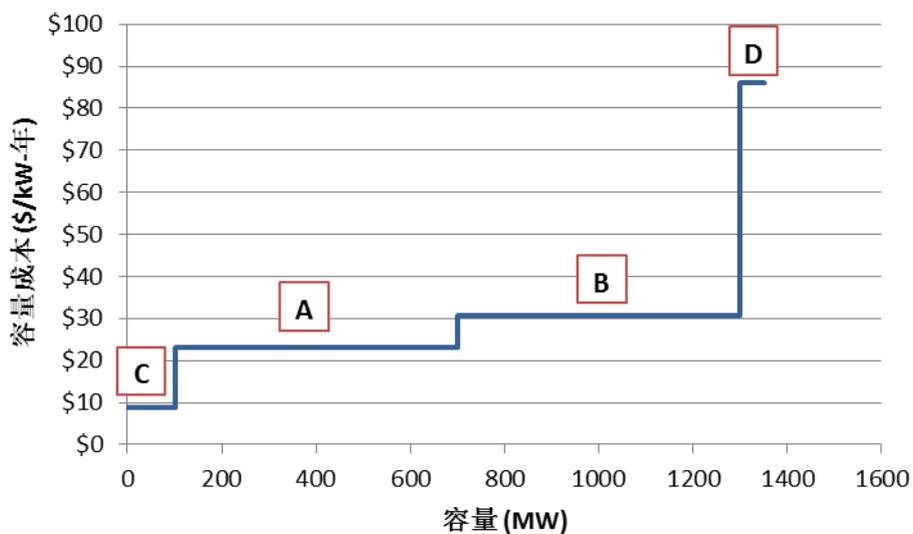
² 睿博能源智库 (2013). “Demand Response as a Power System Resource: Program Designs, Performance, and Lessons Learned in the United States,” 报告下载地址：
<http://www.raponline.org/document/download/id/6597>

机组 B	联合循环汽轮机	600	31	44
机组 C	汽轮机	100	9	66

表格备注：对于现有机组，边际容量成本只包含固定运行维修成本，资本成本已是沉没成本；边际电能成本包括燃料成本和可变运行维修成本。

该电力公司预测需要新增 50MW 的容量资源以满足夏季高峰增长的需求，有两种选择：（1）购买新的容量（2）给客户经济激励（如电费折扣）以降低高峰时段的负荷。如果要购买新的容量，最便宜的选择是一台单循环燃气轮机（图片的机组 D）。垂直一体化的电力公司的总容量成本变成 \$37.6 百万（= [600 MW * 23 \$/kW-年 + 600 MW * 31 \$/kW-年 + 100 MW * 9 \$/kW-年 + 50 MW * 86 \$/kW-年] * 1000 kW/MW）。³

		名牌容量 (MW)	边际容量成本 (\$/kW-年)	边际电能成本 (\$/MWh)
机组 D	汽轮机	50	86	53



在这种情况下，只要给客户的激励低于\$86/kW-yr，电力公司的边际容量成本便会降低，比如每年每一兆瓦给客户\$85,000（\$85/kW-yr），电力公司的总容量成本变成\$37.5百万（= [600 MW * 23 \$/kW-年 + 600 MW * 31 \$/kW-年 + 100 MW * 9 \$/kW-年 + 50 MW * 85 \$/kW-年] * 1000）。电力公司可以实施需求响应项目，以低于\$86/kW-yr的水平补偿愿意参与的客户，或者在容量市场上直接与能够提供 50MW 负荷减少的客户签订合同。所以，不管是电力公司项目还是容量市场方式，需求响应的容量价值都会接近边际容量成本。

³在竞标容量市场，电力公司的购买成本是\$116百万（= 1350 * 86 * 1000）。

需求响应对电力系统的经济价值 - 中国

中国和美国电力公司的主要区别体现在：首先虽然中国电力公司有对辖区用户提供供电服务的义务但是对资源充足性的要求相对较低，用有序用电方式来解决供需问题导致限电停电的情况仍有发生。其次电力公司没有以最低成本采购资源的要求，因此没有真正意义上像单循环燃气轮机的边际资源。

在美国，需求响应需要解决的问题是减少新增不必要的发电容量，提高设置发电容量水平的经济性。在中国，需要解决的问题则是发电资源不足，减少限电水平和提高资源分配的经济性。虽然两国的情况和出发点不一样，需求响应对电力系统的价值基本上相似，在美国一般可以概括为可避免的边际资源，在中国则是可提高的发电负荷率。

需求响应容量价值的例子

假如一个地区今年有 1000 MW 的发电资源，包括线损的电力需求为 6000 GWh(发电负荷率为 68%)，实施有序用电减少负荷达到 300 MW。1000 MW 的发电资源包括两台机组，其特征如下：

机组种类	名牌容量 (MW)	边际容量成本 (元/kW-年)	边际电能成本 (元/MWh)	标杆电价 (元/MWh)
燃煤机组	600	650	400	500
燃煤机组	400	650	400	500

按这两台机组的标杆电价总发电成本为 300 千万元 (= 6000 GWh * 500 元/MWh * 1000 MWh/GWh)，实际总发电成本为 305 千万元 (= 1000 MW * 650 元/kW-年 * 1000 kW/MW + 6000 GWh * 400 元/MWh * 1000 MWh/GWh)。

按照明年预测电力需求（峰值）上涨 7.7% 达到 1400 MW，电量需求上涨 5% 达到 6300 GWh，发电容量缺口为 400 MW，需要新加的电量为 300 GWh。为解决发电容量缺口问题，可以建 300 MW 燃煤机组，其特征和现有机组一样，如下：

机组种类	名牌容量 (MW)	边际容量成本 (元/kW-年)	边际电能成本 (元/MWh)	标杆电价 (元/MWh)
燃煤机组	300	650	400	500

如果新建两台 300 MW 机组，发电成本表面上为 315 千万元 (= 6300 GWh * 500 元/MWh * 1000 MWh/GWh)，但机组负荷率下降到 45%，实际需要回收的发电总成本为 356 千万元 (= 1600 MW * 650 元/kW-年 * 1000 kW/MW + 6300 GWh * 400 元/MWh * 1000 MWh/GWh)、单位发电成本为 565 元/MWh (=

356 千万元 / 6300 GWh / 1000 MWh/GWh)。

如果实施需求响应规模能达到 100 MW，则弥补发电容量缺口只需要再建一个 300 MW 的发电厂。在发电厂要回收固定成本和总用电量不变的假设下，总发电成本变成 336.5 千万元 ($= 1300 \text{ MW} * 650 \text{ 元/kW-年} * 1000 \text{ kW/MW} + 6300 \text{ GWh} * 400 \text{ 元/MWh} * 1000 \text{ MWh/GWh}$)，机组负荷率上升为 55%。每千瓦需求响应可以最多补偿 1950 元/kW-yr ($[356.0 - 336.5 \text{ 千万元}] / 100 \text{ MW} / 1000 \text{ kW/MW}$)，还可以降低发电成本。需求响应的价值如此高是因为新建第二台的 300 MW 机组会大幅度降低所有机组的平均负荷率。

如果放松发电厂要回收固定成本的前提，保持实施需求响应之后总用电量不变的假设，需求响应的价值就是边际发电容量成本。在这种假设下，要建两台 300 MW 机组总成本变成 343 千万元 ($= 1400 \text{ MW} * 650 \text{ 元/kW-年} * 1000 \text{ kW/MW} + 6300 \text{ GWh} * 400 \text{ 元/MWh} * 1000 \text{ MWh/GWh}$)。需求响应降低发电容量需求 100 MW 总发电成本变成 337 千万元 (见上)，与建两台 300 MW 机组的差别为 650 元/kW-年 ($= [343.0 - 336.5 \text{ 千万元}] / 100 \text{ MW} / 1000 \text{ kW/MW}$)。

对中国的借鉴意义

各个国家的电力系统都需要更多的灵活性以应对新的挑战，需求响应作为系统资源在美国及其他地区已经得到了重视和很好的应用。中国仍然需要有新的机制来更好地反映用户的支付意愿和需求响应对电力系统的价值。短期内，中国应该充分考虑电力系统的经济性原则，从而更好地进行资源分配，在用电能效、需求响应以及其他供应侧资源中作出选择。在需求响应的补偿机制方面，中国也许会和美国采取不同的途径，但美国的一些经济方法对中国将有借鉴意义。