

都在说鼓励需求响应，怎么做最佳？

文 | 张柳潼 (Liutong Zhang), 水石能源 (WaterRock Energy Economics)

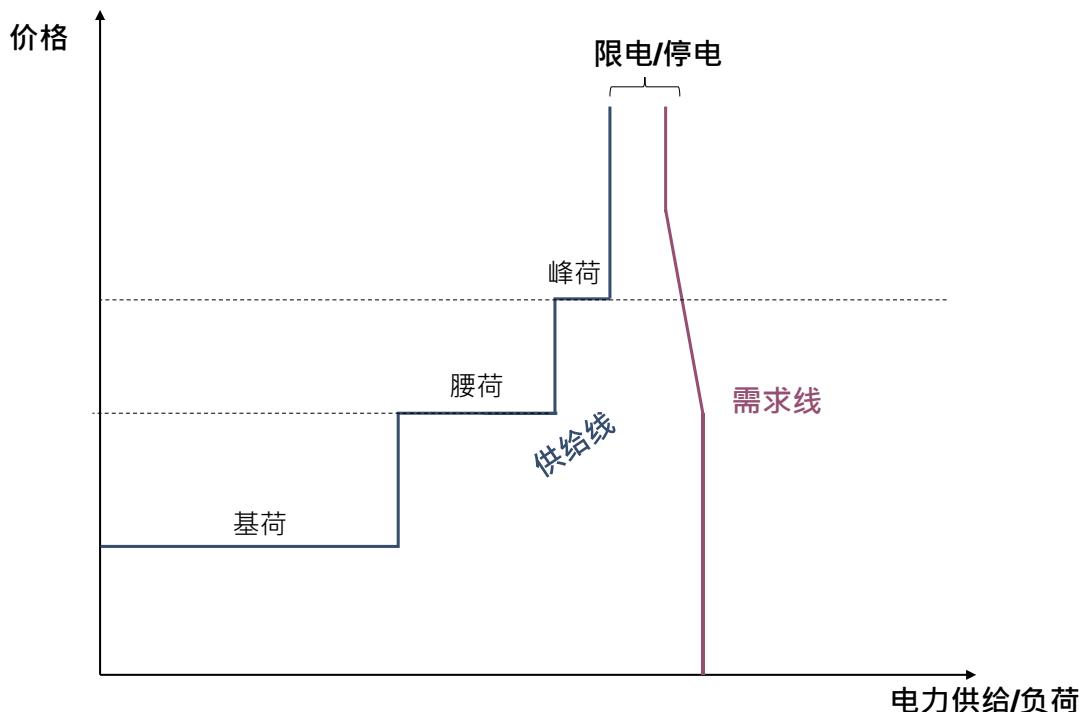
编译 | eo 记者 姜黎

发表于南方电网网站, https://www.csg.cn/xwzx/nygc/202002/t20200224_308571.html

在一个完全竞争市场里，如果用户能够对价格有足够地响应能力，那么批发市场总是能够顺利出清。这时，市场价格信号非常可靠：供应短缺，价格上升，直至有足够的用户自愿削减负荷来平衡市场的短缺。这种情况下，用户从不会遭遇强制错峰限电。

但真实情况是，由于没有实时表计、计费和其他必要设备，电力用户无法实时地对电力价格进行响应，电力市场只能接受“需求侧缺陷”。更重要的是，储能设备成本仍然高企，当容量稀缺时，负荷侧的弹性小，供应短缺时用户被迫轮流停电（如图 1 所示）。

图 1： 供给和需求不能平衡时引起的限电/停电

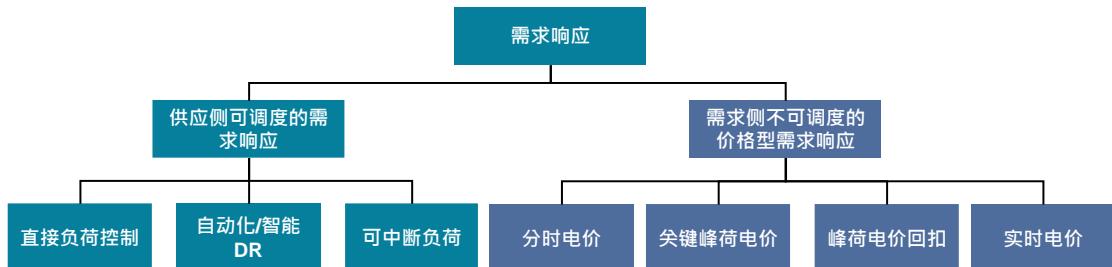


Source: WaterRock Energy Research and Analysis

先进的技术应用，如智能电表、家庭能源管理系统、可穿戴智能设备等，为需求侧主动参与电力市场，减轻市场失灵提供了条件。

需求响应（Demand Response, DR）一词的定义是，用户参与电力市场，对特定的市场变化进行主动响应，改变其用电需求。一般来说，主要分为两类：一类是参与电力市场的供给侧，这种需求响应在竞争市场里是可被系统运营商调度的，并且能够获得补偿，不响应则受到惩罚。另一类是参与需求侧。用户对价格信号自愿做出反应。这种以价格为基础的响应能鼓励用户在高电价时段主动削峰，但这些价格敏感的负荷在实时市场中不能直接被系统调用。本文将重点介绍供给侧可调度的需求响应项目。

图二：需求响应分类



Source: Modified from A. S. Hopkins, M. Whited, *Best Practices in Utility Demand Response Programs, With Application to Hydro-Québec's 2017 - 2026 Supply Plan*, March 31, 2017, page 5.

DR 应用于供给侧有自身的特点。与燃气机组可以全天候待命运行不同，DR 资源受制于数量和负荷削减的可持续性，并不是随时随地可调遣的；同时，一些 DR 资源可能需要有一定预设时间的通知才能在系统需要时做出响应。所有这些都让 DR 资源变得不那么“靠谱”。但 DR 的这些特点让它更适合做为“尖峰”存在，发挥容量备用的功能。

需求响应如何融入电力市场？

中国多个省区都在推进竞价市场建设，这个时候有必要研究需求响应如何与市场协调发展。本文对新加坡和美国德州这两个单一电能量市场，以及 PJM 这个能量+容量市场中需求响应的情况进行了分析，以期为中国电力市场建设提供一些借鉴。

表 1 总结了这三个市场中 DR 参与能量市场、容量市场以及辅助服务市场的情况。

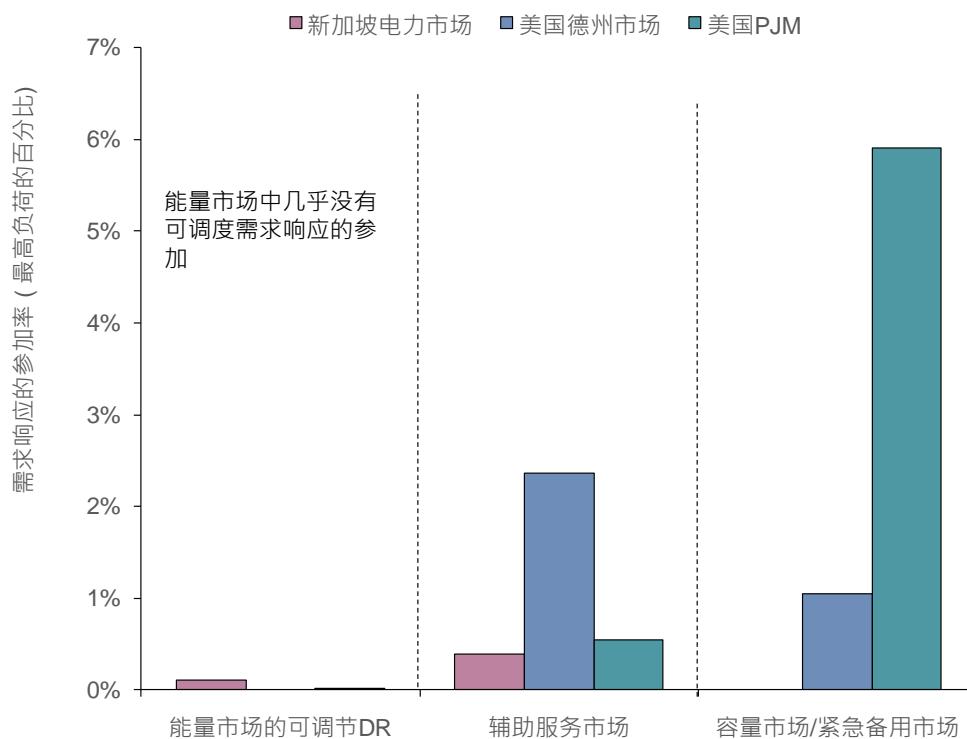
表 1：新加坡，美国德州和 PJM 电力市场中的需求侧响应

	新加坡	美国德州	美国 PJM
能量市场	能量市场的需求响应管理	能量市场的可控制负荷或集成负荷资源	能量市场的经济需求响应
容量或紧急备用服务	没有	紧急备用服务	容量市场中的紧急需求响应项目
辅助市场服务	可中断负荷服务	旋转备用，非旋转备用和调节调频服务	同步（旋转）备用项目和调节调频

Source: Data Collation from Various Market Summary Reports from Governments/Regulators by WaterRock Energy

- 能量服务。在系统正常运行时，可调度 DR 的参加率是微不足道的，因为能量市场的价格通常不足以激励 DR 资源主动发电或削峰。
- 容量或紧急备用服务产品。在拥有容量市场的地方，比如 PJM，DR 可以参与到容量市场中，提供“合格”的容量而获得补偿费用。容量补偿机制在 PJM 市场中对 DR 产业发展起到了很好的激励作用。即使是在单一电量市场中，紧急响应机制也可以用于促进 DR 资源进入市场；比如美国德州电力市场。
- 辅助服务市场。这三个市场中，DR 被看作一类特殊的电厂，都可以作为备用资源提供辅助服务。

图三：在三个市场中 DR 的参加率



Source: WaterRock Energy Research and analysis

新加坡电力批发市场中的需求响应

新加坡电力现货批发市场于 2003 年正式启动运行。它是一个单一电能量市场，电源主力是天然气发电厂，因常年气候温暖，且工业负荷占比大，负荷曲线较为平稳。2012 年到 2016 年间，大量的燃气电厂投产，导致近年来出现了供给过剩的情况，拉低了现货价格。过去 5 年中，几乎没有出现价格上涨现象。因而，市场对需求响应的吸引力较弱。

图四：新加坡需求响应的历史



如图 4 所示，在新加坡市场中主要有两种 DR 资源：一种是在辅助服务市场中的可中断负荷，而这种资源在 2018 年到 2019 年间，使用量仅 27MW；另一种是电量市场的需求响应，由于市场价格较低，对不合规的 DR 惩罚较高，从 2014 年引入开始直至目前几乎没有应用。

2004 年，新加坡引入了可中断负荷，允许用户为系统提供旋转备用服务，并给用户以相应的备用补偿费用，可参与的单个最小负荷单元为 0.1MW。近日，新加坡能源管理局（EMA）修订规则，负荷集成达到 0.1MW 也可参与该项目。系统运营商要求这些负荷必须安装“监测-记录-激活（activation）”设备，以便让调度员随时知晓、监测和控制相关负荷设备。这些设备必须参与初试和持续的反应能力测试，过往响应失败的记录也受到密切跟踪，确保它们能够完全符合调度指令要求。对于参与响应而实际又无法执行指令的资源，罚金为损失负荷值与预备容量乘积的 50%。如果发生概率过高，需要遏制，EMA 可将该比例提高至 100%。截至目前，仅 7 个用户在市场注册提供可中断负荷服务，总容量为 27.5MW（相当于尖峰负荷的 0.4%）。

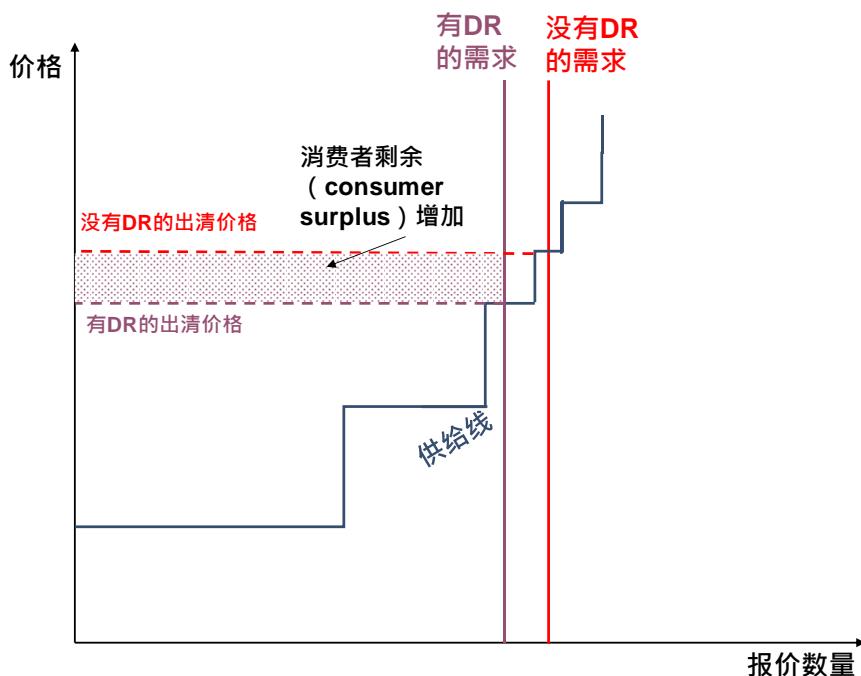
2014 年，新加坡市场引入了可参与现货批发电力市场中的可调度 DR。符合要求的负荷资源需要在批发现货市场中竞价，其竞价曲线是价格越高需求量越低。当 DR 资源报价低于传统电厂时，他们就将被调用，所以他们也可能决定批发市场的边际价格。这类资源对于电力稀缺时段来说是非常宝贵的，系统运营商可以对参加竞价的负荷有效地进行自主性削减。

这种机制运作的核心是如何订立“基准线”，即负荷削减量是相对什么基准来衡量。通常来说，“基准线”是基于历史负荷曲线来设定的，但是新加坡能源局(EMA)考虑到基于历史负荷的“基准线”可能导致市场主体过度博弈。例如，一个体育场为了增加它参与需求响应时可以获得的报酬，可能会持续一段时间白天黑夜都不熄灯，以此提高过往电力消费量的基准线。为了减少这种博弈，新加坡把“基准线”定为一个固定的财务承诺，如果用户没有达到申报的基准消费电量的 95%，即便是 DR 没有被调度，也要缴纳相应罚金。

EMA 针对 DR 资源的特性还设置了一系列规则：

- DR 自 2014 年被引入电力市场起，DR 参与的“地板价”是 F 级燃气电厂长期边际价格的 1.5 倍，只有当报价高于此价格时，才可被纳入市场出清范围。设置“地板价”是为了防止 DR 参与者的投机行为。EMA 近期在考虑是否下调“地板价”以反映供给过剩的情况。
- 削峰电量也有上限，为 200MW。
- 为了激励 DR 参与市场，补偿费用并非基于边际定价，而是基于消费者剩余增加（consumer surplus）的三分之一来计算。市场出清机制运行两次，一次是有 DR 参与的，另一次是没有 DR 参与的，具体情况如图 5 所示。DR 的提供能降低了批发电力市场出清价格，从而增加消费者剩余；DR 提供者的补偿费用是消费者剩余增加的三分之一，最高可达 4500 新加坡币/兆瓦时（折合人民币 23 元/千瓦时）。
- 惩罚机制相对严格。如果接到调度指令而未执行，需要支付消费者剩余增加的三分之一，上限为 4500 新加坡币/兆瓦时（折合人民币 23 元/千瓦时）。即使他们没有收到相关指令，如果用电量低于预测的 95% 也将受到惩罚。

图五：新加坡需求响应价格激励机制的示意图



Source: WaterRock Energy Economics

自 2014 年引入 DR 以来，新加坡市场几乎没有用户参与。钻石能源（Diamond Energy）在 2017 年代理它的竞争性用户（约 7.2MW）参与了市场。还有一家私人电力零售商，红点电力（Red Dot Power）联合新加坡南洋理工学院、淡马锡理工学院和技术教育学院发布了线上响应试点激励计划。参与的机构如能自愿削减尖峰用电需求，可获得一定补偿。但用户最近都不愿续签合同，因为补偿和惩罚不匹配。

在当前机制下，DR 收入金额具有不确定性。由于 DR 参与程度低，DR 对出清价格影响可能微乎其微，导致没有产生多少消费者剩余。因此，DR 提供者不能确定被调度后他们能够获得多少回报。最坏的情况下，收入可能接近零。在供给过剩、价格偏低的大环境下，这个问题变得更加严重。同时，严格的设备要求和高额惩罚也在“劝退”DR 资源。再者，新加坡比较独特的基准线的确立使得只有负荷预测最精准的用户才可为市场提供 DR 服务，因为即使不会被调度，但实际需求“不达标”也要承受惩罚。

启示

中国部分省区正在推进电力现货市场建设。然而，当前市场中，“价格帽”相对较低。几乎所有竞争市场的“价格帽”都在 1 元/千瓦时以下，明显低于其他各国电力市场。

一些市场在夏季存在电力电量短时供不应求的情况，低价格帽使尖峰电价失去了意义，同时也大大降低了用户在电力稀缺时段主动削减负荷的动力，进而减小了对需求响应技术的投资。可以预见，需求响应很难融入到目前中国的电量市场当中。

根据新加坡的案例，如果对不执行指令的惩罚值设定过高，需求响应的参与度也将受到负面影响。另外，新加坡设置的独特的“基准线”和以消费者剩余增加决定的价格机制也不利于需求响应参与电力市场。因此，不建议中国采取类似模式。

美国德州（ERCOT）市场中的需求响应

美国德州电力可靠性委员会（ERCOT）运行着日前和实时电能量市场，“价格帽”达到 9000 美元/兆瓦时（约合人民币 62 元/千瓦时）。和美国其他许多 ISO 运营的市场不同，德州市场没有资源充裕度要求，因此没有容量市场。如图 6 所示，德州市场有以下几种需求响应项目。

图六：ERCOT 需求响应的历史



- 辅助服务。可控负荷资源可以提供备用、非旋转备用和调节调度服务。2018 年有 1730MW（约为峰荷的 2.4%）参与。
- 紧急响应。虽然 ERCOT 没有容量市场，但它会通过竞争性投标购买紧急容量资源。2018 年参与这种响应的负荷为 773MW（约峰荷的 1.1%）。
- 电能量市场。负荷资源在电能量市场中报价，但参与程度很低。

2002年以来，ERCOT 允许负荷项目（Load acting as Resource, LaaR）参与辅助服务市场。负荷能够为德州批发市场提供旋转备用服务，以保障在大机组出现事故后系统能尽快恢复频率。这功能与使用低频继电器的大型负荷特性相匹配，所以有很多负荷规格。提供服务的负荷项目（LaaR）的上限最开始定为总旋转备用服务需求的 25%，2006 年提升到了 50%。

2011 年，ERCOT 确定执行“可控负荷资源”（CLR）项目。相比 LaaR，CLR 项目有着更严格的要求，允许负荷提供旋转备用和调节调频辅助服务。ERCOT 没有对 CLR 在供给旋转备用服务中设定上限。CLR 必须具备类似电厂的能力，对系统的频率变化自动做出响应，并对调度提出的 2 秒钟信号做出回应。

虽然 ERCOT 没有对参与辅助服务的负荷提供隐形补贴，同时要求负荷具备与电厂相似的响应能力，但辅助服务市场中 DR 的渗透率依然较高，特别是旋转备用辅助服务。DR 参与辅助服务市场的积极性来源于其本身适合市场的诸多特性，而且市场给予了可靠的备用性费用。此外，由于备用并不是经常需要，用户无需为了提供辅助服务而大幅改变自己的用电习惯。

2006 年春，德州市场发生了自启动以来的首次“甩负荷”事件。事后分析结论是，如果当时有部分负荷能够主动削减，就可以避免系统“甩负荷”。2008 年 ERCOT 启动了一项名为“紧急可中断负荷服务”（EILS）的新项目，允许 DR 参与市场，直接对批发市场价格进行响应，后更名为“紧急响应服务”（ERS）。为吸引更多的 DR 资源参与市场，ERCOT 不断在微调规则。一开始时，负荷必须在接到 ERCOT 指令 10 分钟以内做出响应，几年后，市场又增加了一种 30 分钟内响应的品种。2013 年，ERCOT 推出了一种天气敏感的 ERS 项目，以评估空调等受天气影响显著的负荷参与紧急响应的潜力。

ERCOT 每年为 ERS 项目进行三次竞争性招标，并设立年度开支上限。这类似于战略储备，这些储备不会对批发电力市场正常运行情况下的能源价格做出反应，只有在能源稀缺时才会被激活。此外，ERCOT 还执行了一个可靠性价格加法方式（reliability price adder），以避免 ERS 或负荷资源被调度时发生价格反转。总体来说，DR 参与 ERS 的积极性相对较高。

2014 年，ERCOT 开始允许 CLR 通过提交需求侧报价参与到实时电能量市场。他们需要遵守 5 分钟实时调度指令。但参与度非常低。2018 年，可能因为要求过高，没有一个负荷资源符合实时市场的经济调度要求。

启示

ERCOT 在响应旋转备用服务和 紧急响应服务(ERS) 中有大量 DR 资源。旋转备用及紧急响应服务与 DR 资源的特性相匹配，且用户知道仅在紧急情况时才会被调用，不会对生产造成过多“打扰”。中国也有很多大工业负荷，可以参照德州的方式来设计需求响应参与市场的模式。

美国 PJM 市场的需求响应

PJM 电力批发市场在 1997 年开始运行。2000 年，因紧急情况削峰，引入了 DR 试点项目。在市场不断发展的 20 年中，如图 7 所示，ISO 为负荷侧提供了许多参与市场的机会。

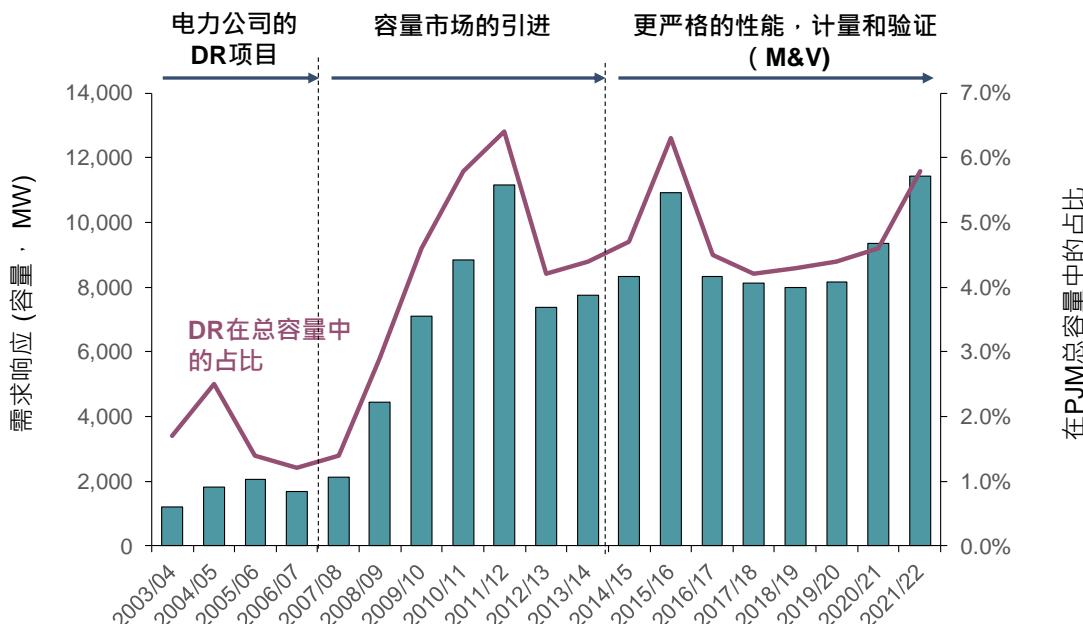
图七：美国 PJM 需求响应的历史



当 2007 年 PJM 启动容量市场（又名可靠性定价模型）时，需求响应就被允许进入。容量市场引入了交割年前三 “基础容量拍卖” (BRA)（比如，2015 年的 BRA 购买 2018/19 年的容量）。如图 8 所示，美国各地电力市场中，PJM 的 DR 是最著名、最成功，也是发展最快的。

容量市场对 DR 的补偿和给电厂的类似。在远期容量市场中，大量的 DR 报价出清。2015/2016 的交割年，有超过 10000MW 负荷在远期容量市场中出清，占整个容量需求的 6.3%。

图八：PJM 容量市场中承诺的需求响应容量，MW



Source: pg 14 of 2019 Demand Response Operations Market Activity Report, January 2020

DR 参与容量市场同样要遵循一些规则，包括以下几点：

- 可中断次数。在 PJM 容量市场运行的头几年中，DR 产品允许有限次中断。
- 告知时间可有不同但要设置上限，PJM 设置有 30 分钟告知时间的，也有 60 分钟和 120 分钟的。
- 可用时段可以限制在工作时间，以最大限度提高参与度。
- 中断时长根据供应短缺事件的情况设置最大值。

刚开始的几年里，PJM 允许 DR 只在夏天的几个小时参与容量市场，而且 DR 可以只收到固定数量的调度指令。当 DR 比例较小的时候，这并没有对系统可靠性造成威胁。但随着 DR 在容量市场中出清比例不断增长，PJM 发现合格的 DR 资源比电厂的可用性限制要多，造成了一定的可靠性风险。当其超过整个容量市场的 5% 时，就会替代电厂，减少仅可由电厂承担的备用比例。因此，DR 越来越有可能以超出其可用性要求的频率和季节性被调用。这导致在夏季和其他季节出现供应短缺的风险升高。

为了减低可靠性风险，2014/15 交割年时，PJM 设计了三种单独的 DR 服务，分别是限期夏日 DR（即原本的有限可用性要求）、展期夏季 DR 和年度 DR。随后，PJM 强制执行了年度 DR 产品的最低采购要求，以及展期夏季+年度 DR 的最低采购量。设定最低限额的目的是提高通过拍卖获得的 DR 资源的总体质量。高质量的产品可以继续获得与发电容量相同的付款；符合最低要求，但质量较差的产品必须以较低的价格出清。此外，PJM 还加强了建立 DR 资源容量评级的计量和验证 (Measurement & Verification) 方法。根据图 8 所示的出清后的容量市场 DR 资源，即使有了更严格的准入条件，数量仍然相对较高。

PJM 允许 DR 参与日前和实时电能量市场以及辅助服务市场，但参与水平远低于容量市场，主要是因为补偿费用往往低于容量市场。因此，DR 资源通常优先考虑参与容量市场的竞争。

在容量市场出清后的需求响应资源有义务参与电能量或辅助服务市场。它们通常以“天花板”价参与电能量市场，因为它们通常不希望在其它所有资源都耗尽之前被调用。基本上 DR 资源就是在系统稀缺期间被用作备用的“容量”。

启示

PJM 的经验表明，需求响应可以在供给侧非常深度地参与容量市场。同时也可作为可调用的资源参与电能量市场，在紧急情况下具有定价能力。

预计中国将在多数省份引入竞争性容量市场。DR 应被允许参与容量市场，其参与资格应仔细确定，需要在资格审查与高昂成本以及繁琐的规则间找到平衡点。

中国如何引入需求响应？

在电量市场中，需求响应的价值是在供给稀缺时段“削峰”。尽管市场设置了详细的需求响应机制，但可调度的需求响应资源参与率普遍较低。一定程度上是因为价格飙升和稀缺时段在能量市场中很少见。这使得主动投资研发应用需求响应技术，创业成为负荷集合商变得不经济。

此外，目前我国不同省份的电力市场设计价格上限较低，降低了在电力紧缺时段主动削减负荷的经济性。这意味着 DR 通过市场化方式融入中国电力能量市场的可能性非常低。

基于对国际电力市场的分析，DR 资源可以在辅助服务和容量市场中发挥作用，并提供有价值的容量来确保电力系统的可靠性。辅助服务和容量市场的补偿机制也很好地契合了 DR 的特征——它们提供可靠的可用性补偿，但只在需要时调用 DR，从而避免使负荷资源频繁地改变其电力消费模式。

为了鼓励需求响应进入市场，中国应认真研究如何将需求响应最好地整合到辅助服务市场和未来可能有的容量市场中。实际上，在正式引入容量市场之前，中国也可以考虑引入应急响应服务，类似于美国 ERCOT 市场的做法。一旦容量市场正式引入，PJM 容量市场为中国提供了丰富的经验。

在开始阶段，DR 资源的资格认定并不一定要非常严格和繁重，以免打击负荷资源参与的积极性。相反，当 DR 在市场中的渗透率较低时，监管机构应在准入资格方面提供最大的灵活性，以吸引不同类型的 DR 资源。一旦达到某个阈值（比如 5%），监管机构可以参考 PJM 的做法，考虑收紧市场规则，将不同类型的 DR 资源与它们所能提供的不同类型的价值服务区分开来。