

# 负荷响应机制在美国智能电网中的新模式

周启航<sup>1</sup> 陈晨<sup>2</sup> 苟竞<sup>2</sup>

(1. 四川电力科学研究所, 四川, 成都 610072; 2. 四川大学电气信息学院, 四川, 成都 610065)

**摘要:** 基于美国智能电网当前研究领域的发展状况, 着重对现有负荷响应机制进行了深入分析与讨论。从用户政策设计、用户反馈、自动负荷响应等方面对美国智能电网负荷响应技术的发展趋势进行了叙述。提出一种在智能电网环境中的负荷响应新模式。此模式可以被电网运营方用于匹配可再生发电资源, 从而为可再生发电资源的安全并网运行这一难题提出一种有效解决方案。

**关键词:** 美国智能电网; 负荷响应; 可再生发电资源

**Abstract:** Based on the recent development of smart grid in the U. S. , it focuses on the in - depth analysis and discussion of the existing demand response mechanism. From the user policy , user feedback , automatic demand response and other aspects , the technology trends of smart grid are described. Finally , a new model of demand response mechanism in smart grid is proposed. It can be used to match the renewable generation resources on operator side , and propose an effective and secure solution for parallel operation of renewable generation resources.

**Key words:** American smart grid; demand response; renewable generation resources

中图分类号: TM769 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2013)04 - 0028 - 04

## 0 引言

负荷响应(demand response, DR)是指电力用户基于电价信号或激励机制作出响应并改变传统电力消费模式的参与行为。当电力供应不足时,电力公司可以通过激励机制使用户减少用电负荷,用户可以自行决定是否参与这类机制,让那些愿意支付高电价的用户,按他们的“正常”水平继续用电,而那些愿意降低用电量或愿意将用电时间转移到低电价时段使用的用户将从此类机制获益。

在美国,DR的基本理念已经得到广泛接受和认同,目前美国是世界上实施DR项目最多、种类最齐全的国家。美国的激励型DR包括直接负荷控制、可中断负荷、负荷侧投标和回购、容量及辅助服务市场等手段。2009年美国国家能源部向美国国会提交的智能电网研究报告<sup>[1]</sup>显示,如果美国电网技术能使所有具有响应能力的负荷均参与DR,可削减的高峰负荷量相当于全美10年内的高峰负荷增长。美国电力市场通过鼓励DR,吸引更多的电力市场参与者,分散市场风险,有效地促进美国电网系统及其市场的良性发展。

## 1 美国电网的负荷响应现况

DR、分布式电源(distributed generation, DG)和分布式能源储备(distributed energy storage, DES)是目前新兴的智能电网概念中的重要组成部分。为了简便起见,现把这些资源统一称为分布式能源资源(distributed energy resources, DER)。尽管智能电网框架下更多关注的是DER这一整体概念,但DR资源作为稳定输电网运作的重要组成部分,更是整个电力批发市场的重要元素,因此在智能电网领域中具有重要意义。事实上,从输电网和电力批发运作模式来看,术语“虚拟发电厂”就是专指这些DR资源<sup>[2]</sup>。

在电能及其配套服务市场中,在独立系统运营商(independent system operator, ISO)/区域输电机构(regional transmission organization, RTO)进行中心控制与协调的环境下,DER/DR依据ISO/RTO市场设计和使用的运营标准提供电能供应、辅助服务、电力储备等产品<sup>[4]</sup>。下面简要介绍美国电力界推动智能电网发展的主要动因和智能电网框架下各种不同形式的DER。

不同的 ISO/RTO 应用及控制 DR 资源的规则不同,具有不同的 DR 服务产品市场。另外,基于不同 ISO/RTO 的市场机制,DR/DER 服务可以由一家或者多家市场参与者提供,包括负荷服务商(load serving entities, LSE)、供电公司(utility distribution companies, UDC)、电力服务提供商(electricity service providers, ESP)、终端用户、负荷整合器和负荷削减服务提供商(curtailement service providers, CSP)。部分参与者拥有负荷、发电资源或发电备用资源。DR 资源的拥有者、操作者和整合者之间如何协调合作是 DR 服务产品市场的一个重要研究领域。

当前美国电力市场拥有多个 ISO/RTO,包括纽约 ISO(NYISO)、宾州—新泽西—马里兰地区的 ISO(PJM)、新英格兰地区 ISO(ISO-NE)、中西部 ISO(MISO)、加州 ISO(CAISO)、德州电力系统委员会(ERCOT)和西南电网(SPP)。在美国电力工业市场化的过程中,ISO/RTO 形成了各自的电力市场。这些电力市场通常包括更加细化的电力服务市场:电能市场(日前及实时)、电能备用市场及发电容量市场等。

## 2 美国智能电网负荷响应技术发展趋势

智能电网建设的涉及面非常广泛,其利益相关者主要包括国家、电网公司、用户、设备制造商、电建公司等。美国智能电网的利益相关者主要包括:电力终端用户(工业用户、商业用户和居民用户)、电力服务零售商、输配电服务提供商、政府相关的协调机构、大型的电力交易商/经纪人/市场、可靠性协调委员会、产品服务提供商、能源政策制定者、政府监管部门、智能电网倡导者、标准化组织和相关金融机构。图 1 所示为美国智能电网利益相关者示意图。

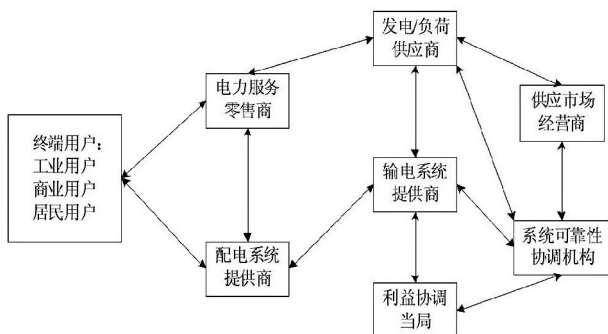


图 1 美国智能电网的利益相关者  
根据现有的技术和市场设计状况,电网系统运

营方在近期(2~5年)内将有更多的工作需要完成,尤其是 DR 在居民用户区域内如何应用的问题。不仅系统运营方需要一个支持 DR 的具有足够灵活性的电力系统平台,发电侧各方也对系统的灵活性有着高度的要求,其中代表性的是风能和太阳能的发电方。支持 DR 技术的发展和实践验证可以提高风能与太阳能安全并网的可行性与灵活性,从而实现更多的可再生能源配置。其他的 DR 利益相关者,包括技术开发人员和各类用户,必须协调合作,保证技术发展满足所有 DR 参与者的利益和需求。

### 2.1 发展基于用户的实现技术

电能消费者的主要类别包括工业用户、商业用户和居民用户。对于工业和商业用户,他们对能源管理的了解程度比较高,针对这些用户的 DR 技术也是相对成熟的。但对于居民层面的情况就不一样了,居民层面的负荷分析还没有成熟的商业模式,还需要更多的分析和通信设施以使得居民用户与智能电网进行互联。

在传统电网中,居民用户一般来说不能自由选择电力服务类型或者基于电价来调整他们的用电方式,从而无法管理他们的电能消耗。智能电网具有非常良好的前景,那是因为它提供给居民用户以自由选择电力服务类型和基于电价来调整用电方式的能力,从而使广大居民用户智能用电,同时也为用户节省了更多的金钱。北美电力公司中常用的两种用户政策是:用户反馈与差异化服务定价<sup>[10]</sup>。

### 2.2 用户反馈政策

用户反馈政策的原则在于让用电客户更直观地看到其节能效果及经济效益,从而让用户更好地理解 and 改变他们的用电行为。用户反馈可以通过很多方式来提供,从每个月的账单到即时的消费与电价读数,其中一些方式的成本较高。

当前北美电力公司的用户反馈政策还存在一些问题。由于目前用户反馈项目的参与用户知道电网及电力公司提供的技术和激励机制是针对短期用电行为的,所以调查结果仅反映出用户是如何应对短期的用电行为激励的。而只有在用户认识到激励机制将会是长期的,并且能使长期的理性用电策略得到最优回报时,整个电网(包括用户端的基础设施建设)才可能发生积极的变化。这也是各地不同时期的用户反馈调查项目结果不一致的原因之一。当前的调查项目的设计不能充分控制渐进性的基础设

施改变对调查结果造成的影响,导致项目针对 DR 的长期影响的结论不准确,可能被高估或者低估。

### 2.3 差异化服务定价政策

不论是静态定价还是动态定价,电力定价都反映了实际的发电与输电成本。所谓差异化服务定价,就是指不同需求的用户可以自由选择不同级别的服务方式,而电力供应商根据用户的选择提供差异化的服务,并根据这些服务所消耗的不同成本来决定从静态定价到动态定价的差异化定价方式。传统电网没有用户端的响应机制,无法提供用户端的实时的动态定价与反馈。而智能电网的一个主要好处就是可以动态定价,而非单纯的静态定价,但是这一点又引出了很多与电力价格息息相关的重要问题,包括电价是否应该反映实时的真实价格,是否提供用户选择等等。许多智能用户问卷项目显示分时定价可以将高峰用电量降低 15% 左右,而在用户侧应用一些智能电网的新兴技术可以将这一数字翻倍。研究表明知情程度和消费行为存在着关系,当用户可以更快更详细地知晓实时电价信息的时候,用户为了节省开支而倾向于在高峰时段减少用电,从而实现高峰期的负荷削减。一般称这样的用户为“智能用户”。美国加州的电力提供商估计,基于 DR 技术的智能用户所节省的能源将会占智能电网所节省的能源总量三分之一到二分之一。因此,智能用户是智能电网配置的一个重要部分。

从实际操作角度讲,差异化服务定价政策主要包括平价电价政策、实时电价政策与混合政策 3 种。对于平价电政策,用户白天与晚上用电价格是相同的。这导致用户在非高峰时段被多收了钱,而在高峰时段又被少收了钱。该策略并不鼓励用户从高峰时段改变到非高峰时段用电,因此无法减少设施的压力。对于实时电价策略,电价的制定基于实时的供需关系和发电、输电、配电的实际成本。因此,电价没有被多收取或者少收取,但用户可能并未在高峰时段减少电能使用,这将导致高昂的电费。第 3 种定价方式是用户在两个极端之间妥协,通过分时计价的策略来使得用户和电力公司都受益。分时计价减小了用户在高峰时段用电被收取高昂费用的可能,而且还鼓励用户进行用电模式的转移。

### 2.4 自动负荷响应

分析者认为只有创造了一个无缝全自动化电网与用户互联的网络,才有可能实现智能电网的全部

潜力。用户不可能也不必时时关注电价,而是提前设置用电偏好的参数,在电价变动或者需要响应的时候系统会根据用户设置的参数自动进行用户反馈。利用全自动的技术可以在许多领域让房屋所有人、建筑管理人和商业操作员来根据电价自动调整需求。这种自动终端用户负荷调节与响应的潜力已经在多种情况下被证明。比如,在美国加州,当电价超过一定程度时,许多供电商与工厂合作来配置能源管理系统以减小各种负荷(包括照明、电梯、加热、通风和制冷)。

智能电网和智能仪表项目在自动负荷响应和能效方面提供了最优实践的经验。把这些成功方法从工业领域扩展到居民领域,还有许多问题需要进一步的研究,如:用户反馈和自动化计数的最优结合点问题; ICT 选项对自动 DR 的影响; 不同用户类型对自动 DR 设计的最优要求<sup>[11]</sup>等问题。

## 3 智能电网中负荷响应的一个新模式

随着实现智能电网的相关技术(尤其是先进的电表测量和信息通信技术)的成熟,这里基于文献[12]提出一个基于激励机制的 DR 协议设计方案,该方案利用自动调温器控制的负荷(thermostatically-controlled load, TCL)来吸收可再生能源发电中的间断性。典型的 TCL 包括商业制冷和空调负荷。

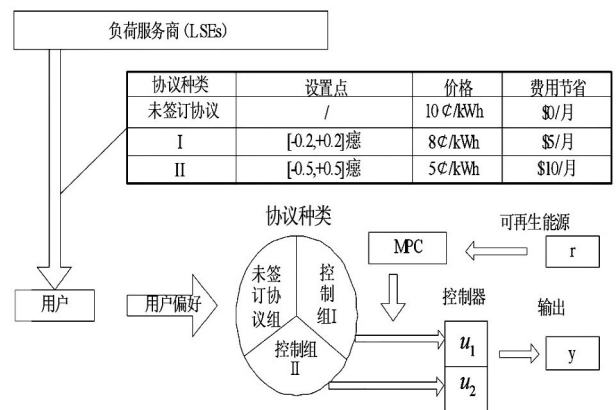


图2 TCL 协议设计

负荷服务商(load serving entity, LSE)设计协议,为终端用户提供激励机制并鼓励用户参与。这个协议提供了不同层次的设置点调整极限和潜在的折扣,据此将用户分在不同的控制组。用户阅读协议的条款和报价,然后决定签订哪一种协议。用户的决定依赖于自身的效用函数,所谓效用函数,是指

权衡舒适度高和省钱多少的函数。LSE 随后观察签订各个合约的人群,跟随可再生能源的输出。图 2 为该模式的主要框架。

该方案使用预测控制(model predictive control, MPC)的方法来进行最优控制,因为 MPC 具有很好的表现和性质。它可以处理线性二次型控制中的不等式约束,而且仅仅需要一步的风能信号预测。该方案应用了一个博弈论模型来解决 LSE 和签订调温器控制协议的终端用户之间的互动行为。LSE 和用户可以不断地寻找针对对方的最佳行为,然后使用迭代来寻找双方都满意的平衡状态。

这一机制可以让 LSE 控制用户的 TCL,因此显著地提升了 LSE 的灵活性。若 LSE 希望有更多的负荷被释放,则仅需要改变协议中的参数来改变控制组的结构。文献[12]中的案例分析证实了 TCL 在合适的参数下可以非常准确地跟踪给定的风能输出。LSE 可以改变协议参数来达到目标,比如最小化最大跟踪误差,或实行协议的总费用等。TCL 协议设计作为一种新的 DR 模式,是一个灵活有效的方法,可以帮助 LSE 减少可再生能源的多变性和间断性。这一新模式可以被电网运营方用于匹配可再生能源,从而使可再生能源安全并网运行。

## 4 结 论

智能化的电网能够支持更大规模的和更丰富灵活的 DR 机制。在电力系统中,DR 所扮演的角色正在由最初的调峰工具转变成为具有更为多元化功能的角色。提出了一种专门匹配可再生发电资源(如风力发电厂)的 DR 机制,可以使负荷良好地实时匹配风电发电量变化,从而为大规模风电安全并网运行的实现提供了技术支持。创新的多元化 DR 机制可以帮助智能电网充分实现其经济和社会效益最大化。

### 参考文献

[1] DOE (U. S. Department of Energy), Smart Grid System Report[R], 2009.  
[2] Ipakchi A., Albuyeh F. Grid of the Future[J]. IEEE

Power and Energy Mag. 2009(9):52-62.

[3] NETL (National Energy Technology Laboratory), Understanding the Benefits of Smart Grids[R]. Pittsburgh, 2010.  
[4] Lightner E. M., Widergren S. E. An Orderly Transition to a Transformed Electricity System[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1):3-10.  
[5] Rahimi F., Ipakchi A. Demand Response as a Market Resource Under the Smart Grid Paradigm[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1):82-88.  
[6] Parvania M., Fotuhi - Firuzabad M. Demand Response Scheduling by Stochastic SCUC[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1):89-98.  
[7] Yunfei Wang, Pordanjani, I. R., Xu, W. An Event - Driven Demand Response Scheme for Power System Security Enhancement[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1):23-29.  
[8] Saele H., Grande O. S. Demand Response From Household Customers: Experiences From a Pilot Study in Norway[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1):102-109.  
[9] Le - Ren Chang - Chien, Luu Ngoc An, Ta - Wei Lin, et al. Incorporating Demand Response With Spinning Reserve to Realize an Adaptive Frequency Restoration Plan for System Contingencies[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3):1145-1153.  
[10] Samadi P., Mohsenian - Rad H., Schober R., et al. Advanced Demand Side Management for the Future Smart Grid Using Mechanism Design[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3):1170-1180.  
[11] Logenthiran T., Srinivasan D., Tan Zong Shun. Demand Side Management in Smart Grid Using Heuristic Optimization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3):1244-1252.  
[12] Xu Li., Deng S. J. An Incentive - based Demand Response Contract Design for Thermostatically Controlled Loads[D]. Working Paper, Georgia Institute of Technology, 2012.

### 作者简介:

周启航(1984),男,硕士,工程师,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制。

(收稿日期:2013-04-08)