

**Solutions for Summer Electric Power Shortages: Demand
Response and its Applications in Air Conditioning and
Refrigerating Systems**

Junqiao Han
Mary Ann Piette
Lawrence Berkeley National Laboratory

夏季电力短缺的解决方案

—需求响应及其在空调制冷系统中的应用—

韩珺巧¹ Mary Ann Piette²

劳伦斯伯克利国家实验室，美国加州伯克利市 Cyclotron 路 1 号，CA94720, USA

摘要:

电力需求响应是解决电力供求矛盾的有效工具，是保证电网安全经济运行的可靠资源。本文介绍电力需求响应及需求侧管理的基本概念及其区别，系统地阐明电力需求响应的分类及实施项目，列举电力需求响应措施在空调制冷系统中的应用，并通过介绍国外的成功实例指出电力需求响应的有效性，最后，为中国电力需求响应的开展提出建议。

关键词: 电力 需求响应 需求侧管理 需求响应措施 空调制冷系统

Solutions for summer electric power shortages:

Demand Response and its applications in Air Conditioning and refrigerating systems

Junqiao Han¹, Mary Ann Piette²

Lawrence Berkeley National Laboratory, 1 Cyclotron Road, Berkeley, CA94720, USA

Summary

Demand response (DR) is an effective tool which resolves inconsistencies between electric power supply and demand. It further provides a reliable and credible resource that ensures stable and economical operation of the power grid. This paper introduces systematic definitions for DR and demand side management, along with operational differences between these two methods. A classification is provided for DR programs, and various DR strategies are provided for application in air conditioning and refrigerating systems. The reliability of DR is demonstrated through discussion of successful overseas examples. Finally, suggestions as to the implementation of demand response in China are provided.

Key Words: electric power, DR (demand response), DSM (demand side management), DR strategy, air conditioning and refrigerating system

1 引言

截至 2006 年底，全国发电装机容量达到 6.22 亿 kW，年装机容量增长 1.01 亿 kW，创全球有史以来最快增速^[1]。尽管电力装机容量在迅速扩张，据中国电力企业联合会预测，2007 年全国夏季高峰负荷电力缺口仍然有 500 万至 600 万 kW 左右。另一方面，自 2004 年以来，全国发电设备利用小时数持续下降^[2]。据国家电网公司预测，2007 年发电设备利用小时数将跌破五千，并于 2008 年继续保持下降趋势^[3]。而在电力低谷时段，发电设备出力的大幅减小甚至停机，不仅增加能耗，而且影响机组寿命，是很不经济的运行方式。

纵观全年电力供需矛盾，我们不难发现，单方面增加发电装机容量不但不能够解决问题，而且导致机组生产能力不能充分发挥，发电成本增高，造成发电资源的极大浪费。如果不增加发动机装机容量，为了满足高峰需求而安全度夏，我们只有一个选择，那便是通过需求侧管理，削峰或移峰而降低电力高峰时段的负荷。

2 电力需求响应与需求侧管理

电力需求响应是指当电力批发市场价格升高或系统可靠性受到威胁时，电力用户接收到供电方发出的诱导性减少负荷的直接补偿通知或电力价格上升的信号后，改变其固有习惯用电模式，达到减少或推移某时段的用电负荷而响应电力供应，从而保证电网系统的稳定性，并抑制电力价格上升的短期行为。

电力需求侧管理是指在行政或诱导措施下，通过提高终端用电效率和优化用电方式，引导用户长期或短期改变用电模式，进而达到节约能源，优化资源配置和保证电网安全性的用电管理活动。相对于单纯的供应满足需求的传统电力管理方式，需求侧管理通过减少或推移需求来平衡电力供需矛盾，延缓新电站及变输配电设施的建设。

电力需求响应是需求侧管理的解决方案之一，是为特定的时间设计，并在特定的短期时间内执行。它利用电力需求的弹性特点，运用经济与市场的杠杆作用，来快速调节电力供应与需求的矛盾。需求侧管理可以通过需求侧单方面的努力实现，而电力需求响应需要供电和用电双方共同参与才能实现。供电方提供给用户可参与的电力需求响应项目；电力用户选择参加一个或多个项目，并在必要时候根据市场情况采取临时性措施，主动调整其需求以响应电力供应。

3 电力需求响应的分类及实施项目

根据上节的定义电力需求响应可以分为两类：补偿激励型需求响应和分时电价型需求响应^[4]。补偿激励型需求响应是指用户在系统需要或电力紧张时减少电力需求，以此获得直接补偿或其他时段的优惠电价。分时电价型需求响应是指用户当接收到电价上升的信号时减少电力需求，而在其他时段则享受优惠电价。在实际执行中，这两种类型的电力需求响应是相互补充，相互渗透的。分时电价型需求响应的大规模实施可以在一定程度上改变电力需求模式，减少电价波动及电力储备短缺的严重性和频度，从而减少补偿激励型需求响应发生的可能性。

电力需求响应根据电力的紧张程度不同又可将其分为可靠性需求响应和价格需求响应两大类。可靠性需求响应是在电力高度紧张时以保证电网安全为主要目的；而价格需求响应是在电力相对紧张时通过价格上调来影响用户的消费行为，从而避免电力高度紧张局面或电力危机的出现。

随着世界各国国情的不同以及实际情况的变化，越来越多且越来越合理的电力需求响应项目正在被研究设计出来。目前，在国际上比较普遍应用的电力需求响应项目现列举如下：

3.1 补偿激励型需求响应

(1) 直接控制负荷管理

供电方直接远程控制用户的电器或设备，在必要并发出紧急通知后，系统操作人员可以中断向被控制电器或设备的电力供应，而用户则获得相应的补偿。该项目通常适用于住宅以及商业建筑，并且在一年或一季度内用户被中断的次数或小时数是有限制的。

(2) 可中断负荷响应

供电方与用户签订协议，在电力短缺或系统突发事件发生时要求用户减少需求，而用户则享受优惠电价或直接经济补偿。如果用户不减少需求，则受到处罚。该项目通常适用于负荷在 200kW 以上的用户，并且在一年或一季度内用户被通知减少需求的次数或小时数是有上限的。通常，用户必须在接到通知后 30min 至 60min 内，作出减少电力需求的反应。

(3) 紧急电力需求响应

该项目是为系统稳定性受到威胁时而设计的。供电方为用户减少负荷而提供补偿，用户则自愿选择参与或放弃，而不受到处罚。

(4) 可保证电力需求响应

当系统突发事件发生或稳定性受到威胁，该项目被触发时，执行方为参与者提供可保证补偿，而用户则有义务减少预定电力负荷，否则将受到严重处罚。通常，用户必须证明确实能够达到预定负荷减少量，才被接受参与该项目。所以该部分需求可以认为是电网系统的容量或保险，在必要时可保证其发挥作用。

(5) 需求竞价/回购响应

该项目鼓励大型用户在其提议的价格下自愿减少电力需求，或在被公布的补偿价格下明示自愿减少多少负荷。该项目通常根据电力需求预测提前一天通知用户，但在必要时也可当天通知。如果用户选择参与，但没有能够减少需求，将受到处罚。

3.2 分时电价型需求响应

(1) 分时电价响应*¹

电价随一年不同的季节或一天不同的时段而不同，但电价的变化幅度不太大。它通常是根椐以往经验，将电力需求高的时段设定为高价段，而在其他时段给用户优惠的电价，并期望用户响应电价，改变其需求模式。这种形式是电力需求响应的雏形，也是最普及、最成熟的一种，它通常实施于一年的某季节或全年。经验证明它确实一定程度上影响了电力需求曲线^[4]。

(2) 临界峰值电价响应

是一种新式的分时电价，它的高价时段电价远远高于其他时段价格，并且只有在电力趋于高度紧张，需求趋于临界峰值，系统稳定性受到威胁时，由供电方发出短期通知后方可实施。这种电价通常是提前设定好的，为了保护用户利益，通常这种形式的电力需求响应的年实施天数被限制。作为用户，在临界峰值电价响应实施时，必须采取有效措施，临时减少电力需求。

(3) 实时电价响应

电力零售价格不是提前设定，而是直接受批发价格的影响而呈逐时持续变化状态，也有根据预测或经验提前一天通知逐时电价，以便于用户提前计划需求以响应电力供应市场。

4 电力需求响应在空调制冷系统中的应用

近年,在期刊及杂志上陆续刊载了一些介绍有关电力需求响应的文章^[5,6,7,8]。但采取什么措施才能切实保证需求能够成功地响应电力供应市场,目前仍然空白。本论文将介绍电力需求响应措施在空调制冷系统中的应用。

空调制冷系统的电力消费在民用建筑的年电力消费中占有举足轻重的地位,特别是公共建筑大约可达到50%—60%。而建筑物围护结构及内部物体的蓄热特性,导致空调制冷系统的开停并不会立刻影响室内温湿度的大幅变化。此外,室内舒适环境允许温湿度及气流速度在一定的范围内变化,并且,有研究证明^[9],人们可接受的室内温度范围随室外温度的上升而升高。因此,在炎热的夏季,适当的提高室内温度或改变送风速度,在短期内不会影响人们对舒适度的感受。综上所述,空调制冷系统成为电力需求响应措施的重要且有效的实施对象。

电力需求响应措施在空调制冷系统中的应用主要有以下十种方式,根据空调系统及自动控制系统的特点,可以选择其中的一种或多种方式来达到电力需求响应的目的。

(1) 空调房间温度设定值调整

提高室内空调设定温度,从而降低空气处理及制冷设备的电力负荷,达到降低电力需求的目的。在电力需求响应实施的过程中,可以改变设定温度一次或多次,或者设定室内温度在一段时间内从一个设定值逐步提高至另一设定值。这是一种十分有效的措施,而且适用于所有的空调系统。

(2) 强制蓄冷

采取预冷措施,在电力需求低谷时段,降低室内设定温度,将建筑物及室内温度预冷下来,而在电力高峰段,提高室内设定温度,利用围护结构及内部设备的蓄放热特性,将电力需求从高峰段转移至低谷段。这种措施适用于墙体比较厚重,内部可蓄热物体较多,蓄热隔热性较好的建筑。

(3) 降低风道静压

通过降低风道静压设定,来改变空气处理机的风机转速或变风量阀的开度,从而降低电力需求。这种措施适用于变风量空调系统。

(4) 限制变频风机转速

限制或降低变频风机转速,或者限制变风量阀的开度,从而降低风机电力需求。这种措施适用于变风量空调系统。

(5) 提高送风温度

提高送风设定温度,对于变风量系统,还需要锁定风机转速或变风量阀的开度。这种措施适用于所有的空调系统。

(6) 停止部分风机或末端装置

对于大空间,多风机或末端装置的空调房间,停止部分风机或末端装置。这种措施建议用于定风量空调系统。如果在变风量系统中运用该措施,还需要锁定运行风机转速或变风量阀的开度。

(7) 限制冷水流量

在集中式中央空调中,限制或降低冷水阀的开度,适当减少冷水流量,从而降低制冷机组及冷水泵的电力需求。这种措施需要控制冷水量调节的极限速度,否则可能造成冷水机组的不安全运行。

(8) 提高冷水供水温度

适当提高冷水机组的冷水供水温度，可以提高冷水机组的运行效率，降低制冷负荷，从而降低制冷机组的电力需求。

(9) 压缩机容量级数控制

控制制冷机组的压缩机容量级数，令其在满负荷但略低于实际冷量需求的工况下运行，从而控制冷水供水温度高于设定值，达到节能目的。

(10) 减少制冷机组运行数量

对于多机组制冷装置，停止部分制冷机组的运行，可以令运行机组在满负荷工况下运行而提高其运行效率，同时，由于机组停运而减少电力需求。

电力需求响应实施结束后，系统需要由特殊运行恢复至正常运行状态。为了避免系统突然恢复而形成新的电力需求高峰，可以采取逐步回调措施。

5 电力需求响应成功实例

电力需求响应自 21 世纪初在美国出现以来，取得了很大成效。例如，2006 年是美国历史记录上的第二个最热夏季。美国加州的全部内陆地区 38℃ 以上的高温天气持续长达 10d，局部地区长达 21d，洛杉矶的近郊 Woodland Hills 地区并创下 48℃ 的高温历史记录，沿海地区及湾区的温度也屡创历史新高。热风暴确实给加州电网造成了空前的压力，但加州却没有发生停电事故。这是因为电力需求响应的实施降低了电力负荷 150 万 kW，超过全州总电力需求的 2%。美国其他地区通过实施电力需求响应，新英格兰独立系统运行机构 (New England ISO) 服务区域降低负荷 53 万 kW，爱克森电力公司 (Exelon Corp) 服务区域降低负荷 110 万 kW，东北电力 (Northeast Utility) 降低负荷 9.5 万 kW，美国中部能源公司 (MidAmerican Energy) 降低负荷 25 万 kW。据调查统计，美国全国现行的电力需求响应项目的降低负荷总潜力可达 3,750 万 kW^[4]。电力需求响应被证明是一种在必需时可以减少负荷的可靠的资源。

目前，美国电力需求响应的实施一般是通过服务外包的形式，通过专门的能源咨询服务公司以及研究机构，来管理、评价并进一步促进项目的实施。

6 结语

电力需求响应是经济和供求矛盾的杠杆，是迅速解决供求矛盾的有效的短期工具。它不但可以抑制电力资源的超前投资，保证电网安全经济运行，同时，由于在电力市场中导入竞争机制，它还保证电力价格的稳定性，推动电力市场更趋公平，具有重大的经济及社会意义。

目前我国电力市场处于改革的初级阶段，导入电力需求响应，保证竞争市场的健康发展，尤为重要。电力需求响应在世界范围内被视为一种可靠的宝贵资源受到关注，作为能源消费大国的中国在此领域已经起步较晚。借鉴国外电力需求响应的成功经验，我们完全可以得出一个推论，如果中国成功实施电力需求响应，依靠现有的电力资源，夏季电力短缺的问题可以得到缓解或解决，并且能够提高整个电力系统的效率，进而实现节能及环保。

中国应该开展对电力需求响应的科学研究，普及电力供需的知识及教育，设计适合中国国情及电力市场的实施项目，并制定相关法律政策来支持其实施及推广。

注：^{*1} 由于分时电价响应实施的长期性，从电力需求响应的定义角度来看，其已经超越电力需求响应的范畴，故在一些文献中不将其列为电力需求响应的一种。

参考文献

1. 国家电力监管委员会，电力监管年度报告（2006）【R】
2. 中国电力企业联合会，全国电力供需形势及经济运行形势分析预测(2006-2007年度)【R】
3. 国家电网公司，2007年全国电力市场分析预测报告【R】
4. Federal Energy Regulatory Commission, *Assessment of Demand Response & Advanced Metering*, staff report, August 2006【R】
5. 朱成章，电力需求侧管理要重视需求响应，供用电，第22卷第5期，2005年10月【J】
6. 李扬，王蓓蓓，宋宏坤，需求响应及其应用，电力需求侧管理，2005年06期【J】
7. 宋平，应用需求响应优化电力高峰负荷管理，大众用电，2004年9期【J】
8. 朱成章，电力需求响应计划，农电管理，2003年10期【J】
9. B. W. Olesen, G. S. Brager, *A Better Way to Predict Comfort: The New ASHRAE Standard 55-2004*, ASHRAE Journal, August 2004【J】

作者简介：

¹韩珺巧，1973年生，女，汉族，籍贯河北省，美国劳伦斯伯克利国家实验室访问研究员，日本早稻田大学理工学综合研究中心客座研究员，建筑工程学博士，从事建筑物节能，城市环境以及电力需求响应方面的研究

通讯地址：Lawrence Berkeley National Laboratory, 1 Cyclotron Road M.S. 90R3111, Berkeley, CA94720-8134, USA

电话：1-510-486-4757，电子邮件：JQHan@lbl.gov

² Mary Ann Piette, born in Virginia, USA in 1961, female
Research Director, PIER Demand Response Research Center
Staff Scientist, Lawrence Berkeley National Laboratory

1 Cyclotron, Building 90R3111

Berkeley, CA 94720-8134, USA

Phone 1-510-486-6286, Email: MAPiette@lbl.gov