非工业空调负荷参与紧急调控和虚拟变供电的模式研究

郑庆荣[1]，张 娟[1]，赵建立[1]，罗玉孙[2]，谌礼操[2]

（1.国网上海市电力公司，上海 200120；2.北京慧和仕科技有限责任公司，北京 100089）

摘要：近年来，我国夏季空调负荷容量迅速上升，城市夏季空调负荷可占高峰负荷的30%～40%，导致负荷尖峰问题，严重威胁电网的安全运行。而空调负荷具备热存储能力，调峰潜力巨大，其中非工业空调负荷参与需求响应对社会生产的影响较小，可有效缓解电力供需矛盾。首先提出了非工业空调负荷参与紧急调控和虚拟变供电模式的柔性调控策略，在此基础上建立了非工业空调柔性调控主站系统，并以上海市为例，分析了主站系统在两种模式下的应用效果，算例验证了非工业空调负荷的科学调峰，能够有效实现电网负荷的均衡分配，减轻电网压力，为电网的安全稳定运行提供保障。

关键词：需求响应；紧急调控；虚拟变供电模式；非工业空调负荷

The mode of involvement in emergency regulation and virtual power supply of non-industrial air conditioning load

ZHENG Qingrong[1], ZHANG Juan[1], ZHAO Jiangli[1], LUO Yusun[2], CHEN Licao[2]

(1. Shanghai Electric Power Company of State Grid, Shanghai 200120, China; 2. Beijing Wells Technology Co.,Ltd., Beijing 100089, China)

Abstract: In recent years, our country summer air conditioning cooling load of a large increase, promote whole society rapidly rising electricity load, serious threat to the safe operation of power grid equipment. Non-industrial air conditioning load have outstanding potential of lower peak load, and little effect on social production, is the ideal demand response resource. The non-industrial air conditioning load involved in emergency control and virtual variable power supply mode of the flexible regulation construction, flexible control main station system is established. Non-industrial air conditioning load of the scientific realization of power grid peak shaving, stabilize the overloading of the substation and the rapid load control in emergency situations, so as to realize the balanced allocation power load, reduce the pressure of power grid, guarantee the stability for power grid safety. Taking Shanghai power as an example, application of shanghai power demand response system is introduced.

Key word: demand response; emergency control; virtual variable power supply mode; non-industrial air conditioning load

0 引言

近年来，我国多地出现夏季持续晴热高温天气，以空调为主的制冷负荷大量增加，导致出现负荷尖峰现象，造成电力供需矛盾。在空调制冷需求的推动下，上海等地用电负荷创历史新高。夏季激增的空调负荷导致负荷峰谷差显著拉大，而且在一年中往往只集中于气温炎热的数百小时，导致部分发电容量处于闲置状态，造成巨大

的资源浪费。此外，空调负荷激增严重威胁了电网设备的安全运行，常导致高温恶劣运行环境下线路和变压器的满载、过载问题，失去对事故的抵御能力。因此，在用电侧开展空调负荷的柔性调控，可以有效减少电力尖峰负荷，提高电能的利用率，促进社会资源的高效利用，并且有利于保障电力系统的安全运行。

非工业空调负荷对温度最为敏感，是温度升高时负荷激增的主要来源，而且非工业空调负荷主要集中在第三产业，错、避峰潜力突出，并且参与需求响应对社会生产的影响较小，是理想的需求响应资源。

近年来，欧美等发达国家，已经开始了包括空调负荷调控在内的需求响应技术研究。目前，基于智能电网框架的需求响应技术已得到了成熟的运用，并与完善的金融、保险工具相配合以价格信号和奖励措施来综合调度各类用户侧资源，能够有效解决系统性电力供应不足和时段性电力供需不平衡等问题，并在提高供电可靠性、减少并延缓电网固定资产投资以及规避批发电力市场高现货电价风险等方面起到了显著的作用。因此，许多国家已从能源战略高度将需求响应资源置于与发电侧资源同等甚至优先的地位[1]。

2012年7月，国家发改委与财政部下发了《电力需求侧管理城市综合试点工作中央财政奖励资金管理暂行办法》，并公布了电力需求侧管理城市综合试点工作首批试点城市名单，正式启动了电力需求侧管理城市综合试点工作，明确要求推广移峰填谷技术，实现电力需求响应的应用。2014年北京市、上海市、苏州市和佛山市确定为第一批需求响应试点。

国家电网公司积极推动大规模非工业空调负荷的调控工作。在前期单个楼宇空调负荷调控实证试点的基础上，2014年的智能电网创新工程安排了智能楼宇推广工作，进行了大规模非生产性空调负荷参与电网有序削峰的关键技术研究和示范，进一步验证了大规模空调负荷参与调控的效果，为电网的安全稳定运行提供了有力的保障。

国内对电力系统需求响应已进行了大量的研究工作，文献[2]对电力需求侧能效管理与需求响应系统进行了研究与设计。文献[3]提出了对公共楼宇空调负荷参与电网虚拟调峰的基本思路。文献[4]对智能用电互动体系构架进行了探讨。文献[5]提出了面向需求响应应用的空调负荷建模及控制方式。文献[6]对中央空调降负荷潜力进行了建模并分析了影响因素。文献[7]对负荷聚合技术及其应用进行了研究。文献[8]提出了需求侧管理中面向居民用电的互动化评价模型。文献[9]设计了面向电力需求侧主动响应的商业模式及市场框架。文献[10]对参与需求响应的工业用户智能用电管理也进行了研究。但是上述研究都关注于电网有序调峰和需求响应方面，对区域变电站过载及紧急情况下的负荷调控技术研究不足。

综上所述，本文利用非工业空调负荷开展紧急调控和虚拟变供电模式的柔性调控，利用精细化、智能化的柔性调控手段，实现电网大规模非工业空调负荷的科学调峰，不仅可以有效降低高峰负荷，还可以平抑变电站的过载，从而实现电网负荷的均衡分配，减轻电网压力，为电网稳定性提供保障。并且以上海市为例，验证了该柔性调控策略的有效性。

1 非工业空调负荷开展紧急调控和虚拟变供电模式的柔性调控策略

1.1 柔性调控的运行模式

本文提出的非工业空调负荷柔性调控策略包含两种运行模式。一种是通过分时段平缓调峰的虚拟变供电模式；另一种是调节电网预期外负荷缺口的紧急负荷调控模式。

1.2 虚拟变供电模式

虚拟变供电模式下的负荷调控，主要指在预测的高峰时段内，调动可控用户资源，以降低可调节负荷的使用需量，并将其转化为虚拟变供电补充容量以维持电网各区域负荷平稳的一种手段，能够达到临时投入补充变压器增容的效果，以实现满足特定需求下的高峰用电、保障电网安全以及确保用电高峰期变压器不过载的目标。

例如夏季7月和8月，基于对基线负荷与气象因子等因素的分析预测，在预计会出现午高峰的12:30～14:00时段内，将已计算出降负荷能力的用户按照电网预测需要下降的负荷比例方案或其他方案进行分配。根据负荷基线、天气预报等因素，预测当天某地区12:30～13:00需要削减1 MW的负荷，13:00～14:00需要削减500 kW的负荷，按照时间尺度为30 min来制定调控计划，则为12:30～13:00分配降负荷能力为1 MW的用户资源，为12:00～13:00和13:00～14:00分别分配降负荷能力为500 kW的用户资源。通过此类手段，对预测可能出现负荷高峰的时段进行平和调峰，保证电网的安全稳定运行。

由于对空调负荷的柔性调控需要具备前瞻性，以防止电网超负荷运行，因此调控计划需要提前制定，无法实时获取电网负荷与用户调控能力。因此，负荷基线与可降负荷的预测起着至关重要的作用。负荷基线是指对参与柔性调控的空调负荷，在执行柔性调控前对其进行负荷预测所形成的负荷曲线。因此需要研究适用于工程应用的负荷基线计算方法，充分计及环境因素和随机因素，尽量还原执行柔性调控前的负荷曲线。但由于基线本身不存在，负荷基线计算方法需考虑到公平性和计算结果的稳定性。

在每次柔性调控事件中，系统需对所有参与本次柔性调控事件的用户进行负荷基线的计算，作为用户执行效果评价的基本依据。计算方法如下。

从当前柔性调控事件日开始向前选择对应事件时段15天的历史负荷数据， 从这15天中剔除调控事件日后，再选择对应事件时段总用电量最大的5天，这是为了避免低估基本负荷。根据这5天的历史数据计算对应事件时段每分钟的负荷平均值，即用户在该事件时段的基本负荷。

能力统计用于实时获取用户调控能力，并对区域调控能力进行汇总，计算出用户能力基线，为调控计划制定和资源分配提供依据。

用户侧上报的降负荷能力是以设备为单位的，用户侧智能终端根据设备的当前运行状态，根据不同的控制方法向主站上报设备控制能力，如1#主机关闭的控制方法可削减500 kW的负荷，调节1#主机负载率可削减300 kW的负荷，调节1#主机出水温度可削减50 kW的负荷，每个设备同一时间只能执行一个控制方法，则该用户1#主机的最大降负荷能力为500 kW（C_{max}），最小降负荷能力为50 kW（C_{min}）（前提是1#主机处于开启状态，若为关闭，则该设备无降负荷能力）。

由上述分析，一个用户的最大降负荷能力等于该用户所有接入设备的最大降负荷能力之和（$C_{max1}+C_{max2}+C_{max3}+\cdots+C_{maxN}$），用户最小降负荷能力等于该用户所有接入设备的最小降负荷能力之和（$C_{min1}+C_{min2}+C_{min3}+\cdots+C_{minN}$）；同理，区域最大降负荷能力的计算方法则是所有用户最大降负荷能力之和，区域最小降负荷能力则等于所有用户最小降负荷能力之和。

能力基线的计算方式与负荷基线的计算数据息息相关，为了与基线负荷产生的时间相对应，能力基线也选取与负荷基线相同的5天为基础数据进行计算，然后将该5天的最大降负荷能力数据和最小降负荷能力数据分别求期望值，最后计入当天的气象因子，获得当天调控时段所对应的最大能力基线及最小能力基线。

在进行虚拟变供电模式下的柔性调控前，可通过虚拟变供电效果曲线预测调峰结果，由于虚拟变供电模式的调控时段具有不确定性，为了充分考虑用户的舒适度，防止大面积长时间关闭空调主机对用户造成的影响，在进行变供电计划制定时需要科学、合理地对用户资源进行分配，计算方法如下。

首先，需要按照时段数量对用户资源进行分配，分配用户的原则为：以各时段负荷缺口为依据，按最高能力趋于平均原则分配。如共7个用户，最高能力分别为300 kW、150 kW、220 kW、100 kW、350 kW、210 kW和600 kW，则将600 kW、100 kW和150 kW 分为第一组投入第一个时段，将350 kW、210 kW分为第二组投入第二个时段，将300 kW、220 kW分为第三组，这样分配各时段负荷削减量则较为平均。

单时段的调控能力=平均分配用户资源后该时段的用户最大能力之和+其他时段用户资源的最小能力之和。以上述划分的时段为例，分配给时段一某时刻的3个用户最高能力之和为850 kW，分配给时段二、时段三的用户最低能力之和分别为100 kW、50 kW，则时段一该时刻的调控能力为850 kW +100 kW +50 kW =1 000 kW，满足时段一削减1 MW负荷的需求；时段二、时段三调控能的计算方法相同，以此形成3个时段的调控能力曲线。

进行资源自动分配时同一个时段分配的用户应满足两个原则，一是分到第一组的用户以最大能力投入；二是其他组的用户在该时段以最小能力投入。如第一组分配的3个用户以最大能力投入，其他4个用户以最小能力投入。

资源分配完成后，即可判断变供电模拟效果曲线是否满足调峰要求，若无法满足调峰需求，则可以通过调整用户侧资源的方式进一步调整变供电能力曲线。

1.3 变供电资源能力补投方案

在虚拟变供电调控模式执行过程中，用户可以实时查看调控达标率和调节负荷曲线是否与模拟曲线一致，若未达到模拟效果，则可以继续补充投放虚拟变供电资源。

如果运行效果与预期目标不相符，则将启动虚拟变供电资源补充投放机制。该机制包含用户侧和需求管理侧双重保障机制。

需求管理侧补充投放机制：在用户降负荷能力满足需求的情况下，可权衡用户舒适度与降负荷需求的关系，调整柔性调控时间尺度，避免不同时段内参与柔性调控的用户资源重复使用，并预留足够的用户资源，当虚拟变供电效果未达到预期时，增加用户资源投入，增加可调节负荷的控制量，从而满足虚拟变供电容量的总体需求。

在执行过程中，主站系统需要实时监控虚拟变供电实际效果是否达到预期，若区域实际负荷≤目标负荷，则表示达到了预期效果，不需要再进行负荷补充投放；若区域实际负荷＞目标负荷，则需要根据用户剩余能力和负荷缺口进行补充投放资源的筛选。补充投放的计算方法如下。

首先计算出负荷缺口：负荷缺口gap=实际负荷－负荷限额；同时需要统计出当前所有用户的剩余降负荷能力cap，由上述两个数据可以得出整体需要削减的负荷比例rate=gap/cap，对应就可以得出：每个用户需要削减的负荷=单用户的实时降负荷能力×rate。有剩余降负荷能力的用户都可作为备选资源进行投入，但筛选用户时优先选择未投入的用户资源，其次选择已投入的用户资源。若用户降负荷能力为0，则无法参与补充投放。

用户侧补充投放机制：终端用户将根据接收到的负荷调节需求，实时调整需求响应资源的投入。当预期的调控作业执行完成后仍未达到降负荷需求，终端将重新制定调控策略，直到满足降负荷目标为止。并且在参与虚拟变供电调控时，在用户资源有限的条件下，大部分用户都需要参与多时段调控需求。则终端用户可根据下达的负荷削减目标调整控制策略。如在时段内仅关闭一层楼的，而当时段二降负荷需求量增加时，终端将自动调整策略，关闭两层楼的风机，或直接关闭一台空调主机，从而实现对降负荷需求曲线的响应。

1.4 紧急负荷调控模式

当气象因素等外部条件发生改变时，根据固有条件进行预测的基线和负荷缺口不再适用，可能会出现紧急负荷缺口的情况。而紧急负荷调控就是针对该类紧急负荷缺口事件的应对方案。

当出现紧急负荷缺口时，启用紧急负荷调控方案，将负荷缺口及时分配至下属区域及用户，通过对用户资源的柔性调控，达到降低高峰负荷的目标，从而解决当前电力供需不足的情况。紧急负荷调控方案将通过自动分配用户资源、用户补充投放等方式，使用户能够更加快捷地下达降负荷需求，修正负荷调控效果。

紧急调控模式与虚拟变供电模式最大的区别在于：紧急调控模式整体调控时间短（在1 h以

内）；进行资源分配时将以所有用户最大降负荷能力投入，以达到快速有效地缓解电力供需不足的目标。因此，紧急调控从计划制定、资源分配到用户侧执行过程都追求简洁高效的效果。

两种调控模式各有所长、特点鲜明。虚拟变供电模式主要的特点是调控时段较长，但降负荷能力相较于紧急负荷调控模式更弱，负荷曲线也更加平稳，适用于平缓调峰与负荷高峰转移时的调控需求；而紧急负荷调控模式则具有调控能力强、调控响应快，但调控时间短的特点，对于预期外的突发高峰负荷具有很好的调控效果。

2 系统架构

紧急调控和虚拟变供电模式的非工业空调柔性调控主站系统总体采用4层体系架构，分为主站层、网络层、测控层和用户层，如图1所示。用户层的设备状态数据和运行数据经过网络层，从下而上到达主站层，经过主站层的决策分析，将控制命令又从上而下传送到设备层，完成虚拟变供电、紧急调控资源潜力预测、实时调控策略优化以及区域用能调控策略分解等任务，通过与需求响应系统的实时信息互动，开展非生产性空调负荷的优化调控，能够有效减少区域用电尖峰，提升区域电网整体运行的安全性和经济性。

柔性调控主站系统部署在公网，可提供与需求响应系统的交互接口，同时柔性调控系统又完全独立于其他系统运行，可独立承担调控决策和负荷调节等职能。

3 系统功能

主站软件采用分布式架构，支持多平台和跨平台模式，支持各类主流的操作系统：HP-UX、SOLARIS、IBM-AIX、Linux和Windows；数据库支持各主流类型，如ORACLE、MYSQL等。在操作系统基础上，建立了一体化的支撑平台，为各类应用功能提供通用基础服务。

主站软件功能模块可分为柔性调控模块、能效分析模块、合同结算模块、管理配置模块和支撑功能等模块，具体功能模块如图2所示。

柔性调控模块主要服务于虚拟变供电和紧急负荷调控的决策、执行和结果统计，针对调控计划的制定和发布、资源分配以及调控指令的生成与下达等流程进行管理和实现。

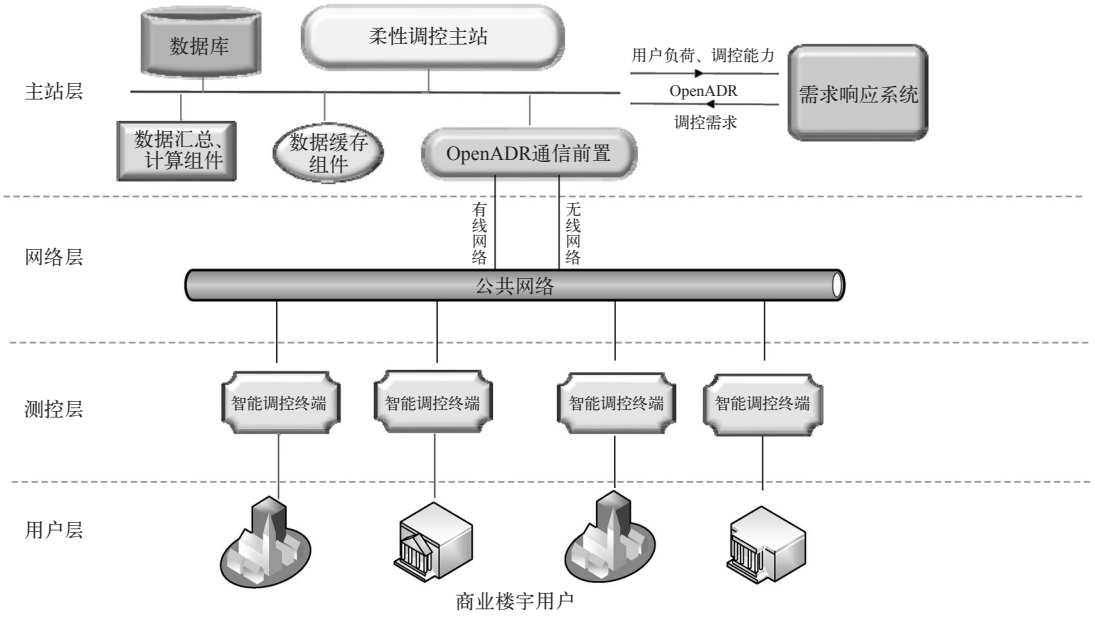


图1 非工业空调柔性调控主站总体架构

Fig.1 Non-industrial air-conditioning flexible control main station overall structure

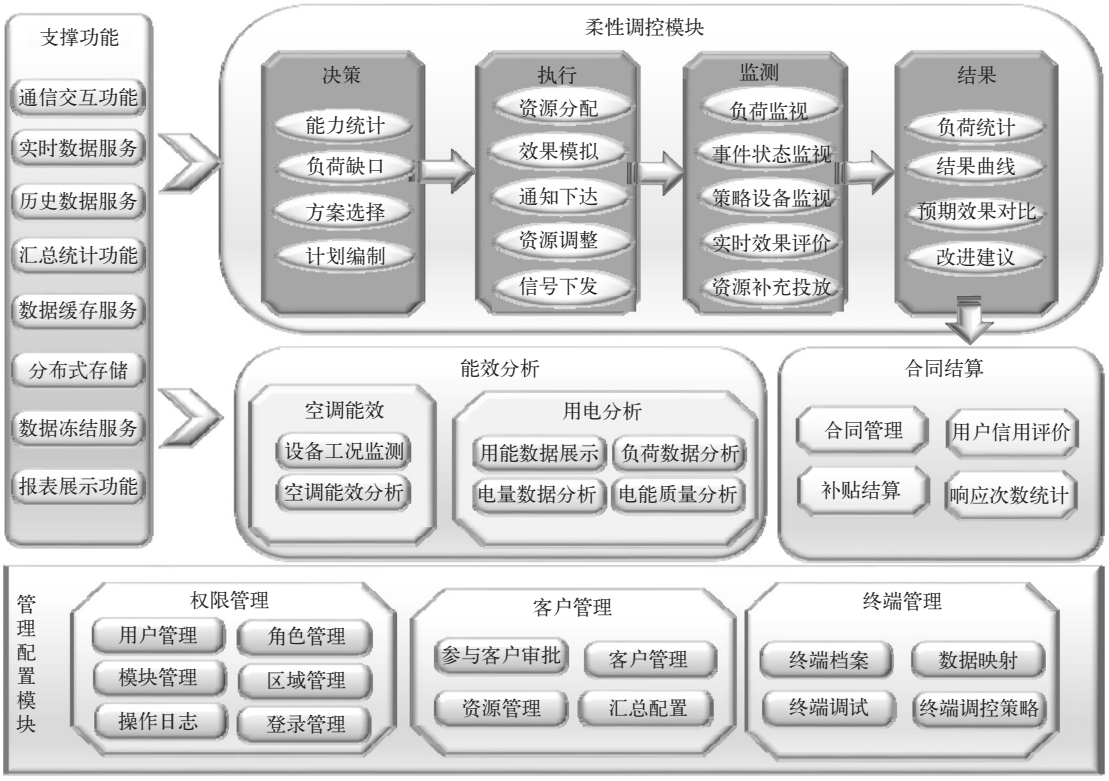


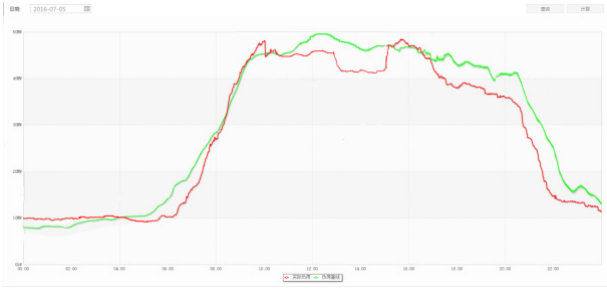
图2　主站软件功能

Fig.2 Main station software function

4　算例分析

4.1　虚拟变供电模式

图3为上海电网非工业空调需求响应主站系统采用虚拟变供电模式进行调控的实际执行效果。在负荷高峰时段（13:00～15:00）内对非工业空调负荷实施柔性调控。本次调控划分为4个连续时段进行计划编制和调控执行，每个时段为30 min，参与调控的用户共10户，用户平均最大降负荷能力为210 kW。



注：绿线为接入空调负荷基线；红线为空调实际调控曲线。

图3　虚拟变供电效果曲线

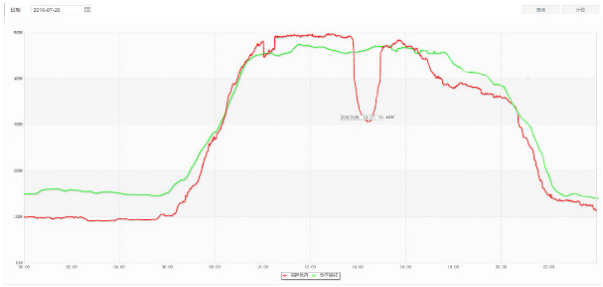
Fig.3 Virtual variable power supplg simulation

由图3可以看出，当天时段内平均空调基线负荷为4 800 kW，要求削减负荷为650 kW。根据每个时段的平均基线负荷与调控能力，系统对4个时段进行自动资源分配，最终分配策略为：第一个时段投入3个用户的最大能力，7个用户的最小能力；第二、第三个时段投入2个用户的最大能力，8个用户的最小能力；第四个时段投入3个用户的最大能力，7个用户的最小能力。调控过程中无用户退出，但在第二个时段时出现实际负荷高于目标负荷的情况，因此对该时段进行一次负荷补投，从而达到预期效果。本次非工业空调负荷柔性调控最终完成平均调控698 kW负荷的效果，平均削减空调高峰负荷14.5%，后期接入更多用户后将对调节负荷高峰产生更加显著的作用。

4.2　紧急负荷调控模式

图4为采用紧急负荷调控模式后上海电网的实际执行效果。本次紧急调控时段为13:40～14:20，持续时间为40 min。实施非工业空调负荷紧急调控时，基线负荷平均值为4 700 kW，参与用户数量为

8户，预测总降负荷能力为1 500 kW。由于是紧急负荷调控，因此在编制计划时将确认参与的用户全部投入调控，并每5 min对剩余能力进行统计，一经发现存在剩余能力，立即进行补充投放。本次调控最终产生削减1 550 kW高峰负荷的效果，是接入空调负荷容量的33%左右，为电网负荷在紧急情况下的平衡提供了保障。



注：绿线为接入空调负荷基线，红线为空调实际调控曲线

图4 紧急负荷调控效果曲线

Fig.4 Emergency load control effect simulation

5 结束语

提出利用非工业空调负荷开展紧急调控和虚拟变供电模式的柔性调控策略，建立了非工业空调负荷柔性调控主站系统，并以上海电网为例分析了两种模式下的柔性调控结果，所得结论如下。

利用精细化、智能化的柔性调控手段，能够实现电网大规模非工业空调负荷的科学调峰，可以有效降低高峰负荷、平抑变电站的过载，并且能够在紧急情况下进行负荷快速调控，从而实现电网的负荷均衡分配，减轻电网压力，为电网的安全稳定运行提供保障。

参考文献

[1] 阮文骏，刘莎，李扬．美国需求响应综述[J]．电力需求侧管理，2013，15(2)：61-64.
RUAN Wenjun，LIU Sha，LI Yang．Overview of demand response in the U.S.A.[J]．Power Demand Side Management，2013，15(2)：61-64.

[2] 闫华光，陈宋宋，钟鸣，等．电力需求侧能效管理与需求响应系统的研究与设计[J]．电网技术，2015，39(1)：42-47.
YAN Huaguang，CHEN Songsong，ZHONG Ming，et al． Research and design of demand side energy efficiency management and demand response system[J]． Power System Technology，2015，39(1)：42-47.

[3] 杨永标，颜庆国，徐石明，等．公共楼宇空调负荷参与电网虚拟调峰的思考[J]．电力系统自动化，2016，39(17)：103-106.
YANG Yongbiao，YAN Qingguo，XU Shiming，et al．Thinking of public building air-conditioning load participating in grid with virtual peak clipping[J]．Automation of Electric Power Systems，2016，39(17)：103-106.

[4] 孙国强，李逸驰，卫志农，等．智能用电互动体系构架探讨[J]．电力系统自动化，2016，39(17)：68-74.
SUN Guoqiang，LI Yichi，WEI Zhinong，et al．Discussion on architecture of smart power utilization [J]．Automation of Electric Power Systems，2016，39(17)：68-74.

[5] 宋梦，高赐威，苏卫华，等．面向需求响应应用的空调负荷建模及控制[J]．电力系统自动化，2016，40(14)：158-167.
SONG Meng，GAO Ciwei，SU Weihua．Modeling and controlling of air-conditioning load for demand response applications[J]．Automation of Electric Powersytems，2016，40(14)：158-167.

[6] 王蓓蓓，朱峰，嵇文路，等．中央空调降负荷潜力建模及影响因素分析[J]．电力系统自动化，2016，40(19)：44-52.
WANG Beibei，ZHU Feng，JI Wenlu，et al．Load cutting potential modeling of central air-conditioning and analysis on influencing factors[J]．Automation of Electric Power Systems，2016，40(19)：44-52.

[7] 孙玲玲，高赐威，谈健，等．负荷聚合技术及其应用[J]．电力系统自动化，2017，41(6)：159-166.
SUN Lingling，GAO Ciwei，TAN Jian，et al．Load

aggregation technology and its applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 159-166.

[8] 孙毅，贾孟杨，陆俊，等. 需求侧管理中面向居民用电的互动化评价模型[J]. 电力系统自动化，2017，41(13)：62-68.
SUN Yi, JIA Mengyang, LU Jun, et al. Interactive evaluation model for residential electricity in demand side management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 62-68.

[9] 丁一，惠红勋，林振智，等. 面向电力需求侧主动响应的商业模式及市场框架设计[J]. 电力系统自动化，2017，41(14)：2-9.
DING Yi, HUI Hongxun, LIN Zhenzhi, et al. Design of business model and market framework oriented to active demand response of power demand side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 2-9.

[10] 史俊祎，文福拴，崔鹏程，等. 参与需求响应的工业用户智能用电管理[J]. 电力系统自动化，2017，41(14)：45-53.
SHI Junyi, WEN Fushuan, CUI Pengcheng, et al. Intelligent energy management of industrial loads considering participation in demand response program[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 45-53.

作者简介

郑庆荣

郑庆荣（1977－），男，高级工程师，主要研究方向为智能用电技术。

(收稿日期：2018－09－26)EA

(上接第63页)

4(1): 31-39.

[18] ZHANG T, ZHANG G, LU J, et al. A new index and classification approach for load pattern analysis of large electricity customers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 153-160.

[19] 施羽展，谢开贵，胡博. 基于人工神经网络的电力市场输电阻塞预测模型[J]. 电网技术，2011，35(3)：195-199.
SHI Yuzhan, XIE Kaigui, HU Bo. Transmission congestion prediction model of power market based on artificial neural network[J]. Power Grid Technology, 2011, 35 (3): 195-199.

[20] 张超. 基于时间序列法超短期负荷预测改进方法的研究[D]. 锦州：辽宁工业大学，2015.
ZHANG Chao. Research on the improved method of ultra-short term load forecasting based on time series method[D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2015.

[21] MAK S T. Dynamic modeling of the distribution feeder using smart meters data to support feeder VOLT-VAR control[C]. Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE, 2012: 1-7.

作者简介

韩春玲

韩春玲，女，讲师，主要研究方向为计算机应用技术。

(收稿日期：2018－10－16)EA