

基于CPS架构的商业楼宇智能用能控制 管理系统建设与应用

刘俊¹, 彭浩², 何涵², 张之涵¹, 李诗卉¹, 赵长乐³

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 深圳市康拓普信息技术有限公司, 广东 深圳 518000; 3. 北京慧和仕科技有限责任公司, 北京 100089)

Construction and application of intelligent energy consumption control management system for commercial buildings based on CPS framework

LIU Jun¹, PENG Hao², HE Han², ZHANG Zhihan¹, LI Shihui¹, ZHAO Changle³

(1. Shenzhen Power Supply Company, Shenzhen 518000, China; 2. Shenzhen Comtop Information Technology Co., Ltd., Shenzhen 518000, China; 3. Beijing Wells Technology Co., Ltd., Beijing 100089, China)

摘要:针对商业楼宇具有良好的节能及需求响应潜力的特点,提出了基于信息物理系统(cyber physical system, CPS)架构的商业楼宇智能用能控制系统。基于典型CPS系统的3层架构,单元级通过智能用能终端实现了空调、照明、电加热等用能系统的动态信息感知、标准化信息建模及控制;系统级通过智能用能网关开展多元信息融合及边缘计算,实现了楼宇的能效分析、能效诊断及多设备的协调控制;平台级通过智能用电主站系统实现了多商业楼宇用能响应潜力的聚合和协同优化。以深圳地区某商业楼宇为案例,部署应用了基于CPS架构的智能控制管理系统,结果证明用能调控响应程度显著提升,用能能耗明显下降。

关键词:商业楼宇;信息物理系统;能效分析;用能管理

Abstract: In view of the good energy-saving and demand response potential of commercial buildings, an intelligent energy-using control system for commercial buildings based on cyber physical system (CPS) architecture is proposed. Based on the three-tier architecture of typical CPS system, unit level realizes dynamic information perception, standardized information modeling and control of energy-using systems such as air conditioning, lighting and electric heating through intelligent energy-using terminals. System level implements multi-information fusion and edge calculation through intelligent energy-using gateway to realize building energy efficiency analysis, energy efficiency diagnosis and coordinated control of multi-equipment. Platform level implements aggregation and synergetic optimization of energy response potential of multi-commercial buildings through intelligence. Take a commercial building in Shenzhen as an example, an intelligent control and management system based on CPS architecture is deployed and applied. The results show that responsiveness of energy regulation and control is significantly improved, and energy consumption is significantly reduced.

Key words: commercial buildings; cyber physical system; efficiency analysis; energy consumption management

0 引言

随着经济快速发展,我国建筑体总量和能耗强度在持续增长。据统计,2018年我国建筑总面积约为617亿m²,年均增长率约为4%。其中商业楼宇市场份额约占14%,年增长率约为6%,单位能耗是其他建筑的2倍多,由此可见,商业楼宇用能占比高,单位能耗也高。因此,建设商业楼宇智能用能管理控制系统,将楼宇群体用能设备整合为大规模可控

柔性负荷,可参与电网互动,实现资源优化配置,电网安全稳定运行。以数字化手段解决商业楼宇客户用能问题,针对目前商业楼宇自动化水平低,导致能源利用不充分、能耗高的普遍问题,以建设商业楼宇用能控制系统为切入点,为客户提供抑制需求侧不合理能源消费的整体解决方案,可推动商业楼宇用能设备、系统间的泛在联接,提升商业楼宇舒适度与智控能力,降低用能成本,提高综合能效水平。

为解决商业楼宇能源管理和需求响应的问题,文献[1]提出了基于虚拟调峰管理中央空调系统的具体实施方法;文献[2]提出了基于负荷聚合商业业务的需求响应资源整合方法及其商业模式的推广途径;文献[3—4]提出了计及规模化空调热平衡惯性

收稿日期:2019-12-31;修回日期:2020-03-20

基金项目:国家自然科学基金项目(61973209)

This work is supported by National Natural and Science Foundation of China(No. 61973209)

的空调负荷参与削峰模型;文献[5]针对以往中央空调对终端整体调节的控制方法,提出了基于局部终端温度调节的控制策略;文献[6]提出了商务楼中央空调DCC的市场运作模式及策略优化模型,建立了满足舒适度及调峰需求的中央空调柔性调控优化决策模型,建立了针对居民的同时考虑用电费用指标和用户舒适度指标的多目标空调优化模型。

但是,目前的研究主要是对末端设备或“源”设备进行局部调优^[7-8],缺乏全域感知协同,因此无法实现系统级整体用能优化;另一方面,商业建筑用能控制系统以能源自我管理为主要目标,未建立需求响应和市场交易业务模型,无法实现楼宇负荷与电网的友好互动^[9-10]。

本文提出了基于CPS架构的商业楼宇智能用能控制系统。设计了商业楼宇智能用能管理控制系统架构,结合楼宇本身用能的物理场景进行了分析^[11],对暖通空调系统自身节能优化控制和参与需求响应的策略管理进行了精细化分析,建立了中央空调柔性调控优化决策模型及流程,最后在深圳市某商业楼宇的非工空调调控应用工程中进行了验证。

1 系统概念与应用场景

1.1 系统概念

单元级CPS是信息物理系统的最小单元。通过智能用能终端构成“感知-分析-决策-执行”的数据闭环,每个智能终端都是一个可被识别、联网的信息载体。单元级CPS通过智能用能终端实现了对空调、照明、电加热等用能系统的动态信息感知、标准化信息建模及控制。

系统级CPS是智慧能源网关与能源管理系统通过工业网络的有机组合,可实现更大范围、更宽领域的信息自动流动,实现多个单元级CPS的互联、互通,进一步提高制造资源优化配置的广度、深度和精度。系统级CPS基于多个单元级最小单元的状态感知、信息交互、实时分析,实现楼宇的能效分析、能效诊断及多设备的协调控制等。

平台级CPS是多个系统级CPS的有机组合,主要包含楼宇智能管理系统主站和负荷聚合商子站。SoS级CPS通过大数据平台,实现了跨系统、跨平台的互联、互通和互操作,在全球范围内实现信息全面感知、深度分析、科学决策和精准执行。平台级CPS通过智能用电主站系统实现多商业楼宇用能响应潜力的聚合与协同优化。

1.2 应用场景

在电力网与信息网的融合模型下,楼宇用能管理

参与电网业务的基于CPS的信息交互架构如图1所示。

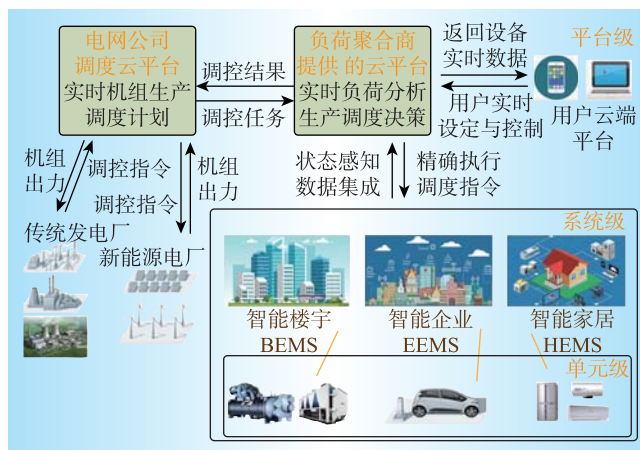


图1 基于CPS的电网供需信息交互架构

Fig. 1 Power network supply and demand information interaction architecture based on CPS

负荷聚合商通过智能服务云平台对多个系统级融合CPS模型的负荷状态进行统一监测、实时分析、集中控制。利用数据融合、大数据分析技术,科学制定对多个系统级CPS融合模型的调度计划,实现更大范围内新能源资源的优化配置,提高能源的利用率,实现平台级CPS的智能用能管控。

2 系统架构

电力网与信息网的融合系统如图2所示。其构建了支撑电力业务的信息云平台与物理电力系统之间基于数据自动流动的状态感知、实时分析、科学决策、精准执行的闭环赋能系统,实现了电网内资源配置和运行的按需响应、快速迭代、动态优化和协同控制。

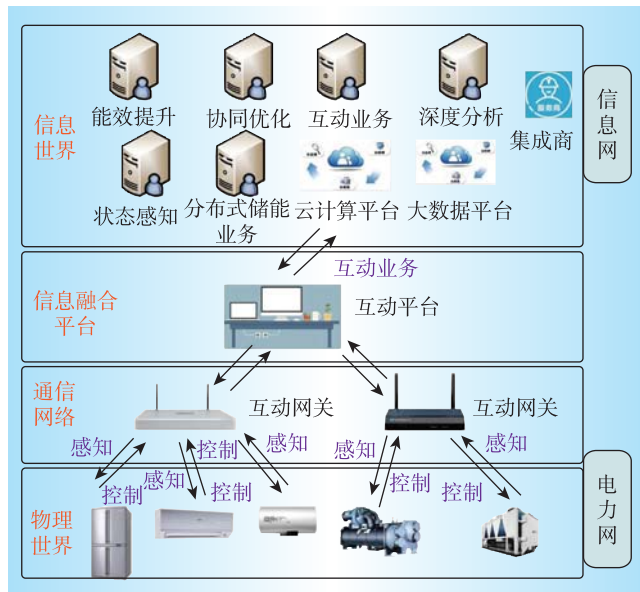


图2 电力网与信息网融合系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fusion system of power network and information network

单元级CPS的本质是通过软件对物理实体及环境进行状态感知、计算分析实现对物理实体的最终控制,构建最基本的数据自动流动的闭环,形成物理世界和信息世界的融合交互。同时,为了与外界进行交互,单元级CPS应具有通信功能。单元级CPS是具备可感知、可计算、可交互、可延展、自决策功能的CPS最小单元。在支撑电力供需互动的电力网与信息网融合系统中,每个智能用电设备为1个CPS最小单元,其体系架构图如3所示。单元级CPS通过智能用能终端实现了对空调、照明、电加热等用能系统的动态信息感知、标准化信息建模及控制。

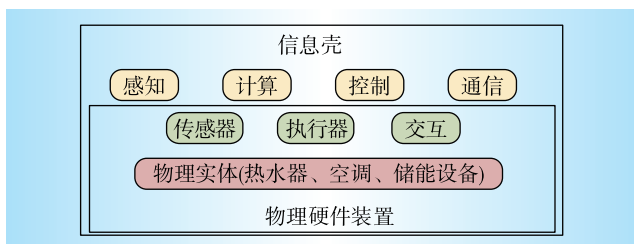


图3 单元级体系架构

Fig. 3 Unit level architecture

在实际运行中,任何活动都是多个人、机、物共同参与完成的。例如家庭能源管理系统管理单个家庭负荷设备的行为,就是多个智能负荷设备共同活动的结果,这些智能家电负荷设备一起组成了1个系统。通过网络形成的系统级CPS体系架构如图4所示。

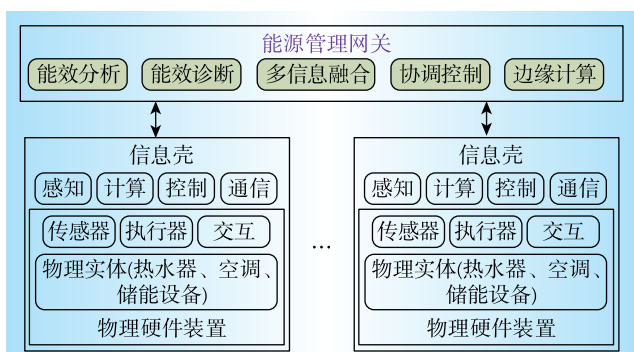


图4 系统级体系架构

Fig. 4 System-level architecture

系统级CPS基于多个单元级CPS的状态感知、信息交互、实时分析,实现了局部需求侧电力资源的自组织、自配置、自决策、自优化。在单元级CPS功能的基础上,系统级CPS通过智能用能网关开展多元信息融合及边缘计算,实现楼宇的能效分析、能效诊断及多设备的协调控制等。其中互连互通、边缘网关和数据互操作主要实现单元级CPS的异构集成;即插即用主要在系统级CPS实现对单元级CPS的识别、配置、更新和删除等功能;协同控制是

指对多个单元级CPS的联动和协同控制等;监视与诊断主要是对单元级CPS的状态实时监控和诊断其是否具备应有的能力。

多个系统级CPS的有机组合构成平台级CPS。例如多个智能家庭互联至同一个平台,形成了1个平台级的信息物理融合供需互动系统。通过单元级CPS和系统级CPS混合形成的平台级CPS体系架构如图5所示。

3 系统优化管控策略

电网公司、需求侧和供电侧设备组成的整体可视作融合系统中的系统级融合模型,电网公司获取供电侧和需求侧的相关数据信息,经过分析和决策,最终对供需双方发布执行指令。对于商业楼宇的智能用能控制主要分为2个阶段:一是日前阶段,基于粒子群(particle swarm optimization, PSO)算法寻找最优控制参数;二是日内阶段,主要基于CPS自治控制,根据偏差量进行反馈修正。

楼宇智能用能管理系统根据用户设备的运行状态,结合调度任务,对负荷数据进行实时分析,制定科学的调度决策,并对调控的负荷设备发送控制指令。用户侧控制终端(用户系统)收到指令后做出相应开关动作,并返回成功调度的信号至聚合商,再由聚合商对总体调度情况进行统一监测、核实,最后向电网公司进行调度结果汇报。

用电设备与电网交互主要是通过调整其负荷行为习惯来实现,因而在研究用电设备与电网的交互策略前有必要对其负荷特征展开分析。单台设备的负荷特性与用户的行为密切相关,表现为时空分布不确定性。就单一设备而言,它主要受用户的需求、使用习惯、使用持续性能等方面的影响;就多台用电设备而言,它还受到设备数量规模的影响。具体分析如下:

(1) 用户需求:以电热水器为例,具体表现为用户的用水时间、用水时长和使用频率等。

(2) 使用习惯:包括用户在选取用电设备时的型号、使用时间等偏好,不同类型用户不同的使用习惯偏好构成了用电负荷分布的多样性。

(3) 使用持续性能:以电热水器为例,其储水箱自身材料物理性质、保温时间、水箱容量、周围环境因素等都是影响其使用持续性能的重要因素。

(4) 设备规模:指一个楼宇内用电设备的总数量,受不同电器购置成本、使用便利性和使用持续能力等方面的影响。

考虑到某些用电设备只存在开、关2种状态,因此采用二进制粒子群(binary particle swarm

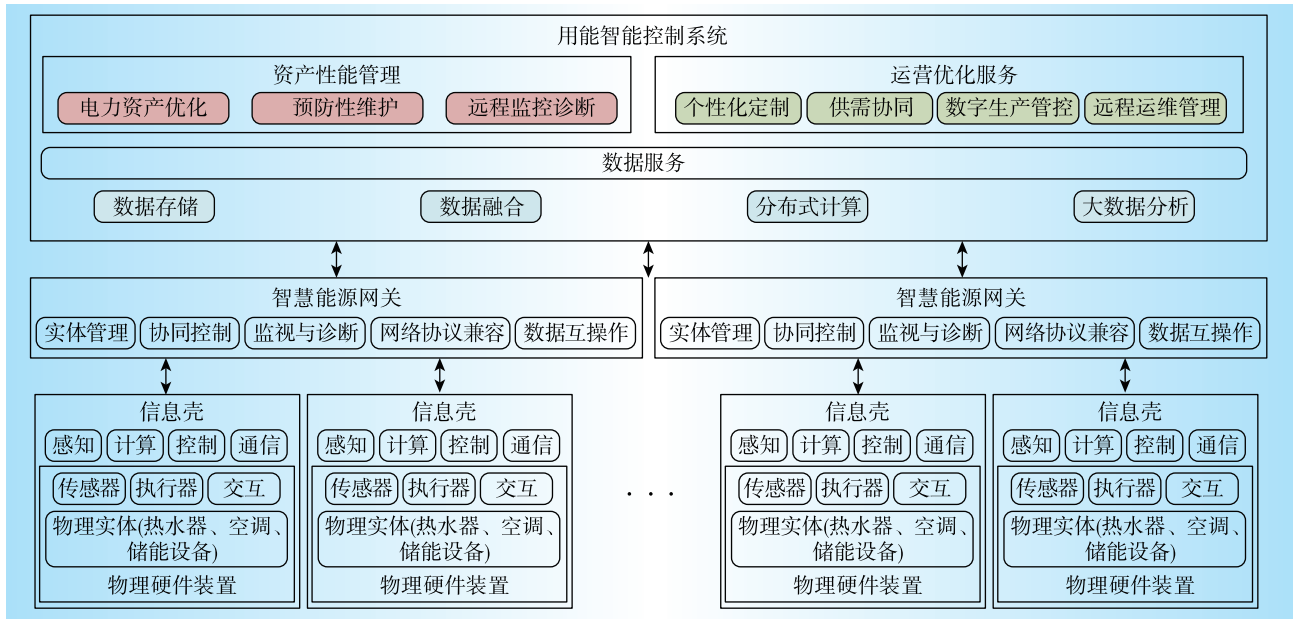


图5 平台级体系架构

Fig. 5 Platform level architecture

optimization, BPSO)算法较为合适。每个粒子代表一个群组用电设备状态的组合,采用二进制编码,0表示开启,1表示关闭。利用BPSO算法,通过CPS系统感知用电设备的实时水温和该时刻分时电价(time-of-use price, TOU),最终由BPSO算法得到的状态序列向量调整用电设备的开关状态,不仅可以减少用户用电成本,也可以保证用户对用电设备的使用舒适度要求,极大地提升用户参与需求响应项目的积极性。在进行调控的时间段内,以15 min为间隔将时间离散化,并假设用电设备负荷的运行、停止状态的变化是在前一个时段结束和下一个时段开始的临界点进行的。

基于BPSO算法对集群用电设备的运行状态进行优化控制,是在融合模型的控制决策层实现的,步骤描述如下:

(1) 在搜寻空间内初始化粒子群,对每个粒子基于最初的位置和速度计算下一时刻其位置和速度,设置种群大小及最大迭代次数;

(2) 对应每个粒子的位置,考虑约束条件,根据适应值函数计算每个粒子的函数值,求得初始局部最优值,对所有粒子的初始局部最优值进行比较,得出初始全局最优值,将初始速度设置为0;

(3) 更新粒子速度和粒子位置,粒子速度需要设置在一定范围内;

(4) 在局部搜寻空间内比较每个粒子的适应值函数和历史局部最优值,更新局部最优值;

(5) 在全局搜寻空间内比较每个局部最优值和历史全局最优值,更新全局最优值;

(6) 若达到迭代值,则停止计算,否则重复步

骤(2)至步骤(5)。

BPSO控制器的输入是两网融合系统感知执行层所采集到的用电设备实时负荷状态和电网侧分时电价,利用粒子群控制算法,以用负荷波动化为目标函数、用户舒适度为约束条件,对粒子位置进行更新优化,得到输出值,作用于用电设备负荷状态值并最终决定运行状态,具体实现步骤如图6所示。

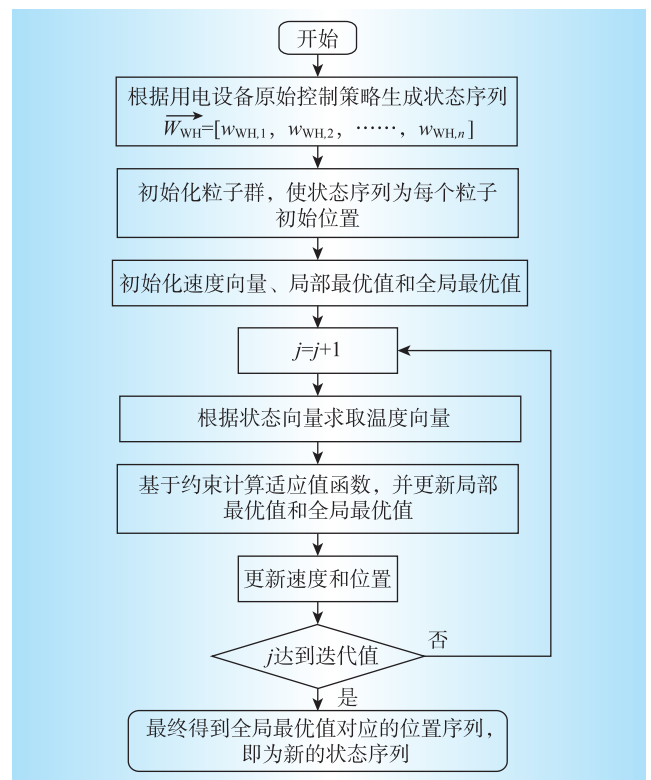


图6 优化控制策略实现流程

Fig. 6 Optimize the control strategy implementation process

4 实证分析

4.1 实例介绍

将商业楼宇用能智能管理系统应用于深圳市新、旧2幢办公大楼。2栋楼宇采用中央空调供冷,变配电系统采用室外变压器供电,电压等级为10 kV,空调系统设备总安装容量为580 kW。

根据用户的运行记录,中央空调系统于每年4月至10月初开机运行,每年运行时长约6个月。冷水机组的工况是按照最不利气候条件设定的,按照中国国标规定为冷冻水进、出水温度分别为12℃、7℃,冷却水进、出水温度分别为32℃、37℃。

根据图7显示的深圳逐月平均温度,在4月至10月间,平均温度波动范围很大,在17~29℃之间,即便是在最热月(7月),逐日最高温度波动范围也很大,为24.1~35.2℃。而冷水机组总是工作在冷冻水进、出水温度分别为12℃、7℃的工况下,将导致不必要的过低的冷冻水出水温度,造成能耗的浪费。

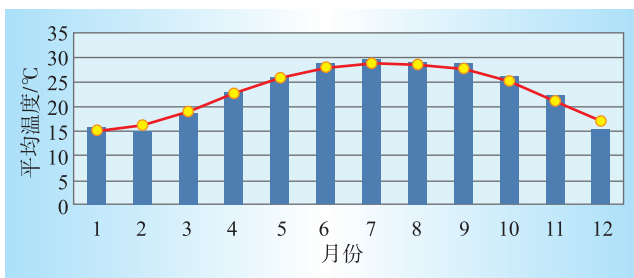


图7 深圳市各月平均温度曲线图

Fig. 7 Average temperature curve of each month in Shenzhen

4.2 应用效果分析

该系统在楼宇应用后,对楼宇整体用能关系和节能有明显的效果。以下示例一将从中央空调整体机组和整体楼宇用能对比分析来说明系统良好的节能效果。

2019年6月19日和23日的中央空调机组日负荷曲线如图8所示。中央空调一般10:00运行,22:00

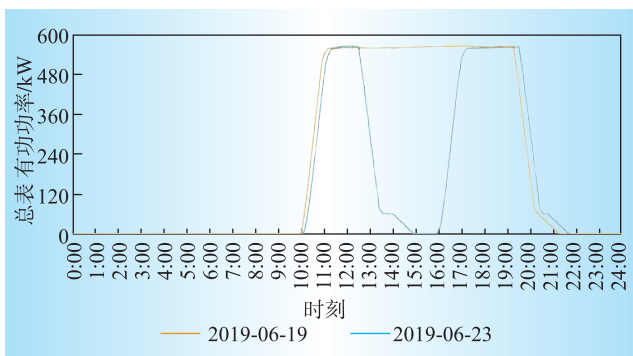


图8 中央空调日负荷曲线图

Fig. 8 Daily load curves of central air conditioning

运行结束,19日中央空调机组在10:00~22:00满负荷运行,23日中央空调机组在10:00~22:00出现了短时负荷下降的情况,属于间歇性运行。在22日空调系统运作过程中,系统对楼宇用能进行监测、分析和调控,在保证不影响用户温度舒适度的前提下给予了自动调控。

6月19日和23日的楼宇耗能日负荷曲线如图9所示。从总负荷曲线趋势可以得出,由于23日系统对中央空调机组自动需求调控,所以23日负荷曲线出现了时段性下降,楼宇总用能减少。

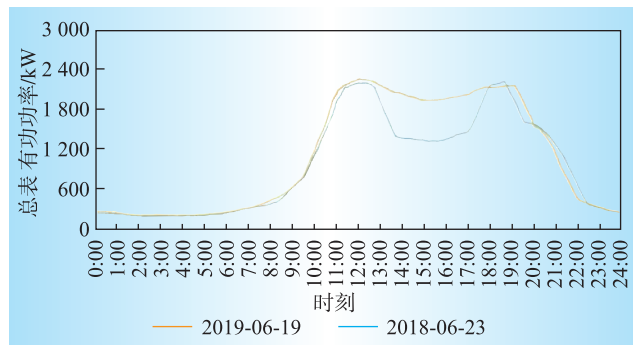


图9 楼宇耗能日负荷曲线

Fig. 9 Daily load curves of building energy consumption

6月22日和23日中央空调机组和楼宇整体耗能的日负荷曲线分别如图10和图11所示。对比分析可知,在22日和23日,系统都根据需求对中央空调机组进行了响应调控。图11中,楼宇整体用能负荷曲线在这2日均出现低谷负荷现象,所以用能调控响应程度显著提升,用能能耗明显下降。

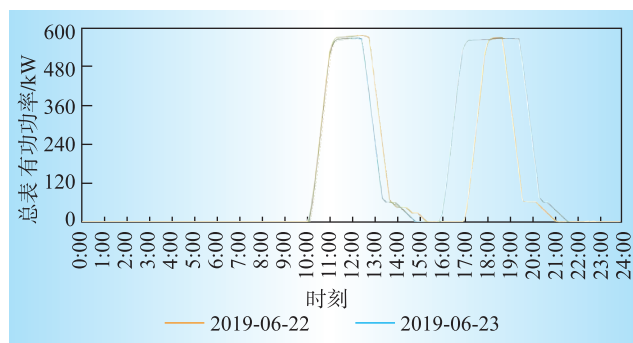


图10 中央空调日负荷曲线

Fig. 10 Daily load curves of central air conditioning

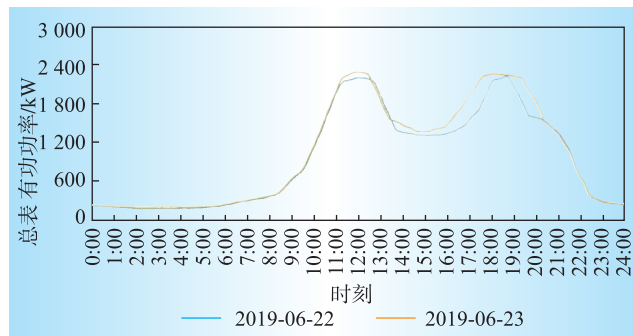


图11 楼宇耗能日负荷曲线

Fig. 11 Daily load curves of building energy consumption

5 结束语

本文提出了基于CPS架构的商业楼宇智能用能控制管理系统。设计了商业楼宇智能用能控制管理系统架构,并结合楼宇本身用能的物理场景,对暖通空调系统自身节能优化控制和参与需求响应的策略管理进行了精细化分析,建立了中央空调柔性调控优化决策模型及流程。通过对空调机组的协调优化和需求响应分析,验证了CPS架构下商业楼宇智能用能控制管理系统对于楼宇能耗管控和负荷需求响应的有效性。在未来可通过传统采集网、物联网和远程通讯网实现楼宇数据全管路通信,实现楼宇用电设备的万物互联,建立楼宇能源智能管理新模式。D

参考文献:

- [1] 史静,周琪,谈健,等. 江苏电网夏季空调负荷特性挖掘与温度敏感性辨识[J]. 电力工程技术,2018,37(3):28-32.
SHI Jing, ZHOU Qi, TAN Jian, et al. The load excavation and temperature sensitivity identification of air conditioning in summer of Jiangsu Power Grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(3):28-32.
- [2] STEPHENS E R, SMITH D B, MAHANTI A. Game theoretic model predictive control for distributed energy demand-side management[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 6(3):1 394-1 402.
- [3] 张琼,董琳琳. 空调蓄冷方案在需求侧管理中的成本效益分析[J]. 南方电网技术,2008,2(1):64-66.
ZHANG Qiong, DONG Linlin. Cost-benefit analysis of air conditioner cycling in DSM[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(1):64-66.
- [4] 李天阳,赵兴旺,肖文举. 面向峰谷平衡的商业楼宇空调负荷调控技术[J]. 电力系统自动化,2015,39(17):96-102.
LI Tianyang, ZHAO Xingwang, XIAO Wenju. Regulation technology of air-conditioning load in commercial buildings for balance of power grid peak and valley[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17):96-102.
- [5] BEIL I, HISKENSIA, BACKHAUS S. Roundtrip efficiency of fast demand response in a large commercial air conditioner[J]. Energy & Buildings, 2015(97):47-55.
- [6] ZHANG R, CHU X, ZHANG W, et al. Active participation of air conditioners in power system frequency control considering users' thermal comfort[J]. Energies, 2015, 8(10):10 818-10 841.
- [7] 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,2015,39(17):103-107.
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, 2015, 39(17):103-107.
- [8] 王丹,范孟华,贾宏杰. 考虑用户舒适约束的家居温控负荷需求响应和能效电厂建模[J]. 中国电机工程学报,2014,34(13):2 071-2 077.
WANG Dan, FAN Menghua, JIA Hongjie. User comfort constraint demand response for residential thermostatically-controlled loads and efficient power plant modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13):2 071-2 077.
- [9] 闫涛,刘宗,巴宇,等. 基于储能云平台架构的分布式储能节点控制器与控制策略研究[J]. 电器与能效管理技术,2019(2):54-59,66.
YAN Tao, LIU Zong, BA Yu, et al. Research on distributed energy storage controller and control strategy based on energy storage cloud platform[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(2):54-59, 66.
- [10] 高赐威,李倩玉,李扬. 基于DLC的空调负荷双层优化调度和控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(10):1 546-1 555.
GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Yang. Bilevel optimal dispatch and control strategy for air-conditioning load based on direct load control[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10):1 546-1 555.
- [11] 辛洁晴,吴亮. 商务楼中央空调周期性暂停分档控制策略[J]. 电力系统自动化,2013,37(5):49-54.
XIN Jieqing, WU Liang. Hierarchical strategies for duty cycling control of air conditioners in business buildings[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5):49-54.

作者简介:

刘俊(1989),男,重庆人,工程师,主要研究方向为电力系统通信、电力营配系统自动化、电力营配系统数据挖掘;

彭浩(1979),男,新疆乌鲁木齐人,工程师,主要研究方向为电力系统通信、电力营配系统自动化、电力营配系统数据挖掘;

何涵(1985),男,江西赣州人,工程师,主要研究方向为楼宇综合能源管理;

张之涵(1991),男,河北唐山人,硕士,工程师,主要研究方向为电力系统通信、电力营配系统自动化;

李诗卉(1989),女,江西南昌人,助理工程师,主要研究方向为电力营配系统自动化;

赵长乐(1993),男,江苏南京人,通信作者,硕士,工程师,主要研究方向为电力需求侧管理与评价。

(责任编辑 水 鸽)