

泛在电力物联网优化与调控方法研究

王永利¹,董焕然¹,齐成元¹,李静立^{2,3},张海宁⁴,祝金荣¹

(1. 华北电力大学 经济与管理学院,北京 102206;2. 都城伟业集团有限公司,北京 100031;3. 青海格尔木鲁能新能源有限公司,青海 格尔木 816000;
4. 国网青海省电力公司 电力科学研究院,西宁 810008)

Research on optimization and dispatching method of ubiquitous power Internet of Things

WANG Yongli¹, DONG Huanran¹, QI Chengyuan¹, LI Jingli^{2,3}, ZHANG Haining⁴, ZHU Jinrong¹

(1. College of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Capital City Weiye Group Co., Ltd., Beijing 100031, China;
3. Qinghai Greermu Luneng New Energy Co., Ltd., Geermu 816000, China;
4. Electric Power Research Institute, State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810008, China)

摘要:建设泛在电力物联网能够为电网的运行与管理、投资与服务开辟新的道路。依托泛在电力物联网的发展路径,可实现泛在电力物联网优化调度建设,提升能源系统的效率。首先研究了泛在电力物联网平台层和感知层的优化主体和内容,然后在此基础上构建了物理网络终端设备参与的边缘优化调度模型,最后以某园区的典型日负荷为依据,选择NSGA-II智能算法对该模型进行应用,验证了该模型的可行性,整体实现了对泛在电力物联网的建设与应用。

关键词:泛在电力物联网;优化运行;边缘计算;NSGA-II智能算法

Abstract: The construction of ubiquitous power Internet of Things (UPIoT) can open up a new way for the operation and management, investment and service of power grid. Therefore, according to the development path of UPIoT, the optimal dispatching construction of UPIoT is realized, the efficiency of energy system is improved. Firstly, the optimization subjects and contents of platform layer and perception layer of UPIoT are studied. Secondly, the edge optimization scheduling model of the physical network terminal equipment is constructed. Finally, the typical daily load of a park is introduced and the NSGA-II intelligent algorithm is applied in the model, which verifies the feasibility of the model and explores the construction and application methods of UPIoT as a whole.

Key words: ubiquitous power Internet of Things; optimal operation; edge calculation; NSGA-II intelligence algorithm

中图分类号:TM73 文献标志码:A

0 引言

目前对泛在电力物联网(ubiquitous power Internet of Things, UPIoT)的研究比较匮乏,大多是对物联网、电力物联网的研究。文献[1]根据物联网在电网中的应用趋势,设计了编码标识系统。文献[2]根据物联网提出了一种可以实时定位人员位置,并根据不同位置提供多种服务的系统。文献[3]提出了物联网应用于电动汽车充电设施的设想。文献[4]基于物联网,提出了电动汽车智能充换电服务网络电池的管理。文献[5]阐述了电力物联网感知层传感器的信息模型,并通过实例进行了验证。文献[6]重点介绍了物联网在智能电网中的应用研究。

文献[7]综述了基于LPWAN技术的UPIoT以及其应用前景,但没有指出UPIoT如何建设应用。

结合国内外专家学者在能源系统优化方面提出的研究成果,文献[8]充分考虑了高渗透率可再生能源的不确定性,以此为基础建立了综合能源系统(IES)优化调度模型,但其建立的以电为核心的模型并未考虑天然气以及燃机等设备。文献[9]将需求响应(DR)概念引入区域IES,并结合能源价格的需求响应机制,提出了区域IES的优化运行模型。文献[10]设计了一个基于电力-天然气(P2G)的虚拟发电厂(GVPP)的新结构,提出了一种多目标鲁棒调度模型,但其主要侧重于风险规避。文献[11]提出了一种基于联盟博弈的综合能源系统优化运行方法,建立了考虑综合需求响应的双层优化模型,其主要是针对经济性进行优化,并没有考虑碳排放等其他目标。文献[12]提出了一种考虑需求侧负荷响应及动态天然气潮流的电-气综合能源系统优

收稿日期:2019-09-30;修回日期:2019-10-10

基金项目:国家电网公司科技项目(SGQHDKY0DWJS1800170)

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation(No.SGQHDKY0DWJS1800170)

化调度新模型,但主要是针对经济性的日前调度。

基于此,结合能源系统优化经验,考虑泛在电力物联网各层次建设内容,本文提出泛在电力物联网平台层与感知层的优化内容与流程,实现了各层级优化与调控的优化内容划分和成果的互联互通,通过泛在电力物联网逐层优化、信息共享实现能源系统的经济、能效、环保等多维度提升。

1 UPIoT 优化调控主体

UPIoT 是围绕电力系统各环节,充分应用移动互联、人工智能等现代信息技术与先进通信技术,实现电力系统各环节万物互联、人机交互,具有全面感知状态、高效处理信息、便捷灵活应用特征的智慧服务系统,包含感知层、网络层、平台层、应用层4层结构,本文主要针对平台层的电力系统调度优化和感知层的边缘优化计算方法进行研究。

UPIoT 平台层的重点是实现超大规模中断统一物联管理,提高数据高效处理和业务协同能力。UPIoT 平台层调度优化立于整体电网角度,将网络内海量的信息资源通过算力整合成一个可互联互通的大型网络,解决数据存储、检索、使用、挖掘和安全隐私保护等问题。通过采集网络节点运行状态、电力供给和需求预测数据以及用户自调节潜力,优化各用能主体之间的能源利用与协调关系,向负荷聚集商、虚拟电厂、商业楼宇、售电公司等荷侧主体发布电网调度优化指令,实现大电网的安全运行与效益最优,其结构如图1所示。

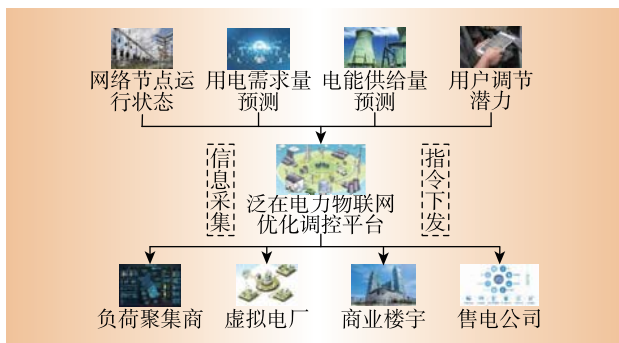


图1 UPIoT 平台层调度优化结构

Fig. 1 Scheduling optimization structure of UPIoT podium level

在UPIoT感知层优化中,主要根据电网发布的调度指令与运行要求,通过采集分布式电源设备和储能设备的运行信息,结合用户需求响应潜力,通过边缘计算中心的优化计算,实现对微网系统的优化调度,根据电网需求实现各设备、各节点、各用户的调度指令生成。感知层优化调度结构如图2所示。

建设UPIoT感知层优化的着力点是在“源-网-荷-储”各环节末梢,支撑数据采集和具体业务开

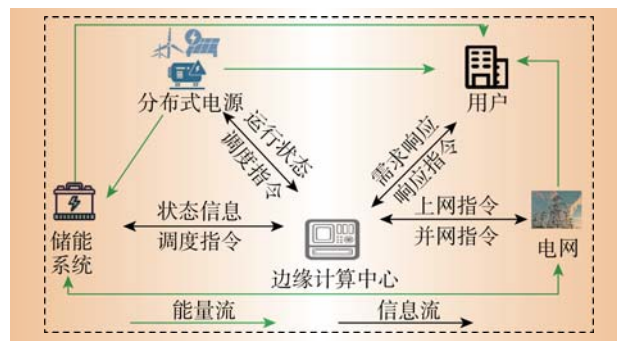


图2 UPIoT感知层优化调度结构

Fig. 2 Scheduling optimization structure of UPIoT perception level

展。在源侧,UPIoT首先采集分布式电源的运行状态,然后将信息传输至数据处理中心,并根据处理结果向分布式电源发布调度指令。在网侧,UPIoT根据数据处理中心的信息向电网传递并网上网的信号。在荷侧,UPIoT向用户发送响应指令并采集用户需求响应的状态信息。在储能侧,UPIoT采集储能设备的状态信息并汇集至数据处理中心,并根据数据中心的处理结果,向储能系统发送调度指令。

2 模型构建

2.1 物理模型

本文以园区类负荷聚集商为例,实现泛在电力物联网感知层边缘计算优化方法研究。园区内能源获取种类包括风能、太阳能和天然气,能源供应种类包括冷、热、电、气4种,其分布式能源设有风机、光伏、燃气轮机、燃气锅炉、溴化锂机、电制冷机、蓄电池和储热罐等,园区能源网结构图如图3所示。

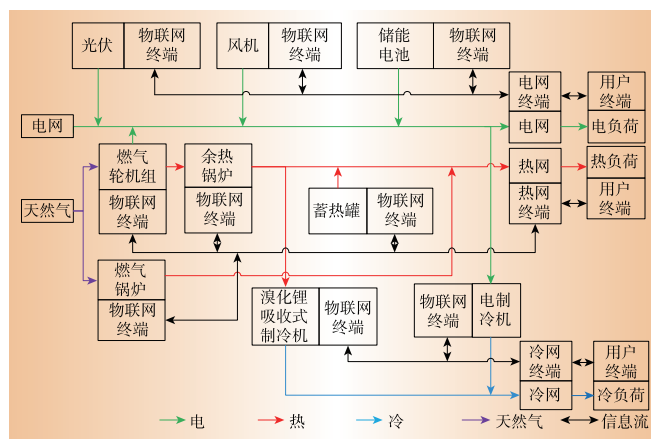


图3 园区能源网结构图

Fig. 3 Framework of park energy network

2.2 目标函数

(1) 运行成本目标

IES经济调度的目标是使能源成本最小化。经济运行成本主要由天然气、电能和热能的交易成本组成。除此之外,还包括系统本身的运行成本。目标函数如下

$$F_1 = \min C_{op} = C_{op_E} + C_{op_H} + C_{op_NG} + C_{op_DR} \quad (1)$$

$$C_{op_E} = \sum_{i=1}^n C_i P_i(t) + C_{bat,dep} + \gamma_{ele} P_{EB_grid}(t) \quad (2)$$

$$C_{op_H} = C_{op_else} + a_{h_st} P_{h_st}(t) \quad (3)$$

$$C_{op_NG} = \partial_{fuel} \frac{\sum P_{CCHP\&GB}(t) \Delta t}{\delta_{CCHP\&GB} \times LHV_{NG}} + a_{NG_st} P_{NG_st}(t) \quad (4)$$

$$C_{op_DR} = \omega_{DR} P_{DR}(t) + \varpi_{DR} V_t \quad (5)$$

式中: C_{op} 为运营成本,元; C_{op_E} 为电能供应模块的运行成本,元; C_{op_H} 、 C_{op_NG} 、 C_{op_DR} 分别为热能供应模块、天然气供电模块、需求响应补贴的运营成本,元; C_i 为分布式发电的运营成本,元/kW; P_i 为分布式发电的输出功率,kW; $C_{bat,dep}$ 为单位时间储能的充/放电折旧费用,元/kWh; γ_{ele} 为分时电价,元/kWh; P_{EB_grid} 为系统和电网之间的交换功率,kW; C_{op_else} 为其他设备的维护成本,包括燃机、燃气锅炉、溴化锂制冷机、电制冷设备等,元; a_{h_st} 为蓄热系统的电力成本,元/kWh; P_{h_st} 为蓄热系统的功率,kW; ∂_{fuel} 为天然气价格,元/m³; $\sum P_{CCHP\&GB}$ 为燃机和燃气锅炉的综合功率,kW; $\delta_{CCHP\&GB}$ 为燃机和燃气锅炉的天然气利用效率; LHV_{NG} 为天然气的低热值,kWh/m³; a_{NG_st} 为天然气存储系统的功率成本,元/kW; P_{NG_st} 为天然气存储系统的功率,kW; ω_{DR} 为需求响应功率补贴价格,元/kW; P_{DR} 为需求响应调峰最大功率,kW; V_t 为需求响应持续时间,h; ϖ_{DR} 为需求响应时间补贴价格,元/h。

(2) 环境排放目标

以天然气为燃料的冷热电联产系统(CCHP)和燃气锅炉是系统的重要动力和供热单元,也是系统污染物排放的重要来源。IES运行的环境成本主要包括以下2个方面:能源生产污染物造成的环境损失和由此造成的非环境损失;相关部门收取的排污费。环境成本最小化模型如式(6)所示。

运行层建立多目标协同优化模型,目标函数包含两大模块:总年化成本模型(包括设备等年值费用、系统年运行费用、系统年维护费用、储能更换费用)和碳排放模型。具体函数形式如下

$$F_2 = \min C_E = \sum_{k=1}^w \sum_{j=1}^m \varpi_{k,j} \delta_{E,j} + \zeta_{EC,p} \quad (6)$$

式中: C_E 为环境成本,元; $\varpi_{k,j}$ 为来自排放源 k 的污染物 j 的排放系数,元/kg; $\delta_{E,j}$ 为污染物排放水平,kg; $\zeta_{EC,p}$ 为污染物排放惩罚费用,元。

2.3 约束条件

(1) 电负荷平衡约束

$$P_{e_grid}(t) + P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{CCHP}(t) + P_{dis}(t) = P_{load}(t) + P_{char}(t) \quad (7)$$

式中: P_{e_grid} 为电网与 IES 之间的电量交换功率,kW; P_{WT} 、 P_{PV} 、 P_{CCHP} 分别为风力发电、分布式光伏发电、

CCHP发电输出功率,kW; P_{dis} 为电池的放电功率,kW; P_{load} 为系统内的总负荷,kW; P_{char} 为储能充电功率,kW。

(2) 热负荷平衡约束

$$H_{CCHP}(t) + H_{GB}(t) + H_{h_re}(t) = H_{load}(t) + H_{h_st}(t) \quad (8)$$

式中: H_{CCHP} 为CCHP热输出功率,kW; H_{GB} 为燃气锅炉输出功率,kW; H_{h_re} 为蓄热系统释放热量的功率,kW; H_{load} 为系统内的热负荷,kW; H_{h_st} 为蓄热系统储存热量的功率,kW。

(3) 冷负荷平衡约束

$$L_{EC}(t) + L_{AC}(t) + L_{l_re}(t) = L_{load}(t) + L_{l_st}(t) \quad (9)$$

式中: L_{EC} 为电制冷设备输出冷负荷的功率,kW; L_{AC} 和 L_{l_re} 分别为溴化锂制冷机输出冷负荷的功率和蓄冷系统释放冷负荷的功率,kW; L_{load} 为系统内的冷负荷,kW; L_{l_st} 为蓄冷系统储存冷负荷的功率,kW。

(4) 天然气负荷平衡约束

$$P_{ng_grid}(t) + P_{ng_st}(t) = \frac{P_{CCHP}(t)}{\varpi_{CCHP_e}} + \frac{P_{GB}(t)}{\varpi_{GB_e}} + P_{ng_life}(t) \quad (10)$$

式中: P_{ng_grid} 为天然气网向系统供应天然气的功率,kW; P_{ng_st} 为系统中储气系统释放的功率,kW; ϖ_{CCHP_e} 为燃气发电的效率,%; ϖ_{GB_e} 为燃气锅炉的效率,%; P_{GB} 为燃气锅炉热输出功率,kW; P_{ng_life} 为区域 IES 中的居民用气负荷,kW。

(5) 能量储存系统运行约束

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (11)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{char}(t) \leq P_{char,max} \varpi_{BA_s} \\ 0 \leq P_{dis}(t) \leq P_{dis,max} \varpi_{BA_r} \\ \varpi_{BA_s}, \varpi_{BA_r} \leq 1 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} P_{char,max} = \min \left\{ I_{char,max} V_{bat}, \frac{[SOC_{max} - SOC(t)] Q_{max}}{\varpi_{BA_s} \Delta t}, P_{inv} \right\} \\ P_{dis,max} = \min \left\{ I_{dis,max} V_{bat}, \frac{[SOC(t) - SOC_{min}] Q_{max} \varpi_{BA_r}}{\Delta t}, P_{inv} \right\} \end{cases} \quad (13)$$

式中: SOC_{min} 和 SOC_{max} 分别为电储能荷电状态的最小值和最大值; ϖ_{BA_s} 和 ϖ_{BA_r} 分别为电池充电和放电的效率; $I_{char,max}$ 和 $I_{dis,max}$ 分别为电池允许的最大充电和放电电流,A; Q_{max} 为电储能最大容量,kWh; P_{inv} 为逆变器最大输出功率,kW; V_{bat} 为储能最大放电电压,V; Δt 为储能约束的单位时间。

(6) 能源网异常处理

当用户用电出现异常波动时,通过用户用能监测终端、电网节点监测终端和供能设备监测终端的异常信息警告采取电能补充措施:先后使用储能设备、电网补充电能缺口,并在下一时刻点根据用户用能数据和设备运行情况的变化循环优化设备出力,以保障在电网稳定运行的基础上实现经济最优和碳排放最低。异常电能补充平衡如下

$$P_W(t) = P'_{dis}(t) + P'_{e_grid}(t) \quad (14)$$

式中: P_w 为电网电能缺口功率, kW; P'_{dis} 为储能设备额外放电功率, kW; P'_{e_grid} 为电网额外购电功率, kW。

当热网和冷网出现用能波动或供能设备运行状况异常时,由物联网设备上传异常信息,由于用户对冷源和热源的感知存在惰性,考虑供冷、供热设备调度存在响应时间,该情景不采取瞬即用能补充措施。但通过异常信息的收集,对园区的运行状态进行再优化,对异常运行状态设备发布检修信息,实现能源网安全运行。

当气网出现供气不足时,通过气网节点压力警告,调节园区设备运行状态。由于园区无法调节供气情况,因此采取园区优先满足燃机用气,稳定供电平衡,在下一时刻点根据燃气供应气量限制对园区设备运行进行优化,依次满足燃机、用户用气和燃气锅炉的用气量,当上一元素用气无法满足时,不考虑对下一元素供应燃气,燃气供应约束如下

$$P'_{\max,ng_grid} + P'_{\max,ng_st} \geq \frac{P'_{CCHP}(t)}{\varpi_{CCHP-e}} + \xi_1 P'_{ng_life}(t) + \xi_2 \frac{P'_{GB}(t)}{\varpi_{GB-e}} \quad (15)$$

式中: $P'_{\max,ng_grid}$ 和 $P'_{\max,ng_st}$ 分别为气网的最大供应功率和储气系统的最大放气功率, kW; ξ_1 和 ξ_2 分别为用户用气和燃气锅炉用气调整系数,取值范围为[0,1]。

2.4 NSGA-II 算法

NSGA-II在NSGA的基础上进一步优化,实现了共享参数的自动设置和选择。同时,NSGA-II在种群选择中引入了精英策略,提高了结果的准确性。本文所采用的NSGA-II算法的流程如图4所示。

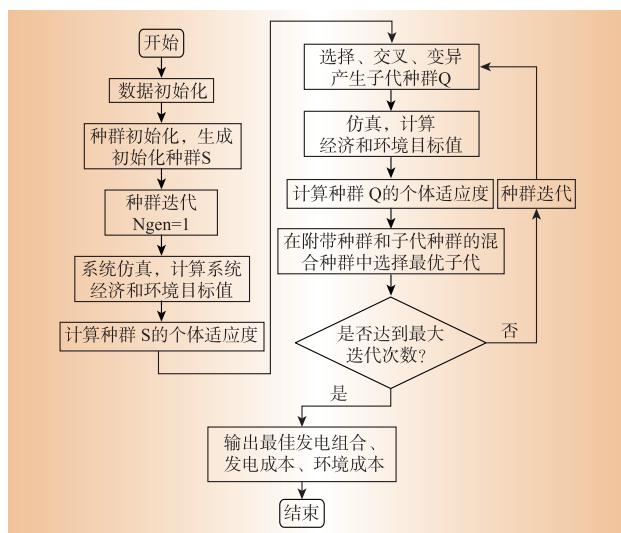


图4 NSGA-II算法流程图

Fig. 4 Flow chart of NSGA-II algorithm

3 案例分析

本文以某园区为例,选取该园区典型日的多能源负荷,以1h为运行优化精度,在MATLAB2016b的环境下对该园区设备运行与需求响应指令进行优化。

3.1 基础数据

该园区建立了包含冷、热、电3种能源的IES,其中包括风机、光伏等可再生能源设备,蓄电池储热罐等调峰设备,共同参与园区能源供应。

通过对园区内用户负荷的收集与分析,得到园区内多能源典型日负荷,如图5所示。

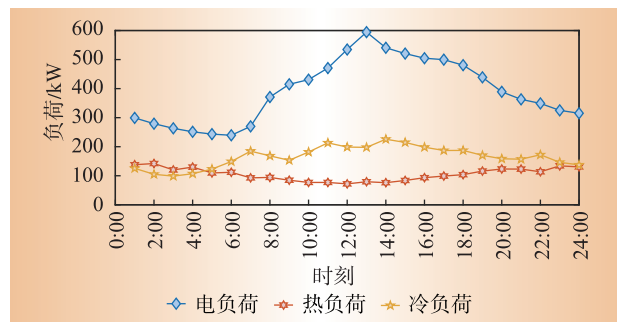


图5 园区多能源典型日负荷曲线

Fig. 5 Typical daily load curve of multi-energy in the park

在本研究中,天然气价格采用固定价格3.45元/m³,电力价格主要分为固定电价和分时电价。固定电价采用0.5元/kWh,系统内多余电量采用固定电价上网;系统中的缺电量以及储能在低谷时段的储电量采用由峰谷分时电价机制执行的购电价格,峰时(9:00~11:00,16:00~22:00)电价为0.8元/kWh,谷时(23:00~次日8:00)电价为0.3元/kWh,平时(12:00~15:00)电价为0.5元/kWh。

3.2 优化结果分析

为验证本文所建模型的有效性,本节通过将物联网设备不参与运行优化调度(方案一)与物联网设备参与运行优化调度(方案二)进行对比,分析该模型在建设UPIoT中的意义。

本文规定园区的电力并网策略为并网上网型,即既可向电网购电,也可向电网售电,购售电价格不一。由于园区中存在风机、光伏等可再生能源发电,优化中优先考虑消纳可再生能源发电。

在物联网设备未参与园区运行调度的方案下,运行成本5324.4元,碳排放量4480kg,独立性95.35%,各设备的出力策略如图6—图8所示。

由数据分析可知,由于燃机配置较小,不能完全满足园区内冷热电3种能源的供应,加之蓄电池和储热罐设备对负荷波动性的调节,使得燃机一直以满负荷出力。在电系统中,由于风机、光伏的不可控性和燃机的设备出力恒定,使得园区内电系统稳定性由蓄电池和电网购售电保证,从园区的上下网功率中可以看出,该方案中购电最大功率为106kW,购电电量为437.2kWh,对电网依赖较高。在热系统中,燃机的满负荷出力和蓄热罐的热量调节使得二者已经满足园区内的热力供应,因此燃气锅炉在该调度

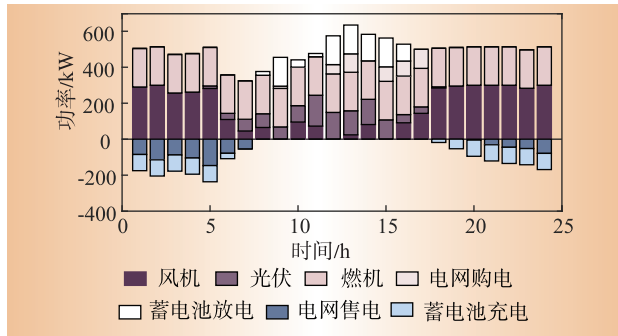


图6 方案一园区电系统设备出力图

Fig. 6 Equipment output of the campus electrical system in program I

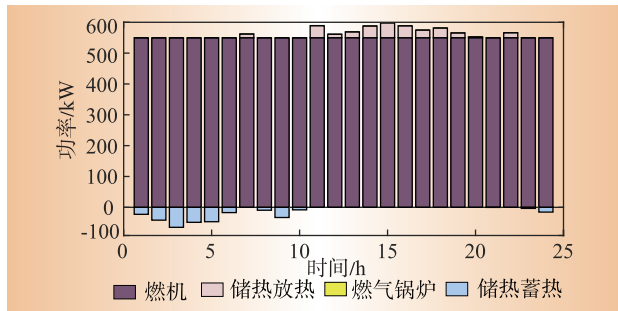


图7 方案一园区热系统设备出力图

Fig. 7 Equipment output of the campus thermal system in program I

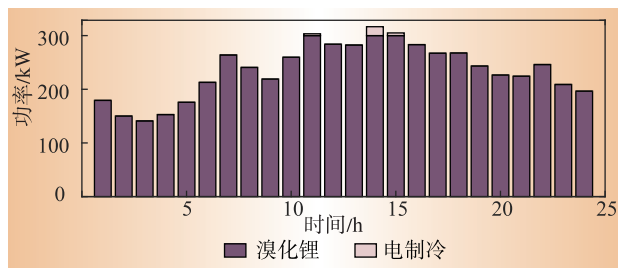


图8 方案一园区冷系统设备出力图

Fig. 8 Equipment output of the campus cooling system in program I

策略中未参与运行。在冷系统中,由于未配置储冷设备,溴化锂制冷机的制冷成本较低,但其不能完全保证园区内冷需求的供应,因此电制冷设备起到补充冷需求的作用,以保障用户用冷需求。本文通过对需求响应指令的优化,在能源管网安全运行和满足用能需求的前提下,实现园区的经济运行。该方案的运行成本5 170.9元,碳排放量4 369 kg,独立性97.32%。方案二的设备出力如图9—图11所示。

通过该方案对用户需求响应负荷进行优化,在少量经济补贴的前提下实现了峰值负荷的转移。由于该园区电力负荷峰值较为集中,且超出了园区分布式能源的电力产能范围,因此在需求响应优化后,在负荷高峰期还需从电网购电以保证园区能源供应,但需求响应使得园区对电网依赖度较小,其表现为最大购电功率为51 kW,购电电量为251.7 kWh。物联网参与的需求响应优化结果如图12所示。

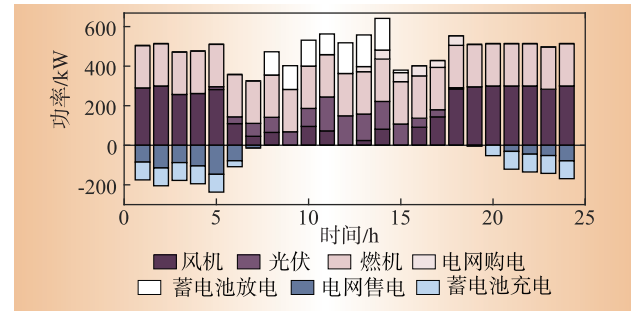


图9 方案二园区电系统设备出力图

Fig. 9 Equipment output of the campus electrical system in program II

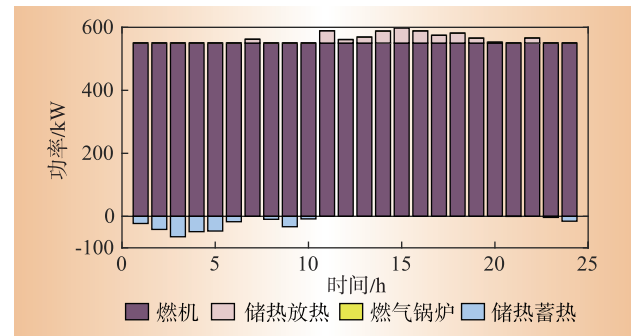


图10 方案二园区热系统设备出力图

Fig. 10 Equipment output of the campus thermal system in program II

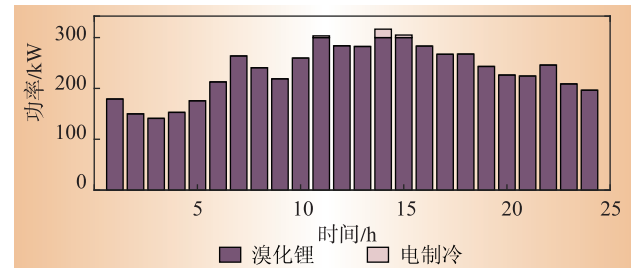


图11 方案二园区冷系统设备出力图

Fig. 11 Equipment output of the campus cooling system in program II

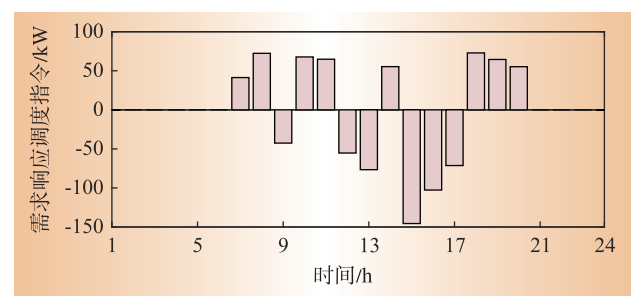


图12 园区需求响应优化结果图

Fig. 12 The result of the demand response optimization of the campus

通过对加入了物联网设备参与的园区运行调度优化数据分析可知,该方案较物联网设备不参与运行调度方案在经济性、环境性、对电网的依赖性等多个角度都有提升。具体数据如表1所示。

通过表1数据对比可以看出,以物联网为媒介

表1 方案指标对比

Table 1 Comparison of indicators between the two programs

指标名称	方案一	方案二
运行成本/元	5 324.4	5 170.9
碳排放量/kg	4 480	4 369
独立性/%	95.35	97.32

的运行调度优化可以更好地实现园区的运行调度。在经济方面,在计算需求响应补贴成本后,方案二较方案一节约运行成本153.5元,占方案一运行成本的2.88%;在环境方面,方案二碳排放减排111 kg,占方案一碳排放量的2.48%;在独立性方面,方案二增加独立性1.97%,占方案一的2.07%。通过引入物联网参与园区需求响应的优化调度,实现了园区运行在经济性、环境性、独立性的多角度提升。

4 结束语

本文通过借鉴能源系统优化方法,提出了UPLoT平台层和感知层不同维度的优化角度,并以此为基础构建了物理网终端设备参与感知层优化调度模型,以某园区的典型日负荷为依据,选择NSGA-II智能算法对该模型进行了应用,得到以下结论:

(1) 通过建立各设备的运行策略和物联网信息处理策略,实现了园区的多能源互补运行与异常情况紧急处置,实现了园区能源网的安全运行;

(2) 通过将物联网设备参与园区系统的运行调度与传统系统运行方式对比,加入了依托于用户物联网终端的实时需求响应,可实现经济性、环境性、对电网的依赖性3个方面不同程度的优化;

(3) 下一步将实现园区用户物联网终端对用户用能的智能化、个性化管理,实现用户层的智能用能优化。D

参考文献:

- [1] 张军永,黄小庆,曹一家,等. 输变电设备物联网的设备编码标识[J]. 电力系统自动化,2013,37(9):92-96. ZHANG Junyong, HUANG Xiaoqing, CAO Yijia, et al. Equipment encode-identification in internet of power transmission and transformation equipments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9):92-96.
- [2] 彭彬,于浩,苏韵掣,等. 基于物联网的智能厂站位置服务系统[J]. 电力系统自动化,2013,37(16):114-118. PENG Bin, YU Hao, SU Yunche, et al. A location based service system in smart power plant based on internet of things[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16):114-118.
- [3] 杨永标,丁孝华,朱金大,等. 物联网应用于电动汽车充电设施的设想[J]. 电力系统自动化,2010,34(21):95-98. YANG Yongbiao, DING Xiaohua, ZHU Jinda, et al. Assumption of internet of things applied in electric vehicle charging facilities[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(21):95-98.
- [4] 薛飞,雷宪章,张野彪,等. 基于物联网的电动汽车智能充换电服务网络电池管理[J]. 电力系统自动化,2012,36(21):41-46. XUE Fei, LEI Xianzhang, ZHANG Yebiao, et al. Battery management of smart charging and swapping service network for electric vehicle based on internet of things[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21):41-46.
- [5] 荆孟春,王继业,程志华,等. 电力物联网传感器信息模型研究与应用[J]. 电网技术,2014,38(2):532-537. JING Mengchun, WANG Jiye, CHENG Zhihua, et al. Research and application of power Internet of Things sensor information model[J]. Power System Technology, 2014, 38(2):532-537.
- [6] REKA S S, DRAGICEVIC T. Future effectual role of energy delivery: a comprehensive review of internet of things and smart grid[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018(91):90-108.
- [7] 陈皓勇,陈永波,王晓娟,等. 基于LPWAN的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(8):1-8. CHEN Haoyong, CHEN Yongbo, WANG Xiaojuan, et al. Ubiquitous power Internet of Things based on LPWAN[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8):1-8.
- [8] 张鹏,王丹,贾宏杰,等. 考虑可再生能源不确定性的综合能源系统优化调度方法[J]. 电气应用,2017(19):42-48. ZHANG Peng, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Optimal dispatching method for integrated energy system considering uncertainty of renewable energy[J]. Electro Technical Application, 2017(19):42-48.
- [9] WANG Y, HUANG Y, WANG Y, et al. Optimal scheduling of the RIES considering time-based demand response programs with energy price[J]. Energy, 2018(164):773-793.
- [10] JU L, ZHAO R, TAN Q, et al. A multi-objective robust scheduling model and solution algorithm for a novel virtual power plant connected with power-to-gas and gas storage tank considering uncertainty and demand response[J]. Applied Energy, 2019(250):1 336-1 355.
- [11] 丛昊,王旭,蒋传文,等. 基于联盟博弈的综合能源系统优化运行方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(14):14-22. CONG Hao, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Integrated energy system optimization operation method based on coalition game[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14):14-22.
- [12] 张伊宁,何宇斌,晏鸣宇,等. 计及需求响应与动态气潮流的电-气综合能源系统优化调度[J]. 电力系统自动化,2018,42(20):1-8. ZHANG Yining, HE Yubin, YAN Mingyu, et al. Optimal scheduling of electric-gas integrated energy system considering demand response and dynamic gas flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20):1-8.

作者简介:

王永利(1980),男,河北石家庄人,博士,副教授,主要研究方向为能源互联网、电网投资。

(责任编辑 孙 晶)