

考虑多能协同的工厂综合需求侧响应模型

何仲潇¹,徐成司¹,刘育权²,华煌圣²,董树锋¹

(1. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027;2. 广州供电局有限公司,广东 广州 510620)

摘要:在能源互联网背景下,分散化的能源市场和能源网络结构使得传统的电力需求侧响应(DR)将逐步向综合需求侧响应(IDR)的方向发展。IDR 是能源互联网中实现用户深度参与系统调控、传递能源市场价格信号、参与能源市场的重要切入点,是电力 DR 理论在能源互联网中的扩展。针对工业园区提出了一种工厂 IDR 模型,同时将光伏、电储能、冰蓄冷和水蓄冷等分布式资源考虑在内。建立园区内能源系统 IDR 的物理和数学模型,并将其转换为混合整数线性规划用分支定界法进行求解。仿真结果表明,通过 IDR 模型的优化,多种能源协同互补,并引导用户制定合理的综合能源利用方案,提高了用户侧的用能效率,减少了用户的用能成本;所提模型在工厂的经济性、灵活性以及系统运行方面均带来了一定的效益。

关键词:综合需求侧响应;工业园区;多能协同;经济调度;模型

中图分类号:TM 715

文献标识码:A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.06.010

0 引言

近年来,随着环境污染问题的日益严重,传统的攫取和依赖不可再生资源的生长方式已经不能维持我国经济社会的发展,以石油和煤炭为核心的化石能源时代即将结束,我们将要面临的是新能源和化石能源互补的“混合能源时代”^[1]。在能源互联网背景下,分散化的能源市场和能源网络结构使得传统的电力需求侧响应 DR(Demand Response)逐步向综合需求侧响应 IDR(Integrated Demand Response)的方向发展^[2]。IDR 是能源互联网中能量流、信息流与价值流汇聚融合在用户侧的重要体现,是能源互联网中实现用户深度参与系统调控、传递能源市场价格信号、参与能源市场的重要切入点。IDR 的实施能够实现系统供需双侧资源的协同效益。而工业园区以其能源需求不断增大、能源种类多、能源结构不合理、常规能源储备量减小、能源利用率普遍偏低、峰谷电力负荷差额大等特点^[3],成为 IDR 实施的良好平台。因此,在多能协同的框架下,研究工业用户的 IDR 模型以及对用电信息的潜在行为响应,对未来综合能源系统在工业用户领域的推广以及电网系统实现智能配电的最优设计具有重要的指导意义。

在 IDR 理论研究方面,文献[4]对多能系统下需方响应的热点问题进行了探讨;文献[5]引入了碳交易市场,进一步分析碳排放约束对用户综合用能行为以及用户用能效益的影响;文献[6]基于能源集线器的基本架构,对综合能源系统中的电-气-热混合潮流建模进行了研究;文献[7-8]对多能源网络和多能源市场下的 IDR 资源协调运行机制和相应的

效益评估方法进行了讨论。

综上所述,目前对 IDR 的研究尚未充分考虑不同网络的具体特性约束以及具体的响应模型。因此,针对工业园区,本文提出了一种考虑多能协同的工厂 IDR 模型,同时将光伏、电储能、冰蓄冷和水蓄冷等分布式资源考虑在内,建立园区内能源系统 IDR 的物理和数学模型,并将模型转换为混合整数线性规划问题用分支定界法进行求解。研究了工业用户参与 IDR 的几种主要方式及其所能取得的效果。

1 工厂 IDR 模型

1.1 IDR 概述

IDR 的概念由传统 DR 衍生而来,与能源互联网中多能源互联网络以及多能源市场具有强伴生关系,是 DR 理论在能源互联网中的扩展。可以说 IDR 是依托于用户侧的多能源智能管理系统,其通过电力市场、天然气市场、碳交易市场等多个能源市场的价格信号引导改变用户的综合用能行为。IDR 实施的目标应该是实现能源互联网中供需双侧资源协调优化,提高用户用能的可替代性,提高能源互联网中多能源系统以及多能源市场的运行稳定性和运行效率^[9-10]。

1.2 IDR 物理模型

同时考虑光伏、电储能、冰蓄冷和水蓄冷的工业园区微电网示意图如图 1 所示^[11-12]。将 m 组光伏发电系统、蓄电池和直流负荷分别连接到 m 条直流母线上,通过双向变流器与公共的交流母线相连,再由交流母线通过变压器接入配电网,并在交流母线上接入冰蓄冷装置。该系统既可满足直流负荷需求,也可满足交流负荷需求。整个系统可以被分为直流电源、直流负荷以及交流电源、交流负荷。当地的直流母线用来和直流能源设备相连,并通过一个双向

收稿日期:2017-03-03;修回日期:2017-04-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0901300)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0901300)

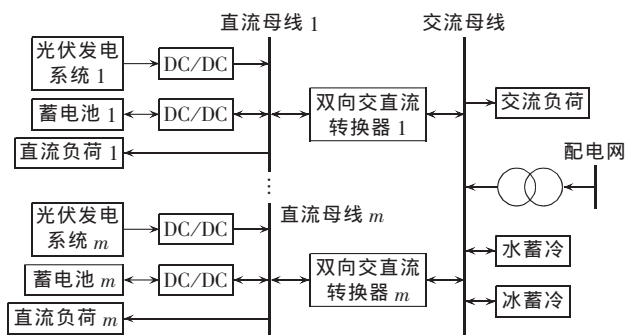


图 1 工业微电网示意图

Fig.1 Schematic diagram of industrial park microgrid

转换器与交流系统连接。这种结构使得电池和直流负荷能够在交直流转换之前使用光伏输出的能量,从而消除交直流转换时不必要的能量损耗,提高了光伏的就地消纳能力。同时,冰蓄冷和水蓄冷装置的接入可以实现供冷负荷的转移,并充分利用夜间气温变化,提高机组产冷量,更好地实现工业园区的削峰填谷。通过 IDR 实现多能协同和耦合互补,从而使得各类能源得到高效利用,并节约电费。

为了实现工业园区微电网的多能协同优化、提高能源利用效率,本文设计了如图 2 所示的 IDR 策略。其中,输入数据是通过预测获得的用户交/直流负荷^[13]、冷负荷^[14]、光伏输出^[15]和分时电价数据。在实现目标和约束的基础上,形成电池充放电和转换器的操作策略以及冰蓄冷、水蓄冷装置制冷机和蓄冰槽的冷负荷分配策略。为了简便分析,假设在研究模型中光伏输出和负荷的预测数据至少可以提前一天使用,即会在某一天开始之前形成电池、转换器和冰蓄冷、水蓄冷装置的工作计划。

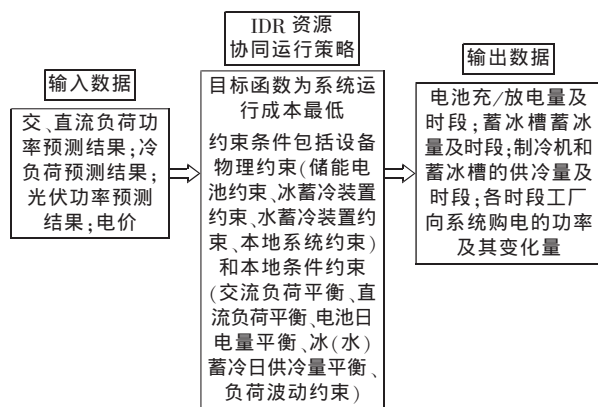


图 2 IDR 策略

Fig.2 IDR strategy

1.3 IDR 数学模型

本节列出了工业园区 IDR 的数学模型。目标函数为系统运行成本最小。假设可以从预测中得知交/直流负荷、冷负荷和光伏输出的数据。基于分时电价的价格激励可以设计电池、交直流转换器和冰蓄冷

装置和水蓄冷装置的调度策略。

1.3.1 目标函数

以初始安装成本 C_{IN} 、运行维护成本 C_{OM} 以及电网购电成本 C_{ES} 所构成的运行费用 C_{ATC} 最小为优化的目标函数:

$$\min C_{ATC} = C_{IN} + C_{OM} + C_{ES} \quad (1)$$

其中,初始安装成本 C_{IN} 可以视为定值;运行维护成本 C_{OM} 如式(2)所示;电网购电成本 C_{ES} 如式(3)所示。

$$C_{OM} = \sum_s \sum_t \xi_s^{om} w_{t,s}^{out} T \quad (2)$$

$$C_{ES} = \sum_{t=1}^{96} C(t) P(t) T \quad (3)$$

其中, ξ_s^{om} 为设备 s 单位输出功率的运行维护费用; $w_{t,s}^{out}$ 为能量转换设备 s 在时段 t 的输出功率; t 为时段数; T 为单位时段长度; 96 为全天时段总数, 全天时段总数也可以为其他适合的值; $C(t)$ 为时段 t 的分时电价; $P(t)$ 为时段 t 从主网得到的供电功率。

1.3.2 约束条件

(1) 直流电源和交流电源约束。

a. 总功率平衡约束。

$$P(t) = P_{AC-load}(t) + P_{AC-DC}(t) + P_i(t) - P'_i(t) + P_{CT}(t) \quad (4)$$

其中, $P_{AC-load}(t)$ 为时段 t 的交流负荷; $P_{AC-DC}(t)$ 为时段 t 交直流转换器的功率; $P_i(t)$ 为时段 t 蓄冰槽的耗电量, $P'_i(t) = P_i(t)\eta$ 为时段 t 蓄冰槽承担的冷负荷量, η 为供冷效率(由于存在冷损失), 当蓄冰槽制冰蓄冷时有 $P_i(t) > 0, P'_i(t) = 0$, 当蓄冰槽融冰供冷时有 $P'_i(t) > 0, P_i(t) = 0$; $P_{CT}(t)$ 为时段 t 冷却塔的耗电量, 由于冷却塔的能耗在系统中所占的比例不大, 在实际应用中往往采用经验公式(5)表示。

$$P_{CT}(t) = 0.025 [Q_k(t) + P_k(t)] \quad (5)$$

其中, $P_k(t)$ 为时段 t 制冷机耗电量; $Q_k(t) = P_k(t)\gamma_{EER}$ 为制冷机供冷量, γ_{EER} 为制冷机能效比, 可以通过制冷机组运行参数拟合得到。

b. 交直流转换器效率约束。

$$P_{AC-DC}(t) = \begin{cases} \eta_{A/D} P_{DC}(t) & P_{DC}(t) > 0 \\ 0 & P_{DC}(t) = 0 \\ \eta_{D/A} P_{DC}(t) & P_{DC}(t) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\eta_{A/D}$ 为交流转换为直流的转换效率; $\eta_{D/A}$ 为直流转化为交流的转换效率; $P_{DC}(t)$ 为时段 t 的直流母线总负荷。

c. 直流母线总负荷约束。

$$P_{DC}(t) + P_{PV}(t) = P_{DC-load}(t) + P_B(t) \quad (7)$$

其中, $P_{PV}(t)$ 为光伏发电功率; $P_{DC-load}(t)$ 为直流负荷; $P_B(t)$ 为储能电池在时段 t 的功率, 充电时 $P_B(t) > 0$, 放电时 $P_B(t) < 0$ 。

另外,为了限制 IDR 后系统负荷的波动、不增加电力系统侧调度的难度,引入负荷波动约束:

$$\begin{cases} |P(t+1)-P(t)| \leq 0.1\lambda \\ |P(t+2)-P(t)| \leq 0.15\lambda \end{cases} \quad (8)$$

其中, λ 为负荷有功功率的几何均值;比例系数根据具体实际情况和经验给出,这里取 0.1 和 0.15。以负荷波动率 l 作为评判负荷波动的标准, l 定义为负荷有功功率的标准差 σ 与负荷有功功率的几何均值 λ 之比^[16],即:

$$l = \sigma / \lambda \quad (9)$$

(2) 设备和能源平衡约束。

a. 储能电池放电功率约束。

$$P_D^{\max} \leq P_B(t) \leq P_C^{\max} \quad (10)$$

其中, P_C^{\max} 为储能电池最大充电功率; P_D^{\max} 为储能电池最大放电功率。

b. 储能电池电量状态约束。

$$\begin{cases} E_{\min} \leq E_B(t) \leq E_{\max} \\ E_{\min} = \text{SOC}_{\min} R \\ E_{\max} = \text{SOC}_{\max} R \end{cases} \quad (11)$$

其中, E_{\max} 为储能电池最大电量; E_{\min} 为储能电池最小电量; $E_B(t)$ 为时段 t 的电池储能容量; SOC_{\min} 和 SOC_{\max} 分别为最小和最大荷电状态; R 为电池容量。

在任何时段, 储能的总能量为储能初始能量和累积能量的总和:

$$\begin{cases} E_B(t) = E(0) + \sum_{i=1}^t E(i) \\ E(i) = P_B(i) T \\ E_{\min} \leq E(0) \leq E_{\max} \end{cases} \quad (12)$$

其中, $E(0)$ 为电池初始电量。

c. 储能电池日电量累积约束。

$$\sum_{t=1}^{96} P_B(t) = 0 \quad (13)$$

式(13)表示储能电池日累积电量为 0。

d. 冰蓄冷装置约束。

$$\begin{cases} 0 \leq Q_k(t) \leq Q_{k\max} \\ 0 \leq Q_i(t) \leq Q_{i\max} \\ \sum_{t=1}^{96} Q_i(t) T \leq Q_i \end{cases} \quad (14)$$

其中, $Q_{k\max}$ 为冰蓄冷制冷机组最大供冷量; $Q_i(t)$ 为时段 t 蓄冰槽供冷量; $Q_{i\max}$ 为蓄冰槽最大供冷量; Q_i 为蓄冰槽容量。

e. 水蓄冷装置约束。

$$\begin{cases} 0 \leq W_k(t) \leq W_{k\max} \\ 0 \leq W_i(t) \leq W_{i\max} \\ \sum_{t=1}^{96} W_i(t) T \leq W_i \\ W(t) + Q(t) = Q_{\text{sys}}(t) \end{cases} \quad (15)$$

其中, $W_k(t)$ 为时段 t 水蓄冷制冷机供冷量; $W_{k\max}$ 为水蓄冷制冷机组最大供冷量; $W_i(t)$ 为时段 t 蓄水罐供冷量; $W_{i\max}$ 为蓄水罐最大供冷量; W_i 为蓄水罐容量; $Q(t) = Q_i(t) + Q_k(t)$; $W(t) = W_i(t) + W_k(t)$; $Q_{\text{sys}}(t)$ 为

系统需要的供冷量。

1.3.3 IDR 过程

首先读取交/直流负荷、冷负荷以及分时电价的信息,然后基于此建立上述优化模型。在上述模型中,除式(6)外都是线性函数,式(6)是分段线性函数。因此,可以采用文献[17]中的分支定界法将含分段线性函数的线性优化问题转化成混合整数线性规划来求解。最终,可以得到储能电池的充放电策略,冰蓄冷、水蓄冷装置的响应行为以及全天的总电费值。

2 算例分析

在电力市场环境下,选取含分布式光伏、电储能、冰蓄冷和水蓄冷的工业园区负荷作为响应参与方。

正常情况下,由于工艺过程要求,大工业企业设备在一天内的负荷曲线变化十分平稳,无较大波动,负荷率较高,日峰谷差小,属于最理想的用户负荷状态。本文算例所用工业园区的交流负荷及冷负荷曲线分别如图 3、图 4 所示。

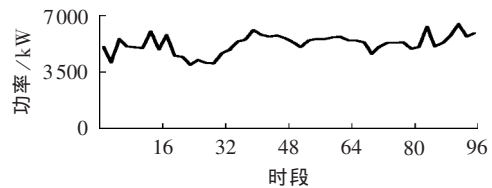


图 3 工业园区负荷曲线

Fig.3 Load curve of industrial park

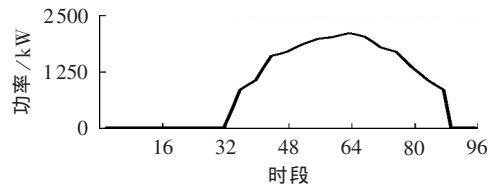


图 4 冷负荷曲线

Fig.4 Cooling load curve

由于和其他电池相比,锂电池具有高性能、安全和长寿命等特点,因此选择锂电池作为储能元件。电池参数如表 1 所示。分时电价的数据取自广州市 2016 年 1 月开始执行的分时电价,如表 2 所示。电储能和冰蓄冷装置的运行维护费用分别为 0.005 元/(kW·h)、0.0097 元/(kW·h)。直流负荷曲线如图 5 所示,光伏输出如图 6 所示。交直流转换效率设为 0.95^[11]。

每台冰蓄冷空调蓄水工况下的制冷量为 1758 kW/台,蓄冰工况下的制冷量为 1213 kW/台,功率为

表 1 电池参数

Table 1 Battery parameters

电池参数	数值	电池参数	数值
容量/(kW·h)	9600	最大荷电状态	0.9
充电电流限制/(A·h)	18000	最小荷电状态	0.3
放电电流限制/(A·h)	18000	充放电效率/%	95

表 2 分时电价
Table 2 TOU tariffs

时间段	价格/[元·(MW·h) ⁻¹]
低谷 00:00—08:00	364.7
平段 08:00—14:00 17:00—19:00 22:00—24:00	680.5
高峰 14:00—17:00 19:00—22:00	1 191.1

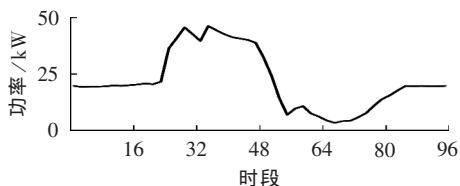


图 5 直流负荷
Fig.5 DC load

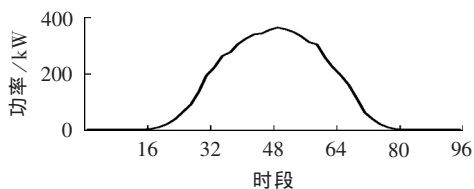


图 6 光伏出力
Fig.6 PV output

341 kW/台,蓄冷容量为 29 112 kW·h^[18]。

求解工业园区 IDR 模型,各时段工业负荷响应策略(储能电池荷电状态、冰蓄冷负荷分配)如图 7、8 所示。

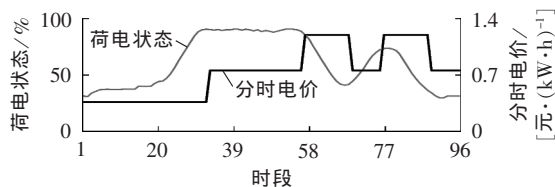


图 7 电池荷电状态
Fig.7 SOC of battery

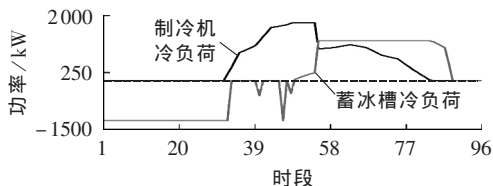


图 8 冰蓄冷装置负荷分配
Fig.8 Load distribution between cooling device of ice storage

由图 7、8 知,电池在凌晨低谷电价时段(00:00—08:00,荷电状态接近 90%)以及下午平段电价时段(17:00—19:00,荷电状态接近 75%)充电,而在高电价时段(14:00—17:00,19:00—22:00)放电;且为了满足负荷波动约束的要求,电池在平段电价时段(08:00—14:00)未动作。总体而言,由于电池的充放电,在低谷电价和平段电价时段的负荷急剧增加,

即由于峰价的激励,通过电池的充放电响应行为,将峰值电价时段的负荷成功转移到低电价时段和平段电价时段。可以看出 IDR 的实施提高了用户在系统运行和能源市场中的参与程度,充分挖掘了用户需求侧的调节潜力。

蓄冰槽在夜间低谷电价时段以最大的蓄冷能力蓄冷,在白天用电高峰时段用储存的冷量来供应全部或部分冷负荷,充分利用了夜间气温变化,提高了机组的产冷量;利用低谷段电力平衡峰谷用电负荷,缓解了电力供应紧张,并且使制冷设备长期在设计工作点上平衡运行,提高了整体用能效率。水蓄冷和冰蓄冷的响应行为类似,这里不多做讨论。

通过 IDR 模型优化后,用户侧的多种能源互补协同利用,能够给系统调节供需平衡提供“软托盘”,使得用户用能需求产生更大的弹性,充分发挥了能源互联网中的多能源置换效益。同时,IDR 的实施提高了用户在系统运行和能源市场中的参与程度,实现多能源系统的供需协调优化以及区域能源系统的自平衡,增加了工厂系统调节的灵活性。工业园区中的负荷变化情况如图 9 所示。

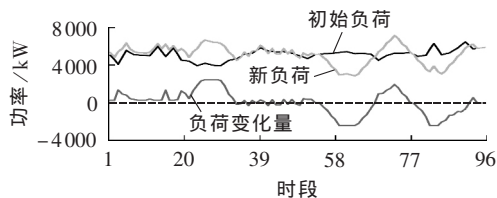


图 9 工业园区的负荷变化

Fig.9 Load curves of industrial park

通过多种能源的 IDR,使交直流转化和储能充放电时的能量损耗减小,优化了当地的可再生能源利用率。同时,在分时电价的激励下,成功地将峰值电价时段的负荷转移到低电价时段和平段电价时段,实现了电网的削峰填谷,并优化了当前的能源消费结构。同时,由于负荷波动的约束成功限制了负荷的波动率。经计算,经 IDR 后的系统负荷波动率 $l=0.18$ 。经 IDR 优化后的电费节约情况如下:IDR 优化前总电费成本为 93 458.8 元;IDR 优化后总电费成本为 84 941.8 元,其中能耗成本为 84 837.1 元,运维成本为 104.7 元,总成本比优化前节约了 8 517 元。

可见,IDR 的实施使用户能够对价格信号做出反应,依据价格信号调整自身不同类型能源使用需求和用能习惯,从而降低自身的用能成本,获得额外的经济效益。经过 IDR 优化后,节约了 9.1% 的电费。具体测算过程中约束个数为 1 056,变量个数为 1 725,迭代次数为 3 976,分支节点数为 72,总耗时 9.55 s。可以看出,此优化算法具有较高的计算效率,可以实现普遍推广。

上述光伏发电比较平稳。在实际情况中,光伏发

电具有随机性、波动性和间歇性等特点。讨论光伏发电存在较大波动时工业园区的 IDR 情况。光伏输出如图 10 所示。

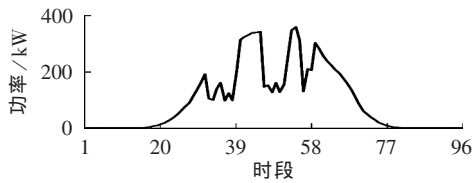


图 10 光伏出力
Fig.10 PV output

同样求解工业园区 IDR 模型,在光伏发电存在较大波动时各时段各类设备的响应策略(储能电池荷电状态、冰蓄冷负荷分配)及工业园区中负荷变化情况如图 11—13 所示。

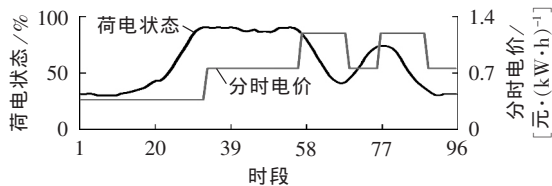


图 11 电池荷电状态
Fig.11 SOC of battery

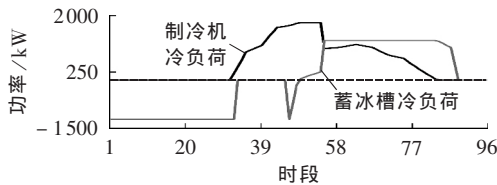


图 12 冰蓄冷装置负荷分配
Fig.12 Load distribution between cooling device of ice storage

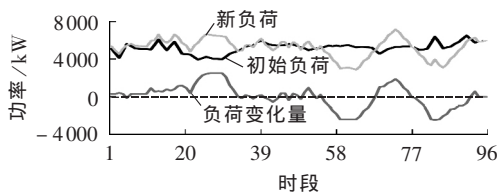


图 13 工业园区的负荷变化
Fig.13 Load curves of industrial park

经 IDR 优化后的电费节约情况如下:优化前总电费成本为 93956.8 元;优化后总电费成本为 85482.2 元,其中能耗成本为 85376.3 元,运维成本为 1059 元,总成本比优化前节约了 8474.6 元。

经计算求得当前情况下经过 IDR 后的系统负荷波动率 $l=0.19$,即由于储能的合理配置,平抑了光伏输出的波动,极大地提高了光伏的就地消纳能力。同时可以看出,在光伏发电存在较大波动时,各类设备的 IDR 行为不会发生明显变化,并且提出的 IDR 模型同样可以达到较好的效果。因此,所提模型同样适用于光伏发电波动较大的情况。可见,提出的 IDR

优化模型在工业园区中具有很好的推广价值。

3 结论

本文针对同时含光伏、电储能、冰蓄冷和水蓄冷等分布式资源的工业园区提出了一种考虑多能协同的工厂 IDR 模型。建立园区内能源系统 IDR 的物理和数学模型,并将其转换为混合整数线性规划用分支定界法进行求解。

结果表明,IDR 的实施能够给工厂的多个环节带来一定的效益,在工业园区中具有很好的推广价值。

a. 从系统运行层面来看,IDR 能够促使能量在不同层级能源系统中切换和梯级利用,提升工厂整体的用能效率。同时,用户侧的多能源互补协同利用,能够给系统调节供需平衡提供“软托盘”,使得用户用能需求产生更大的弹性,更好地实现了电网的削峰填谷,缓解电网压力。

b. 从用户用能层面来看,IDR 的实施使用户能够依据价格信号调整自身不同类型能源使用需求和用能习惯,从而降低自身的用能成本。同时,光伏、储能、冰蓄冷以及水蓄冷等分布式资源的接入,使得在需求侧能够以较低的成本实现能量存储,增加了用户用能的灵活性,使用户拥有更大容量的“虚拟能量单元”,能够直接参与辅助服务或者能量市场的交易,提高自身收益。

c. 此外,IDR 的实施能够增加工厂系统调节的灵活性,提高用户在系统运行和能源市场中的参与程度,充分挖掘用户需求侧的调节潜力,实现多能源系统的供需协调优化以及区域能源系统的自平衡;且所提 IDR 模型在光伏发电波动较大时同样适用,提高了系统中可再生能源的接入比例以及系统运行调控的灵活性。

参考文献:

- [1] 曾鸣,杨雍琦,刘敦楠,等. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J]. 电网技术,2016,40(1):114-124.
ZENG Ming, YANG Yongqi, LIU Dunnan, et al. “Generation-grid-load-storage” coordinative optimal operation mode of energy internet and key technologies[J]. Power System Technology, 2016, 40(1):114-124.
- [2] SHEIKHI A,BAHRAMI S,RANJBAR A M. An autonomous demand response program for electricity and natural gas networks in smart energy hubs[J]. Energy, 2015, 89:490-499.
- [3] 沈颖忱. 工业园区能源供给系统优化配置方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.
SHEN Yingchen. Research on optimal allocation of energy supply system in industrial park[D]. Chongqing:Chongqing University, 2016.
- [4] 张钦. 智能电网下需求响应热点问题探讨[J]. 中国电力, 2013, 46(6):85-90.
ZHANG Qin. Exploration of hot issues on demand response in

- smart grids[J]. *Electric Power*,2013,46(6):85-90.
- [5] SONG M,ALVEHAG K,WIDÉN J,et al. Estimating the impacts of demand response by simulating household behaviours under price and CO₂ signals[J]. *Electric Power Systems Research*,2014,111(111):103-114.
- [6] 李扬,王治华,卢毅,等. 峰谷分时电价的实施及大工业用户的响应[J]. *电力系统自动化*,2001,25(8):45-48.
LI Yang,WANG Zhihua,LU Yi,et al. The implementation of peak and valley time price for electricity and the response of large industries[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2001,25(8):45-48.
- [7] PAZOUKI S,HAGHIFAM M R. Optimal planning and scheduling of energy hub in presence of wind,storage and demand response under uncertainty[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*,2016,80:219-239.
- [8] REZAEI N,KALANTAR M. Smart microgrid hierarchical frequency control ancillary service provision based on virtual inertia concept:an integrated demand response and droop controlled distributed generation framework[J]. *Energy Conversion & Management*,2015,92(92):287-301.
- [9] NOLAN S,O'MALLEY M. Challenges and barriers to demand response deployment and evaluation[J]. *Applied Energy*,2015,152:1-10.
- [10] GILS H C. Economic potential for future demand response in Germany—modeling approach and case study[J]. *Applied Energy*,2016,162(4):401-415.
- [11] 王成山,洪博文,郭力. 不同场景下的光蓄微电网调度策略[J]. *电网技术*,2013,37(7):1775-1782.
WANG Chengshan,HONG Bowen,GUO Li. Dispatch strategies of PV-battery microgrid in different scenarios[J]. *Power System Technology*,2013,37(7):1775-1782.
- [12] 赵耀. 基于分布式电源的微网控制及运行优化研究[D]. 天津:南开大学,2013.
ZHAO Yao. Research on microgrid control and operation optimization based on distributed power supply[D]. Tianjin: Nankai University,2013.
- [13] WU Z,ZHOU S,LI J,et al. Real-time scheduling of residential appliances via conditional risk-at-value[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*,2014,5(3):1282-1291.
- [14] 吴杰. 冰蓄冷空调系统负荷预测模型和系统优化控制研究[D]. 杭州:浙江大学,2002.
WU Jie. Load forecasting model and system optimization control of ice storage air conditioning system[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2002.
- [15] LOCMENT F,SECHILARIU M,HOUSSAMO I. DC load and batteries control limitations for photovoltaic systems—experimental validation[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*,2012,27(9):4030-4038.
- [16] 龚薇,刘俊勇,贺星棋,等. 计及负荷波动率和互补系数的负荷恢复[J]. *电网技术*,2014,38(9):2490-2496.
GONG Wei,LIU Junyong,HE Xingqi,et al. Load restoration considering load fluctuation rate and load complementary coefficient[J]. *Power System Technology*,2014,38(9):2490-2496.
- [17] 钱颂迪,甘应爱,陈秉正,等. 运筹学[M]. 北京:清华大学出版社,2005:114-132.
- [18] 王修岩,高冲,李宗帅. 冰蓄冷空调系统的多目标优化控制策略研究[J]. *计算机测量与控制*,2015,23(12):4057-4059.
WANG Xiuyan,GAO Chong,LI Zongshuai. Multi-objective optimization control strategy research for ice storage air-conditioning system[J]. *Computer Measurement and Control*,2015,23(12):4057-4059.

作者简介:



何仲潇

何仲潇(1993—),男,四川邛崃人,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统的优化调度(E-mail:hezxx@zju.edu.cn);

徐成司(1995—),男,浙江温州人,主要研究方向为配电网优化调度(E-mail:3140103128@zju.edu.cn);

刘育权(1971—),男,湖南怀化人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统运

行与控制(E-mail:liuyuq@guangzhou.csg.cn)。

Industrial park IDR model considering multi-energy cooperation

HE Zhongxiao¹,XU Chengsi¹,LIU Yuquan²,HUA Huangsheng²,DONG Shufeng¹

(1. College of Electrical Engineering,Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Guangzhou Power Supply Co. Ltd.,Guangzhou 510620, China)

Abstract: In the background of energy internet,the decentralized energy market and the energy network structure make traditional DR(Demand Response) gradually develop towards IDR(Integrated Demand Response). As the expansion of DR in energy internet,IDR is an important entry of users for their participating in the system dispatch,transmitting the price signals of energy market and participating in the energy market. An industrial park IDR model is proposed,which considers various distributed energy sources,such as photovoltaic power,battery storage,ice storage,water storage,and so on. The physical and mathematical IDR models of industrial park energy system are established and transformed into a mixed integer linear programming,which is solved by the branch and bound method. Simulative results show that,owing to the IDR model optimization,multi-energy cooperation and reasonable user comprehensive energy utilization scheme,the user-side energy consumption efficiency is improved and the user's energy consumption cost is reduced;the proposed model brings benefits to industrial park in the aspects of economy,flexibility and system operation.

Key words: IDR; industrial park; multi-energy cooperation; economic dispatch; models