

基于多能互补的电/热综合需求响应

徐航¹, 董树锋^{1,2}, 何仲潇^{1,2}, 施云辉¹, 王莉³, 刘育权³

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027;

2. 清华四川能源互联网研究院, 四川省 成都市 610000;

3. 广州供电局有限公司, 广东省 广州市 510620)

Electro-thermal Comprehensive Demand Response Based on Multi-energy Complementarity

XU Hang¹, DONG Shufeng^{1,2}, HE Zhongxiao^{1,2}, SHI Yunhui¹, WANG Li³, LIU Yuquan³

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

2. Tsinghua Sichuan Energy Internet Research Institute, Chengdu 610000, Sichuan Province, China;

3. Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510620, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: The industrial load with high level of automation is stable, thus it has great demand response potential. There are different demands of various energy for industrial users. Each energy subsystem has relationship of coupling and complementarity. This paper proposed a comprehensive demand response mechanism based on multi-energy complementarity from the perspective of industrial users, where the user's demand for multi-energy, such as cooling, heating and electric, is included in demand response range. Meeting the peak load demand of higher authorities is regarded as optimization objective with the constraints of physical, energy balance and new demand response. The mixed integer linear programming method is used to solve the problem and the response strategy of electric/heating demand is obtained. An example analysis shows that the proposed strategy can further excavate the user's response potential and guide the user to formulate reasonable demand response plan. Compared with traditional demand response strategies, the loss of user side is smaller, the response degree is higher, beneficial to achieve win-win of power grid companies and the users.

KEY WORDS: multi-energy complementation; comprehensive demand response; industrial user; demand response potential

摘要: 工业园区中工业负荷稳定、自动化水平高, 具有较大的需求响应潜力。工业用户对多能源存在需求差异, 各个能源子系统存在耦合互补的关系。从工业用户角度出发, 将用户对于冷、热、电多能流的需求纳入需求响应范围内, 提出基于多能互补的电/热综合需求响应机制。以满足上级调峰需求为优化目标, 在设备物理约束、能量平衡约束及新增需求响应约束下, 采用混合整数线性规划法进行求解, 最终得到电/热综合需求响应策略。算例分析表明, 所提策略可进

一步挖掘用户的响应潜力, 并指导用户合理制定需求响应方案; 相较传统需求响应策略, 该策略用户侧损耗较小, 响应程度更高, 有利于实现电网公司与用户侧的共赢。

关键词: 多能互补; 综合需求响应; 工业用户; 需求响应潜力

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2018.2234

0 引言

需求响应(demand response, DR)是整合用户侧电网响应潜力的有效手段^[1], 需求侧与电网进行“双向互动”, 可缓解电力供应紧张矛盾、平衡间歇性可再生能源带给电网的波动, 从而有效提升电网运行的安全与稳定性^[2-3]。工业多元用户是工业园区典型的用能主体, 其工业生产往往涉及到冷、热、电多能的耦合与转换^[4]。工业用户负荷稳定且自动化水平高, 与商业、居民用户相比具有更大的响应容量, 是重要的 DR 资源^[5]。然而, 传统工业园区缺乏统一的用能优化与调度管理, 工业用户负荷的响应潜力难以得到进一步的挖掘与利用。因此, 研究工业园区多元用户的综合需求响应策略是引导用户优化用能结构、实现园区内多能流友好交互的关键。

目前, 国内外对于需求响应策略的研究已有较多研究成果。文献[6]提出了生活电器效用分级的方法, 从而确定其动态控制优先级, 用于指导需求侧的实施。文献[7]针对居民用户的需求响应资源, 基于统一建模语言, 设计了需求响应业务建模方法。文献[8]以分布式光伏消纳最大化作为优化目标, 制定负荷的需求响应方案。商业楼宇的温控负荷是商业用户参与电网调峰的优选对象^[9], 通过对温控负

基金项目: 国家重点研发计划资助(2016YFB0901300)。

The National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0901300)。

度-170) ,可作为吸收式制冷机的热源或者用于制备热水。工厂中主要的制冷设备包括吸收式制冷机、用户空调和蓄冰装置。吸收式制冷机可利用回收的低品位热进行制冷作业。蓄冷装置可利用低谷价的电能进行蓄冰作业,并在需要时释放冷量,与电池储能系统也起到类似的削峰填谷的效果。在冷量不足时,用户空调作为调峰设备补充冷量。若用户空调、蓄冷装置等电制冷设备皆满发尚不能满足冷负荷需求,且吸收式制冷机由于低品位热蒸汽不足尚未满发时,则吸收式制冷机利用外购中品位热蒸汽进行制冷。

园区管理中心负责整个园区的互动与协调,确保园区的用能安全。在园区的优化调度过程中,园区管理中心根据各个工业用户上传的用能计划进行风险评估,当有可能出现用电高峰时,园区管理中心将调峰需求进行分解,并以具体的调峰指令发布给工业用户,引导其进行需求响应。园区管理中心会与确定参与需求响应的用户签订响应合约,用户需严格按照合约执行运行计划,否则需支付相应的违约费用。

传统的调峰过程中,园区管理中心所下达的调峰指令主要为削峰时段需削减的电关口功率。工业用户通过调整其用能策略或削减电负荷,从而减少削峰时段的购电需求,达到削峰的目的。在园区中,CHP 不仅能够输出热蒸汽,所产生电能既能供给园区使用又可售卖给供电公司,因此,园区可通过电网购电与 CHP 购电满足园区电负荷需求。因此,园区管理中心可通过补贴激励的方式可刺激用户提升对外的购热需求,园区 CHP 增加热输出的同时也增加了发电量,新增发电量优先供给园区使用,从而减少园区整体的电网购电功率,同样可达到削峰填谷的效果。而新增发电量取决于提升的热需求和园区 CHP 的热电比 R_{CHP} 。

2 工业用户典型设备建模

2.1 设备准稳态模型

针对图 1 中的工业用户主要设备,建立准稳态模型。由于工业生产中的热力管道温度都为恒定的,热蒸汽的供应取决于蒸汽流量的控制。为统一优化变量,本文以热能可满足的等效热负荷表示其所具备的可用能。

$$H_{grad}(t) = F_{grad}(t) \cdot \lambda_{grad} / 3600 \quad (2)$$

式中 $F_{grad}(t)$ 、 $H_{grad}(t)$ 和 λ_{grad} 分别为该品位热能的消耗速率(单位为 t/h)、等效热负荷(单位为 kW)与热值(单位为 kJ/t)。

1) 蒸汽驱动设备。

蒸汽驱动设备是工业生产过程中常见的生产设备,通常以较高温度的热蒸汽作为其驱动热源,同时能够回收剩余低品位热供给吸收式制冷机或用于制备热水。

$$H_{steam_low}(t) = H_{steam}(t) \cdot \eta_{steam_low} \quad (3)$$

式中: $H_{steam}(t)$ 为工业用户的蒸汽需求负荷; $H_{steam_low}(t)$ 为蒸汽驱动设备回收的低品位热功率; η_{steam_low} 为蒸汽驱动设备低品位热回收效率。

2) 吸收式制冷机。

吸收式制冷机能够利用工业生产过程中的余热进行制冷作业,是冷、热耦合的关键设备。本文采用单效吸收式制冷机模型,其制冷性能系数较低,但能够利用低品位热源。

$$Q_{Br}(t) = H_{Br}(t) \cdot I_{COP}^{Br} \quad (4)$$

式中: $Q_{Br}(t)$ 和 $H_{Br}(t)$ 分别为吸收式制冷机制冷功率与耗热功率; I_{COP}^{Br} 为吸收式制冷机制冷能效比。

3) 用户空调。

用户空调是常见的电制冷设备,其制冷量与其输入电能成正比。

$$Q_{cond}(t) = P_{cond}(t) I_{COP}^{cond} \quad (5)$$

式中: $Q_{cond}(t)$ 和 $P_{cond}(t)$ 分别为用户空调的制冷功率与耗电功率; I_{COP}^{cond} 为用户空调的制冷能效比。

4) 蓄冷装置。

蓄冷装置能利用低电价电能将冷能存储于蓄冷介质中,并在需要时将其释放。

$$S_{ice}(t+1) = (1 - \sigma_{ice}) S_{ice}(t) + \frac{P_{ice_s}(t) I_{COP}^{ice} T - Q_{ice_r}(t) T}{\eta_{ice_r}} \quad (6)$$

式中: $S_{ice}(t)$ 为蓄冷装置的容量; $P_{ice_s}(t)$ 和 $Q_{ice_r}(t)$ 为蓄冷装置的蓄冷耗电功率与融冰制冷功率; I_{COP}^{ice} 为蓄冷装置的制冷能效比; η_{ice_r} 为蓄冷装置的融冰效率; σ_{ice} 为蓄冷装置的自损耗系数; T 为单位时段长度。蓄冷与融冰作业不可同时进行。

5) 电池储能系统。

$$S_{ES}(t+1) = (1 - \sigma_{ES}) S_{ES}(t) + [\eta_{ES}^s P_{ES_s}(t) - \frac{P_{ES_r}(t)}{\eta_{ES}^r}] T \quad (7)$$

式中: $S_{ES}(t)$ 为电池储能容量; $P_{ES_s}(t)$ 和 $P_{ES_r}(t)$ 分别为电池储能的充电功率与放电功率; η_{ES}^s 和 η_{ES}^r 分别为电池储能的充电效率和放电效率。

2.2 约束条件

除了设备自身的物理约束外,还需考虑冷、热、

电功率平衡约束。

1) 电功率平衡约束。

$$P_{\text{buy}}(t) + P_{\text{PV}}(t) = P_{\text{load}}(t) + P_{\text{cond}}(t) + P_{\text{ice}_s}(t) + P_{\text{ES}_s}(t) - P_{\text{ES}_r}(t) \quad (8)$$

式中： $P_{\text{buy}}(t)$ 为用户关口购电功率； $P_{\text{PV}}(t)$ 为光伏发电功率； $P_{\text{load}}(t)$ 为电负荷需求。

2) 冷功率平衡约束。

$$Q_{\text{Br}}(t) + Q_{\text{cond}}(t) + Q_{\text{ice}_r}(t) = Q_{\text{load}}(t) \quad (9)$$

式中 $Q_{\text{load}}(t)$ 为系统冷负荷。

3) 热功率平衡约束。

$$H_{\text{buy}}(t) \geq \frac{H_{\text{steam}}(t)}{\varepsilon_{\text{steam_loss}}} \quad (10)$$

$$H_{\text{low}}(t) \leq H_{\text{steam_low}}(t) \quad (11)$$

$$H_{\text{buy}}(t) + H_{\text{low}}(t) = \frac{H_{\text{steam}}(t)}{\varepsilon_{\text{steam_loss}}} + \frac{H_{\text{water}}(t)}{\varepsilon_{\text{water_loss}}} + \frac{H_{\text{Br}}(t)}{\varepsilon_{\text{Br_loss}}} \quad (12)$$

式中： $H_{\text{buy}}(t)$ 为外购热功率； $H_{\text{low}}(t)$ 为被利用的低品位热功率； $H_{\text{water}}(t)$ 为热水负荷； $\varepsilon_{\text{steam_loss}}$ 、 $\varepsilon_{\text{water_loss}}$ 和 $\varepsilon_{\text{Br_loss}}$ 分别为供热给蒸汽驱动负荷、热水负荷及吸收式制冷机时的转化效率。式(10)表示外购热蒸汽必须满足蒸汽驱动负荷需求，式(11)表示低品位热的主要来源为蒸汽驱动负荷回收的低品位热，式(12)表示热源必须能满足所有的热负荷需求，其中低品位热可作为吸收式制冷机的驱动热源或用于制备热水，当低品位热不足以使吸收式制冷机满发，而用户又要求吸收式制冷机持续制冷时，吸收式制冷机可利用外购中品位热进行制冷作业。同理，当低品位热无法满足热水负荷时，可利用外购热制备热水。此外，考虑到能量转化过程中是存在能量损耗的，引入热转化效率，即热负荷实际所需热能为 $H_{\text{load}}(t) / \varepsilon_{\text{load_loss}}$ ，其中 $H_{\text{load}}(t)$ 为热负荷， $\varepsilon_{\text{load_loss}}$ 为供热给该负荷的转化效率。

4) 储能设备约束。

$$S(t_{\text{start}}) = S(t_{\text{final}}) \quad (13)$$

$$0 \leq w_r(t) \leq \gamma_r(t) w_r^{\text{max}} \quad (14)$$

$$0 \leq w_s(t) \leq \gamma_s(t) w_s^{\text{max}} \quad (15)$$

$$0 \leq \gamma_s(t) + \gamma_r(t) \leq 1 \quad (16)$$

式中： t_{start} 和 t_{final} 分别表示调度起始时刻与终止时刻；调度周期前后，储能设备的容量应保持一致； w_s^{max} 和 w_r^{max} 分别表示储能的最高充电和放电功率； $\gamma_s(t)$ 和 $\gamma_r(t)$ 分别表示储能处于时段 t 处于充能和放能的 0-1 状态变量， $\gamma_s(t)$ 取 1 表示充电， $\gamma_r(t)$ 取 1 表示放电。式(16)保证储能不能同时充放电。上述约束对电池储能和冰蓄冷设备均适用。

3 电/热综合需求响应模型

3.1 目标函数

工业用户的日运行费用 C_{day} 由购电成本 C_e 、购热成本 C_h 、设备运行维护成本 C_{om} 和工厂隐性收益 C_{rec} 构成，即

$$C_{\text{day}} = C_e + C_h + C_{\text{om}} - C_{\text{rec}} \quad (17)$$

式中 C_{rec} 为当用户增加热负荷需求后，工厂产量提升所带来的隐性收益。该收益存在于需求响应阶段。将全天分为 96 个时段，则 C_{rec} 与新增热负荷需求的关系为

$$C_{\text{rec}} = \sum_t \lambda_{\text{heat}} H_{\text{steam_add}}(t) T \quad (18)$$

式中： $H_{\text{steam_add}}(t)$ 为工业用户的新增蒸汽负荷需求热功率； λ_{heat} 为隐性收益系数，取决于用户的工业模式； T 为单位时段长度。

园区主要通过电网购电和向 CHP 购电满足园区电负荷需求，其中 CHP 的发电量优先供给园区使用，因此，当园区存在削峰需求时，可通过降低用户购电需求或提升 CHP 发电量 2 种方法来减少园区电网购电功率，从而达到削峰的效果。因此，用户可根据园区管理中心下发的调峰指令，利用工厂内多能流耦合机制，调整各个设备的用能策略，降低削峰时段的电关口功率并使之尽量接近削峰目标；或者是通过补贴激励的方式引导用户增加对热的需求，从而增大园区 CHP 的发电量。以上 2 种削峰方案可同步执行，以获得更大的响应潜力。即“用户降低的购电需求+用户使 CHP 新增的发电量”尽量满足削峰需求即可。 t_0-t_1 为削峰时段，需求响应优化目标为

$$\min \sum_{t_0}^{t_1} \left\{ \frac{H_{\text{buy_DR}}(t) - H_{\text{buy}}(t)}{R_{\text{CHP}}} + [P_{\text{buy_DR}}(t) - P_{\text{buy}}(t)] - \Delta P_{\text{ref}}(t) \right\} \quad (19)$$

式中： $H_{\text{buy_DR}}(t)$ 和 $P_{\text{buy_DR}}(t)$ 分别为用户需求响应后关口购热功率曲线和关口购电功率曲线； $\Delta P_{\text{ref}}(t)$ 为园区下发的削峰指令，即需要削减的购电功率。

3.2 约束条件

除 2.2 中的约束条件，还应考虑如下约束。

1) 非削峰时段电关口功率约束。

$$P_{\text{buy_DR}}(t) \leq P_{\text{upper}}(t), t \notin [t_0, t_1] \quad (20)$$

式中 $P_{\text{upper}}(t)$ 为购电上限。

2) 非削峰时段热关口功率约束。

$$H_{\text{buy_DR}}(t) \geq H_{\text{lower}}(t), t \notin [t_0, t_1] \quad (21)$$

式中 $H_{\text{lower}}(t)$ 为购热上限。

3) 等比例削峰约束。

为防止工业用户在削峰时段的前半部分将可调控资源用尽,导致削峰时段后半部分无可用的调控资源,需添加等比例削峰约束,保证可调控资源的均衡分配。

$$\frac{P_{\text{buy_DR}}(t) - P_{\text{buy}}(t)}{\Delta P_{\text{ref}}(t)} = \frac{P_{\text{buy_DR}}(t+1) - P_{\text{buy}}(t+1)}{\Delta P_{\text{ref}}(t+1)} \quad (22)$$

$$\frac{H_{\text{buy_DR}}(t) - H_{\text{buy}}(t)}{\Delta H_{\text{ref}}(t)} = \frac{H_{\text{buy_DR}}(t+1) - H_{\text{buy}}(t+1)}{\Delta H_{\text{ref}}(t+1)} \quad (23)$$

4) 削峰时段的需求响应热约束。

在补贴政策的激励下,工业用户会在削峰时段根据自身情况增加其对热的需求。为保证不浪费中品位热,同时尽可能扩大热需求的上升空间,则需要削峰时段的热功率平衡约束进行修正。

$$H_{\text{low}}(t) \leq H_{\text{steam_low}}(t) + H_{\text{steam_add}}(t) \cdot \eta_{\text{steam_low}} \quad (24)$$

$$\frac{H_{\text{steam}}(t) + H_{\text{steam_add}}(t)}{\varepsilon_{\text{steam_loss}}} \leq H_{\text{buy_DR}}(t) \leq \frac{H_{\text{Br}}(t) + H_{\text{steam}}(t) + H_{\text{steam_add}}(t)}{\varepsilon_{\text{Br_loss}} + \varepsilon_{\text{steam_loss}}} \quad (25)$$

$$H_{\text{buy_DR}}(t) + H_{\text{low}}(t) = \frac{H_{\text{steam}}(t)}{\varepsilon_{\text{steam_loss}}} + \frac{H_{\text{steam_add}}(t)}{\varepsilon_{\text{steam_loss}}} + \frac{H_{\text{water}}(t)}{\varepsilon_{\text{water_loss}}} + \frac{H_{\text{Br}}(t)}{\varepsilon_{\text{Br_loss}}} \quad (26)$$

其中,式(24)表示新增蒸汽热负荷后,同时也会产生新的蒸汽回收低品位热,使得低品位热增加。式(25)与式(26)表示:外购热功率必须基于实际负荷需求,不应在超出热需求的情况下,为满足调峰需求而盲目增加外购热,从而造成外购热蒸汽的浪费,即外购热功率除了需满足所有蒸汽负荷需求,还存在购买上限,具体表现为:当 $\Delta H_{\text{ref}}(t) \leq H_{\text{steam_add}}(t)$ 时,工业用户的蒸汽热负荷响应潜力大于热响应需求时,新增外购热全部用于满足新增蒸汽热负荷,吸收式制冷机依旧优先使用低品位热进行制冷作业;当 $\Delta H_{\text{ref}}(t) > H_{\text{steam_add}}(t)$ 时,为尽量满足调峰需求,吸收式制冷机优先使用外购中品位热进行制冷作业,剩余部分由低品位补充;即外购热功率的上限为 $H_{\text{steam}}(t) + H_{\text{steam_add}}(t) + H_{\text{Br}}(t)$,其中 $H_{\text{Br}}(t) \leq H_{\text{Br_max}}$, $H_{\text{Br_max}}$ 为吸收式制冷机最大耗热功率。此时,工业用户的最大热需求响应潜力为 $H_{\text{steam_add}}(t) + H_{\text{Br_max}}$ 。

最后,采用混合整数线性规划法对上述模型进行求解,可得到工业用户电/热综合需求响应策略,

计算出工业用户的响应容量,并上报给园区管理中心。园区管理中心根据不同用户的响应容量及响应报价对参与需求响应的用户进行选择,并对用户进行补贴。

4 算例分析

本文以广州某工业园区的一个典型工业用户为研究对象进行分析。工厂内各个设备参数如附录 A 表 A1—A3 所示。该工业用户的冷、热、电、蒸汽负荷曲线如附录 B 图 B1 所示。电价数据来自于广州 2017 年 1 月起执行的分时电价。高峰时段为 14:00—17:00、19:00—22:00,低谷时段为 00:00—08:00;平谷时段为 08:00—14:00、17:00—19:00、22:00—24:00。按照高峰电价 1.05 元/kW·h,低谷电价 0.35 元/(kW·h),平段电价 0.66 元/kW 计费。外购热蒸汽价格为 348 元/t,折合为单位热值的价格为 0.435 元/(kW·h)。园区下发调峰指令为:在 18:00—19:00 时段,削峰需求为 1.8 MW,园区 CHP 热电比为 1.5。工业用户接受到调峰指令后,确认自身对热需求的提升上限为 0.8 MW,工厂的隐性收益系数为 0.4 元/(kW·h)。基于此,该工业用户进行电/热综合需求响应,图 2—5 为工业用户综合需求响应结果。图 4 中工厂的完整响应过程如附录 B 图 B2 所示。

由图 2、3 可知,削峰时段,工业用户的购电关口下降 815.27 kW,购热功率增加 1477.10 kW,使园区 CHP 多发了 984.73 kW 的电量,从而满足 100% 园区调峰需求。图 4 为电/热综合需求响应前后电平衡优化调度结果,附录 B 图 B3—B5 为需求响应前后各个制冷设备的运行出力变化情况。可知,需求响应前,工厂通过合理控制设备的运行状态与出力,保证工厂运行的经济性。为此,电池储能系统在谷时段充电,在平时段补充电能 1 次,在峰时段放电;吸收式制冷机利用系统产生的余热进行制冷作业,冷量不足部分由空调或冰蓄冷装置补充。需求响应后,为尽量满足上级的削峰需求,电池储能第 2 次放电时刻提前,最佳补充电能的时段缩短,需在平时段补充电能 2 次。然而 75 点时储能的放电功率已达到最大,但是依旧无法满足削峰需求,需通过适当调整制冷设备的运行状态,来达到减少用电的目的,具体调整如下:将冰蓄冷释放夜间存储冷量的时段提前;吸收式制冷机利用部分中品位热蒸汽作为热源进行制冷,达到满发,从而在满足冷负荷的前提下,减少该时刻的耗电量。

图 5 为电/热综合需求响应前后中品位热平衡

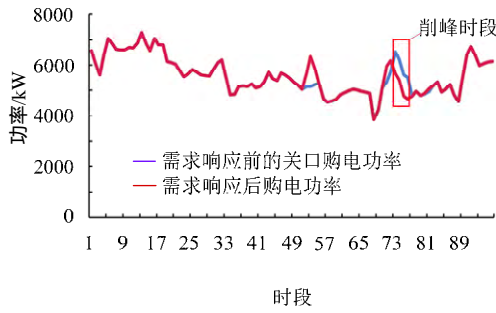


图 2 综合需求响应前后电关口功率变化结果

Fig. 2 Power change results of integrated demand response

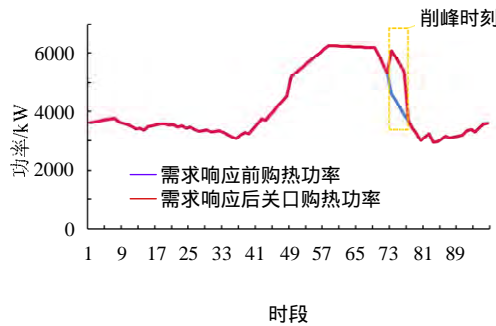
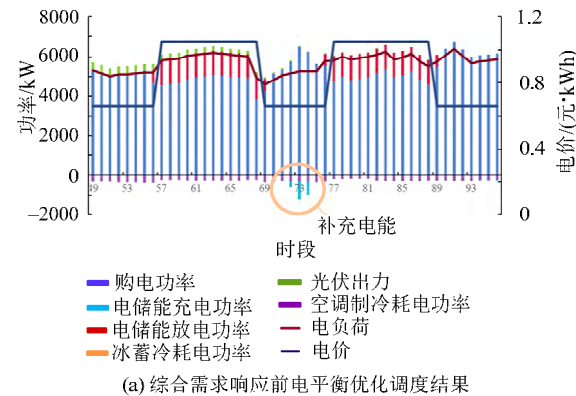
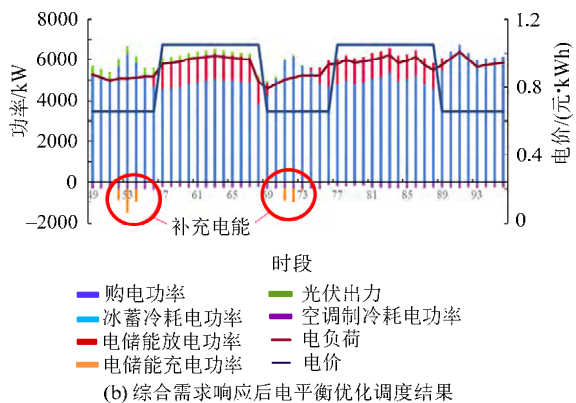


图 3 综合需求响应前后热关口功率变化结果

Fig. 3 Heat change results of integrated demand response



(a) 综合需求响应前电平衡优化调度结果

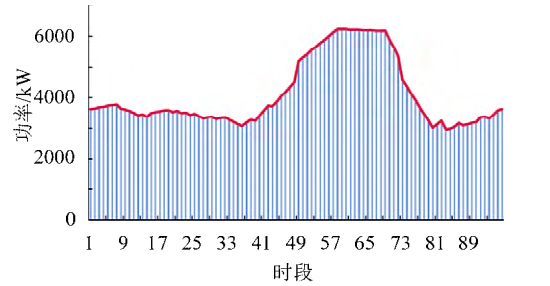


(b) 综合需求响应后电平衡优化调度结果

图 4 综合需求响应前后电力平衡优化调度结果

Fig. 4 Optimal scheduling results of power balance of integrated demand response

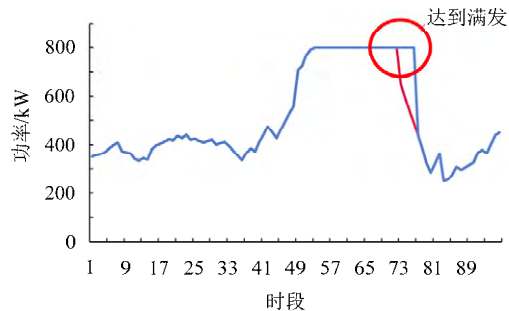
优化调度结果及吸收式制冷机的出力变化情况。可知，用户基于自身实际情况情况，新增蒸汽负荷为 0.8 MW，需求响应过程中为尽量满足调峰需求，吸



(a) 综合需求响应前中品位热平衡优化调度结果



(b) 综合需求响应后中品位热平衡优化调度结果



(c) 综合需求响应前后吸收式制冷机出力变化情况

图 5 综合需求响应前后中品位热平衡优化调度结果

Fig. 5 Optimal scheduling results of medium grade heat balance of integrated demand response

收式制冷机以外购中品位热蒸汽为主要驱动热源，增加外购热数量。在达到调峰要求之后，低品位热持续补充，吸收式制冷机达到满发状态。

为突出本文所提综合需求响应策略的经济优越性，进行传统多能互补需求响应仿真和传统需求响应仿真对比，可得出如下结论：

1) 传统多能互补需求响应仅通过改变工厂设备出力及运行状态，使购电关口功率尽可能贴近削峰目标。通过传统多能互补需求响应，工厂购电关口功率下降 815.27 kW，仅能满足 45.29% 的削峰需求，该需求响应策略日运行费用为 127 697.61 元。

2) 传统需求响应主要通过控制可中断负荷实现相同效果的削峰，工厂所遭受的损失由电力公司进行补贴。为实现相同的削峰效果，选择参数如附

录 A 表 A4 的可中断负荷进行操作控制,根据式(1)可知,用户损失费用约为 1769.75 元。

3) 该用户通过优化调度制定的用能策略所需的日运行费用为 127 600.47 元。进行传统多能互补需求响应和电/热综合需求响应之后,工厂日运行费用分别为 127 697.61 元和 127 961.70 元,则可认为在传统多能互补需求响应策略和电/热综合需求响应策略下用户多付出或损失的费用分别为 97.14 元和 361.23 元。

以上 3 种需求响应策略下,用户损失情况如表 1 所示。可知,电/热综合需求响应策略与传统多能互补需求响应策略的工业用户损失费用远少于传统需求响应,则电网公司所需要补贴的费用更少;虽然传统多能互补响应策略下用户损失费用较低,但响应潜力有限,无法完全满足调峰需求。因此,计及多能互补的电/热需求响应方法能充分挖掘工业用户的需求响应潜力,以较低的用户损失费用最大程度满足调峰需求,实现电网公司与用户侧的互利共赢。

表 1 不同需求响应策略下的工业用户损失费用
Tab. 1 Loss cost of industrial users under different demand response strategies

需求响应策略	用户损失费用/元	调峰需求满足程度/%
传统需求响应策略	1769.75	89.58
传统多能互补响应策略	97.14	45.29
电/热综合需求响应策略	361.23	100

5 结论

本文基于传统需求响应调度,将用户对于冷、热、电能的需求纳入需求响应范围内,提出了基于多能互补的电/热综合需求响应策略。该策略以满足上级调峰指令为目标,充分考虑工业生产过程中热能的梯级利用与多能源的差异互补性,为工业用户制定需求响应方案提供支持。本文所提策略有以下几个优势:

1) 本文从工业用户的角度出发,使用户可根据园区的调峰指令合理制定电/热需求综合响应策略,能够有效地缓解电力缺额,提高工业园区的用电安全性与稳定性。

2) 充分考虑工业园区多能系统的耦合关系,相较传统的多能优化需求响应方案能够进一步挖掘用户的需求响应潜力,从而为园区削峰提供充足的响应资源。

3) 较传统需求响应策略,用户侧损失更小,则电网公司产生的调度费用更小,有利于实现电网公司与用户侧的共赢,提高用户参与园区能量互动

的积极性。

本文所提方法能够增加用户的需求响应潜力,并通过与用户签订响应合约来实施需求响应策略。而合理的激励机制能够更有效地激发工业用户参与响应积极性。激励机制中一般包含用户固定补偿、失负荷补偿、响应成本及不响应惩罚等四个因素。其中失负荷补偿和不响应惩罚是激发响应积极性的关键,合理设计失负荷补偿的补偿系数以及奖惩机制,能够激励用户更积极参与需求响应,是本文进一步研究的方向。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/volumn/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 杨旭英,周明,李庚银.智能电网下需求响应机理分析与建模综述[J].电网技术,2016,40(1):220-226.
Yang Xuying, Zhou Ming, Li Gengyin. Survey on demand response mechanism and modeling in smart grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 220-226(in Chinese).
- [2] 王蓓蓓.面向智能电网的用户需求响应特性和能力研究综述[J].中国电机工程学报,2014,34(22):3654-3663.
Wang Beibei. Research on consumers' response characteristics and ability under smart grid: a literatures survey[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3654-3663(in Chinese).
- [3] 陆俊,朱炎平,彭文昊,等.计及用电行为为聚类的智能小区互动化需求响应方法[J].电力系统自动化,2017,41(17):113-120.
Lu Jun, Zhu Yanping, Peng Wenhao, et al. Interactive demand response method of smart community considering clustering of electricity consumption behavior[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 113-120(in Chinese).
- [4] 姜子卿,郝然,艾芊.基于冷热电多能互补的工业园区互动机制研究[J].电力自动化设备,2017,37(6):260-267.
Jiang Ziqing, Hao Ran, Ai Qian. Interaction mechanism of industrial park based on multi-energy complementation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 260-267(in Chinese).
- [5] 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(in Chinese).
- [6] 赵雪霖,何光宇.生活电器用电效用概念及其评估方法[J].电力系统自动化,2016,40(1):53-59.
Zhao Xuelin, He Guangyu. Power utility evaluation of residential electrical appliances[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 53-59(in Chinese).
- [7] 李童佳,张晶,祁兵.居民用户需求响应业务模型研究[J].电网技术,2015,39(10):2719-2724.
Li Tongjia, Zhang Jing, Qi Bing. Studies on business model of demand response for residential users[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2719-2724(in Chinese).
- [8] 汤奕,鲁针针,伏祥运.居民主动负荷促进分布式电源消纳的需求响应策略[J].电力系统自动化,2015,39(24):49-55.
Tang Yi, Lu Zhenzhen, Fu Xiangyun. Demand response strategies for promoting consumption of distribution power generation with residential active loads[J]. Automation of Electric Power Systems,

- 2015, 39(24): 49-55(in Chinese).
- [9] 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(in Chinese).
- [10] 戚野白, 王丹, 贾宏杰, 等. 基于需求响应的集群温控负荷建模及参与低频减载策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 751-759.
Qi Yebai, Wang Dan, Jia Hongjie, et al. Research on under frequency load shedding strategy using aggregated thermostatically controlled loads based on demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 751-759(in Chinese).
- [11] 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(in Chinese).
- [12] 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): 1546-1555.
Gao Ciwei, Li Qianyu, Li Yang. Bi-level optimal dispatch and control strategy for air-conditioning load based on direct load control [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1546-1555(in Chinese).
- [13] 智勇, 郭帅, 何欣, 等. 面向智慧工业园区的双层优化调度模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 31-38.
Zhi Yong, Guo Shuai, He Xin, et al. Bilevel optimal dispatch model for intelligent industrial park[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 31-38(in Chinese).
- [14] 刘晓琳, 王兆杰, 高峰, 等. 分时电价下的高耗能企业发用电响应[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(8): 41-49.
Liu Xiaolin, Wang Zhaojie, Gao Feng, et al. Response behaviors of power generation and consumption in energy intensive enterprise under time-of-use price[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(8): 41-49(in Chinese).
- [15] 姚明涛, 胡兆光, 张宁, 等. 工业负荷提供辅助服务的多智能体响应模拟[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4219-4226.
Yao Mingtao, Hu Zhaoguang, Zhang Ning, et al. Multi-agent response simulation of industrial loads for ancillary services [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4219-4226(in Chinese).
- [16] 金红光, 隋军, 徐聪, 等. 多能源互补的分布式冷热电联产系统理论与方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3150-3160.
Jin Hongguang, Sui Jun, Xu Cong, et al. Research on theory and method of multi-energy complementary distributed CCHP system [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3150-3160(in Chinese).



徐航

收稿日期: 2018-09-18。

作者简介:

徐航(1994), 女, 硕士研究生, 研究方向为主动配电网运行与控制、综合需求响应, E-mail: xuhang_1994@zju.edu.cn;

董树锋(1987), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为输配一体化电网分析、配电网建模和分析, E-mail: dongshufeng@zju.edu.cn。

(责任编辑 徐梅)

附录 A

表 A1 设备参数

Tab. A1 Coefficients of energy supply equipment

设备	参数名称	取值级单位
吸收式制冷机	最大耗热功率 H_{Br}^{max}	1000kW
	制冷能效比 I_{COP}^{Br}	0.8
户用空调	最大输入功率 P_{cond}^{max}	1000kW
	制冷能效比 I_{COP}^{cond}	4.3
冰蓄冷装置	最大耗电功率 P_{ice}^{max}	166
	最大融冰制冷功率 Q_{ice}^{max}	500
蒸汽驱动设备	制冷能效比 I_{COP}^{ice}	3
	低品位热回收效率 $\eta_{steam,low}$	0.2

表 A2 储能参数

Tab. A2 Energy storage parameters

设备	最大充能功率/kW	最大放能功率/kW	最大荷能状态	最小荷能状态	初始荷能状态/kWh	充能效率	放能效率	自损耗系数
电池储能	1250	1250	0.9	0.1	960	0.95	0.95	0.0025
冰蓄冷装置	500	500	0.95	0.1	300	0.9	0.9	0.002

表 A3 设备的运行维护费用

Tab. A3 Operation and maintenance cost of equipment

设备	吸收式制冷机	户用空调	冰蓄冷装置	电池储能
运行维护成本(元/kW.h)	0.008	0.0097	0.01	0.005

表 A4 工业用户可中断负荷参数

Tab. A4 Parameters of industrial users' interruptible loads

最大可中断容量/MW	可中断时段	a_i	b_i
1.8	18:00-18:15	30	265
1.5	18:15-18:30	25	235
1.7	18:30-18:45	25	225
1.45	18:45-19:00	20	200

表 A5 不同需求响应策略的运行费用组成

Tab. A5 Operating cost composition of different demand response strategies

需求响应策略	购电成本/元	购热成本/元	运行维护成本/元	隐性收益/元
传统多能互补需求响应策略	84 415.05	42 977.18	208.24	/
电/热需求响应策略	84 440.11	43 629.68	211.93	320

附录 B

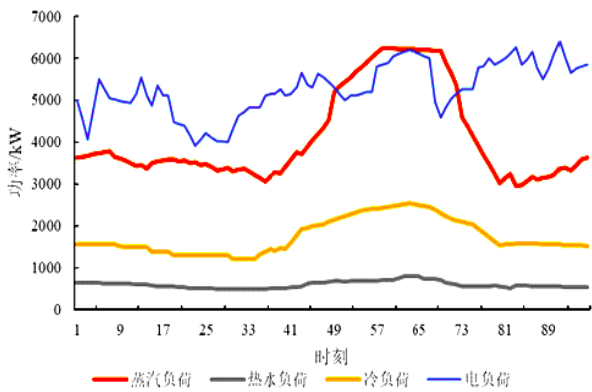


图 B1 工业园区典型用户的冷、热、电、蒸汽负荷曲线
Fig. B1 Cold, thermal, electric and steam load curves of typical users in industrial park

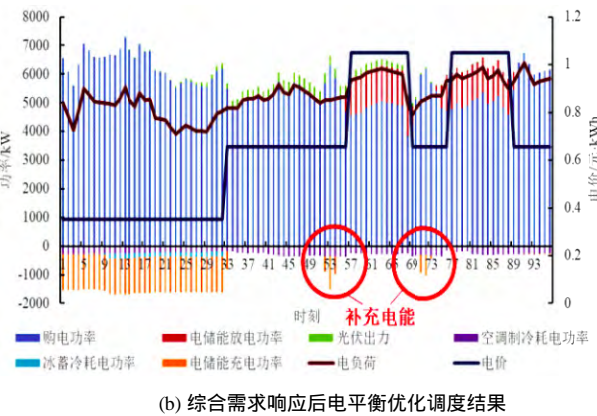
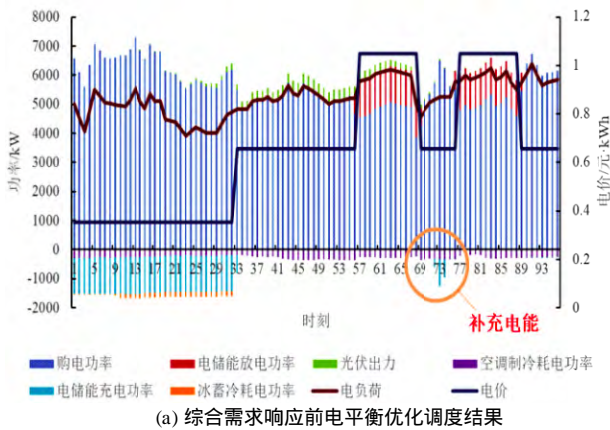


图 B2 综合需求响应前后电力平衡优化调度结果
Fig. B2 Optimal scheduling results of power balance of integrated demand response

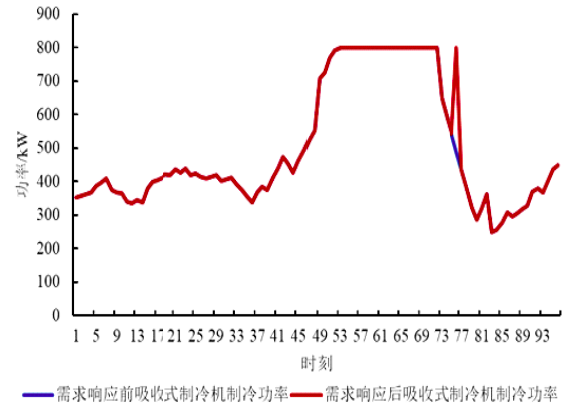


图 B3 综合需求响应前后吸收式制冷机出力变化结果
Fig. B3 The output changes of the absorption chiller of integrated demand response

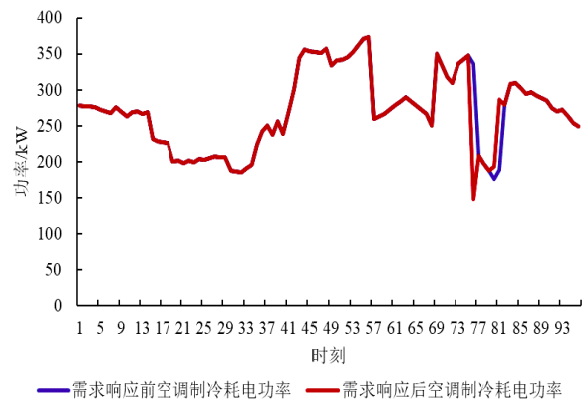


图 B4 综合需求响应前后空调出力变化结果
Fig. B4 The output changes of air condition of integrated demand response

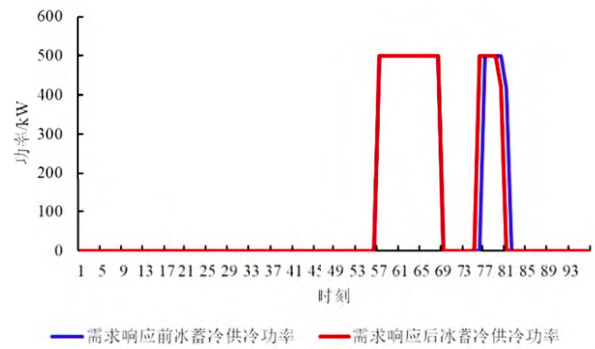


图 B5 综合需求响应前后冰蓄冷装置出力变化结果
Fig. B5 The output changes of ice storage of integrated demand response