

基于冷热电多能互补的工业园区互动机制研究

姜子卿,郝然,艾芊

(上海交通大学 电气工程系,上海 200240)

摘要: 随着智能配用电和能源互联网技术的发展,涉及多能源需求互补特性的多方互动成为解决综合能源系统效率低、电能紧缺等问题的有效方案。以工业园区综合能源系统为研究对象,在传统需求响应调度的基础上,将用户对冷、热、电等多种能源的需求纳入广义需求侧资源的范畴中,考虑多能源在价格、用能、需求特性上的差异性和冷热电联产(CCHP)机组的出力特性等,建立了基于多能互补的广义需求响应互动优化模型,实现电网、用户与CCHP机组的多方互动。算例结果表明,所提互动机制和优化调度方法能够有效地激励用户和CCHP机组参与多能需求响应互动,且与传统的需求响应调度机制相比经济性有显著提高。

关键词: 需求响应; 多能互补; 综合能源系统; 工业园区; 互动机制; 可中断负荷

中图分类号: TM 715

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.06.034

0 引言

工业园区是以工业负荷为主的复杂能源系统,涵盖多种产能/用能主体,涉及电、冷、热等多种能源的生产、转移和利用。其负荷需求量大、负荷特性复杂、供电可靠性要求高,对配用电系统的运行调度提出了较高的要求^[1]。但与此同时,传统的工业园区缺乏用能的统一优化,普遍存在能源浪费、电能紧缺等问题,极大地影响了系统的运行效率和经济环境效益^[2]。近年来,随着智能配电网技术和需求响应技术的发展,有效的互动机制成为解决该问题的一种极佳方案,通过发掘园区各主体的响应潜力,使之与电网进行良性互动,能够更好地满足用户用能需求,降低用能成本和提高综合能源利用率^[3]。而能源互联网技术的发展使得多种能源系统能够互动响应,从而使得建立具备多主体、多能源、多层次的工业园区综合能源系统成为可能^[4]。

目前国内外学者对于电网与用户的互动研究已取得了一定的成果。文献[5]从需求响应相关理论入手,研究了电网与用户双向互动的响应机理和相关技术。文献[6]在综合考虑供应侧和需求侧作用机理的基础上,将需求响应纳入发电调度,建立了计及用户侧互动的发电调度模型。文献[7]通过建立基于系统动力学的柔性负荷互动模型,分析了互动后各时段负荷变化量、响应量等动态特性。文献[8]采用模糊综合评价法对居民智能用电态度进行量化评分,并分析了居民的用能偏好。文献[9]基于风电在不同时间尺度上误差的不同以及对应电网调节能力的差

异,提出计及风电不确定性的多时间尺度源-荷协调调度策略。上述研究工作主要着眼于以需求响应为基础的用电行为分析,而没有考虑其他类型能源的产能、用能特性。

同时,对于多能源的优化调度研究也得到了一定的发展。文献[10]提出了基于电、热负荷跟踪策略的冷热电联产(CCHP)系统鲁棒优化调度方法,并用后悔值准则来描述系统的运行性能。文献[11]在热电联产(CHP)型微电网中引入了热泵装置用于消纳过剩风电并承担部分热负荷,并建立了短期最优经济运行模型。文献[12]提出了基于室内温度优化的CCHP系统和风电联合日前调度方法,能够有效地解决产热量较大时弃风量较大的问题。文献[13]提出了一种新型的热电机组组合和调度仿真方法,能够有效地评估大规模风电在成本、可靠性方面对系统运行的影响。文献[14]以供电和供热总煤耗最低为目标,建立了含储热的电力系统电热综合调度模型。文献[15]提出了一种微电网能量管理框架,用于实现微电网各主体的联合运行优化,同时考虑了价格型需求响应。此类文献多针对以CCHP系统为产能主体的微电网或其他自治性系统,以系统自身调度经济性为目标,并没有考虑其与电网或其他主体的互动,也没有涉及负荷侧对多能源的响应行为。

目前对多能源背景下的需求响应也有一定的研究。文献[16]通过系统模糊电价的计算求取柔性负荷响应后的负荷改变量,提出了多能互补的综合目标函数对多能出力进行调度。文献[17]建立了以联供系统与负荷曲线的联合满意度为目标的双向峰谷定价模型,激励CCHP系统参与需求侧管理。文献[18]以成本和排放最小为目标,提出了基于CHP的微电网多目标能量管理模型,并考虑了电价型需求响应。但上述文献并没有考虑用户对多类型能源的需求特性和需求之间的转化。

收稿日期:2017-02-28;修回日期:2017-05-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577115);国家重点研发计划项目(2016YFB0901300)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577115) and the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0901300)

目前的研究工作较少涉及不同类型能源需求间的相互影响和广义需求侧资源的统一优化调度,也较少涉及工业能源系统的协同互动。而通过冷、热、电等多种能源在价格、用能特性、用能需求上的差异性和互补性,设计合理的工业园区多主体、多能源互动机制,既能有效地缓解电力缺额、提高供电可靠性,又能在一定程度上扩大各参与主体的利益,实现共赢。

本文以工业园区综合能源系统为研究对象,在传统需求响应互动机制的基础上,将用户对冷、热、电等多种能源的需求纳入广义需求侧资源的范畴中,考虑多能源在价格、用能、需求特性上的差异性,CCHP 系统多能出力特性等,以最小化互动总成本为目标,建立了基于多能互补的广义需求响应互动优化模型,实现了电网、用户与 CCHP 系统的多向互动,并借助算例进行了验证。

1 面向工业大用户的传统需求响应机制

传统的工业园区互动机制以大工业用户的需求响应调度为主要内容,涉及电网公司与用户之间的双向沟通和互动,并以最小化调度成本为优化目标。

园区管理中心代表电力公司,是整个园区互动的协调中心。在互动过程中,管理中心结合园区能源系统运行的实际情况,将互动指标进行分解,然后将具体的负荷削减指令发布给底层用户,引导用户响应。

工业负荷是工业园区的主要负荷,工业用户负荷量大、自动化程度高,具有很高的互动响应潜力。工业负荷按负荷性质可分为生产性和非生产性负荷,其中生产性负荷指与生产产品直接相关的负荷,如重要的机械设备,一般不能随意转移和削减;非生产性负荷指起辅助作用的负荷,如空调、照明设备等,其重要性较低,可以根据实际情况迅速做出响应。

在实际的互动过程中,将工业用户的响应分为价格型响应和激励型响应,其中前者为用户对价格的自动响应,后者则由电力公司统一调度安排^[3]。

1.1 价格型响应

价格型响应指用户根据电力公司制定的分时电价来调整优化自身的负荷计划,从而减少其用电量。用户对电价的响应行为分为本时段内负荷的削减以及不同时段间负荷的转移,分别用自需求弹性和互需求弹性来表征,如式(1)所示。

$$E(u, v) = \frac{\Delta q_u / q_{0,u}}{\Delta \rho_v / \rho_{0,v}} = \frac{\Delta q_u}{\Delta \rho_v} \frac{\rho_{0,v}}{q_{0,u}} \quad (1)$$

其中, u, v 为时段,取值范围 1~24;当 $u \neq v$ 时, $E(u, v)$ 为时段 u 与时段 v 的交叉弹性系数,当 $u = v$ 时, $E(u, v)$ 为时段 u 的自弹性系数; $q_{0,u}$ 为用户在时段 u 的初始电量; $\rho_{0,v}$ 为时段 v 的初始电价; $\Delta \rho_v$ 和 Δq_u 分别为时段 v 电价变化量和时段 u 电量变化量。

由此得到分时电价的多时段响应模型,用户在时段 u 的用电量如式(2)所示。

$$q(u) = q_{0,u} + \sum_{v=1}^{24} E(u, v) q_{0,v} \Delta \rho_v / \rho_{0,v} \quad (2)$$

1.2 激励型响应

激励型响应在工业园区的双向互动中主要以可中断负荷的形式实施。电力公司与大用户签订用能合同,在实际运行中根据实际负荷状况或其他需要,向大用户发布负荷削减指令,用户根据自身情况响应并削减一定量的负荷,并获得相应的补偿。

用户获得的可中断补偿与自身负荷特性和生产情况有关,并随着削减电量的增加而增大。可中断补偿费用为:

$$C_{E,i} = \sum_{t=1}^T (\alpha_i \Delta L_{i,t}^2 + \beta_i \Delta L_{i,t}) \quad (3)$$

其中, $C_{E,i}$ 为电力公司支付给用户 i 的可中断补偿费用; $\Delta L_{i,t}$ 为用户 i 在时段 t 的负荷削减量; T 为总时段数,若以 1 h 为 1 个时段,则一天共有 24 个时段,即 $T=24$; α_i 和 β_i 为相应系数,与用户自身特性和失负荷成本有关。

在实际调度过程中,为了评估负荷响应的有效性,需要确定该用户的基线负荷。若用户实际负荷量小于其基线负荷与要求负荷削减量的差值,则认定本次响应有效。

电力公司在对可中断负荷进行调度时,以调度总费用最小为优化目标:

$$\min C_E = \sum_{i=1}^n C_{E,i} = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T (\alpha_i \Delta L_{i,t}^2 + \beta_i \Delta L_{i,t}) \quad (4)$$

其中, C_E 为电力公司一天内用于可中断负荷的总支出; n 为大用户数量。

2 考虑多能互补的多方互动原理

2.1 基于多能互补的广义需求响应

在具备冷、热、电等多种能源需求的工业园区综合能源系统中,用户对多能源的需求在时间、空间、成本等方面的不同,为综合能源系统多主体、多能源的互动响应提供了巨大的发挥空间^[19]。

本文将需求响应的概念进行扩充,引入基于多能互补的广义需求响应,基于多种能源系统在产能特性、供求特性以及用能特性等的差异性,通过激励的方式刺激或诱导用户改变某一种或多种能源的需求,从而对另一种能源的供求关系产生影响,达到削峰填谷、缓解用能紧张等目的。

引入多能互动后,需求响应不再仅局限于电负荷的削减或平移,还应包括多种能源类型之间的需求转化,CCHP 系统、电动汽车、储能、光伏等与用户成为广义的需求侧资源;互动也不再仅局限于传统的电力公司和用户的双向互动,所有能提供或利用其

他形式能源的主体成为综合能源系统互动体系中的“第三方”。基于多能互补的多方互动示意图见图 1。

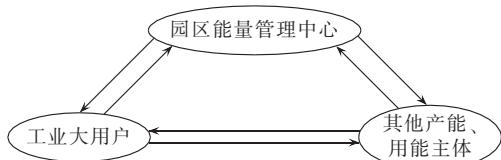


图 1 基于多能互补的多方互动示意图

Fig.1 Schematic diagram of multiparty interaction based on multi-energy complementation

鉴于 CCHP 机组可以通过以热定电、以电定热、以冷定电这 3 种方式运行,具有较高的灵活性,因此本文主要考虑 CCHP 系统作为工业园区冷热能源的生产机组和多方互动的主体。

2.2 多能源用能特性及需求差异

基于多能互补的工业园区互动建立在用户对各类型能源的需求特性以及能源价格差异性的基础上,通过整合各类资源促进多能互补,降低互动成本。

激励 CCHP 系统参与互动的主要方式是通过冷、热补偿的方式刺激用户对热的需求。管理中心根据用户对热和冷的需求特性,对用户在某时段多出原计划热负荷的用能成本给予部分或全部补偿,从而增大热、冷负荷;由于 CCHP 机组以以热定电或以冷定电的方式工作,在增加热出力的同时也增加了发电量,若冷、热补偿费用低于可中断补偿费用,则 CCHP 机组将被优先调度,同时总调度成本将减少。

以一个简单的例子说明其原理。图 2 展示了某种情况下 3 类广义需求侧资源的需求特性和价格关系,包括可中断负荷的成本曲线和用户冷、热需求曲线。其中,可中断负荷补偿价格随着负荷削减量的增加而增加;而用户的冷、热负荷量随着能源价格的降低而增加。假设园区管理中心以全价补贴(即补偿价格等于能源价格)的方式对用户多用的冷、热资源进行补偿,某一时段用户的热负荷为 a ,冷负荷为 b ,则此时调度负荷量 $a-d$ 需支出的补偿费用低于冷、热补偿费用,管理中心将优先调用可中断负荷;若该时段用户热负荷为 c ,则由图 2 可知,此时热补偿价格低于可中断负荷的最低补偿价格,管理中心采用激励 CCHP 机组增发热能的方式更能节约互动成本。

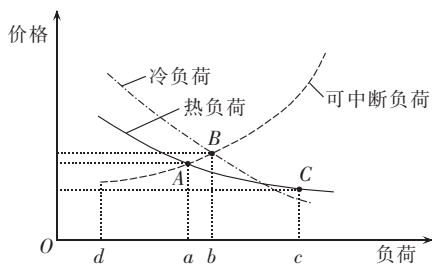


图 2 多能需求特性示意图

Fig.2 Schematic diagram of multi-energy demand property

实际调度中,CCHP 机组增发的冷、热出力可以分别由储冷、储热装置暂时储存,并在其他时段释放。超出储能装置储存能力的冷、热资源再通过刺激用户需求来消纳。

2.3 CCHP 机组产能特性

以燃气轮机为电源的 CCHP 系统,其出力特性见图 3,在产热量一定时,其发电量可在一定的范围内调节^[20]。热电比、热气比等指标均不是定值,而是随工作状态的变化而改变。由图 3 可看出,在产热量较低的工作点上,发电量的可调范围相对较大;而在产热量最大值附近的运行状态,发电量可调范围较小。

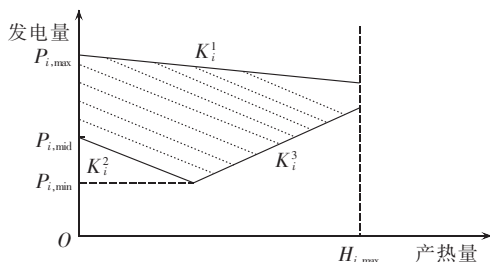


图 3 CCHP 机组热电出力特性

Fig.3 Heat-power output characteristics of CCHP unit

CCHP 机组的热电出力关系如下:

$$0 \leq H_{i,t} \leq H_{i,\max} \quad (5)$$

$$P_{i,t} \leq P_{i,\max} - K_i^1 H_{i,t} \quad (6)$$

$$P_{i,t} \geq \max \{P_{i,\min} - K_i^2 H_{i,t}, K_i^3 H_{i,t} + K_i^4\} \quad (7)$$

$$-R_{E,D} \leq P_{i,t+1} - P_{i,t} \leq R_{E,U} \quad (8)$$

$$-R_{H,D} \leq H_{i,t+1} - H_{i,t} \leq R_{H,U} \quad (9)$$

其中, $H_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的热出力; $P_{i,t}$ 为发电量; $H_{i,\max}$ 为机组热出力最大值; $P_{i,\max}$ 为机组最大发电量; $R_{E,U}$ 、 $R_{E,D}$ 分别为发电量向上、向下爬坡率; $R_{H,U}$ 、 $R_{H,D}$ 分别为产热量向上、向下爬坡率; K_i^1 、 K_i^2 、 K_i^3 、 K_i^4 为系数。

CCHP 机组的冷电出力关系与热电出力关系类似,此处不再赘述。

2.4 各互动主体收益分析

用户参与互动的根本动力是利益驱动,而通过多种能源需求之间的相互转化和激励,基于多能互补的广义需求响应不仅能有效提高能源利用率、降低削峰成本,还可以实现多方共赢。

对互动机制的实施方面而言,其总支出如式(10)所示。由于可供调度的需求侧资源增多,电力公司可以优先选择补偿价格较低、性价比高的资源类型进行调度,其调度成本与单纯调度可中断负荷相比将有明显降低。

$$C_{\text{total}} = C_E + C_Q + C_H \quad (10)$$

其中, C_H 为热补偿支出; C_Q 为冷补偿支出。

工业用户也将从多能互动中获得客观的收益。用户 i 的互动收益 $C_{L,i}$ 如式(11)所示,其主要包括三部分:由于响应分时电价节约的电费支出 $C_{\text{TOU},i}$,获得

的可中断负荷补偿 $C_{E,i}$ 以及用热、用冷补偿。

$$C_{L,i} = C_{TOU,i} + C_{E,i} + C_{Q,i} + C_{H,i} \quad (11)$$

CCHP 系统由于互动而增加的冷、热出力部分由电力公司予以补偿,同时,随着热出力增加而增发的电量以统一收购价格卖给电力公司,或者以合同价格直接向大用户供电。CCHP 机组 i 的收益为:

$$C_{C,i} = \lambda_E P_{i,t} + \lambda_H H_{i,t} + \lambda_Q Q_{i,t} - \lambda_F F_{i,t} \quad (12)$$

其中, $Q_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的冷出力; λ_E 为现行电价; λ_H 为 CCHP 机组热价; λ_Q 为 CCHP 机组冷价; λ_F 为天然气价格; $F_{i,t} = H_{i,t} / \mu_{H,i}$ 为所用天然气量, $\mu_{H,i}$ 为机组 i 的热气转化效率,与产热量有关。

由上述分析可知,各方的利益相较于无互动时均有增加,假设各参与方的行为均为理性行为,则该机制能够有效促使各方参与互动。

3 基于多能互补的工业园区互动机制

在前文需求响应和多能需求互动原理的基础上,提出基于多能互补的综合能源系统多方互动机制。园区管理中心对可中断负荷的补偿规则与 1.2 节相同。对用户的冷、热补偿采取全价补贴的方式,即用户在原基础上多用的冷、热资源费用全部由管理中心承担,并支付给 CCHP 机组。互动的实施应本着“公正透明”的原则,园区各主体参与互动削减的负荷量或增发的冷热量以及其获得的补偿费用等信息应及时公开。

3.1 互动执行流程

工业园区综合能源管理中心根据园区用户对多能源的需求及电、冷、热等能源的生产特性,对广义需求侧资源进行调度。各类主体根据自身的用能特性、响应潜力,响应价格信息和调度指令,调整自身负荷或产能计划,从而实现柔性互动。互动流程如下。

a. 园区管理中心首先进行下一日的负荷预测,或由大用户向管理中心提交次日的电、热、冷用能计划。由管理中心计算是否需要启动互动机制进行削峰。

b. 园区管理中心结合电、热、冷负荷曲线和掌握的用户用能弹性等信息,求解考虑多能互补的优化互动调度模型,得到各时段大用户需要削减的负荷或 CCHP 机组需要增加的出力。

c. 管理中心向用户下发负荷削减指令,向 CCHP 机组下发出力增发指令。

d. 用户根据自身的实际情况,判定是否能按要求完成相应的负荷削减指标,并及时向管理中心反馈。

e. 若存在用户因故不能执行负荷削减指令的情况,则管理中心根据模型重新进行优化调度。

f. 本日的需求响应结束后,管理中心对用户的响应有效性进行判定。

g. 每月根据本月各用户的响应情况,进行补偿费用或惩罚费用的月度结算。

3.2 互动优化调度模型

基于多能互补的综合能源系统互动优化调度模型,在满足削峰硬性指标的基础上,以电力公司对广义需求侧资源调度的总补偿支出(包括对电、热、冷的补偿支出)最小为优化目标:

$$\min C_{\text{total}} = C_E + C_Q + C_H \quad (13)$$

$$C_E = \sum_{i=1}^n C_{E,i} = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T (\alpha_i \Delta L_{i,t}^2 + \beta_i \Delta L_{i,t}) \quad (14)$$

$$C_H = \sum_{i=1}^{n_C} \sum_{t=1}^T \lambda_H \Delta H_{i,t} \quad (15)$$

$$C_Q = \sum_{i=1}^{n_C} \sum_{t=1}^T \lambda_Q \Delta Q_{i,t} \quad (16)$$

其中, n_C 为 CCHP 机组数量; $\Delta H_{i,t}$ 为热出力改变量; $\Delta Q_{i,t}$ 为冷出力改变量。

需要考虑的约束条件包括 CCHP 机组、储能装置和可中断负荷的约束等。

a. 削峰指标约束。

削峰指标是园区互动需满足的硬性约束,园区在任一时段的对外总负荷须满足削峰指标 μ ,以全年最大负荷值 $L_{E,\max}$ 的百分比表示。削峰指标约束为:

$$P_{G,t} \leq \mu L_{E,\max} \quad (17)$$

其中, $P_{G,t}$ 为时段 t 园区用户向电力公司购买的电量。

b. CCHP 机组约束。

CCHP 机组应满足 2.3 节所述的出力特性约束,其中 CCHP 机组的原计划产量应与其出力改变量满足如下关系:

$$H_{i,t} = H_{0,i,t} + \Delta H_{i,t} \quad (18)$$

$$Q_{i,t} = Q_{0,i,t} + \Delta Q_{i,t} \quad (19)$$

$$P_{i,t} = P_{0,i,t} + \Delta P_{i,t} \quad (20)$$

其中, $H_{0,i,t}$ 、 $Q_{0,i,t}$ 、 $P_{0,i,t}$ 分别为原计划产热量、产冷量、发电量。

机组需满足最小开停机时间约束,即:

$$(X_{i,t}^{\text{on}} - T_i^{\text{on}}) \times (I_{i,t-1}^{\text{on}} - I_{i,t}^{\text{on}}) \geq 0 \quad (21)$$

$$(X_{i,t}^{\text{off}} - T_i^{\text{off}}) \times (I_{i,t-1}^{\text{on}} - I_{i,t}^{\text{on}}) \geq 0 \quad (22)$$

其中, $X_{i,t}^{\text{on}}$ 、 $X_{i,t}^{\text{off}}$ 分别为机组 i 在时段 t 已经连续运行、停机的时段数; T_i^{on} 、 T_i^{off} 分别为最小连续运行时间、停机时间; $I_{i,t}^{\text{on}}$ 为状态变量,机组运转时为 1,机组停运时为 0。

c. 用户可中断负荷约束。

用户削减的负荷量应不小于其与电力公司约定的最小中断量 $\Delta L_{i,\min}$,不大于其最大可削减容量 $\Delta L_{i,\max}$:

$$\Delta L_{i,\min} \leq \Delta L_{i,t} \leq \Delta L_{i,\max} \quad (23)$$

其负荷中断的时间不能超过其最大可中断时间:

$$(X_{i,t}^{\text{red}} - T_i^{\text{red}}) \times (I_{i,t-1}^{\text{red}} - I_{i,t}^{\text{red}}) \leq 0 \quad (24)$$

其中, T_i^{red} 为用户 i 的最大可中断时间; $X_{i,t}^{\text{red}}$ 为用户 i 到时段 t 为止已经持续中断的时间; $I_{i,t}^{\text{red}}$ 为状态变量,

负荷中断时为 1,反之则为 0。

d. 储电装置约束。

储电装置通过在负荷低谷期充电、在负荷高峰期放电,起到削峰填谷的作用。其荷电状态值 $S_{E,t}$ 的变化规律为:

$$S_{E,t} = \begin{cases} S_{E,t-1} + \frac{P_{ch,t} \eta_{E, ch} \Delta t}{\Omega_E} & \text{充电} \\ S_{E,t-1} - \frac{P_{dis,t} \Delta t}{\eta_{E, dis} \Omega_E} & \text{放电} \end{cases} \quad (25)$$

其中, $P_{ch,t}$ 、 $P_{dis,t}$ 分别为储电装置在时段 t 的充、放电功率; $\eta_{E, ch}$ 、 $\eta_{E, dis}$ 分别为储电装置的充、放电效率; Δt 为充放电时间间隔,默认为 1 h; Ω_E 为储电装置容量。

储电装置荷电状态约束为:

$$S_{E, min} \leq S_{E,t} \leq S_{E, max} \quad (26)$$

其中, $S_{E, min}$ 、 $S_{E, max}$ 分别为储电装置所允许的荷电状态最小值、最大值。

充、放电功率约束为:

$$0 \leq P_{ch,t} \leq P_{ch, max} \quad (27)$$

$$0 \leq P_{dis,t} \leq P_{dis, max} \quad (28)$$

其中, $P_{ch, max}$ 、 $P_{dis, max}$ 分别为储电装置的最大充、放电功率。

为了满足储电装置连续运行,需满足调度周期始末充放电平衡约束,即:

$$S_{E,0} = S_{E,T} \quad (29)$$

e. 储热、储冷装置约束。

CCHP 机组在响应指令时增发的冷、热能源可以分别由储冷和储热装置暂时进行存储,并在其他时段释放,从而减少 CCHP 机组的生产成本和电力公司的互动成本,同时可以避免不必要的能源浪费^[14]。

储热装置的蓄、放热能力约束为:

$$S_{H,t} = \begin{cases} S_{H,t-1} + H_{ch,t} \Delta t & \text{蓄热} \\ S_{H,t-1} - H_{dis,t} \Delta t & \text{放热} \end{cases} \quad (30)$$

$$S_{H,t} \leq \Omega_H \quad (31)$$

其中, $S_{H,t}$ 为储热装置在时段 t 储存的热量; Ω_H 为储热装置容量; $H_{ch,t}$ 、 $H_{dis,t}$ 分别为储热装置在时段 t 的蓄、放热功率,需满足式(32)、(33)所示的限制。

$$H_{ch,t} \leq H_{ch, max} \quad (32)$$

$$H_{dis,t} \leq H_{dis, max} \quad (33)$$

其中, $H_{ch, max}$ 、 $H_{dis, max}$ 分别为储热装置的最大蓄、放热功率。

此外,还应满足连续运行约束,即:

$$S_{H,0} = S_{H,T} \quad (34)$$

储冷装置的运行约束与储热装置类似,在此不再赘述。

f. 多能负荷平衡约束。

整个互动过程中,需满足电、冷、热多种能源供给与负荷的平衡约束,分别如式(35)~(37)所示。

$$P_{G,t} + \sum_{i=1}^{n_c} P_{i,t} + P_{S,t} + \sum_{j=1}^n \Delta L_{j,t} = L_{ED,t} \quad (35)$$

$$\sum_{i=1}^{n_c} H_{i,t} = \sum_{i=1}^n (L_{H0,i,t} + \Delta L_{H,i,t}) + H_{S,t} \quad (36)$$

$$\sum_{i=1}^{n_c} Q_{i,t} = \sum_{i=1}^n (L_{Q0,i,t} + \Delta L_{Q,i,t}) + Q_{S,t} \quad (37)$$

其中, $L_{ED,t}$ 为互动前时段 t 工业用户总负荷; $L_{H0,i,t}$ 为用户 i 在时段 t 的原始热负荷量; $\Delta L_{H,i,t}$ 为用户 i 在时段 t 的热需求变化量; $H_{S,t}$ 为储热装置在时段 t 的出力; $L_{Q0,i,t}$ 为用户 i 在时段 t 的原始冷负荷量; $\Delta L_{Q,i,t}$ 为用户 i 在时段 t 的冷需求变化量; $Q_{S,t}$ 为储冷装置在时段 t 的出力。

g. 多能源的供求关系约束。

热、冷等能源的价格与用户对该种能源的需求量有关,其具体关系由园区管理中心对用户的用能分析得到,可通过需求曲线或分段函数来表示:

$$\lambda_H = f(H_{i,t}) \quad (38)$$

$$\lambda_Q = f(Q_{i,t}) \quad (39)$$

其中, $f(\cdot)$ 表示函数关系。

3.3 响应有效性判定

用户响应有效性按照基线负荷的方法进行判定。具体做法是选择用户在需求响应实施日前最近 5 个正常生产工作日,将其对应响应时段的冷、热、电负荷曲线作为基线负荷。基线中出现的最大负荷称为基线最大负荷,根据基线计算出的平均负荷称为基线平均负荷。

如果用户在负荷削减过程中同时满足响应时段最大负荷不高于基线最大负荷、响应时段平均负荷低于基线平均负荷且其差值大于等于规定的负荷削减量,则视为有效响应;否则视为无效响应。

CCHP 机组在互动过程中若满足:响应时段每小时产热量或产冷量大于等于对应基线负荷值,并且差值大于等于规定的增发量,则视为有效响应。

4 算例分析

以广州某大型工业园区为例,分析所提互动机制和优化方法的效果。该园区某日的电、热、冷负荷曲线如图 4 所示。年最大电负荷为 50 MW,削峰指标为不超过年最大负荷的 80%。园区有 3 台 CCHP 机组,其中机组 1、2 的容量为 4 MW/8 t,以以热定电的方式运转;机组 3 的容量为 3 MW/5 t,以以冷定电方式运转,具体机组参数和价格信息分别见表 1、2;储电装置容量为 0.6 MW/1.2 MW·h,充放电效率为 90%;储热、储冷装置容量分别为 1.5 t、1 t,最大蓄、放能功率为 0.5 t/h;有 8 家大工业用户,其可中断负荷补偿系数和参数见表 3。用户最大热负荷需求为 14 t/h,最大冷负荷需求为 4 t/h。用户执行大工业峰谷电价。高峰时段为 14:00—17:00、19:00—22:00,平段为 08:00—14:00、17:00—19:00、22:00—24:00,低谷时段为 00:00—08:00。按高峰电价 1.10 分/(kW·h)、

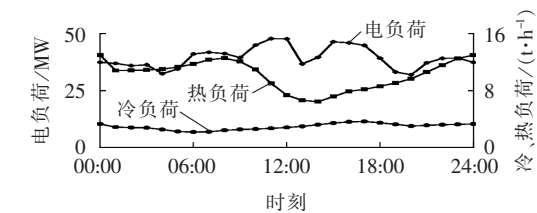


图 4 电、热、冷负荷曲线

Fig.4 Electric,heating and cooling load curves

表 1 CCHP 机组 1 和 2 的参数

Table 1 Parameters of CCHP unit 1 and 2

发电量/ MW	发热量/ (t·h ⁻¹)	热价/ (元·t ⁻¹)	发电量/ MW	发热量/ (t·h ⁻¹)	热价/ (元·t ⁻¹)
0	0	—	1.99	5.71	400
0.70	3.00	420	2.45	6.13	400
0.77	3.45	420	3.38	6.94	390
1.00	4.31	410	3.99	8.30	390
1.47	5.05	410			

表 2 CCHP 机组 3 的参数

Table 2 Parameters of CCHP unit 3

发电量/ MW	产冷量/ (t·h ⁻¹)	冷价/ (元·t ⁻¹)	发电量/ MW	产冷量/ (t·h ⁻¹)	冷价/ (元·t ⁻¹)
0	0	—	1.10	3.28	450
0.53	1.95	470	1.82	3.89	450
0.57	2.24	460	2.54	4.51	440
0.75	2.80	460	2.99	5.10	440

表 3 用户可中断负荷参数

Table 3 Parameters of users' interruptible loads

用户	最大中断容量/MW	单次最大中断时间/h	α	β
1	2	3	375	1500
2	0.5	3.5	175	1250
3	1	3	175	1375
4	0.9	2.5	150	1375
5	0.75	4	140	1375
6	1.5	3.5	225	1500
7	1.2	2.5	200	1375
8	0.5	4	165	1250

平段电价 0.68 分/(kW·h)、低谷电价 0.45 分/(kW·h) 计费。以 1 h 为单位调度时段时长,即 00:00—01:00 对应时段 1,01:00—02:00 对应时段 2,依此类推,共 24 个时段。

根据本文所提互动优化模型得到各 CCHP 机组响应电网指令增发的冷、热量,如图 5 所示。相应增加的电能出力 and 用户可中断负荷削减量,如图 6 所示。

由图 5、6 可以看出,共有 8 个时段需要通过启

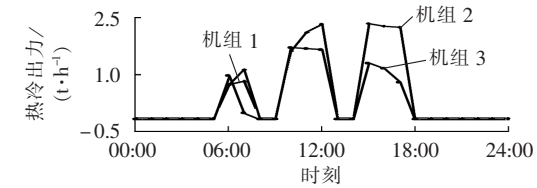


图 5 CCHP 机组增发的冷热出力

Fig.5 Heating/cooling output increment curves of CCHP units

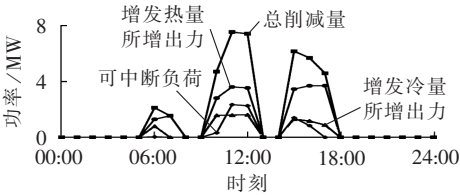


图 6 CCHP 机组增发出力 and 负荷削减量

Fig.6 Load shedding curves and increased power output of CCHP units

动互动机制来满足削峰指标,分别为时段 6、7、10—12、15—17,最大的待削峰量为 7.5 MW。CCHP 机组 1 和 2 的冷热出力曲线基本相同,这是因为在热负荷一定的情况下,这 2 台 CCHP 机组平分产热量能够实现成本最低。在时段 6、7,负荷的削减主要靠刺激用冷、用热需求使 CCHP 机组增发电量来实现,由于热价略低于冷价,因此热出力改变量较大。在时段 10—12 和 15—17,随着待削峰量的增大,削峰指标开始由冷、热的增发出力 and 用户可中断负荷共同承担。由表 1—3 可知,利用增发热量来获得增发电量的补偿费用总体上略低于冷补偿和可中断负荷补偿,因此以热定电型 CCHP 机组出力的增加量高于其他 2 类。在时段 10,通过热补偿激励的园区热负荷达到用户的热需求极限值,CCHP 机组 1 和 2 不能再增加出力,负荷削减主要由机组 3 和可中断负荷承担。此时 CCHP 机组的增发出力高于可中断负荷量,而到时段 11,由于 CCHP 机组均工作在较高的运行点,机组的热电比和冷电比较大,即增加单位电能出力所需的冷、热增发量变大,所需支出的补偿费用高于部分用户的可中断补偿费用,因此可中断负荷削减量增加,并超过了机组 3 的电能增发量。由于储热、储冷装置的作用,CCHP 机组在非响应时段的出力有一定程度的降低。

各用户一天内的可中断负荷削减量如图 7 所示。由图 7 可以看出,补偿费用较低(即补偿系数较小)的用户优先被调度削减负荷;并且由于各家用户可中断负荷的补偿费用随中断量的增加呈非线性增长,因此在时段 11、12 等尖峰时段,总的负荷削减指标被近似地分摊到各家用户,而不是待某用户达到其最大中断容量后再调度其他用户,从而减小了

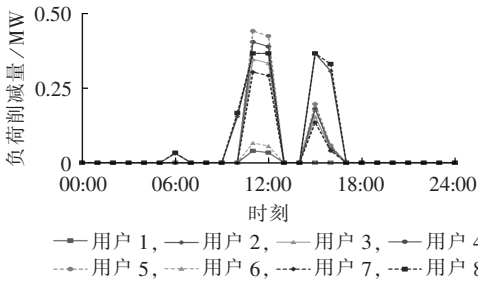


图 7 各用户负荷削减量

Fig.7 Load shedding curves of different users

调度成本。

图 8 为计及多能互补前后,互动所需的可中断负荷削减量对比图。在引入了多能源需求的交叉互补后,可中断负荷在时段数和削减量上均明显减少。

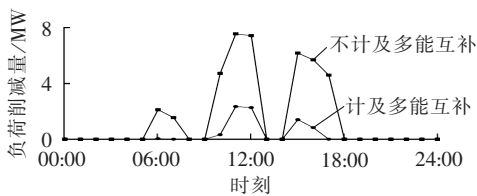


图 8 计及多能互补前后的负荷削减量

Fig.8 Comparison of load shedding between with and without multi-energy complementation

互动前后园区的电负荷曲线以及互动后园区电、热、冷负荷曲线分别见图 9、10。经过互动削减后的负荷均满足削峰指标要求,同时达到了总调度费用最小化的目标。经计算,互动后的各方利益见表 4。计及多能互补时,总调度成本为 40917.5 元;不计及多能互补时,总调度成本(即可中断负荷补偿费用)为 48347.4 元;采用本文所提基于多能互补的多方互动机制和优化调度方法使互动总成本降低了 15%,效果明显。

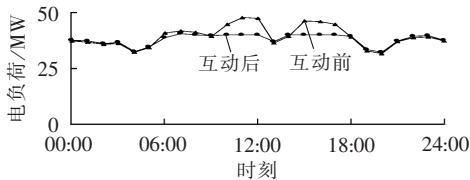


图 9 互动前后园区总负荷曲线

Fig.9 Total load curves before and after interaction

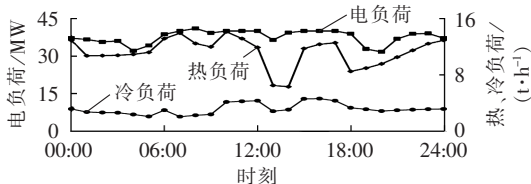


图 10 互动后园区多能负荷曲线

Fig.10 Load curves of different energies after interaction

表 4 互动前后各主体收益

Table 4 Profits of different parts before and after interaction

主体	收益		主体	收益	
	互动前	互动后		互动前	互动后
CCHP 机组 1、2	86669.2	102462.1	用户	—	25197.1
CCHP 机组 3	52046.7	63982.2			

5 结论

本文在传统需求响应调度的基础上,提出了具备多主体、多能源需求的综合能源系统互动机制。

该机制考虑多能源在产能、用能和价格特性上的差异性,充分利用包括冷、热、电在内的广义需求侧资源,促进电网、用户和 CCHP 机组之间的多向良性互动,并建立了基于多能互补的广义需求响应互动优化模型。算例对互动前后电、热、冷负荷的变化量,可中断负荷削减量,CCHP 机组出力增加量等进行了详细分析,结果表明所提互动机制和优化调度方法能够有效地激励用户、CCHP 机组参与涉及多能需求响应的互动,促进能源的综合利用,且与传统的需求响应调度机制相比经济性有显著提高。本文可为考虑多能互补和多能源需求特性的广义需求响应研究提供一定的参考。后续将进一步研究不同能源需求间的负荷耦合特性对需求响应的影响。

参考文献:

[1] 刘涤尘,彭思成,廖清芬,等. 面向能源互联网的未來综合配电系统形态展望[J]. 电网技术,2015,39(11):3023-3034.
LIU Dichen,PENG Sicheng,LIAO Qingfen,et al. Morphological prospect of future integrated power distribution system for energy internet[J]. Power System Technology,2015,39(11):3023-3034.

[2] 付学谦,孙宏斌,郭庆来,等. 能源互联网供能质量综合评估[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):1-7.
FU Xueqian,SUN Hongbin,GUO Qinglai,et al. Comprehensive assessment of energy supply quality of energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(10):1-7.

[3] ALBADI M H,ELSAADANY E F. Demand response in electricity markets:an overview[C]//Power Engineering Society General Meeting. Tampa,FL,USA:IEEE,2007:1-5.

[4] 田世明,栾文鹏,张东霞,等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3482-3494.
TIAN Shiming,LUAN Wenpeng,ZHANG Dongxia,et al. Energy internet technology form and key technology[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3482-3494.

[5] 李扬,王蓓蓓,李方兴. 灵活互动的智能用电展望与思考[J]. 电力系统自动化,2015,39(17):2-9.
LI Yang,WANG Beibei,LI Fangxing. Experience and thinking of intelligent electricity with flexible interaction[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(17):2-9.

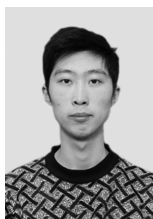
[6] 刘小聪,王蓓蓓,李扬,等. 智能电网下计及用户侧互动的发电日前调度计划模型[J]. 中国电机工程学报,2013,33(1):30-38.
LIU Xiaocong,WANG Beibei,LI Yang,et al. Smart grid under the user side interaction of the power generation before the scheduling model[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(1):30-38.

[7] 曾丹,姚建国,杨胜春,等. 柔性负荷与电网互动的系统动力学仿真模型[J]. 中国电机工程学报,2014,34(25):4227-4233.
ZENG Dan,YAO Jianguo,YANG Shengchun,et al. System dynamics simulation model of flexible load and grid interaction[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(25):4227-4233.

[8] 何永秀,王冰,熊威,等. 基于模糊综合评价的居民智能用电行为分析与互动机制设计[J]. 电网技术,2012,36(10):247-252.
HE Yongxiu,WANG Bing,XIONG Wei,et al. Behavior analysis and interactive mechanism design of residents based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Power System Technology,2012,36

- (10):247-252.
- [9] 杨胜春,刘建涛,姚建国,等. 多时间尺度协调的柔性负荷互动响应调度模型与策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3664-3673.
- YANG Shengchun,LIU Jiantao,YAO Jianguo,et al. Multi-time-scale coordinated flexible load interaction response scheduling model and strategy[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(22):3664-3673.
- [10] WANG L,LI Q,SUN M,et al. Robust optimisation scheduling of CCHP systems with multi-energy based on minimax regret criterion[J]. IET-Generation Transmission & Distribution,2016,10(9):2194-2201.
- [11] 郭宇航,胡博,万凌云,等. 含热泵的热电联产型微电网短期最优经济运行[J]. 电力系统自动化,2015,39(14):16-22.
- GUO Yuhang,HU Bo,WAN Lingyun,et al. Short-term optimal economic operation of thermoelectric power generation microgrid with heat pump[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(14):16-22.
- [12] WU C,JIANG P,GU W,et al. Day-ahead optimal dispatch with CHP and wind turbines based on room temperature control[C]//IEEE International Conference on Power System Technology. Wollongong,Sydney,Australia:IEEE,2016:1-6.
- [13] UMMELS B C,GIBESCU M,PELGRUM E,et al. Impacts of wind power on thermal generation unit commitment and dispatch[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2007,22(1):44-51.
- [14] 吕泉,陈天佑,王海霞,等. 含储热的电力系统电热综合调度模型[J]. 电力自动化设备,2014,34(5):79-85.
- LÜ Quan,CHEN Tianyou,WANG Haixia,et al. Combined heat and power dispatch model for power system with heat accumulator[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(5):79-85.
- [15] MA L,LIU N,ZHANG J,et al. Energy management for joint operation of CHP and PV prosumers inside a grid-connected microgrid:a game theoretic approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2016,12(5):1930-1942.
- [16] 胡蘭丹,刘东,闫丽霞,等. 考虑需求响应的 CCHP 多能互补优化策略[J]. 南方电网技术,2016,10(12):74-81.
- HU Landan,LIU Dong,YAN Lixia,et al. CCHP multi-energy complementary optimization strategy considering demand response[J]. Southern Power Grid Technology,2016,10(12):74-81.
- [17] 范龙,李献梅,陈跃辉,等. 激励 CCHP 参与需求侧管理双向峰谷定价模型[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(17):45-51.
- FAN Long,LI Xianmei,CHEN Yuehui,et al. Encourage CCHP to participate in demand side management bidirectional peak-valley pricing model[J]. Power System Protection and Control,2016,44(17):45-51.
- [18] GITIZADEH M,FARHADI S,SAFARLOO S. Multi-objective energy management of CHP-based microgrid considering demand response programs[C]//2014 Smart Grid Conference. Tehran,Iran:IEEE,2014:1-7.
- [19] LIU M,SHI Y,FANG F. Load forecasting and operation strategy design for CCHP systems using forecasted loads[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology,2015,23(5):1672-1684.
- [20] CHENG L,LIU C,WU Q,et al. A stochastic optimal model of micro energy internet contains rooftop PV and CCHP system [C]//International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. Beijing,China:IEEE,2016:1-5.

作者简介:



姜子卿

姜子卿(1994—),男,山东潍坊人,博士研究生,主要研究方向为电力市场、需求响应、虚拟电厂(E-mail:jiangzq_jollay@sjtu.edu.cn);

郝然(1993—),男,江苏徐州人,博士研究生,主要研究方向为能源互联网(E-mail:haoransjtu@sjtu.edu.cn);

艾芊(1969—),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电能质量、人工智能及其在电力系统中的应用、电力系统元件建模、分布式发电等(E-mail:aqian@sjtu.edu.cn)。

Interaction mechanism of industrial park based on multi-energy complementation

JIANG Ziqing,HAO Ran,AI Qian

(Department of Electrical Engineering,Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240,China)

Abstract: Owing to the development of the smart power distribution & utilization and the energy internet technology,the multiparty interaction based on multi-energy complementation becomes an effective solution to the low efficiency and power shortage of IES(Integrated Energy System). With an industrial park IES as the research object,a generalized demand-response interaction optimization model based on multi-energy complementation is established to realize the multiparty interaction among users,CCHP(Combined Cooling Heating and Power) units and power grid,which,based on traditional demand-response dispatch,takes users' cooling, heating and electric power demands as the resources of generalized demand side and considers the differences among multiple energy resources in price,demand and property as well as the power output characteristics of CCHP units. Case study shows that,the proposed interaction mechanism and optimal dispatch method promotes the participation of users and CCHP units in the multiparty interaction effectively and achieves significantly better economy than traditional demand-response dispatch mechanism.

Key words: demand response; multi-energy complementation; integrated energy system; industrial park; interaction mechanism; interruptible load