

基于双层联合优化的电-气综合能源生态系统需求响应模型

毛颖兔¹, 王 盛², 邵常政², 徐 旻¹, 丁 一²

(1. 国网浙江省电力有限公司经济技术研究院, 浙江 杭州 310008;

2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘 要:提出了一种在电-气综合能源生态系统中,基于双层联合优化的市场化需求侧响应模型。该双层联合优化包括系统层的经济调度以及节点层的能量优化分配。首先,构建了以节点为单位的用户多能灵活负荷模型以及用户参与需求侧相应的经济分析模型,然后提出了电-气综合能源生态系统的稳态潮流模型。在此基础上,提出了电-气综合能源生态系统中需求响应的双层优化模型。系统层优化在获取辅助服务市场上聚合商的需求响应报价基础上,对电气联合传输系统进行集中式能量优化调度。节点层的优化问题为聚合上的能源优化分配模型,即聚合商根据系统购买的需求相应服务,将负荷削减量按照经济性最优的原则分配给用户。建立双层优化问题后,将下层优化问题转化为上层优化的KKT条件,并通过内点法进行求解。最后,通过IEEE 24节点可靠性测试系统和比利时20节点天然气系统的耦合系统,验证了本文提出的电-气综合能源生态系统下的多能需求响应模型的有效性,及其相对于传统电力需求响应的优越性。

关键词:电-气综合能源生态系统; 双层优化; 需求响应

中图分类号: TM716

文献标志码: A

文章编号: 2096-4145(2018)10-0018-08

Bi-level Joint Optimization Based Multi-energy Demand Response Model for Integrated Electricity and Gas System

MAO Yingtu¹, WANG Sheng², SHAO Changzheng², XU Yang¹, DING Yi²

(1. Economy Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310008, China;

2. College of Electric Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: this paper proposes a demand response (DR) model based on bi-level joint optimization framework in integrated electricity and gas system (IEGS), concerning both centralized energy dispatch and nodal energy redistribution. First, multi-energy flexible load model for nodal customer sectors and the corresponding economic model for DR participation is established, and the power flow model of IEGS in steady state with bidirectional energy exchange is built. Afterwards, a bi-level optimization based DR model in IEGS is proposed. The system level optimization aims on centralized energy optimal dispatch in transmission system, given the bidding price of DR service in ancillary market given by aggregators. The nodal level optimization focuses on optimal energy purchasing and distribution of load curtailment among individual customers. Then the lower level optimization formulations are converted into the KKT conditions of upper level optimization, and the problem is solved using interior point method. Finally, the coupled system of IEEE 24-node reliability test system and Belgium 20-node natural gas system shows the effectiveness of multi-energy DR model in IEGS and its superiority to traditional DR model.

Key words: integrated electricity and gas system; bi-level optimization; demand response

0 引言

天然气作为一种高效、清洁的化石能源,在近

些年得到了长足的发展,尤其是作为热力发电的来源^[1]。根据中国电力企业联合会发布的报告,2016年,燃气机组的发电量达到了 1.833×10^8 MWh,和2015年相比,同期增长了12.81%^[2]。另外,随着电转气技术的成熟,过剩的电力可以通过电解水过程转化为氢气或进一步甲烷化后,注入天然气传输系统中,实现了电力系统和天然气系统之间能量的双

基金项目: 国网浙江省电力公司科技项目(5211JY160010)

Project Supported by the Science and Technology Project of China State Grid Zhejiang Electric Power Company (5211JY160010)

向流动^[5]。因此,电力系统和天然气系统的耦合关系被进一步加深,电-气综合能源生态系统的概念随之提出。天然气系统和电力系统的联合优化运行使其经济性、可靠性、鲁棒性得到进一步加强。

另一方面,天然气系统和电力系统在用户侧的能量耦合大大拓展了需求侧响应的灵活性和潜力^[4]。在传统的电力系统中,需求侧响应通常通过电力灵活负荷的负荷削减和负荷转移来完成,以缓解负荷尖峰时刻电力供给不足的状况^[5]。但是在电-气耦合系统中,由于多能灵活负荷的存在,在一种能源供应不足或价格尖峰的时候,可以转向使用另外一种能源,从而达到既削减一种能源负荷,又不会造成负荷功能的中断^[6]。例如在工业生产线上,恒温的控制既可以通过电热锅炉实现,也可以通过燃气锅炉实现。当电力供应短缺或者尖峰电价时,管理人员可能倾向于通过消耗天然气来取代用电。

利用多能灵活负荷的需求响应最近也逐渐成为一项研究热点。文献[7]提出了多能源系统需求响应的交易框架和技术框架模型以分析其经济效益。文献[8]考虑了以不同设备消耗不同的能源实现多能互补的需求响应,并分析了从能源初始供应到终端用户的能源供给充裕度评估。文献[9]研究了电热联合需求响应中考虑房间热力学模型的热负荷动态变化。在已有的这些研究中,较多着眼于以“智能建筑”、“智能城市”等为背景的电热需求响应,或以能源集线器模型实现多能互补。这就使得该研究大多集中在配电网侧等小区域范围内,并无法把能源传输阶段的灵活运行纳入考虑。且电气联合系统的联合需求响应也较少得到研究,在文献[1,10]的电气联合系统供能充裕度分析中,当供能出现不足时,采取被动切负荷的措施。失负荷价值常数用于衡量切负荷所带来的损失,且只有电力这一单一能源的失负荷价值得到了研究。这使得失负荷价值模型过于粗糙,且没有发挥市场在优化能源配置,尤其是多能互补之间优化配置的作用以激发用户主观能动性。

针对上述问题,本文提出了一种基于双层联合优化的电-气综合能源生态系统中多能灵活负荷的需求响应实现模型。首先,建立了多元用户的多能灵活负荷模型,为聚合商在需求响应市场上的投标价格提供了测算依据。其次,建立了多能系统中需求响应的双层优化决策模型。其中,上层的系统优化调度模型考虑电-气联合系统运行时的稳态潮流约束,决定能源供给元件的出力以及节点聚合商的

需求响应服务购买量;下层的能量优化分配模型中,节点聚合商根据上层优化得到的能源节点价格,以最经济的方式购买能源并将需求响应执行量在用户之间分配。然后,将下层优化转化为上层优化的库恩塔克(Karush-Kuhn-Tucher, KKT)条件,并用内点法进行求解。最后,通过电-气综合能源生态测试系统对本文提出的优化模型的有效性及其相对传统电力系统需求响应的优越性进行了验证。

1 用户侧多能灵活负荷建模

本文所涉及的电-气综合能源生态系统结构如图1所示,由能量耦合元件(包括燃气机组和气转电设备)将电力系统和天然气系统相连接。和传统电力系统相区别的是,燃气机组在作为电力系统电能供给元件之一的同时,也消耗天然气,从而成为天然气系统的负荷。其余非燃气电能供给设备,例如可再生能源机组、水电机组等,其原动机所消耗的能源不在本文考虑范围内。

在天然气系统中,天然气井通常离天然气负荷集中区较远,因此其传输系统需要大量长距离输送管道,压缩机以及储气设施等。另外,电转气设备可安装于关键的气负荷节点上,通过电解水和甲烷化过程,消耗电能并产生可兼容的气体注入天然气传输系统中^[11]。同时天然气系统和电力系统在消费侧通过灵活负荷而紧密耦合。通常电是主导能源,天然气可以成为电力的替代品。

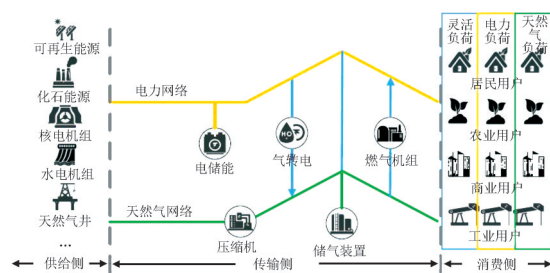


图1 电-气综合能源生态系统结构

Fig. 1 Structure of integrated electricity and gas system

1.1 节点用户的负荷构成

能源传输网络的节点通常由多类型的用户聚合而成,包括居民用户、农业用户、商业用户和工业用户等。作为多元用户的聚合体,聚合商从市场上购买电和天然气,并分配给下游终端用户,满足其能源需求。假设在节点 i 处共有 j 种类型用户集合 Ψ_i ,其节点电力总负荷有功功率 $\overline{P_{D,i}^e}$,天然气总负荷功率 $\overline{P_{D,i}^g}$ 和各类型用户 j 的传统电力负荷有

功率 $\overline{P_{D,i,j}^{cl}}$, 传统天然气负荷功率 $\overline{P_{D,i,j}^{gl}}$ 和多能灵活负荷有功功率 $\overline{P_{D,i,j}^n}$ 之间的关系可以表示为

$$\overline{P_{D,i}^e} = \sum_{j \in \Psi_i} \overline{P_{D,i,j}^{cl}} + \overline{P_{D,i,j}^n} \quad (1)$$

$$\overline{P_{D,i}^g} = \sum_{j \in \Psi_i} \overline{P_{D,i,j}^{gl}} \quad (2)$$

其中, 传统电力负荷和天然气负荷只能由相应的能源来供给。多能灵活负荷通常以电负荷的形式存在, 必要时可转化为气负荷。自然地, 对于每一种类型的用户 j 而言, 其电力负荷有功功率 $\overline{P_{D,i,j}^e}$ 为

$$\overline{P_{D,i,j}^e} = \overline{P_{D,i,j}^{cl}} + \overline{P_{D,i,j}^n} \quad (3)$$

不同用户类型通过不同方式参与需求响应, 例如大型工业用户和电力公司直接签订合同, 小型商业用户、居民用户通过售电商进行竞价等^[12]。传统的用户参与需求响应的形式分为负荷削减和负荷转移。但是在多能源系统中, 用户可以通过采用切换多能灵活负荷所消耗的能源的形式, 以达到更多的负荷削减量, 或者在削减负荷的同时满足其所提供服务的正常进行。

1.2 用户参与需求响应的收益与损失建模

在参与需求响应的过程中, 用户进行了负荷的削减或转移, 则有该能源提供的服务可能会被中断, 因此该用户会承担一定的经济损失。以负荷削减为例, 该经济损失的数目取决于以下 4 点: 1) 用户类型; 2) 削减负荷类型; 3) 削减负荷量; 4) 削减持续时间。这部分损失通常由用户损失函数来描述。其中节点 i 上用户类别 j 的电负荷的用户损失函数 $CDF_{i,j}^e(T)$ 与时间 T 的关系由文献[13]给出的典型点分段线性插值得到。因为一部分电负荷以多能灵活负荷的形式存在, 所以实际上, 该服务在一定程度上不会受到影响。因此, 多能灵活负荷部分的电力用户损失函数需进行如下修正:

$$CDF_{i,j}^n(T) = CDF_{i,j}^e(T) \sum_{m \in \Omega_{i,j}^n} \alpha_{i,j,m} / \sum_{m \in \Omega_{i,j}^n} \beta_{i,j,m} \quad (4)$$

式中: $\alpha_{i,j,m}$ 和 $\beta_{i,j,m}$ 分别为节点 i 上用户种类 j 的各种多能灵活负荷 m 所占的用户损失比例以及负荷功率比例; $\Omega_{i,j}^n$ 为该用户多种灵活负荷的集合。

气负荷的用户损失函数可由天然气的热值模型进行计算。 $H_g = 39 \text{ MW}/(\text{m}^3/\text{s})$, 为天然气的热值。假设多能灵活负荷 m 由电和气满足的效率分别是 $\eta_{i,j,m}^e$ 和 $\eta_{i,j,m}^g$, 则用户 m 的天然气损失函数计算为

$$CDF_{i,j}^g(T) = CDF_{i,j}^e(T) H_g \eta_{i,j,m}^e / \eta_{i,j,m}^g \quad (5)$$

2 双层优化决策模型

整体的双层优化调度机制如图 2 所示。假设在气电联合系统中, 电力系统和天然气系统由同一个独立系统调度机构 (Independent System Operator, ISO) 进行统一调度。在日前阶段, ISO 通过负荷预测确定电、气负荷的负荷水平。同时, 节点聚合商在提前已知的用户损失函数基础上, 用过一定的报价策略在需求响应市场上进行报价。与此同时, 发电、供气的成本曲线也在市场上进行提交。在实时运行阶段, ISO 获取到这些信息后进行上层集中式优化调度, 将调度指令下达给聚合商和发电机组。此后, 聚合商在满足 ISO 指令要求的基础之上, 在各类用户间实现能量的最优化分配。值得注意的是, 由于多能灵活负荷的存在, 聚合商进行的能量最优分配不仅存在于不同类型的用户之间, 也存在于不同能源之间。供需差异以节点电价和实时电价的形式, 为聚合商对于能源的优化采购和用户对于能源的倾向性使用提供了激励。用户的这一自主性行为, 也缓解了系统的运行压力。

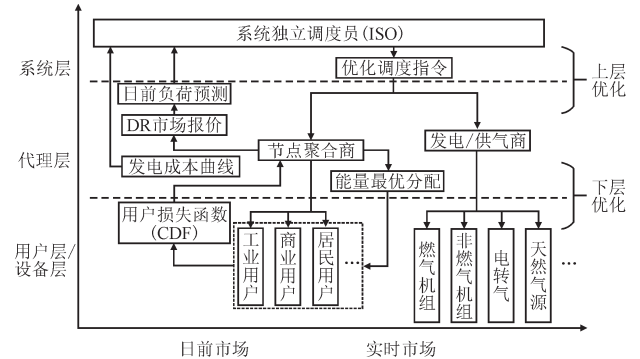


图2 双层优化调度结构流程

Fig. 2 Flow chart for bi-level optimal dispatch

2.1 ISO 上层优化调度

2.1.1 目标函数

在电、气负荷水平和供能成本曲线、需求响应报价确定之后, ISO 进行优化调度的目标是, 在满足系统供需平衡可靠运行的前提下, 使得购能成本最小。在需求响应的框架下, 广义的购能成本还包含购买需求响应服务的成本。直接参与上层调度的有: 各燃气机组的有功出力 $P_{glu,i,j}^e$ 和无功出力 $Q_{glu,i,j}^e$, 非燃气机组的有功出力 $P_{ng,i,j}^e$ 和无功出力 $Q_{ng,i,j}^e$, 天然气源的天然气输出功率 P_{ij}^g 和电转气设备的天然气输出功率 $P_{pbg,i,j}^g$ 。而用户的灵活负荷通过聚合商进行响应决定该节点的电力负荷有功

率削减 LC_i^e 和天然气负荷削减 LC_i^g 。在 ISO 的调度中,每个负荷水平相同的认为是一个时段,而不同时段之间是相互解耦的。其上层调度模型如式(6)所示。其中,控制变量有 $X=\{P_{\text{gfu},i,j}^e, Q_{\text{gfu},i,j}^e, P_{\text{ng},i,j}^e, Q_{\text{ng},i,j}^e, P_{\text{plg},i,j}^g, P_{\text{plg},i,j}^e, LC_i^e, LC_i^g\}$ 。其目标函数 F^{ISO} 为:

$$\begin{aligned} \text{Minimize}_{X_{ij}} F^{\text{ISO}} = & \sum_{i=1}^{NB^e} \left(IC_i^e(LC_i^e) + \rho_i^g \sum_{j \in \Omega_i^g} P_{ij}^g \right) + \\ & \sum_{i=1}^{NB^g} \left(IC_i^g(LC_i^g) + \sum_{j \in \Omega_i^e} GC_{ij}^{\text{ng}}(P_{\text{ng},i,j}^e, Q_{\text{ng},i,j}^e) \right) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: NB^e 和 NB^g 分别为电力系统和天然气系统的节点数量; ρ_i^g 为节点 i 气源供给天然气的单位价格; IC_i^e 和 IC_i^g 分别为购买电力和天然气需求响应服务所需支付的中断成本,其计算方式如下:

$$IC_i^e = MC_i^e(LC_i^e)LC_i^e \quad (7)$$

$$IC_i^g = MC_i^g(LC_i^g)LC_i^g \quad (8)$$

式中: MC_i^e 和 MC_i^g 分别为节点 i 的聚合商在需求响应市场上提供电力和天然气需求响应服务的边际报价,由其报价函数求导得到。

其报价函数由聚合商下所述用户的用户损失函数的基础上,结合聚合商的报价策略决定。在此不对聚合商的报价策略进行详细阐述,假设其依据用户损失函数的边际成本形成报价曲线。 GC_{ij}^e 为节点 i 上非燃气机组 j 的发电成本曲线,由式(9)计算

$$GC_{ij}^e = b_{0,i,j} + b_{1,i,j} P_{\text{ng},i,j}^e + b_{2,i,j} P_{\text{ng},i,j}^e{}^2 \quad (9)$$

式中: $b_{0,i,j}$, $b_{1,i,j}$, $b_{2,i,j}$ 分别为该非燃气机组成本曲线的相关参数,由历史数据拟合得到。

2.1.2 约束条件

在考虑电-气综合能源生态系统的基础上,将气、电系统间的能量流动和需求响应的负荷削减纳入节点的能量守恒式当中,分别得到电、气系统在新环境下的节点能量守恒等式:

$$\sum_{j \in \Omega_i^e} P_{\text{ng},i,j}^e + \sum_{j \in \Omega_i^g} P_{\text{gfu},i,j}^e - P_{\text{D},i,j}^e - \sum_{j \in \Omega_i^{\text{ng}}} P_{\text{plg},i,j}^e \quad (10)$$

$$LC_i^e - \text{real}(\sum_{j \in \Xi_i^e} f_{ij}^e) = 0$$

$$\sum_{j \in \Omega_i^e} Q_{\text{ng},i,j}^e + \sum_{j \in \Omega_i^{\text{ng}}} Q_{\text{gfu},i,j}^e - Q_{\text{D},i,j}^e \quad (11)$$

$$\text{im}(\sum_{j \in \Xi_i^e} f_{ij}^e) = 0$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j \in \Omega_i^e} P_{ij}^g - \sum_{j \in \Omega_i^{\text{ng}}} P_{\text{gfu},i,j}^g - P_{\text{D},i,j}^g + \\ & \sum_{j \in \Omega_i^{\text{ng}}} P_{\text{plg},i,j}^g + LC_i^g - \sum_{j \in \Xi_i^g} f_{ij}^g = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

式中: Ω_i^{ng} , Ω_i^{gfu} , Ω_i^{plg} , Ω_i^g 分别为节点 i 上非燃气机组,燃气机组,电转气设备,气源的集合; f_{ij}^e , f_{ij}^g 分别为从节点 i 到节点 j 的电输送功率和天然气流量。 Ξ_i^e 和 Ξ_i^g 分别为电力系统和天然气系统中,和节点 i 相连的支路的集合。

燃气机组和电转气设备承担着电力系统和天然气系统之间的能量流动。燃气机组的天然气消耗 $P_{\text{gfu},i,j}^g$ 和发电功率 $P_{\text{gfu},i,j}^e$ 之间的关系如式

$$P_{\text{gfu},i,j}^g = (a_{0,i,j} + a_{1,i,j} P_{\text{gfu},i,j}^e + a_{2,i,j} P_{\text{gfu},i,j}^e{}^2) / H_g \quad (13)$$

式中: $a_{0,i,j}$, $a_{1,i,j}$, $a_{2,i,j}$ 为跟燃气机组特性和运行状态相关的参数^[14]。

电转气设备的电能消耗功率 $P_{\text{plg},i,j}^e$ 和天然气产生功率 $P_{\text{plg},i,j}^g$ 的关系如下式:

$$P_{\text{plg},i,j}^e = \eta_{ij}^{\text{plg}} H_g P_{\text{plg},i,j}^g \quad (14)$$

式中: η^{plg} 为电转气的效率,一般为 0.55~0.75 之间。

在天然气系统中,管道中天然气稳态流量由 Weymouth 功率方程计算,如式(15)。该方程适用于高压和大管道直径的远距离天然气输送流量计算,且认为管道中气体温度不变^[15]。管道的特性与管道直径、管道长度、摩擦因数、气体压缩系数和气体温度等相关,被等效为系数 C_{ij} 。其中, π_i 表示节点 i 的节点气压。 sgn 表示狄利克雷(Dirichlet)函数,其值由式定义。

$$f_{ij}^g = \text{sgn}(\pi_i, \pi_j) C_{ij} \sqrt{|\pi_i^2 - \pi_j^2|} \quad (15)$$

$$\text{sgn}(\pi_i, \pi_j) = \begin{cases} 1, & \pi_i \geq \pi_j \\ -1, & \pi_i < \pi_j \end{cases} \quad (16)$$

电力系统的线路潮流计算如下

$$\begin{aligned} f_{ij}^e = & V_i V_j ((G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) + \\ & j(G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})) \end{aligned} \quad (17)$$

式中: V_i 和 V_j 分别为节点 i 和 j 上电压幅值; θ_{ij} 为节点 i, j 之间的相角差; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为电力节点 i 和 j 之间的电导和电纳。

除了等式约束式(10)~式(17)以外,该上层优化模型还包含不等式约束条件(18)~(21)

$$\underline{X}_{ij} \leq X \leq \overline{X}_{ij} \quad (18)$$

$$\underline{\pi}_i \leq \pi_i \leq \overline{\pi}_i \quad (19)$$

$$|f_{ij}^e| \leq S_{ij}^e \quad (20)$$

$$|f_{ij}^g| \leq S_{ij}^g \quad (21)$$

式中: $\overline{X_{ij}}$ 和 $\underline{X_{ij}}$ 分别为控制变量集合 X_{ij} 的上限和下限。

通常,节点各用户的电力负荷削减 LC_{ij}^e 的下限为 0,上限由式(22)计算:

$$\overline{LC_{ij}^e} = \gamma_{el,ij}^e \overline{P_{D,ij}^{el}} \quad (22)$$

式中: $\gamma_{el,ij}^e$ 为可参加需求响应的负荷比例。

天然气负荷削减 LC_{ij}^g 同理。在 ISO 进行优化调度后,系统各个元件的运行状态也随之决定。ISO 将直接调度各机组,并要求节点聚合商按要求进行需求响应。

2.2 节点聚合商下层能量优化分配

对于节点聚合商,他们收到 ISO 集中调度的指示 LC_i^e 和 LC_i^g 。在满足负荷削减的同时,聚合商将负荷削减在用户之间优化分配,以达到用户的经济损失最小。我们假设每种用户类型为 1 个用户集群,该用户集群只能共同削减负荷或者不削减负荷。即

$$\sum_{j \in \Psi_i} LC_{ij}^{el} + LC_{ij}^{\Pi} = LC_i^e \quad (23)$$

$$\sum_{j \in \Psi_i} LC_{ij}^{gl} = LC_i^g \quad (24)$$

式中: LC_{ij}^{el} , LC_{ij}^{gl} 和 LC_{ij}^{Π} 分别为节点 i 上用户 j 的传统电力负荷,传统天然气负荷和多能灵活负荷的削减量。

每个负荷水平 k 下的各类用户的电力和天然气负荷削减为 $LC_{ij,k}^e$ 和 $LC_{ij,k}^g$ 。各个节点聚合商的优化目标 F_i 为所有不同负荷水平时段 $T_{i,k}$ 下的收益之和最大:

$$\begin{aligned} \text{Maximize } F_i = & pft_{i,j,k}(T_{i,k}, P_{D,ij}^e - LC_{i,k}^e, P_{D,ij}^g - LC_{i,k}^g) - \\ & \sum_{k=1}^{NK} \sum_{j \in \Psi_i} CDF_{ij,k}^{el}(T_{i,k}, LC_{ij,k}^{el}) + CDF_{ij,k}^{gl}(T_{i,k}, LC_{ij,k}^{gl}) - \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^{NK} T_{i,k} (\rho_{i,k}^e (P_{D,i}^e - \sum_{j \in \Psi_i} LC_{ij,k}^{el} - \sum_{j \in \Psi_i} LC_{ij,k}^{\Pi}) \\ & + \rho_{i,k}^g (P_{D,i}^g - \sum_{j \in \Psi_i} LC_{ij,k}^{gl})) \end{aligned}$$

s.t. 式(23)~式(24)

$$\underline{LC_{ij,k}^{el}} \leq LC_{ij,k}^{el} \leq \overline{LC_{ij,k}^{el}} \quad (26)$$

$$\underline{LC_{ij,k}^{gl}} \leq LC_{ij,k}^{gl} \leq \overline{LC_{ij,k}^{gl}} \quad (27)$$

$$\underline{LC_{ij,k}^{el}} \leq LC_{ij,k}^{el} \leq \overline{LC_{ij,k}^{el}} \quad (28)$$

式中: $pft_{i,j,k}$ 为节点 i 用户 j 在时段 k 的收益函数,与供给的电、天然气和供给时间有关; NK 为根据负荷水平划分的时间段。

事实上,对于一用户类别,其负荷削减的时间可能同时跨越多个负荷水平时段。为解耦多时段之间的相关性,假设各个时间段之间的用户损失函数计算相互独立。另外,各节点的能源价格和负荷削减已定,式(25)可简化为

$$\text{Minimize } F_{i,k} = \sum_{j \in \Psi_i} CDF_{ij,k}^{el}(LC_{ij,k}^e) + CDF_{ij,k}^{\Pi}(LC_{ij,k}^{\Pi}) + \sum_{j \in \Psi_i} CDF_{ij,k}^g(LC_{ij,k}^g) \quad (29)$$

3 优化模型的求解

上层优化模型是非凸的非线性规划问题,而由式(29), (23)~(24), (26)~(28)组成的下层优化模型是线性规划问题,但其目标函数是分段线性化的。对于双层优化模型,一般将下层优化问题用 KKT 条件转化为上层优化模型的约束条件并进行求解。对于下层模型建立的拉格朗日函数 $L_{i,k}$ 如下:

$$\begin{aligned} L_{i,k}(LC_{ij,k}^{el}, LC_{ij,k}^{gl}, LC_{ij,k}^f) = & F_{i,k} + \lambda_{i,k}^e \left(\left(\sum_{j \in \Psi_i} LC_{ij,k}^{el} + LC_{ij,k}^{\Pi} \right) - LC_i^e \right) + \\ & \lambda_{i,k}^g \left(\left(\sum_{j \in \Psi_i} LC_{ij,k}^{gl} \right) - LC_i^g \right) + \sum_{j \in \Psi_i} \overline{\mu}_{ij,k}^{el} (LC_{ij,k}^{el} - \overline{LC_{ij,k}^{el}}) + \\ & \sum_{j \in \Psi_i} \overline{\mu}_{ij,k}^{gl} (LC_{ij,k}^{gl} - \overline{LC_{ij,k}^{gl}}) + \sum_{j \in \Psi_i} \overline{\mu}_{ij,k}^f (LC_{ij,k}^f - \overline{LC_{ij,k}^f}) \end{aligned} \quad (30)$$

式中: $\lambda_{i,k}^e$, $\lambda_{i,k}^g$ 为拉格朗日等式约束算子; $\overline{\mu}_{ij,k}^{el}$, $\overline{\mu}_{ij,k}^{gl}$, $\overline{\mu}_{ij,k}^f$ 为不等式约束算子。

$$\frac{dL}{dLC_{ij,k}^{el}} = \sum_{j \in \Psi_i} \frac{d(CDF_{ij,k}^{el}(LC_{ij,k}^{el}))}{dLC_{ij,k}^{el}} + \sum_{j \in \Psi_i} \lambda_{i,k}^e + \sum_{j \in \Psi_i} \overline{\mu}_{ij,k}^{el} = 0 \quad (31)$$

$$\frac{dL}{dLC_{ij,k}^{gl}} = \sum_{j \in \Psi_i} \frac{d(CDF_{ij,k}^{gl}(LC_{ij,k}^{gl}))}{dLC_{ij,k}^{gl}} + \sum_{j \in \Psi_i} \lambda_{i,k}^g + \sum_{j \in \Psi_i} \overline{\mu}_{ij,k}^{gl} = 0 \quad (32)$$

$$\frac{dL}{dLC_{ij,k}^f} = \sum_{j \in \Psi_i} \frac{d(CDF_{ij,k}^f(LC_{ij,k}^f))}{dLC_{ij,k}^f} + \sum_{j \in \Psi_i} \lambda_{i,k}^e + \sum_{j \in \Psi_i} \overline{\mu}_{ij,k}^f = 0 \quad (33)$$

$$\left(\sum_{j \in \Psi_i} LC_{i,j}^{\text{el}} + LC_{i,j}^{\text{fl}} \right) - LC_i^{\text{e}} = 0 \quad (34)$$

$$\left(\sum_{j \in \Psi_i} LC_{i,j}^{\text{gl}} \right) - LC_i^{\text{g}} = 0 \quad (35)$$

$$\overline{\mu}_{i,j,k}^{\text{el}} (LC_{i,j,k}^{\text{el}} - \overline{LC}_{i,j,k}^{\text{el}}) = 0 \quad (36)$$

$$\overline{\mu}_{i,j,k}^{\text{gl}} (LC_{i,j,k}^{\text{gl}} - \overline{LC}_{i,j,k}^{\text{gl}}) = 0 \quad (37)$$

$$\overline{\mu}_{i,j,k}^{\text{fl}} (LC_{i,j,k}^{\text{fl}} - \overline{LC}_{i,j,k}^{\text{fl}}) = 0 \quad (38)$$

$$\overline{\mu}_{i,j,k}^{\text{el}} \geq 0, \overline{\mu}_{i,j,k}^{\text{gl}} \geq 0, \overline{\mu}_{i,j,k}^{\text{fl}} \geq 0 \quad (39)$$

通过求解方程组(31)~(38),并检验是否满足(39),可得到带求解变量 $LC_{i,j,k}^{\text{el}}$, $LC_{i,j,k}^{\text{gl}}$, $LC_{i,j,k}^{\text{fl}}$ 的参数表达式:

$$LC_{i,j,k}^{\text{el}} = \overline{LC}_{i,j,k}^{\text{el}}, LC_{i,j,k}^{\text{gl}} = \overline{LC}_{i,j,k}^{\text{gl}}, LC_{i,j,k}^{\text{fl}} = \overline{LC}_{i,j,k}^{\text{fl}} \quad (40)$$

值得注意的是,对于不同类型的用户,其CDF一般是不同的。即对于ISO给出的不同节点负荷削减量,CDF呈现出分段线性的特征。将式(40)提供的等式约束作为上层优化的额外的约束条件,使得双层优化简化成单层优化问题求解。

化简后的优化问题通过内点法进行求解。在求解优化问题的同时,节点电价 ρ_i^{e} 、天然气价 ρ_i^{g} 将作为副产物出现,由边际价格 $\partial L(X, \lambda, \mu) / \partial [P_{\text{D},i}^{\text{e}}, P_{\text{D},i}^{\text{g}}]$ 决定。该节点价格将在市场出清时被广播到各个节点。内点法具有能在求解速度和全局筛选性上取得较好的平衡,通过Matlab中的matpower工具包中的MIPS函数实现修改。

4 算例分析

采用IEEE24节点可靠性测试系统^[16]和比利时20节点天然气传输系统^[17]来测试电-气综合能源生态系统中利用多能灵活负荷进行需求响应的效果分析。其拓扑图如图3所示。每个负荷节点的不同用户类型比例参照文献[18]。在电力系统和天然气系统的连接节点且同时是天然气和电力系统的负荷节点的节点,我们对于每一类型的多能用户,设置了一定比例的多能灵活负荷。另外,电力节点15,13,4,2的12 MW,20 MW,100 MW 燃油机组被燃气机组取代。在天然气节点7,10,16安装了50 MW的电转气设备。电力和天然气的日负荷曲线如图4所示。

图4代表了一天之内在电气联合系统中的需求侧响应成本情况。如图4(a)为一天的负荷曲线,

每30 min采集1个数据点。在每个数据点上进行一次运行优化。其运行成本如图4(b)所示。我们将成本拆分成4个部分。其中,天然气系统由于其供给充足,管道容量大未造成阻塞,其需求响应成本一直处于较低的状态。在20:00左右的电力负荷尖峰时段,ISO对于需求响应的购买达到了尖峰。

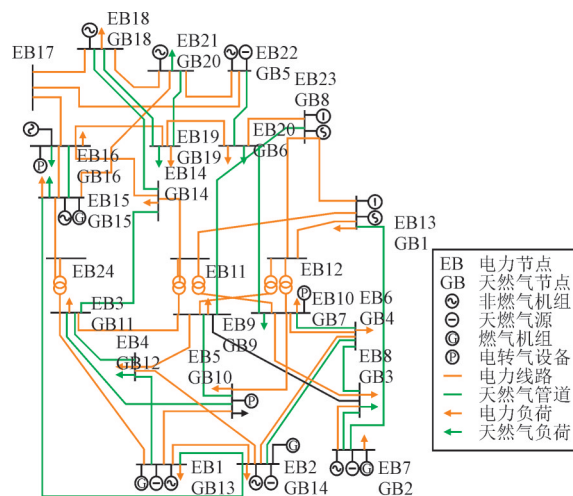
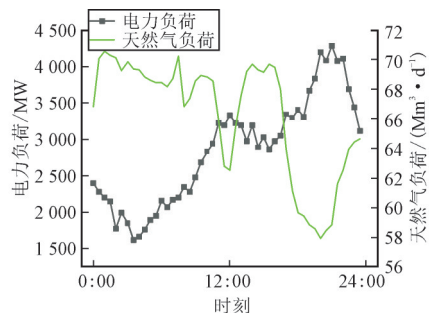
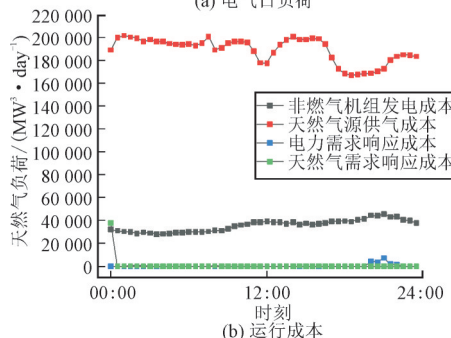


图3 电-气综合能源生态系统测试案例拓扑图

Fig. 3 Topological graph of test case for integrated electricity and gas system



(a) 电气日负荷



(b) 运行成本

图4 电气日负荷曲线及运行成本

Fig. 4 Daily load profile and operational cost

节点的能源价格会对节点聚合商的能源采购策略产生影响,如图5所示。节点电价在通常情况下保持较为稳定的水准,在20:00左右产生电价尖峰。因此,购买电力能源需要更多的成本,而提供需求响应倾向于削减能源成本同时还可以获取收

益。因此,价格尖峰和需求响应服务的购买尖峰在时间上具有一致性。对于天然气系统也是如此,在0:00~3:00,7:00左右出现需求服务购买尖峰。

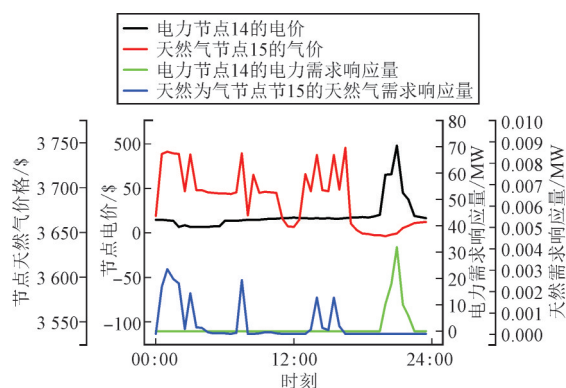


图5 节点价格以及节点用户需求响应情况

Fig. 5 Nodal price and demand response of nodal users

为研究不同多能灵活负荷比例对于需求响应的影响,我们设置了3个场景,多能灵活负荷分别占据25%,50%,75%的比例,表1为不同灵活负荷比例下的成本比较。可以看到,随着多能灵活负荷比例的上升,总成本下降。其中,非燃气机组供电成本和天然气供气成本并无明显变化,其成本下降主要是由需求响应服务购买成本下降引起的。其原因是因需求响应中断的负荷由另一种能源代替。

表1 不同灵活负荷比例下成本比较

Tab.1 Cost comparison for different flexible load portions

场景	A	B	C
多能灵活负荷占比	25%	50%	75%
电力需求响应成本/(\$/hour)	49 912	45 015	44 496
天然气需求响应成本/(\$/h)	338 508	315 481	301 119
非燃气机组发电成本/(\$/h)	47 662	47 455	47 433
天然气供气成本/(\$/h)	209 267	209 362	209 422
总成本/(\$/h)	645 385	617 313	602 470

5 结论

电气系统的耦合使能源的传输和用户侧的需求响应变得更加灵活。多能灵活负荷的出现使得在不中断正常服务的前提下,实现需求响应,减少用户损失。但是目前对于多能源需求响应的研究更加侧重于配网侧通过能源集线器模型实现多能互补。本文通过建立双层优化模型,利用市场激励实现能源传输侧和用户侧进行共同灵活运行以实现供需的友好互动。仿真结果表明,相对于传统的电力需求响应,多能需求响应的确有着经济性上的

优势。然而,用户侧集群庞大,行为随机性强,且需求响应的重要来源是空调,与冷热的供应密切相关。如何融合冷热供给系统,且将用户的随机行为纳入考虑,将用户满意度定量纳入经济指标中,将会是未来的研究机遇与挑战。

参考文献

- [1] HE Y, SHAHIDEHPOUR M, LI Z, et al. Robust constrained operation of integrated electricity-natural gas system considering distributed natural gas storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 9(3):1061-1071.
- [2] 中电联行业发展与环境资源部. 2016年电力统计基本数据一览表[EB/OL]. <http://www.cec.org.cn/guihuayutongji/tongjinxinxi/niandushuju/2018-03-21/178791.html>, 2018-03-21
- [3] 余娟, 马梦楠, 郭林, 等. 含电转气的电-气互联系统可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3):708-715.
YU Juan, MA Mengnan, GUO Lin, et al. Reliability evaluation of integrated electrical and Natural-Gas system with Power-to-Gas [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3):708-715.
- [4] WANG J, ZHONG H, MA Z, et al. Review and prospect of integrated demand response in the multi-energy system [J]. Applied Energy, 2017, 202:772-782.
- [5] JIA H, DING Y, SONG Y, et al. Operating reliability evaluation of power systems considering flexible reserve provider in demand side[J/OL]. IEEE Transactions on Smart Grid, [2018-04-17]. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8340166&isnumber=5446437>.
- [6] HELSETH A, HOLEN A T. Impact of energy end use and customer interruption cost on optimal allocation of switchgear in constrained distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3):1419-1425.
- [7] GOOD N, CESEÑA E A M, HELTORP C, et al. A transactive energy modelling and assessment framework for demand response business cases in smart distributed multi-energy systems[J/OL]. Energy, [2018-02-20]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917306992>.
- [8] SHARIATKHAH M-H, HAGHIFAM M-R, CHICCO G, et al. Adequacy modeling and evaluation of multi-carrier energy systems to supply energy services from different infrastructures[J]. Energy, 2016, 109:1095-1106.
- [9] SHARIATKHAH M H, HAGHIFAM M R, PARSAMOOGHADDAM M, et al. Evaluating the reliability of multi-energy source buildings: a new analytical method for

- considering the dynamic behavior of thermal loads[J]. Energy & Buildings, 2016, 126:477-484.
- [10] ZHANG X, SHAHIDEPOUR M, ALABDULWAHAB A S, et al. Security-constrained co-optimization planning of electricity and natural gas transportation infrastructures[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6):2984-2993.
- [11] GÖTZ M, LEFEBVRE J, MÖRS F, et al. Renewable Power-to-Gas: a technological and economic review[J]. Renewable Energy, 2016, 85:1371-1390.
- [12] NEGASH A I, HARING T W, KIRSCHEN D S. Allocating the cost of demand response compensation in wholesale energy markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3):1528-1535.
- [13] GERD H. KJØLLE, SAMDAL K, SINGH B, et al. Customer costs related to interruptions and voltage problems: methodology and results[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3):1030-1038.
- [14] UNSIHUAY C, LIMA J W M, DE SOUZA A C Z. Modeling the integrated natural gas and electricity optimal power flow[C]. Tampa: IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007.
- [15] AN S, LI Q, GEDRA T W. Natural gas and electricity optimal power flow[C]. Dallas: IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003.
- [16] GRIGG C, WONG P, ALBRECHT P, et al. The IEEE reliability test system-1996, a report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 14(3):1010-1020.
- [17] DE WOLF D, SMEERS Y. The gas transmission problem solved by an extension of the simplex algorithm[J]. Management Science, 2000, 46(11): 1454-1465.
- [18] WANG P, DING Y, XIAO Y. Technique to evaluate nodal reliability indices and nodal prices of restructured power systems[J]. IEEE Proceedings- Generation, Transmission and Distribution, 2005, 152(3):390-396.

(责任编辑 张健)

收稿日期:2018-08-15

作者简介:毛颖兔(1963),男,浙江诸暨人,教授级高工,本科,从事电力系统研究及管理工作。

(上接第3页)

业又好又快发展,为实现“两个一百年”战略目标提供坚实的能源供应保障。

参考文献

- [1] 史丹.全球能源转型特征与中国的选择[N].经济日报, 2016.08.18(14版).
- [2] 朱彤,王蕾.《国家能源转型:德、美实践与中国选择》——对能源转型的战略性思考[M].杭州:浙江大学出版社,2016.
- [3] 徐小杰.中国2030:能源转型的八大趋势与政策建议[M].北京:社会科学文献出版社,2015.
- [4] 王勇.构建全球能源互联网促进国际合作加快能源转型[C].苏州:2016国际能源变革论坛,中国,2016.
- [5] 孙贤胜,许慧文.国际能源转型的趋势与挑战[J].国际石油经济,2018,26(1):7-10.
- SUN Xiansheng, XU Huiwen. Trends and challenges in international energy transformation[J]. International Petroleum Economics, 2018, 26(1):7-10.
- [6] 黄晓勇.世界能源蓝皮书:世界能源发展报告(2018)[M].北京:社会科学文献出版社,2018.
- [7] 国际能源署.《2017版《BP世界能源统计年鉴》报告 中文版》[EB/OL].https://wenku.baidu.com/view/af6cfbb04bfe04a1b0717fd5360cba1aa8118c2d.html, 2017.10.17.
- [8] 国家发改委、环保部、国家能源局.煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020年)[EB/OL].http://www.gov.cn/gongbao/content/2015/content_2818468.htm, 2014.09.12.
- [9] 王颂.加快再电气化进程,推进绿色发展[N].国家电网报,2018.03.07(1版).
- [10] 国际能源署.《世界能源展望》2017版[EB/OL].https://www.bp.com/zh_cn/china/reports-and-publications/bp_2017_.html, 2017.11.25.
- [11] 国际能源署.《中国能源转型和发展(世界能源展望2017中国特别报告)》[EB/OL].http://news.ifeng.com/a/20171218/54263252_0.shtml, 2017.12.18.
- [12] 国家能源局.《2016年光伏发电统计信息》[EB/OL].http://www.nea.gov.cn/2017-02/04/c_136030860.htm, 2017.02.04.
- [13] 国家能源局.《2017年光伏发电相关统计数据》[EB/OL].http://53113.yuneb.com/article/show.html?itemid=1887051.shtml, 2018.01.24.
- [14] 国家能源局.《2018年上半年光伏建设运行情况》[EB/OL].http://www.nea.gov.cn/2018-08/02/c_137363846.htm, 2018.08.02.
- [15] 国际能源署.中国分布式能源前景展望[M].北京:石油工业出版社,2017.

(责任编辑 钱文姝)

收稿日期:2018-09-24

作者简介:童光毅(1969),男,湖北黄冈人,经济学博士,高级工程师。中国农业大学兼职教授、博士生导师。主要从事能源战略规划、电力体制改革、电网规划、电力安全生产监督管理等工作。