

计及综合需求响应的社区综合能源系统 优化调度

刘蓉晖,马天天,孙改平

(上海电力大学 电气工程学院,上海 200090)

摘要:综合能源系统(IES)需求侧潜在的电、热、冷和天然气可调度资源是降低 IES 运营成本的重要因素。为了在降低 IES 运营成本的同时保证用户用能满意度,建立了考虑综合满意度约束的 IES 日前优化调度模型。首先,基于温控负荷的热惯性建立社区综合能源系统柔性热负荷和冷负荷虚拟储能模型。同时,基于可平移、可转移、可削减的分类方法建立柔性电、气负荷优化调度模型。此外,基于主观法和客观法相结合的综合赋权方法建立满意度模型,并对比不同满意度约束下 IES 运营经济性和设备容量利用率。在 Matlab 软件平台编程并应用分支定界法求解仿真算例。仿真结果表明,所提出的优化调度模型可以降低 IES 运营成本,提高 IES 设备容量利用率,并保证用户用能满意度。

关键词:社区综合能源系统;综合满意度;需求侧响应;虚拟储能

中图分类号:TM73 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed23190

Optimal Dispatch of Community Integrated Energy System Considering Comprehensive Demand Response

LIU Ronghui, MA Tiantian, SUN Gaiping

(School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power,
Shanghai 200090, China)

Abstract: The potential dispatchable resources of electric power, heat, cool and gas in the integrated energy system (IES) are important contributors to reduce the operating cost of IES. In order to guarantee the customer satisfaction while reducing operating cost of IES, a IES day-ahead optimal dispatch model considering an integrated satisfaction constraint was established. Firstly, based on the thermal inertia of the temperature control load, a virtual energy storage model of the flexible heating load and cooling load in the community IES was established. Then, a flexible electric load and gas load optimal dispatch model was established based on the classification method of shiftable load, transferable load, and curtailable load. Furthermore, a satisfaction model based on an integrated weighting method combining subjective and objective methods was established, and IES operating economy and equipment capacity utilization were compared under different satisfaction value. Programming was carried out in Matlab, and branch and bound method was applied to solve simulation examples. Simulation results indicate that the declared optimal dispatch model can reduce the operating cost of IES, improve the equipment capacity utilization of IES and guarantee the customer satisfaction.

Key words: community integrated energy system; hybrid satisfaction; demand response; virtual energy storage

传统化石能源的过度使用引起了持续的环境污染问题^[1]。如何提高太阳能等清洁能源利用率和减少污染物排放已成为现代能源系统中需要考虑的重要研究方向^[2]。但是,电、热、冷、气等多种能源以往都是分开进行管理和运营^[3],因此能源之间缺少耦合性导致能源利用率较低。综

合能源系统(integrated energy system, IES)已经成为解决上述问题的重要方法^[4]。

针对 IES 需求侧管理的研究有很多,基于热电联产(combined heating and power, CHP)的地区电力和热力系统是 IES 一种常见形式^[5]。文献[6]利用多能源互补策略来增加可再生能源的消纳,

基金项目:国网上海市电力公司科技项目(SGSH0000DJJS1900288);上海绿色能源并网工程技术研究中心项目(13DZ2251900)

作者简介:刘蓉晖(1975—),女,博士,副教授,Email:liuronghuiyzy@126.com

通讯作者:孙改平(1984—),女,博士,讲师,Email:sunfrog2002@163.com

研究了包含热电联产机组和电热设备耦合的IES系统,并考虑了供热网络的能量存储特性,提出了一种结合电、热的调度方法。但是,该文献忽略了需求侧响应带来的影响。文献[7]建立了多目标IES调度模型,基于能源价格建立实时需求响应模型。文献[8]考虑电力和热力需求响应,提出了降低IES运营成本的能源管理策略,建立柔性电和热负荷模型,并将电负荷分为可转移负荷和可削减负荷两种,将柔性热负荷分为住宅用水负荷和室内供暖负荷。储能设备具有较高成本和较长投资周期^[9],用户侧虚拟储能的应用有助于缓解这一问题。文献[10]基于不同室内温度下客户的舒适度和建筑物的热储存能力,实现了热负荷跨时段转移。通过利用建筑物的储热特性,参考文献[11]提出了基于虚拟存储系统(virtual energy storage system, VESS)的建筑物模型,并将VESS应用到建筑物微电网的优化调度模型中以降低运营成本。

基于以上分析,本文提出了基于电、冷、热和天然气能源子系统的综合需求响应模型。首先,基于可平移、可转移、可削减的分类方法建立了柔性电力和天然气需求响应模型。然后,利用虚拟热、冷能量存储系统来降低IES的运营成本。此外,建立了综合满意度模型,并在不同满意度值约束下对比了IES运营经济性和设备容量利用率。

1 IES结构和需求响应模型

1.1 IES结构

图1为IES结构图。

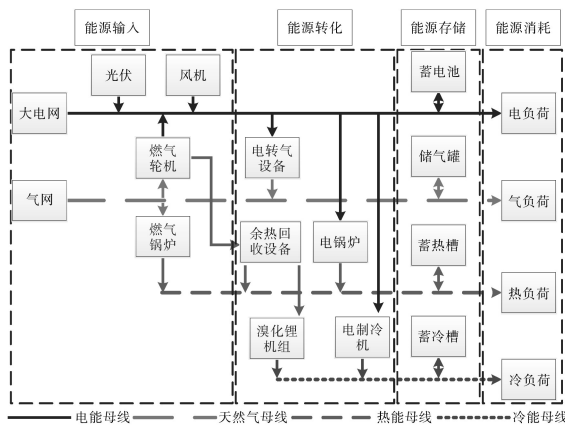


图1 IES结构

Fig.1 IES architecture

如图1所示,能源生产模块包括太阳能发电(photovoltaics, PV), 风扇涡轮机(wind turbine,

WT), 微型燃气轮机(gas turbine, GT)和燃气锅炉(gas boiler, GB)。能量转换模块包括电制热(electric boiler, EB), 废热回收锅炉(waste heat boiler, WHB), 溴化锂制冷(lithium bromide refrigerator, LBR), 电转气(power-to-gas, PtG)和电制冷(electric refrigerator, EC)。能量存储模块由电存储(electricity storage, ES), 热存储(heating storage, HS), 冷存储(cooling storage, CS)和气存储(gas storage, GS)组成。能源消耗部分包括电、热、冷和天然气负荷。

1.2 电、气需求响应模型

1.2.1 可平移负荷

社区IES中用能时段可整体平移的负荷,用 L_{shift} 表示可平移负荷, $[t_1, t_2]$ 表示平移前负荷的用能时段, $[t_{\text{sh-}}, t_{\text{sh+}}]$ 表示可平移负荷可平移的时段间隔,0-1变量 $\alpha_{\text{sh},t}$ 表示时段 t 的平移状态, $\alpha_{\text{sh},t}=1$ 表示时段 t 负荷进行平移。

平移负荷的调度成本^[12]如下:

$$F_{\text{shift}} = F_{\text{cost}}^{\text{shift}} P_{\text{sum}}^{\text{shift}} \sum_{t=t_{\text{sh-}}}^{t_{\text{sh+}}+t_2-t_1} \alpha_{\text{sh},t} \quad (1)$$

式中: $F_{\text{cost}}^{\text{shift}}$ 为调度 L_{shift} 单位功率的成本; $P_{\text{sum}}^{\text{shift}}$ 为 L_{shift} 平移的总功率。

1.2.2 可转移负荷

可转移负荷的调度更加灵活,其供能时间可更改或中断,但调度后可转移负荷总功率需保持不变。 L_{div} 表示可转移负荷, $[t_{\text{div-}}, t_{\text{div+}}]$ 表示可转移负荷的可转移区间,状态变量 $\alpha_{\text{div},t}$ 表示可转移负荷的转移状态, $\alpha_{\text{div},t}=1$ 表示时段 t 进行转移,可转移负荷可转移功率约束如下:

$$\alpha_{\text{div},t} P_{\text{min}}^{\text{div}} \leq P_t^{\text{div}} \leq \alpha_{\text{div},t} P_{\text{max}}^{\text{div}} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{min}}^{\text{div}}$ 为可转移负荷最小转移功率; $P_{\text{max}}^{\text{div}}$ 为可转移负荷最大转移功率。

可转移负荷的调度成本如下:

$$F_{\text{div}} = F_{\text{cost}}^{\text{div}} \sum_{t=t_{\text{div-}}}^{t_{\text{div+}}} (\alpha_{\text{div},t} P_t^{\text{div}}) \quad (3)$$

式中: $F_{\text{cost}}^{\text{div}}$ 为 L_{div} 单位功率的调度成本。

若可转移负荷转移后的时段持续时间过短,实际中会导致设备的启停过于频繁从而使其损坏,因此需要对可转移负荷最小持续时间进行约束:

$$\sum_{t=t_{\text{div-}}}^{t+T_{\text{min}}^{\text{div}}-1} \alpha_{\text{div},t} \geq T_{\text{min}}^{\text{div}} (\alpha_{\text{div},t} - \alpha_{\text{div},t-1}) \quad (4)$$

式中: $T_{\text{min}}^{\text{div}}$ 为 L_{div} 最小连续运行时间。

1.2.3 可削减负荷

可削减负荷的调度过程通过对负荷用电功率进行一定比例的削减来完成。 L_{cut} 表示可削减负荷,状态变量 $\alpha_{\text{cut},t}$ 用于表示 t 时段的削减状态。 $\alpha_{\text{cut},t}=1$ 表示在 t 时段内削减负荷功率,可削减负荷的调度成本如下:

$$F_{\text{cut}} = F_{\text{cost}}^{\text{cut}} \sum_{t=1}^T \alpha_{\text{cut},t} (P_t^{\text{cut}} - P_t^{\text{cut}*}) \quad (5)$$

式中: $F_{\text{cost}}^{\text{cut}}$ 为 L_{cut} 单位功率的调度成本; P_t^{cut} 为 L_{cut} 削减后的功率; $P_t^{\text{cut}*}$ 为 L_{cut} 削减前的功率; T 为时段。

1.3 热、冷虚拟储能模型

社区建筑物节能可通过储热/冷的能力来实现。同样,居民热水集中供应方式下,也可利用其热惯性^[13]。

1.3.1 虚拟储热模型

文中居民用水通过加热储水箱的方式进行集中供应。忽略热水供应管道和用户侧的热能损耗,储水箱水温与相关参数的计算公式^[14]如下:

$$\theta_{t+1}^{\text{wat}} = \frac{\rho_w V_{t+1}^{\text{cold}} (\theta_{\text{cw}} - \theta_t^{\text{wat}}) C_w + \rho_w V_w \theta_t^{\text{wat}} + h_{t+1}^{\text{wat}} \Delta t}{\rho_w V_w C_w} \quad (6)$$

式中: θ_t^{wat} 为时段 t 热水负荷温度; V_t^{cold} 为时段 t 储水箱加入冷水体积; ρ_w 为水密度; C_w 为水比热容; V_w 为储水箱体积; θ_{cw} 为加入冷水的温度; h_t^{wat} 为时段 t 对水箱加热功率; Δt 为1。

1.3.2 虚拟储冷模型

以夏季室内供冷为例,建立室内外热能流动模型的过程^[14]。考虑到建筑物的热阻系数,室内温度与室外温度关系如下:

$$\theta_t^{\text{out}} - \theta_t^{\text{in}} = q_t R \quad (7)$$

式中: θ_t^{out} , θ_t^{in} 分别为时段 t 的室外温度和室内温度; q_t 为时段 t 室内外交互的热量; R 为建筑的热阻系数。

IES提供给室内的制冷功率为 $h_t^{\text{r}} \Delta t$,室内空气温度变化量与 t 时段内提供的制冷功率的关系如下:

$$\Delta \theta_t^{\text{in}} = \frac{h_t^{\text{r}} \Delta t + q_t}{C_{\text{air}}} \quad (8)$$

式中: C_{air} 为空气的比热容。

结合公式(7)和式(8)可得:

$$\theta_{t+1}^{\text{in}} = \theta_t^{\text{in}} e^{-\frac{1}{RC_w}} + (Rh_{t+1}^{\text{r}} + \theta_{t+1}^{\text{out}})(1 - e^{-\frac{1}{RC_w}}) \quad (9)$$

2 综合满意度模型

本文基于可平移负荷平移次数、可转移负荷

转移次数、可削减负荷削减次数及温控负荷温度变化范围等指标建立综合满意度模型来约束IES调度过程:

$$F_{\text{sat}} = 1 - F_{\text{dis}} \quad (10)$$

$$F_{\text{dis}} = \mu_1 F_{\text{dis1}} + \mu_2 F_{\text{dis2}} + \mu_3 F_{\text{dis3}} \quad (11)$$

式中: F_{sat} 为综合满意度函数; F_{dis} 为不满意度函数; F_{dis1} 为用电不满意度函数; F_{dis2} 为用热和冷不满意度函数; F_{dis3} 为用气不满意度函数; μ_1, μ_2, μ_3 分别为三个部分的权重系数。

参考文献[15],综合满意度取值范围为0.0~0.9。

2.1 热、冷虚拟储能模型

考虑到柔性电负荷调度所引起的客户不满,可通过以下函数来描述用户用能不满意度:

$$F_{\text{dis1}} = \omega_1 \cdot \frac{\sum_{t=1}^T \alpha_{\text{sh},t}}{A_{\text{max}}} + \omega_2 \cdot \frac{\sum_{t=1}^T \alpha_{\text{div},t}}{B_{\text{max}}} + \omega_3 \cdot \frac{\sum_{t=1}^T \alpha_{\text{cut},t}}{C_{\text{max}}} \quad (12)$$

式中: $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 分别为三个部分的权重系数; A_{max} 为可平移负荷最大平移次数; B_{max} 为可转移负荷的最大转移次数; C_{max} 表示可削减负荷的最大削减次数。

2.2 用热和冷不满意度函数

居民用水负荷关注水温是否满足基本舒适度需求:

$$\theta_{\text{min}}^{\text{wat}} \leq \theta_t^{\text{wat}} \leq \theta_{\text{max}}^{\text{wat}} \quad (13)$$

式中: $\theta_{\text{min}}^{\text{wat}}, \theta_{\text{max}}^{\text{wat}}$ 分别为水箱中水温的最低温度和最高温度。

根据文献[15],本文采用预测平均评价(predicted mean vote, PMV)指标量化人体对温度的舒适状态,PMV指标在-0.9~0.9之间变化是适当的。PMV指标与各种因素之间的关系公式如下:

$$I_{\text{PMV}} = 2.43 - 3.76 \cdot \frac{2T_{\text{sk}} - (D_1 T_z + D_2 T_m + T_z)}{2M_0(I_{\text{cl}} + I_a/f_{\text{cl}})} \quad (14)$$

式中: T_{sk} 为体表温度,取306.65 K; D_1, D_2 为体积大小系数; T_z, T_m 分别为室温和室内物体温度; M_0 为人体代谢率,70.6 W/m²; I_{cl} 为衣物热阻系数,取值0.113 m²·K/W; I_a/f_{cl} 表示室内空气热阻与衣物面积系数的比值,0.1 m²·K/W。

室内温度基本约束情况如下:

$$T_{\text{min}}^{\text{air}} \leq T_t^{\text{air}} \leq T_{\text{max}}^{\text{air}} \quad (15)$$

式中: $T_{\text{min}}^{\text{air}}$ 为室温最低值; $T_{\text{max}}^{\text{air}}$ 为室温最高值。

基于上述的水温和室温基本约束条件,因此

热、冷负荷用能不满意度函数如下:

$$F_{\text{dis2}} = \sigma_1 \frac{\sum_{t=1}^T |\theta_t^{\text{wat}} - \theta_e^{\text{wat}}|}{12 \times (\theta_{\text{max}}^{\text{wat}} - \theta_{\text{min}}^{\text{wat}})} + \sigma_2 \frac{\sum_{t=1}^T |T_t^{\text{air}} - T_e^{\text{air}}|}{12 \times (T_{\text{max}}^{\text{air}} - T_{\text{min}}^{\text{air}})} \quad (16)$$

式中: σ_1, σ_2 分别为热水温度函数和室内温度函数所占权重系数; θ_e^{wat} 为水温范围的中间值,取70℃; T_e^{air} 为室内温度最舒适温度值,即PMV指标取0时的室内温度,26℃。

2.3 用气不满意度函数

本文天然气负荷包括天然气灶和天然气交通工具,用以下函数具体量化用户的用能不满意度:

$$F_{\text{dis3}} = \varepsilon_1 \frac{\sum_{t=1}^T S_t}{S_{\text{max}}} + \varepsilon_2 \frac{\sum_{t=1}^T C_t}{C_{\text{max}}} \quad (17)$$

式中: $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 分别为可平移负荷不满意度函数和可削减负荷不满意度函数权重系数; S_t 为可平移气负荷在时段 t 的平移状态; C_t 为可削减气负荷在时段 t 的削减状态; S_{max} 为可平移气负荷最大平移次数; C_{max} 为可削减气负荷最大削减次数。

2.4 权重系数赋值

结合主观加权法和客观加权法确定 μ_1, μ_2, μ_3 的值,利用主观加权法确定 $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \sigma_1, \sigma_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ 的值^[16]。以下为主客观综合权重分配方法计算过程,针对指标 $Y_x (x=1, 2, \dots, v)$, v 为指标数量,主观权重的相对重要性系数数学模型如下:

$$\alpha_x = \omega_{sx} / (\omega_{sx} + \omega_{ox}) \quad (18)$$

式中: ω_{sx} 为指标 Y_x 的主观权重; ω_{ox} 为指标 Y_x 的客观权重。

客观权重系数的相对重要性系数 β_x 如下:

$$\beta_x = \omega_{ox} / (\omega_{sx} + \omega_{ox}) \quad (19)$$

结合式(18)、式(19),指标 Y_x 的综合权重计算如下:

$$\omega_x = \frac{\alpha_x \omega_{sx} + \beta_x \omega_{ox}}{\sum_{x=1}^v (\alpha_x \omega_{sx} + \beta_x \omega_{ox})} \quad (20)$$

3 储能设备模型

本文储能设备包括ES, HS, CS和GS。由于篇幅限制,以下为电储能设备的数学模型,其它形式的储能模型与之类似。储能设备的动态数学模型表示为

$$S_{\text{soc}}(t) = S_{\text{soc}}(t-1) \cdot (1 - \sigma) + \frac{P_{\text{cha}}(t) \rho_{\text{cha}} X_t \Delta t - P_{\text{dis}}(t) Y_t \Delta t / \rho_{\text{dis}}}{E_{\text{ps}}} \quad (21)$$

式中: $S_{\text{soc}}(t), S_{\text{soc}}(t-1)$ 分别为储能设备在 $t, t-1$ 时段的荷电功率大小; σ 为储能设备的荷电量自损率; $\rho_{\text{cha}}, \rho_{\text{dis}}$ 分别为储能设备的充、放电能效系数; $P_{\text{cha}}(t), P_{\text{dis}}(t)$ 分别为 t 时段储能设备的充、放电功率; X_t, Y_t 分别为储能设备的充、放能状态, $X_t \in \{0, 1\}, Y_t \in \{0, 1\}$; E_{ps} 为储能设备额定容量。

4 优化调度模型

4.1 目标函数

IES一个运行周期内的运行成本包括新能源发电成本、购电成本、购气成本、设备维护成本、柔性负荷调度成本和碳排放惩罚成本:

$$\begin{cases} \min F(t) = F_{\text{en}}(t) + F_{\text{ma}}(t) + F_{\text{di}}(t) + F_{\text{co}_2}(t) \\ F_{\text{en}}(t) = \sum_{i=1}^T [K_{\text{wt}} P_{\text{wt}}(t) + K_{\text{pv}} P_{\text{pv}}(t) + K_{\text{grid}} P_{\text{grid}}(t) + K_{\text{gas}} P_{\text{gas}}(t)] \Delta t \\ F_{\text{ma}}(t) = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^T \mu_{ij} P_{ij}(t) \Delta t \\ F_{\text{di}}(t) = F_{\text{shift}} + F_{\text{cut}} + F_{\text{div}} \\ F_{\text{co}_2}(t) = \sum_{i=1}^T Z_{\text{cost}} [\delta_1 P_{\text{grid}}(t) + \delta_2 P_{\text{MT}}(t) + \delta_3 P_{\text{CB}}(t)] \end{cases} \quad (22)$$

式中: F_{en} 为用能成本,包括新能源发电成本、购电成本和购气成本; F_{ma} 为设备维护成本; F_{di} 为柔性负荷调度成本; F_{co_2} 为碳排放惩罚成本; K_{wt} 为风机发电成本系数; P_{wt} 为风机出力; K_{pv} 为光伏发电成本系数; P_{pv} 为光伏出力; $K_{\text{grid}}, K_{\text{gas}}$ 分别为电价、天然气价; $P_{\text{grid}}, P_{\text{gas}}$ 分别为购电功率和购气功率; μ_{ij} 为储能设备 i 单位充放功率维护成本; P_{ij} 为储能设备充放功率; Z_{cost} 为单位重量 CO_2 排放的惩罚成本折算系数; P_{MT} 为燃气轮机出力; P_{CB} 为燃气锅炉出力; $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 分别为电网发电单位功率的 CO_2 排放系数、燃气轮机单位发电电量 CO_2 排放系数、燃气锅炉单位热能出力 CO_2 的排放系数,单位元/kg。以上机组 CO_2 排放系数及惩罚成本见参考文献[3]。

4.2 约束条件

为实现上述目标,需考虑如下约束:

1) 电功率平衡约束:

$$P_{\text{wt}}(t) + P_{\text{pv}}(t) + P_{\text{grid}}(t) + P_{\text{gt}}(t) + P_{\text{es}}(t) = P_{\text{load}}(t) + P_{\text{echg}}(t) \quad (23)$$

式中: P_{gt} 为GT发电功率; P_{es} 为ES出力; P_{load} 为电负荷; P_{echg} 为电转热、电转冷、电转气设备消耗电功率。

2) 热功率平衡约束:

$$H_{\text{whb}}(t) + H_{\text{gb}}(t) + H_{\text{eb}}(t) + H_{\text{bat}}(t) = H_{\text{wat}}(t) \quad (24)$$

式中: H_{whb} , H_{gb} , H_{eb} , H_{bat} , H_{wat} 分别为 WHB 热能出力、GB 热能出力、EB 热能出力、蓄热槽热能出力、热负荷。

3) 冷功率平衡约束:

$$C_{lbr}(t) + C_{ec}(t) + C_{cs}(t) = C_{air}(t) \quad (25)$$

式中: C_{lbr} , C_{ec} , C_{cs} , C_{air} 分别为 LBR 冷能出力、EC 冷能出力、储冷设备出力、冷负荷。

4) 气功率平衡约束:

$$G_{netg}(t) + G_{ptg}(t) + G_{gs}(t) = G_{gas}(t) \quad (26)$$

式中: G_{netg} , G_{ptg} , G_{gs} , G_{gas} 分别为购气功率、电转气出力、储气罐出力、气负荷。

文中各设备出力约束和储能设备约束参考文献[12],不再赘述。

4.3 模型求解

本文的 IES 模型是 0-1 型混合整数线性规划问题,其标准形式如下:

$$\begin{cases} \min F(x) \\ \text{s.t. } P_i(x) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \\ D_j(x) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \\ x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ x_k \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (27)$$

式中: $F(x)$ 为目标函数; x 为待优化变量; $P_i(x)=0$ 为等式约束; $D_j(x)$ 为不等式约束; m, n 分别为等式和不等式约束个数; $x_{\min}, x_{\max}$ 分别为 x 上下限; x_k 为状态变量。

参考文献[17],本文在 Matlab 软件 YALMIP 平台编程,采用分支定界法求解,相较于遗传算法等智能算法精确性更高。

分支定界法求解流程如图 2 所示。

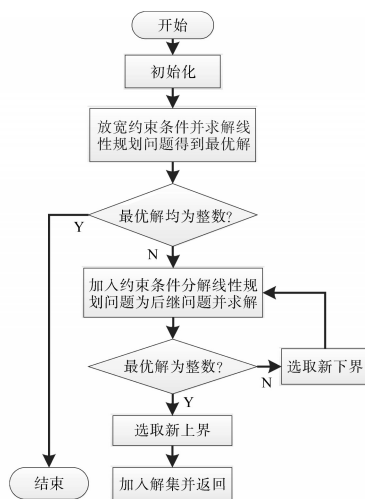


图2 分支定界法求解流程图

Fig.2 Flow chart of branch and bound method

5 算例

5.1 基础数据

选取居民区 IES 作为本文研究对象,以典型夏季日为例进行优化调度。夏季供冷需求占最大比例,燃气需求占最小比例。WT 和 PV 功率的预测曲线参考文献[4]。运行周期据分时电价分为 6 个时段,峰时段 10:00~15:00, 18:00~21:00, 电价为 0.82 元/(kW·h);平时段 7:00~10:00, 15:00~18:00, 21:00~24:00, 电价为 0.53 元/(kW·h);谷时段包括 0:00~7:00, 电价为 0.25 元/(kW·h);参考文献[4],天然气的价格为 2.5 元/m³。热、冷负荷虚拟储能模型参数参考文献[14]。

5.2 案例设置

案例 1:不考虑柔性负荷与虚拟储能模型;室温设置为固定值 26℃,水温设置为固定值 70℃;

案例 2:考虑电、气柔性负荷,不考虑虚拟储能模型;室温设置为固定值 26℃,水温设置为固定值 70℃;

案例 3:考虑电、气柔性负荷与虚拟储能模型;在不同满意度约束下对比 IES 运营经济性和设备容量利用率。

5.3 案例结果分析

案例 1:在不考虑柔性需求响应与虚拟储能情况下,求解最小运营成本;该案例下功率平衡结果如图 3~图 6 所示。

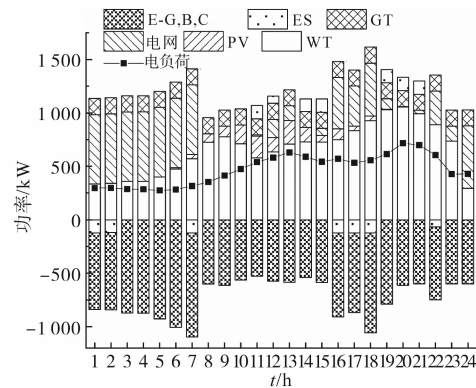


图3 电功率平衡

Fig.3 Electric power balance

该案例下为了使室温保持在 26℃,室内供冷功率的大小主要受到室外温度的影响,因此,室内供冷功率变化曲线与室外温度曲线变化趋势相同。同样,为了使储水箱中的水温维持在

70℃,总供热功率与注入水箱的冷水体积密切相关,结合图6可以看出,注入冷水体积越大,所需供热功率越大(室外温度曲线和注入冷水体积参考文献[14])。

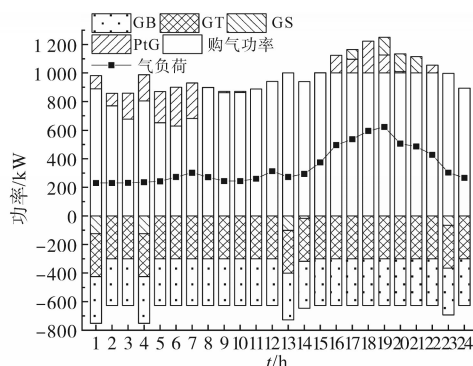


图4 气功率平衡

Fig.4 Natural gas power balance

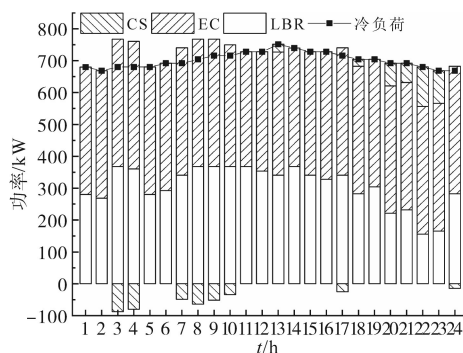


图5 冷功率平衡

Fig.5 Cold power balance

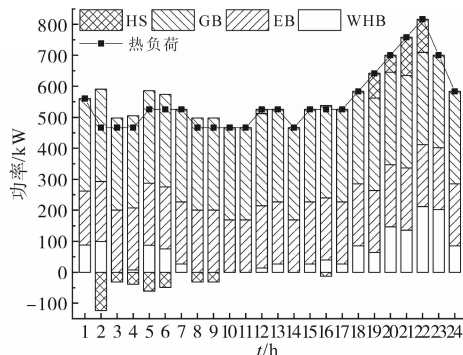


图6 热功率平衡

Fig.6 Heat power balance

案例2:将电、气柔性负荷模型纳入考虑,图7、图8即为电、气负荷优化后结果图。

从图7、图8可以看出,部分负荷功率从负荷峰值时段转移到非峰值时段,降低了系统用能成本。

案例3:综合满意度和IES成本如图9所示,综合满意度指数越大,IES成本越高。当满意度指数达到0.6时,IES达到满负荷运行,这是因为

夏季制冷负荷最大,制冷设备首先达到满负荷状态。满意度值继续增加,需增加IES制冷设备容量,将导致系统投资成本大幅增加。

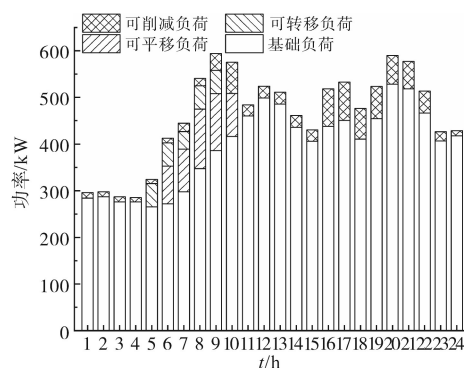


图7 电负荷

Fig.7 Electric load

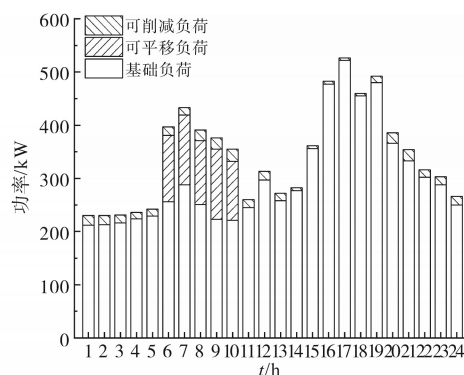


图8 气负荷

Fig.8 Natural gas load

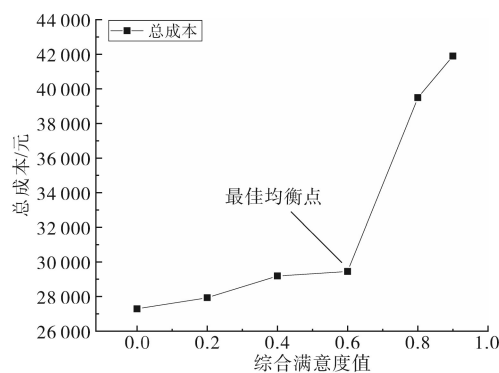


图9 IES结构满意度和成本

Fig.9 Integrated satisfaction and cost of IES

案例3中,最佳综合满意度值0.6的物理含义可以用图10来解释,容量冗余度 D 计算方法如下:

$$D = \frac{P_{\text{MAX}} - P_E}{P_E} \times 100\% \quad (28)$$

式中: P_{MAX} 为调度周期内设备最大输出功率; P_E 为设备额定容量。

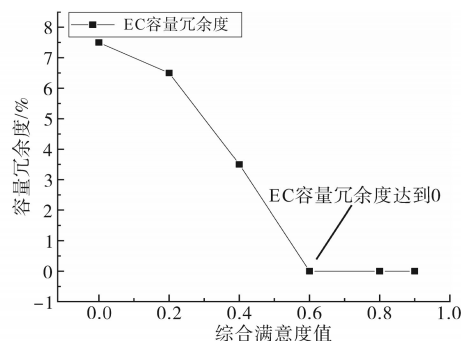


图10 满意度和容量冗余度

Fig.10 Integrated satisfaction and capacity waste rate

综合满意度越高,EC的容量裕度越小。当综合满意度的取值范围为0.0~0.6时,EC的容量裕度大于0;当综合满意度的取值为0.6时,EC的容量裕度为0。因此,案例3取综合满意度值0.6的场景与案例1、案例2对比。图11为案例1和案例3热水温度曲线对比,图12为案例1和案例3供热功率曲线对比。

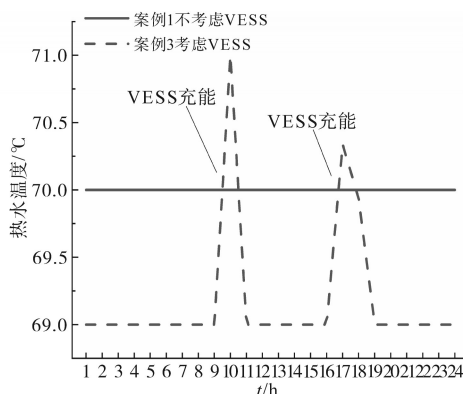


图11 热水温度

Fig.11 Residential water temperature

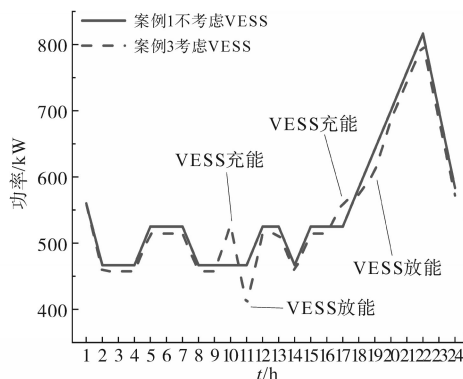


图12 热功率

Fig.12 Residential power

案例1中,水温和室内空气温度设置为固定值。案例3中,考虑到人体对温度的感知模糊性,通过满意度模型求得水温和室温范围。住宅用水的温度范围为69.0~71.0℃,室内温度范围为25.6~26.4℃,这也是热、冷负荷虚拟储能区间。

图11中,水温在时段10达到71.0℃,且在时段17和时段18高于下限69.0℃。考虑到热水具有很强的热惯性,为了降低IES用能成本,在电价较低的时段10、时段17和时段18,居民用水供热功率增加,进行虚拟储能,这样即可在接下来电价较高时段降低功率输出。冷负荷的虚拟储能过程与热负荷类似,不再赘述。

5.4 案例成本对比

对比案例1和案例2,案例2考虑了柔性电、气负荷模型,系统总运营成本降低2.43%;对比案例1和案例3,案例3考虑柔性电、气负荷与虚拟储能模型,系统总运营成本降低4.53%。

表1 3种案例成本对比

Tab.1 Costs comparison of 3 case

案例	用能成本/元	碳排放成本/元	运营成本/元
1	28 979	1 301	30 280
2	28 102	1 342	29 544
3	27 591	1 316	28 907

6 结论

本文提出了一种基于能源集线器优化调度模型,以降低IES运营成本。首先,将虚拟储热/储冷系统与柔性电/气负荷模型相结合,参与IES优化运行,有效降低了IES的运行成本。同时,提出了基于综合加权法的综合满意度模型,以量化用能满意度,并提高IES设备容量利用率。最后,以某居民区夏季场景进行案例分析,结果表明,当综合满意度为0.6时,IES运行成本降低了4.53%,且此时设备容量利用率最高。

参考文献

- [1] 张军,张中丹,王洲,等. 基于数据驱动的微电网双层鲁棒优化调度[J]. 电气传动,2022,52(1):68-75.
ZHANG Jun, ZHANG Zhongdan, WANG Zhou, et al. Double layer robust optimal dispatching of micro-grid based on data-driven[J]. Electric Drive,2022,52(1):68-75.
- [2] 吴琨,李卫民,王军,等. 新能源发电系统高增益直流变换器研究[J]. 电气传动,2018,48(12):16-21.
WU Kun, LI Weiming, WANG Jun, et al. Research on high gain DC converter for new energy power generation system[J]. Electric Drive,2018,48(12):16-21.
- [3] KHAN N A, SIDHU G A S, AWAN A B, et al. Modeling and operation optimization of RE integrated microgrids considering economic, energy, and environmental aspects[J]. International Journal of Energy Research,2019,43(7):6721-6739.
- [4] 林顺富,刘持涛,李东东,等. 考虑电能交互的冷热电区域多