

计及人体舒适度和柔性负荷的综合能源协同优化调度

江岳春¹, 曾诚玉¹, 郇嘉嘉², 赵瑾³, 刘雨晴¹, 吴舒泓¹

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 广东电网有限责任公司电网规划研究中心, 广东 广州 510080; 3. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要:基于能源互联网框架,提出了一种计及人体舒适度和柔性负荷的综合能源协同优化调度方法。首先,从用户需求侧的角度研究能源使用特性,将柔性负荷分为可转移负荷、可削减负荷以及可转换负荷,分别建立数学模型,并分析其经济性;然后,根据建筑热物质特性,构建了建筑等效热阻模型,用于分析冷/热功率与人体舒适度之间的关系;最后,考虑人体舒适度和用户侧柔性负荷,以综合能源服务商运行收益最大为目标函数,得到了园区级综合能源协同优化调度结果,结果表明所提模型可提高经济性并促进新能源的就地消纳。

关键词:综合能源系统;柔性负荷;综合需求响应;建筑等效热阻模型;人体舒适度

中图分类号: TM 73

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.201908007

0 引言

“十三五”以来,我国将能源互联网提升至国家战略地位,如何保证能源绿色发展,促进能源转型,提高能源利用率,是目前亟待解决的问题^[1-2]。综合能源系统通过对冷热电气的综合利用以及梯级调度可有效提高综合能源利用率,降低环境污染^[3]。目前国内外对于综合能源系统优化调度的研究侧重于通过建立包含冷热电联产系统 CCHP (Combined Cooling Heating and Power)、锅炉、热泵、吸收式制冷机、光伏机组、风机、储能等设备的综合能源体系,以系统运行成本最小为目标,采用粒子群算法、多目标分析法以及双层规划等方法进行求解,从而对综合能源系统进行调度^[4-6]。

电力需求响应(DR)与可再生能源发电间一直具有良好的互补效应,许多研究表明电力需求响应可以有效提高电力系统消纳可再生能源的能力^[7-9]。而随着综合能源的推进,用户侧冷、热、电等负荷均可作为柔性负荷参与综合能源运行调度,且由于冷、热、电负荷的耦合互补特性使得其灵活性相较电力需求响应更高^[10-11]。若合理地利用需求侧资源调节潜力,构建含综合需求响应 IDR (Integrated Demand Respond) 的联合运行调度策略,有利于提升能源利用效率,降低供能和用能成本。

用户侧柔性负荷参与需求响应对用户的用能舒适度有直接影响^[12]。已有文献中,文献[13]引入热感觉平均标度预测 PMV (Predicted Mean Vote) 指

标,通过计算 PMV 指标与温度之间的关系,得出 24.8~27.3℃ 为最优舒适温度区间,利用简化的热负荷模型得出温度与冷/热负荷的关系,对家庭能源中心进行优化调度;文献[14]研究了 PMV 指标与室内温度和辐射温度的关系,以 [-0.9, 0.9] 为 PMV 约束,以空调冷负荷最小为目标,优化求解得到最优室内温度,仿真结果表明所提方法既可保证用户用能舒适度又可降低空调能耗;文献[15]通过研究人体作息规律,得出不同场景下的最优温度区间,算例表明所提设定方法既能有效消纳光伏,又能满足用户在不同状态下的热需求。

上述文献在考虑人体舒适度的能源调度中取得了一定的研究成果,同时为后续研究提供了以下2个发展方向:①建筑导热简化模型或导致计算结果有失偏颇,构建较为全面的建筑导热模型有利于进一步优化调度;②现有研究针对温度设定采用较为固定的区间,若能跟踪室外温度实时调节,在保障用户舒适度的同时,有利于进一步的节能降耗。

综上所述,本文将综合能源系统中的用户侧柔性负荷分为可转移负荷、可削减负荷以及可转换负荷,并分别建立数学模型;其次,为考虑人体舒适度,根据建筑热物质特性,以墙壁、窗体、屋顶、地板以及房间内部热交换模型为基础,构建了建筑等效热阻模型,采用牛顿-拉夫逊法对模型进行求解,得到室内温度与能量流动的精准关系;在此基础上,本文以综合能源运行收益最大为目标函数,结合用户舒适度与用能满意度约束,通过算例分析对比本文所提模型在供需两端的经济性和能源消纳方面的有效性。

1 柔性负荷

电力需求响应依靠需求侧负荷在时间上的转移或削减,在削峰填谷、新能源消纳中作用明显,但是

收稿日期:2019-01-19;修回日期:2019-05-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277057);中国南方电网公司科技项目(GD-KJQQ-20161202)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51277057) and the Technical Projects of China Southern Power Grid (GD-KJQQ-20161202)

在一定程度上也影响了用户舒适度。综合能源系统中,冷、热负荷同样具有可控潜力,因此研究冷、热、电等能源的综合需求响应可有效激发负荷柔性。

1.1 综合需求响应模型

参照传统电力需求响应,综合需求响应分为柔性负荷和非柔性负荷两大类,其中柔性负荷分为可转移负荷、可削减负荷和可转换负荷^[16]。综合能源系统中,可转移负荷是指能够在时间上进行平移,但总用能量维持不变的负荷,包括电动汽车 EV(Electric Vehicle)、蓄电池、储热/冷罐等器件,其数学模型可表示为:

$$\sum_{i=1}^N (T_{L,i}^+(t) - T_{L,i}^-(t)) = 0 \quad (1)$$

其中, $T_{L,i}^+(t)$ 为转移后 t 时刻负荷; $T_{L,i}^-(t)$ 为转移前 t 时刻负荷; i 为能源种类,能源种类包括冷能、热能及电能; N 为总调度时刻。

可削减负荷包括暖通系统、热水器、照明等在一定时间段内可灵活削减的负荷,它不仅会影响该时刻负荷总量,一定程度上也会对其他时刻的负荷造成影响,其数学模型如式(2)所示。

$$\begin{aligned} R_{L,i}^+(t) = & \alpha_i v_i(t-1) R_{L,i}^+(t-1) + \\ & \beta_i v_i(t-2) R_{L,i}^+(t-2) + \\ & \gamma_i v_i(t-3) R_{L,i}^+(t-3) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $R_{L,i}^+(t)$ 为可削减负荷参与响应后 t 时刻负荷; $v_i(t)$ 为 t 时刻可削减负荷是否参与需求响应的 0-1 变量,当可削减负荷参与需求响应时,取值为 1,否则为 0; $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 为相关影响因子。

可转换负荷则是需求侧能够实现能源间能量转换的设备,包括微型燃气轮机、电热泵、电转气(P2G)设备等,其数学模型可描述为:

$$\begin{bmatrix} \Delta C_{L,1} \\ \Delta C_{L,2} \\ \vdots \\ \Delta C_{L,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1i} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2i} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{j1} & d_{j2} & \cdots & d_{ji} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $\Delta C_{L,j}$ 为 j 类能源负荷变化量; H_i 为 i 类能源需求响应量; d_{ji} 为需求响应耦合因子,表示 i 类能源需求响应对 j 类能源负荷的影响。

1.2 综合需求响应效益分析

采用弹性系数矩阵法对综合需求响应模型进行求解分析,引入弹性系数,其定义为:

$$\varepsilon_{mn}^i = \frac{\Delta L_m^i}{\delta^i L_m^i} / \frac{\Delta V_m^i}{V_m^i} \quad (4)$$

其中, ε_{mn}^i 为弹性系数,反映用户侧负荷对价格变化所做的调整,当 $m=n$ 时称为自弹性系数,否则称为互弹性系数; ΔL_m^i 为 m 时刻需求响应后 i 类能源变化量; L_m^i 为需求响应前总负荷; δ^i 为弹性负荷比例; ΔV_m^i 为 i 类能源价格变化量, V_m^i 为初始价格, $\Delta V_m^i/V_m^i$ 的比

值记为 k^i ,即电价变化率。

由式(4)可计算得任意时刻负荷变化量如式(5)所示。

$$\Delta L_m^i = \sum_{n=1}^N \varepsilon_{mn}^i \frac{\Delta V_m^i}{V_m^i} \delta^i L_m^i \quad (5)$$

需求响应后,综合能源系统内售能收益 R^i 为:

$$\begin{aligned} R^i = & \sum_{m=1}^N (\Delta L_m^i + L_m^i) (\Delta V_m^i + V_m^i) = \\ & \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N V_m^i \varepsilon_{mn}^i k^i \delta^i (1 + k^i) L_m^i + \\ & \sum_{m=1}^N V_m^i L_m^i (1 + k^i) \end{aligned} \quad (6)$$

1.3 用能满意度

用户参与需求响应时需考虑的另一个因素是用户用能满意度,通常以用户用能方式满意度指标 m_s^i 和用能费用支出满意度指标 m_p^i 来描述:

$$m_s^i = 1 - \frac{\sum_{m=1}^{24} |\Delta L_m^i|}{\sum_{m=1}^{24} L_m^i} \quad (7)$$

$$m_p^i = 1 - \frac{\sum_{m=1}^{24} |\Delta C_m^i|}{\sum_{m=1}^{24} C_m^i} \quad (8)$$

其中, ΔC_m^i 为 m 时刻用户能源费用支出的变化量; C_m^i 为响应前 m 时刻用户能源费用支出。

1.4 电动汽车需求响应模型

电动汽车动态充放电模型^[17]可描述为:

$$S(t+1) = S(t) + \left(\eta_{ev,c} \frac{P_{ev,c}(t)}{E_{ev}} - \frac{1}{\eta_{ev,c}} \frac{P_{ev,d}(t)}{E_{ev}} \right) \Delta t \quad (9)$$

其中, $S(t)$ 为电动汽车在 t 时刻的荷电状态 SOC(State Of Charge); $\eta_{ev,c}$ 和 $\eta_{ev,d}$ 分别为电动汽车的充电和放电效率; $P_{ev,c}(t)$ 和 $P_{ev,d}(t)$ 分别为 t 时刻电动汽车的充电和放电功率; E_{ev} 为电动汽车的额定容量; Δt 为调度时间间隔。

考虑需求响应背景下电动汽车用户对分时电价的响应并结合其出行行为,建立电动汽车的需求响应模型如式(10)所示。

$$P_{ev}(t) = \frac{(S(t_{dept}) - S(t_{arr})) E_{ev} \ln(P_e(t))^{\varepsilon_{mn}^e}}{\eta_{ev} \Delta t \sum_{t=t_{arr}}^{t_{dept}} (P_e(t))^{\varepsilon_{mn}^e}} \quad (10)$$

其中, $P_{ev}(t)$ 为 t 时刻的电动汽车充放电功率; $P_e(t)$ 为综合能源服务商在 t 时刻的供电单价; ε_{mn}^e 为电价弹性系数; η_{ev} 为电动汽车的充放电效率; $S(t_{dept}), S(t_{arr})$ 分别为电动汽车可参与调度始、末时刻的荷电状态, t_{arr}, t_{dept} 分别为电动汽车可参与调度始、末时刻。

2 舒适度建模

用户侧负荷参与响应过程,一般在不牺牲自身舒适度的前提下使用能成本最低。因此计及综合需求响应的综合能源系统调度,有必要将人体舒适度作为约束条件进行考虑。

2.1 人体舒适度

PMV 指标是一项与环境温度、相对湿度、空气流速、人体新陈代谢率、穿衣情况等因素相关的描述人体舒适度的指标^[18]。人体感觉与 PMV 指标的对应关系如表 1 所示。

表 1 人体感觉与 PMV 指标的对应关系

Table 1 Relationship of PMV indicator and feelings

PMV	人体感觉	PMV	人体感觉
-3	寒冷	1	微暖
-2	凉	2	暖
-1	微凉	3	较暖
0	适中		

ISO-7730^[19] 规定 PMV 在 -0.5~0.5 之间较为适宜,我国规定 PMV 在 -0.9~0.9 之间即可^[14]。

文献[20]给出了 PMV 指标与各因素的关系计算公式,如式(11)所示。

$$I_{PMV} = 2.43 - 3.76 \frac{2T_{sk} - (D_1T_z + D_2T_m + T_z)}{2M_0(I_{cl} + I_a/f_{cl})} \quad (11)$$

其中, T_{sk} 为皮肤平均温度, 取为 306.65 K; D_1 、 D_2 为面积系数; T_z 、 T_m 分别为室内温度和热物质表面温度, 它们与建筑冷/热功率流动有关, 可由等效建筑热阻模型求得; M_0 为新陈代谢率, 取为 70.6 W/m²; I_{cl} 为服装基本热阻, 通常取为 0.113 m²·K/W; I_a/f_{cl} 为空气层热阻与服装面积系数的比值, 本文中取值为 0.1 m²·K/W。

2.2 等效建筑热阻模型

影响室内人体舒适度的关键因素在建筑冷/热功率流动与温度之间的关系, 建筑热交换模型较为复杂, 为便于分析两者之间建筑冷/热功率流动对室内温度的影响, 根据建筑热物质特性, 以墙壁、窗体、屋顶、地板以及房间为基础, 构建建筑等效热阻模型, 根据建筑热物质特性, 将建筑热交换模型以电路形式表示, 见附录 A 中的图 A1。图中, 不同节点代表不同元素的温度; F 为修正系数; F_R 为电阻修正系数; h 为传热系数; 下标 a、sur、win、f、sog、wr、z 分别表示室外、环境、窗体、楼层、地板、墙体以及室内; o、m、i 分别代表墙体外部、中部及内部; 与电力系统中的功率类似, 建筑物冷/热功率交换以箭头表示, Q_{gain_rd} 、 Q_{abs} 、 Q_{sol} 、 Q_{net_rd} 、 Q_{inf_net} 、 Q_{sup} 、 Q_{htg} 分别为辐射增益、外表面吸收的太阳辐射、太阳辐射穿过窗户并被内表面吸收的热量、内表面的净辐射增益、渗透、通风、辅助加热和主加热系统的热量增加。

由于模型包含 4 个电容, 因此该模型也可称为四电容模型, 分别代表屋顶、地板、室内家具以及内墙的热物质特性; 节点之间的电阻表示热阻, 由 R 和对流传热系数 h_{cv} 、辐射传热系数 h_{rd} 表示, 热阻可由式(12)求得。

$$R = \frac{1}{\alpha_{in}} + \sum_{x=1}^M \frac{w_x}{\mu_x} + \frac{1}{\alpha_{out}} \quad (12)$$

其中, α_{in} 、 α_{out} 分别为室、内外对流换热系数, 单位为 W/m²; M 为室内墙体总数; w_x 为墙体厚度, 单位为 m; μ_x 为墙体导热系数, 单位为 W/(m²·℃)。

对比欧姆定理, 将建筑等效热阻模型热流量 Q 类比为电流, 节点处的温度则类比为电压。则建筑等效热阻模型中的“欧姆定理”可表示为:

$$Q = \frac{\Delta T}{R} \quad (13)$$

其中, ΔT 为节点间温度差。

对于含热容之处, 以图 A1 中的节点 $T_{wr,mo}$ 为例, 传热模型可表示为:

$$F_{R,wr,mo} C_{wr} \frac{dT}{dt} = \frac{T_{wr,mi} - T_{wr,mo}}{F_{R,wr,mi} R_{wr}} + \frac{T_{wr,o} - T_{wr,mo}}{F_{R,wr,o} R_{wr}} \quad (14)$$

因此, 建筑等效热阻模型可转换为一系列线性和非线性方程组, 此类模型类似于潮流计算采用牛顿-拉夫逊法进行求解, 由于电力系统已大量使用此方法, 本文不再赘述。

3 协同优化调度模型

计及综合需求响应的综合能源系统物理模型见图 1。系统内包含热电联产机组、风能、太阳能等发电装置, 燃气轮机、热泵等供热设备, 溴化锂吸收机组、电制冷机、热泵等供冷设备, 以及热电储能、电动汽车、冰蓄冷等可与系统进行能量交互的设备。

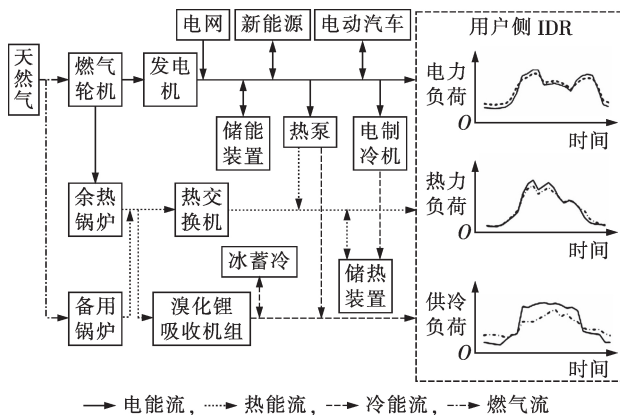


图 1 计及 IDR 的综合能源系统物理模型

Fig.1 Physical model of integrated energy system considering IDR

3.1 目标函数

考虑综合需求响应, 综合能源协同优化调度以综合能源服务商运行收益最大为目标, 见式(15)。

$$\max F_G = \sum_{t=1}^N (R^E(t) + R^H(t) + R^C(t) + R^{ev}(t) - C_{pe}(t) - C_{fuel}(t) - C_{loss}(t) - C_{ME}(t) - C_{EP}(t)) \quad (15)$$

其中, $R^E(t)$ 、 $R^H(t)$ 、 $R^C(t)$ 分别为 t 时刻售电、售热、售冷收益,可由式(6)求得; $R^{ev}(t)$ 为 t 时刻与电动汽车用户交互收益,该值为负时,表示电动汽车向系统放电; $C_{pe}(t)$ 为 t 时刻向上级电网购电费用,该值为负时,表示向电网售电; $C_{fuel}(t)$ 为 t 时刻 CCHP 机组燃料成本; $C_{loss}(t)$ 为 t 时刻系统运行损耗成本,包括储能装置寿命损耗成本及能量传输损耗成本; $C_{ME}(t)$ 为 t 时刻系统运行维护成本; $C_{EP}(t)$ 为 t 时刻环境污染治理成本。

3.2 约束条件

该模型的约束条件包括负荷平衡约束、机组出力约束、机组爬坡约束、储能装置容量约束与传输功率约束等,较多文献已经提及,本文不再赘述。在此基础上,还需要考虑以下约束条件。

(1) 人体舒适度约束。前文对人体舒适度约束已有提及,本文人体舒适度约束采用 ISO-7730 标准,PMV 范围限定在 $-0.5 \sim 0.5$ 范围内。

(2) 用户满意度约束。

$$m_s^i \geq m_{s,min}^i \quad (16)$$

$$m_p^i \geq m_{p,min}^i \quad (17)$$

其中, $m_{s,min}^i$ 为用户用能方式满意度下限值; $m_{p,min}^i$ 为用户用能费用支出满意度下限值

(3) 综合需求响应冷热电分时价格最大变化率约束。

$$k^i \leq k_{max}^i \quad (18)$$

其中, k_{max}^i 为 i 类能源价格最大变化率。

(4) 电动汽车充放电功率约束。

$$0 \leq P_{ev,c} \leq v_{ev,c} P_{ev,c,rate} \quad (19)$$

$$0 \leq P_{ev,d} \leq v_{ev,d} P_{ev,d,rate} \quad (20)$$

$$P_{ev,c} P_{ev,d} = 0 \quad (21)$$

$$S_{min} \leq S(t) \leq S_{max} \quad (22)$$

其中, $v_{ev,c}$ 、 $v_{ev,d}$ 分别为电动汽车是否参与充、放电的 0-1 变量,当电动汽车参与充电时, $v_{ev,c}$ 取值为 1,否则为 0,当电动汽车参与放电时, $v_{ev,d}$ 取值为 1,否则为 0; $P_{ev,c,rate}$ 、 $P_{ev,d,rate}$ 分别为电动汽车充电、放电的额定功率;式(21)表示电动汽车在同一时刻只能充电或放电; S_{max} 、 S_{min} 分别为 SOC 的上、下限。

(5) 电动汽车不可调度时段约束。

$$P_{ev}(t) = 0 \quad t \in (t_{l,beg}, t_{l,end}) \quad (23)$$

其中, $t_{l,beg}$ 、 $t_{l,end}$ 分别为 l 时段不可调度的始、末时刻,用概率密度函数^[17]模拟。

3.3 求解方法

本文采用 YALMIP / CPLEX 工具箱求解所建立的混合整数线性规划模型,CPLEX 是 IBM 公司开发的

一款能够快速稳定可靠地求解复杂数学优化问题的商业求解器,YALMIP 为 MATLAB 提供了一种统一简单的建模语言,可调用 CPLEX 求解器用于求解大规模规划问题。

4 算例分析

4.1 算例基本情况

以我国某个综合能源示范园区为例,园区占地面积为 1 046 000 m²,园区用地情况见附录 B 中的表 B1。园区新能源以光伏为主,配置有 80×20 kW 的分布式光伏机组,园区内夏季典型日冷热电负荷及光伏机组出力曲线如附录 B 中的图 B1 所示,园区综合能源供能系统相关参数见附录 B 中的表 B2;园区拟配置电动汽车 160 辆,并配置有储能电池、建筑蓄热以及冰蓄冷等储能设备,电动汽车及储能设备相关参数见附录 B 中的表 B3。建筑物内人体舒适度相关参数见文献[14]。

园区燃气价格为 2.93 元 / m³,电网峰、平、谷电价分别为 1.1365 元 / (kW·h)、0.6598 元 / (kW·h)、0.1885 元 / (kW·h);峰时段为 08:00—11:00、18:00—22:00,平时段为 11:00—18:00、22:00—23:00,谷时段为 00:00—08:00、23:00—24:00。园区综合需求响应相关参数如表 2 所示。

表 2 园区综合需求响应参数
Table 2 Parameters of IDR in area

能源种类	初始价格 / [元·(kW·h) ⁻¹]	自响应系数	互响应系数	柔性负荷比例
电能	0.5	-0.3	0.10	0.6
冷能	0.6	-0.4	0.15	0.5
热能	0.6	-0.4	0.15	0.5

4.2 场景分析

为验证所提计及人体舒适度的综合需求响应策略的有效性,本文拟从下列 5 个场景进行分析。

场景 1:用户侧不参与需求响应的常规综合能源调度,室内日间温度(08:00—18:00)维持在 25℃,夜间温度(18:00 至次日 08:00)维持在 22℃。

场景 2:在场景 1 的基础上,用户侧仅电负荷参与需求响应。

场景 3:考虑建筑柔性负荷模型,用户侧冷热电负荷均参与需求响应。

场景 4:在上述基础上,利用本文所提建筑热阻模型,考虑人体舒适度约束。

场景 5:考虑人体舒适度约束,采用文献[13]所提简化热负荷模型,与场景 4 对比。

4.2.1 经济效益对比

各场景下综合能源服务商运行成本及园区用户用能成本如表 3 所示。随着建筑柔性负荷和宽舒适度约束的加入,综合能源服务商的运行成本逐步降

表3 经济效益对比

Table 3 Comparison of economic benefit

场景	运行成本 / 元				用户用能成本 / 元			
	燃气费用	运维成本	环境污染成本	电网购电	用电费用	用热费用	用冷费用	电动汽车用户
1	76266.2	12273.7	7315.3	492.6	38728.9	31191.7	74609.7	112.22
2	72592.1	11440.7	6846.2	142.5	37937.3	31191.7	74609.7	-123.10
3	65958.8	10877.8	6052.1	-98.4	37937.3	28625.6	67761.2	-123.10
4	60619.6	10700.2	5756.9	-280.2	37937.3	28625.6	59312.5	-123.10
5	62954.4	10782.5	5854.2	-125.6	37937.3	28625.6	64153.7	-123.10

低,环境污染成本越来越低,有利于环境保护,而用户侧在保证舒适度的同时也降低了用能成本,电动汽车用户有序参与调度,通过峰时放电谷时充电策略还能从中收益。

4.2.2 调度策略对比

场景1下的优化结果如附录C中的图C1所示。夏季典型日下,日间光伏出力较高,但同时日间园区热负荷较高,CHP机组出力也较大,在用户不参与需求响应的情况下,光伏就地消纳困难,而电动汽车用户不响应电价导致的无序充放电,不利于综合能源服务商的整体优化。

场景2考虑了用户侧的电力需求响应,电动汽车日前优化调度曲线与场景1对比如图2所示,响应前后电力负荷曲线见图3。在需求响应驱动下,电动汽车用户在电价峰时段选择放电或者驾驶,在日间光伏出力较高时间段(11:00—14:00)选择充电,一方面有利于光伏就地消纳,光伏消纳比例从场景1的49.2%提升到了59.9%,另一方面电动汽车峰时放电谷时或平时充电保证了电动汽车用户用能费用最小化。

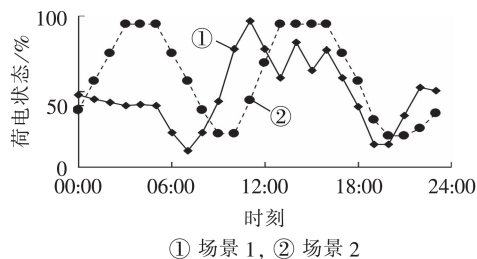


图2 电动汽车电池SOC

Fig.2 SOC of EVs' battery

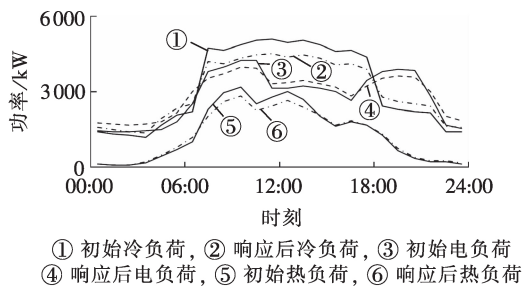
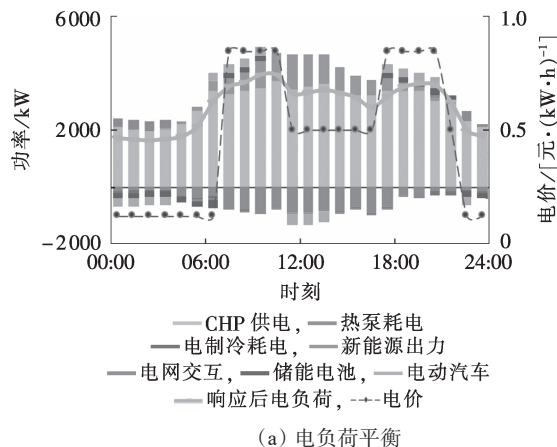


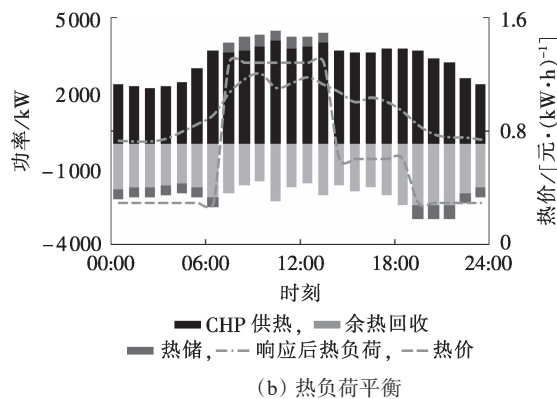
图3 需求响应前后负荷曲线对比图

Fig.3 Comparison of load curve before and after IDR

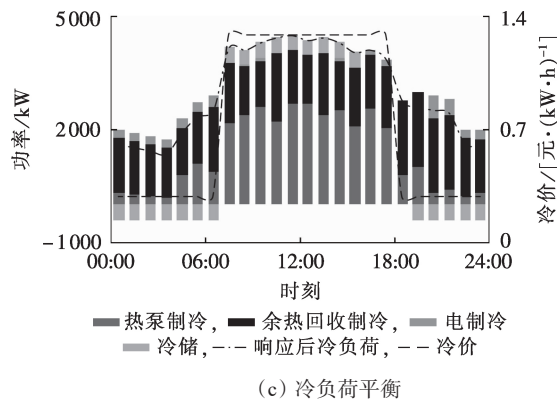
在考虑建筑柔性负荷后,场景3优化结果如图4所示。对比图3响应前后负荷曲线以及图4综合能源冷热电价,可知此时冷热电响应前后负荷曲线以及图4综合能源冷热电价,可知此时冷热电负荷曲线均在一定程度上响应能源价格,达到削峰填谷的



(a) 电负荷平衡



(b) 热负荷平衡



(c) 冷负荷平衡

图4 场景3负荷平衡情况

Fig.4 Load balance in Scene 3

目的。10:00—15:00时段冷热负荷需求减少,电力负荷需求提高,且建筑物内热物质在热价峰时期放热,冰蓄冷装置在冷价峰时期制冷,因此CHP机组出力降低,而此时正是光伏出力最大时间段,因此促进了光伏的就地消纳,消纳比例在场景2下大幅度提高至87.6%。

场景1—3下室内温度控制均较为严格,由于夏季典型日下昼夜温差较大,根据本文所提等效建筑热阻模型,室内制冷功率呈现夜间低、日间高的趋势,且峰谷差较大,虽可保证用户舒适度在较为满意的数值,但在一定程度上制约了建筑柔性负荷的作用。计及本文所提人体舒适度约束模型的场景4的优化调度结果如附录C中的图C2所示,优化结果PMV指标如图5所示。由于温度不再固定,舒适度约束较之前宽松,因此用户用能需求更为灵活。由图C2可知,在宽松的舒适度约束下,冷热负荷峰谷差进一步降低,CHP机组日间供电量减少,光伏消纳比例高达93.4%,晚高峰期间CHP机组供电量增加,避免了向配网购电,减少了购电成本。

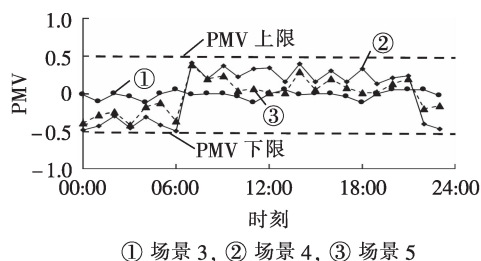


图5 PMV对比

Fig.5 Comparison of PMV

场景5采用简化热负荷模型的经济效益可见表3,经对比可知,在综合需求响应背景下,考虑简化热负荷模型较未考虑时综合能源服务商运行成本及用户用能成本均有所降低,但与场景4相比,本文所提建筑热阻模型在经济效益方面具有更佳效果;通过图5可知:本文所提建筑热阻模型相对于场景5而言,在不超过人体舒适度约束的情况下,PMV计算结果更接近PMV的上/下限,因此其温度设定值相对更接近室外温度,节能效果更好。

5 结论

本文建立了计及人体舒适度和柔性负荷的综合能源协同优化调度模型,以综合能源服务商运行收益最大为目标,采用YALMIP/CPLEX工具箱进行求解,得到以下结论:

(1)将用户侧柔性负荷分为可转移负荷、可削减负荷、可转换负荷,并分别建立数学模型,有利于分析综合需求响应在综合能源优化调度的作用;

(2)考虑用户侧综合能源需求响应,可有效降低用户侧用能成本和供能侧运行成本,并可提高新能

源就地消纳率,本文算例中的光伏消纳率提高了38.4%;

(3)以墙壁、窗体、屋顶、地板以及房间内部热交换模型为基础构建了建筑热阻模型,描述了室内温度与能量流动的关系,为建筑内冷/热功率与用户舒适度之间搭建了桥梁。

本文所提综合需求响应模型和建筑热阻模型为综合能源园区优化调度提供了新思路;在未来能源互联网系统中,园区互联将成为发展趋势,如何在园区之间综合能源系统规划与调度中考虑综合需求响应,将成为下一步研究重点。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 彭克,张聪,徐丙垠,等. 多能协同综合能源系统示范工程现状与展望[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):3-10.
PENG Ke, ZHANG Cong, XU Bingyin, et al. Status and prospect of pilot projects of integrated energy system with multi-energy collaboration [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6):3-10.
- [2] 刘涤尘,彭思成,廖清芬,等. 面向能源互联网的未来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. Outlook of future integrated distribution system morphology orienting to energy internet[J]. Power System Technology, 2015, 39(11):3023-3034.
- [3] 贾宏杰,王丹,徐宪东,等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化,2015,39(7):198-207.
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7):198-207.
- [4] 刘洪,陈星屹,李吉峰,等. 基于改进CPISO算法的区域电热综合能源系统经济调度[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):193-200.
LIU Hong, CHEN Xingyi, LI Jifeng, et al. Economic dispatch based on improved CPISO algorithm for regional power-heat integrated energy system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6):193-200.
- [5] 李阳,邹嘉嘉,曹华珍,等. 基于综合能源协同优化的配电网规划策略[J]. 电网技术,2018,42(5):1393-1400.
LI Yang, HUAN Jiajia, CAO Huazhen, et al. Distribution network planning strategy based on integrated energy collaborative optimization [J]. Power System Technology, 2018, 42(5):1393-1400.
- [6] 张思德,胡伟,卫志农,等. 基于机会约束规划的电-气互联综合能源系统随机最优潮流[J]. 电力自动化设备,2018,38(9):121-128.
ZHANG Side, HU Wei, WEI Zhinong, et al. Stochastic optimal power flow of integrated power and gas energy system based on chance-constrained programming [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9):121-128.
- [7] MANCARELLA P, CHICCO G. Real-time demand response from energy shifting in distributed multi-generation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4):1928-1938.
- [8] 王琪鑫,刘涤尘,吴军,等. 计及用户行为分析的多能协同综合能源系统供需双侧综合优化[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):179-185.
WANG Qixin, LIU Dichen, WU Jun, et al. Comprehensive optimization including user behavior analysis for supply and demand

- sides of IES-MEC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 179-185.
- [9] BAHRAMI S, SHEILHI A. From demand response in smart grid toward integrated demand response in smart energy hub[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 650-658.
- [10] 孙宏斌, 潘昭光, 郭庆来. 多能流能量管理研究: 挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 1-8.
SUN Hongbin, PAN Zhaoguang, GUO Qinglai. Energy management for multi-energy flow: challenges and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 1-8.
- [11] 崔鹏程, 史俊伟, 文福拴, 等. 计及综合需求侧响应的能量枢纽优化配置[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 101-109.
CUI Pengcheng, SHI Junyi, WEN Fushuan, et al. Optimal energy hub configuration considering integrated demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 101-109.
- [12] JENSEN S Ø, MARSZAL-POMIANOWSKA A, LOLLINI R, et al. IEA EBC Annex 67 energy flexible buildings[J]. Energy and Buildings, 2017, 155(11): 25-34.
- [13] 张华一, 文福拴, 张臻, 等. 计及舒适度的家庭能源中心运行优化模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 32-39.
ZHANG Huayi, WEN Fushuan, ZHANG Can, et al. Operation optimization model of home energy hubs considering comfort level of customers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 32-39.
- [14] 王玉山, 彭辉, 王丹, 等. 基于人体舒适度的室内温度优化设定方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(11): 4083-4090.
WANG Yushan, PENG Hui, WANG Dan, et al. Optimization method for indoor air temperature based on thermal comfort[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2015, 46(11): 4083-4090.
- [15] 刘洪, 王亦然, 李积逊, 等. 考虑建筑热平衡与柔性舒适度的乡村微能源网电热联合调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 1-9.
LIU Hong, WANG Yiran, LI Jixun, et al. Coordinated heat and power dispatch of micro internet of energy of countryside considering heat balance model of building and flexible indoor comfort constraint[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 1-9.
- [16] PATERAKIS N G, ERDINÇ O, CATALÃO J P S. An overview of demand response: key-elements and international experience[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 69: 871-891.
- [17] 王浩林, 张勇军, 毛海鹏. 基于时刻充电概率的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 207-213.
WANG Haolin, ZHANG Yongjun, MAO Haipeng. Charging load forecasting method based on instantaneous charging probability for electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 207-213.
- [18] ZHANG Shuai, HE Weiping, CHEN Dengkai, et al. Thermal comfort analysis based on PMV/PPD in cabins of manned submersibles[J]. Building and Environment, 2018, 148: 668-676.
- [19] ISO. Moderate thermal environment-determination of PMV and PPD indices and specification of the condition for thermal comfort: ISO Standard 7730[S]. [S.I.]: ISO, 1984.
- [20] MOHAMED S K S, ABDUL J M F, HOMOD R Z, et al. Dynamic indoor thermal comfort model identification based on neural computing PMV index[C]//ICEE 2013. Putrajaya, Malaysia: [s.n.], 2013: 1-4.

作者简介:



江岳春

江岳春(1965—),男,湖南长沙人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统规划、电力市场及技术支持系统等(E-mail: jychns@sina.com);

曾诚玉(1995—),男,湖南郴州人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为综合能源系统、电力市场等(E-mail: zcytracy@hnu.edu.cn);

邰嘉嘉(1983—),女,山东淄博人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统规划以及综合能源系统等(E-mail: winnie5983@126.com)。

Integrated energy collaborative optimal dispatch considering human comfort and flexible load

JIANG Yuechun¹, ZENG Chengyu¹, HUAN Jiajia², ZHAO Jin³, LIU Yuqing¹, WU Shuhong¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Power System Planning Research Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;

3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Based on the energy internet framework, an integrated energy collaborative optimal dispatch method considering human comfort and flexible load is proposed. Firstly, the energy usage characteristics are studied from the perspective of the user demand, flexible loads are divided into transferable loads, reducible loads and convertible loads. The mathematical models are established according to these loads respectively, and their economic efficiencies are analyzed. Secondly, a thermal resistance model is constructed according to the thermal properties of building to analyze the relationship between cold/heat power and human comfort. Finally, considering the human comfort and user-side flexible load, taking the maximum operating revenue of integrated energy service providers as the objective function, the results of the park-level comprehensive energy collaborative optimization scheduling are obtained, which shows that the proposed model can improve economic efficiency and promote local consumption of new energy sources.

Key words: integrated energy system; flexible load; integrated demand response; building equivalent thermal resistance model; human comfort

附录 A

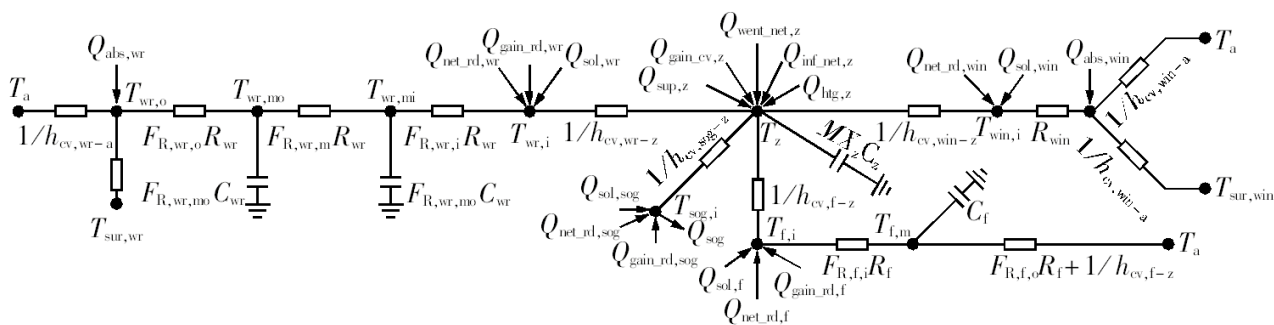


图 A1 建筑热流和等效热阻模型

Fig.A1 Housing model main zone heat flows and equivalent thermal resistance model

附录 B

表 B1 综合能源示范园区用地情况

Table B1 Land use in integrated energy demonstration area

用地性质	面积/m ²
居住用地	206200
工业用地	441400
广场用地	64300
商业用地	99800
医疗卫生用地	65400
教育科研用地	96700
其他用地	72200

表 B2 园区供能系统相关参数

TableB2 Parameters of energy supply system in area

类型	参数	参数值
CHP 机组	装机容量/kW	10000
	供电效率/%	38.9
	产热效率/%	43.2
	热电比	1.11
	运维费用/[元·(kW h) ⁻¹]	0.0946
热泵	装机容量/kW	4000
	制冷能效比 (EER)	3.4
	制热能效比 (COP)	3.33
	运维费用/[元·(kW h) ⁻¹]	0.042
吸收式制冷机	装机容量/kW	2500
	效率/%	80
	运维费用/(元/kW h)	0.032
电制冷机	装机容量/kW	2500
	制冷能效比 (EER)	3.4
	运维费用/(元/kW h)	0.0846
光伏机组	装机容量/kW	80×20
	运维费用/[元·(kW h) ⁻¹]	0.029
电网交互	传输功率上限/kW	500
	传输功率下限/kW	-500

表 B3 园区储能设备相关参数

Table B3 Parameters of energy storage equipments in the area

设备	额定容量/ (kW h)	储/放能 效率	SOC 上限	SOC 下限	运维成本/[元· (kW·h) ⁻¹]
储能电池	4000	0.95	0.9	0.1	0.045
建筑蓄热	4000	0.90	0.9	0.1	0.035
冰蓄冷	4000	0.90	0.9	0.1	0.042
电动汽车	160×10	0.90	0.8	0.2	0.037

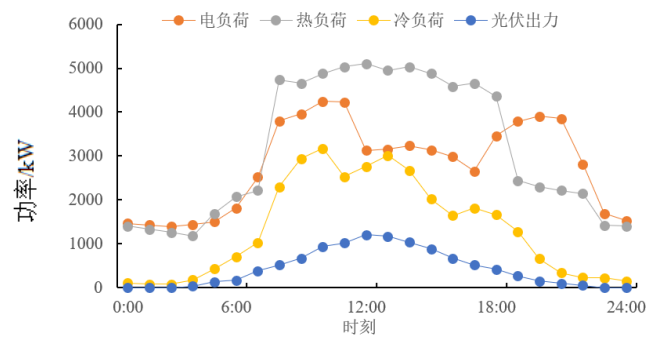
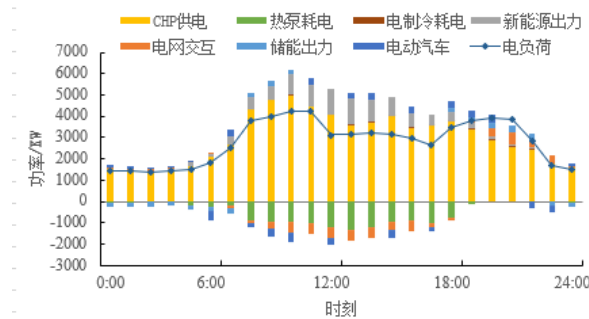


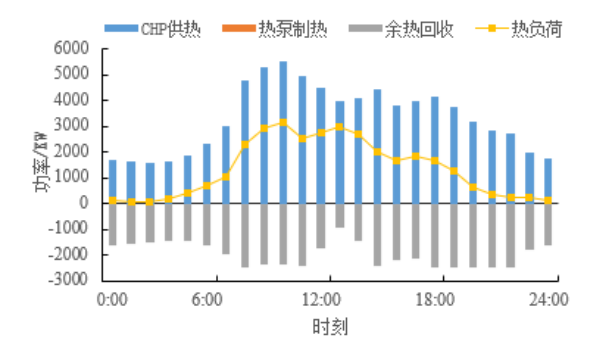
图 B1 园区夏季典型日负荷曲线及光伏出力曲线

Fig.B1 Typical daily load curve and photovoltaic output curve of area in summer

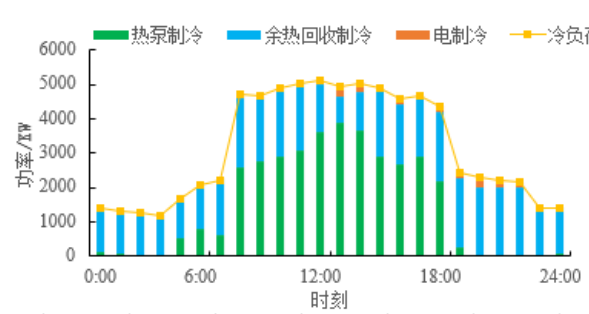
附录 C



(a) 电功率出力分布



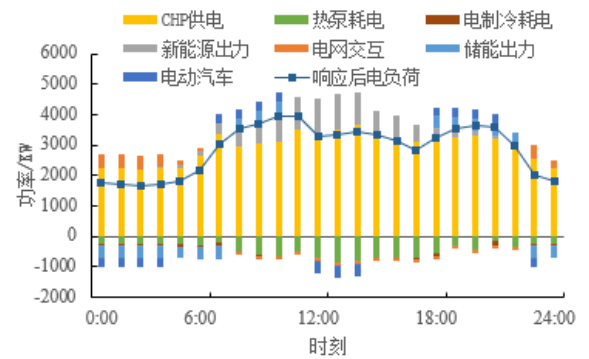
(b) 热功率出力分布



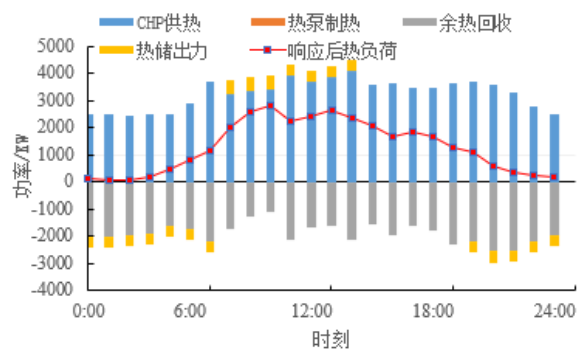
(c) 冷功率出力分布

图 C1 场景 1 下的综合能源出力情况

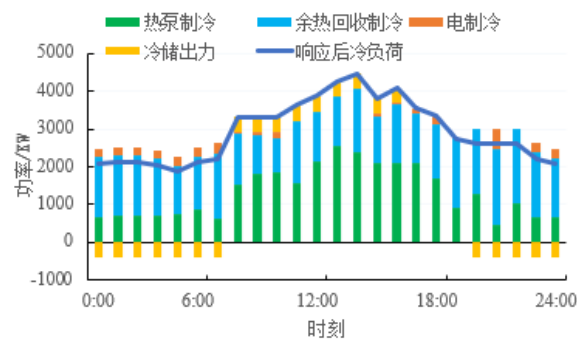
Fig.C1 Integrated energy output distribution in Scen 1



(a) 电功率出力分布



(b) 热功率出力分布



(c) 冷功率出力分布

图 C2 场景 4 综合能源出力情况

Fig.C2 Integrated energy output distribution in Scene4