

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.02.005

考虑综合需求响应的楼宇综合能源系统能量管理优化

程杉^{1,2}, 陈诺^{1,2}, 徐建宇^{2,3}, 王灿^{1,2}, 钟仕凌^{1,2}

(1. 智慧能源技术湖北省工程研究中心(三峡大学),湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学电气与新能源学院,湖北 宜昌 443002;

3. 国网河南省电力有限公司驻马店供电公司,河南 驻马店 463000)

摘要:针对楼宇综合能源系统(residential integrated energy system,RIES)能量管理时未充分考虑影响室温因素及其对负荷建模的影响和刚性捆绑RIES、用户从未全面考虑用户舒适度和用能支出的问题,文中提出冷、热负荷参与阶梯型补贴和电负荷参与电价型综合需求响应的RIES能量管理优化模型及其求解方法。首先,综合考虑影响室温因素,得到离散化的楼宇热平衡方程,建立楼宇的柔性而非固定的冷、热、电负荷数学模型。其次,建立冷、热负荷参与的阶梯型补贴和电负荷参与的电价型综合需求响应机制。然后,考虑RIES向用户售能的收益、从外部购能的成本和支付用户的补贴费用,构建以最大化RIES运行利润为目标、计及设备 and 系统运行约束的能量管理优化数学模型,并采用Cplex对线性化后的模型进行求解。最后,通过算例仿真表明:计及综合需求响应的RIES能量管理优化能统筹协调供需两侧资源,提升系统与用户的经济效益。

关键词:楼宇综合能源系统(RIES);用户舒适度;综合需求响应;柔性负荷;阶梯型补贴;能量管理优化

中图分类号:TM93

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2023)02-0040-08

0 引言

气候变化、化石能源枯竭、能源需求增长等挑战促使人们研究并推广应用具有高效的能源供应效率和灵活的系统运行方式的综合能源系统(integrated energy system,IES)^[1-4]。楼宇综合能源系统(residential integrated energy system,RIES)通过建筑物内的多能互补,实现能源的高效节能利用^[5-7]。

IES根据用户的负荷需求制定合理的运行方案,且通常根据固定负荷进行调度^[8-9],并结合储能装置调节机组出力^[10-11]。而在RIES中,考虑建筑墙体的隔热特性以及居民对温度变化感知的模糊性等因素,基于建筑热平衡模型,可以将传统的固定化冷、热负荷转化为维持温度在一定期望范围内的动态柔性负荷,从而进一步发掘RIES调度潜力^[12]。文献[13]通过引入热感觉平均标度预测指标描述用户供热舒适度,将传统的热负荷曲线转化为负荷需求区间,从而增加负荷调度弹性。文献[14]提出考虑热网储热和供热惯性的热电联合调度策略,灵活调节热负荷。文献[15]则通过改变中央空调的占空比来维持室内温度舒适。

建筑冷、热负荷的柔性供能也促进传统单一的电力需求响应(demand response,DR)向综合需求响应(integrated demand response,IDR)转变。IDR还

可以选择消费不同形式的能源以满足用能需求,从而实现多能协调运行以降低供能压力^[16]。文献[17-18]分析含冷、热、电等多种形式能源参与IDR对微网运行灵活性与经济性的影响,并提出相应的响应补偿机制。文献[19]采取证据理论处理IDR不确定性,建立协调IES运行效益最优与用户参与IDR能力最大化的双层协同规划模型。

以上文献在建立柔性负荷需求模型以及考虑IDR的RIES能量管理优化方面做出贡献,但主要还有2点不足:(1)文献中多以热阻、热容模型建立制冷、制热负荷与用户室温需求的供需关系,未充分考虑影响室内温度的相关因素,不能准确反映不同种类楼宇因围护结构、热力特性、使用时间上的不同引起的柔性供需关系的差异;(2)上述文献将用户与IES捆绑为一个刚性主体参与调度以提高IES收益,制冷、制热功率提高可提升IES利润,但会引起用户负荷增加,从而提高用户购能成本,而且过高、过低的室温会降低用户用能体验。

为此,文中首先计及围护结构传热系数、太阳辐射、遮阳系数等对建筑蓄热能力的影响,得到楼宇热平衡方程并构建楼宇柔性冷、热、电负荷数学模型,一方面可以精确描述外部环境对于管理优化模型经济性和用户舒适度的影响,另一方面可以为需求侧提供更有效的资源。在此基础上制定RIES与用户之间基于阶梯型补贴的IDR机制,避免传统将RIES与用户刚性捆绑的局限性。再者,建立以

收稿日期:2022-10-23;修回日期:2022-12-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52107108)

系统净利润最大为目标的 RIES 能量管理优化数学模型,对其进行线性化处理后采用 Cplex 进行求解。最后,基于仿真算例和对比分析验证 RIES 与用户统筹优化的能量管理数学模型的有效性和优越性,能够实现 RIES 与用户的双赢。

1 RIES 及其设备数学模型

含多能流的 RIES 能量流如图 1 所示。供电设备包括光伏 (photovoltaic, PV)、风力机组 (wind turbine, WT)、配电网和天然气网;能量转换设备包括由燃气轮机 (gas turbine, GT)、热交换器 (heat exchanger, HE)、锅炉 (gas boiler, GB)、电制冷机 (air conditioner, AC)、吸收式制冷机 (absorption refrigerator, AR) 组成的冷热电联产系统 (combined cooling, heating and power system, CCHP);储能设备为蓄电池 (battery, BT)。气负荷和 GT、GB 消耗的燃气由天然气网供给,基本电负荷由从配电网购电和 PV、WT、BT 出力供给,热水负荷由 GT 发电的余热和 GB 供给,而冷负荷由 AC、AR 供给。

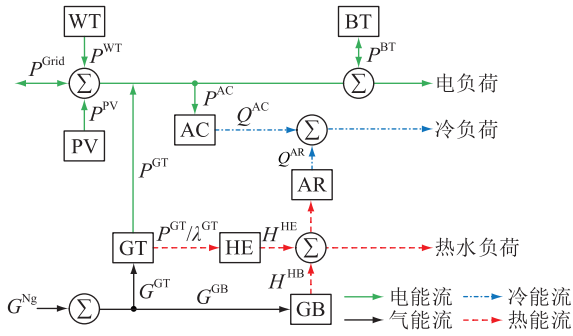


图 1 RIES 结构

Fig.1 Structure of RIES

1.1 燃气轮机 (GT)

GT 发电产生的余热通过 AR 和 HE 输出灵活可变的冷、热功率,得到其在 t 时段消耗的天然气功率 G_t^{GT} 和输出电功率 P_t^{GT} 之间的关系^[11]。

$$G_t^{GT} = a(P_t^{GT})^2 + bP_t^{GT} + cI_t^{GT} \quad (1)$$

式中: I_t^{GT} 为 0-1 变量,表示 GT 在 t 时段的开、停机状态; a 、 b 、 c 为损耗系数。

HE 回收 GT 发电余热,回收到的热功率 H_t^{HE} 与输出电功率 P_t^{GT} 之间的关系,如式(2)所示。

$$H_t^{HE} = \eta^{GT} P_t^{GT} / \lambda^{GT} \quad (2)$$

式中: λ^{GT} 、 η^{GT} 分别为 GT 的输出电热功率比和热回收效率。

GT 运行时还应满足运行功率约束。

$$P_{\min}^{GT} \leq P_t^{GT} \leq P_{\max}^{GT} \quad (3)$$

式中: P_{\max}^{GT} 、 P_{\min}^{GT} 分别为 GT 的输出电功率上、下限。

1.2 锅炉 (GB)

GB 通过燃烧天然气产生热能补充 GT 产热不足时的热负荷,其输出热功率 H_t^{GB} 与输入天然气功率 G_t^{GB} 的关系如式(4)所示,其约束如式(5)所示。

$$H_t^{GB} = \eta^{GB} G_t^{GB} \quad (4)$$

$$0 \leq H_t^{GB} \leq H_{\max}^{GB} \quad (5)$$

式中: η^{GB} 、 H_{\max}^{GB} 分别为 GB 的产热效率和输出热功率上限。

1.3 蓄电池 (BT)

BT 可以通过电功率在时间上的转移来降低用能成本,须满足式(6)的充、放电状态约束、式(7)的充、放电功率约束和式(8)、式(9)的储存能量及其约束。

$$I_t^{cBT} + I_t^{dBT} \leq 1 \quad (6)$$

式中: I_t^{cBT} 、 I_t^{dBT} 为 0-1 变量,分别表示 BT 在 t 时段的充、放电状态。

$$\begin{cases} I_t^{cBT} P_{\min}^{cBT} \leq P_t^{cBT} \leq I_t^{cBT} P_{\max}^{cBT} \\ I_t^{dBT} P_{\min}^{dBT} \leq P_t^{dBT} \leq I_t^{dBT} P_{\max}^{dBT} \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_t^{cBT} 、 P_t^{dBT} 分别为 BT 的充、放电功率; P_{\max}^{cBT} 、 P_{\min}^{cBT} 、 P_{\max}^{dBT} 、 P_{\min}^{dBT} 分别为 BT 充、放电功率上、下限。

$$E_t^{BT} = E_{t-1}^{BT} (1 - \delta^{BT}) + \left(P_t^{cBT} \eta^{cBT} - \frac{P_t^{dBT}}{\eta^{dBT}} \right) \quad (8)$$

$$E_{\min}^{BT} \leq E_t^{BT} \leq E_{\max}^{BT} \quad (9)$$

式中: δ^{BT} 为 BT 的自放电系数; η^{cBT} 、 η^{dBT} 分别为 BT 的充、放电效率; E_{\max}^{BT} 、 E_{\min}^{BT} 分别为 BT 的蓄电上、下限。

在一个调度周期(1 d)始末 BT 蓄电量一致,如式(10)所示。

$$E_0^{BT} = E_{24}^{BT} \quad (10)$$

1.4 制冷设备

AC 通过消耗电能制冷,可得其输入的电功率 P_t^{AC} 与输出的制冷量 Q_t^{AC} 之间的关系与相应的约束。

$$Q_t^{AC} = C^{AC} P_t^{AC} \quad (11)$$

$$0 \leq P_t^{AC} \leq P_{\max}^{AC} \quad (12)$$

式中: C^{AC} 、 P_{\max}^{AC} 分别为 AC 的制冷系数和电功率上限。

AR 通过 GT 发电所产生的余热驱动制冷,其输入的热功率 H_t^{AR} 与输出的制冷量 Q_t^{AR} 之间的关系如式(13)所示,其相应的约束如式(14)所示。

$$Q_t^{AR} = C^{AR} H_t^{AR} \quad (13)$$

$$0 \leq H_t^{AR} \leq H_{\max}^{AR} \quad (14)$$

式中: C^{AR} 、 H_{\max}^{AR} 分别为 AR 的制冷系数和热功率上限。

1.5 电力系统约束

RIES 不能同时向电网购电和售电,且与电网的

交互功率应满足式(15)、式(16)的约束。

$$I_t^{\text{bGrid}} + I_t^{\text{sGrid}} \leq 1 \quad (15)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_t^{\text{bGrid}} \leq I_t^{\text{bGrid}} P_{\text{max}}^{\text{bGrid}} \\ 0 \leq P_t^{\text{sGrid}} \leq I_t^{\text{sGrid}} P_{\text{max}}^{\text{sGrid}} \end{cases} \quad (16)$$

式中： I_t^{bGrid} 、 I_t^{sGrid} 为 0-1 变量，分别表示 RIES 在 t 时段的购、售电状态； P_t^{bGrid} 、 P_t^{sGrid} 分别为 RIES 的购、售电功率； $P_{\text{max}}^{\text{bGrid}}$ 、 $P_{\text{max}}^{\text{sGrid}}$ 分别为 RIES 的购、售电功率上限。

2 IDR 模型

RIES 中含有冷、热、电多种类型负荷。通过对用户负荷需求建模，设置合理的 IDR 补偿机制，在用户用能舒适度范围内调节能量供应，能有效提高 RIES 运行的经济性和可靠性。

2.1 柔性冷负荷需求

假设楼宇制冷设备在使用时间内连续运行，则 t 时段内室内热量变化量 ΔQ_t 等于制冷量 Q_t^{Cl} 与建筑吸热量 Q_t^{Building} 之差，由此可得楼宇热平衡方程。

$$\Delta Q_t = \rho^{\text{Air}} C^{\text{Air}} V^{\text{Building}} \frac{\partial T_t^{\text{In}}}{\partial t} = Q_t^{\text{Cl}} - Q_t^{\text{Building}} \quad (17)$$

式中： ρ^{Air} 为空气密度； C^{Air} 为空气比热容； V^{Building} 为建筑体积； $\partial T_t^{\text{In}} / \partial t$ 为室内温度变化率。

影响 Q_t^{Building} 的主要因素^[20]有：建筑外墙传递的热量 Q_t^{Wall} ，建筑外窗传递的热量 Q_t^{Win} ，建筑因吸收室内照明，人体散热等热量产生的室内热源 Q_t^{In} ，太阳辐射所产生的热量 Q_t^{S} 。

$$\begin{cases} Q_t^{\text{Building}} = Q_t^{\text{Wall}} + Q_t^{\text{Win}} + Q_t^{\text{In}} + Q_t^{\text{S}} \\ Q_t^{\text{Wall}} = \sum_{i=1}^n f_i^{\text{Wall}} s_i^{\text{Wall}} (T_t^{\text{Out}} - T_t^{\text{In}}) \\ Q_t^{\text{Win}} = \sum_{i=1}^n f_i^{\text{Win}} s_i^{\text{Win}} (T_t^{\text{Out}} - T_t^{\text{In}}) \\ Q_t^{\text{S}} = \sum_{i=1}^n f_i^{\text{Win}} X_i Y_i I_{i,t} \end{cases} \quad (18)$$

式中： f_i^{Wall} 、 f_i^{Win} 分别为建筑外墙、外窗与室外的传热系数； s_i^{Wall} 、 s_i^{Win} 分别为建筑外墙、外窗面积； T_t^{In} 、 T_t^{Out} 分别为室内、外温度； I 为太阳辐射功率； X 、 Y 分别为外窗遮阳系数、得热因子； i 为建筑朝向，包括东面、西面、南面、北面、水平面 5 个朝向； $n=5$ 。

式(17)包含混合微分方程和代数方程，考虑到简化模型，对其离散化处理并联合式(18)，可得离散化的楼宇热平衡方程，如式(19)所示。

$$\rho^{\text{Air}} C^{\text{Air}} V^{\text{Building}} (T_{t-1}^{\text{Out}} - T_t^{\text{Out}}) = Q_t^{\text{Cl}} - \sum_{i=1}^n f_i^{\text{Wall}} s_i^{\text{Wall}} (T_t^{\text{Out}} - T_t^{\text{In}}) - \sum_{i=1}^n f_i^{\text{Win}} s_i^{\text{Win}} (T_t^{\text{Out}} - T_t^{\text{In}}) - \sum_{i=1}^n f_i^{\text{Win}} X_i Y_i I_{i,t} \quad (19)$$

由式(19)可得到室内温度与制冷功率之间的关系。为保障用户舒适度，室温应满足式(20)的室温上下限约束和式(21)、式(22)的室温波动约束。

$$T_{\text{min}}^{\text{In}} \leq T_t^{\text{In}} \leq T_{\text{max}}^{\text{In}} \quad (20)$$

式中： $T_{\text{max}}^{\text{In}}$ 、 $T_{\text{min}}^{\text{In}}$ 分别为 T_t^{In} 的上、下限。

$$\begin{cases} \lambda_t^{\text{In-}} = \frac{T_{\text{min}}^{\text{In}} - T_{\text{opt}}^{\text{In}}}{|T_{\text{opt}}^{\text{In}} - T_t^{\text{In}}|} \\ \lambda_t^{\text{In+}} = \frac{T_{\text{max}}^{\text{In}} - T_{\text{opt}}^{\text{In}}}{|T_{\text{opt}}^{\text{In}} - T_t^{\text{In}}|} \end{cases} \quad (21)$$

$$(1 + \lambda_t^{\text{In-}}) T_{\text{opt}}^{\text{In}} \leq T_t^{\text{In}} \leq (1 + \lambda_t^{\text{In+}}) T_{\text{opt}}^{\text{In}} \quad (22)$$

式中： $T_{\text{opt}}^{\text{In}}$ 为设定的最适宜室温。

2.2 柔性热负荷需求

如图 1 所示，热负荷指热水负荷，可通过热水储存模型描述供水温度与热负荷之间的关系。

$$T_{t+1}^{\text{Ws}} = \frac{H_t^{\text{Ws}}}{V^{\text{Ws}} C^{\text{Ws}}} + \frac{V_t^{\text{C,Ws}}}{V^{\text{Ws}}} T_t^{\text{C,Ws}} + \frac{V_t^{\text{Ws}} - V_t^{\text{C,Ws}}}{V^{\text{Ws}}} T_t^{\text{Ws}} \quad (23)$$

式中： C^{Ws} 为水的比热； T_t^{Ws} 、 $T_t^{\text{C,Ws}}$ 分别为储水温度和进入储水罐代替所消耗热水的冷水温度； V^{Ws} 、 $V_t^{\text{C,Ws}}$ 分别为储水总量和替换所消耗的热水的冷水总量； H_t^{Ws} 为供应热水所需要的能量。

为保障用户舒适度，应满足式(24)的水温上下限约束和式(25)、式(26)的水温波动约束。

$$T_{\text{min}}^{\text{Ws}} \leq T_t^{\text{Ws}} \leq T_{\text{max}}^{\text{Ws}} \quad (24)$$

式中： $T_{\text{max}}^{\text{Ws}}$ 、 $T_{\text{min}}^{\text{Ws}}$ 分别为 T_t^{Ws} 的上、下限。

$$\begin{cases} \lambda_t^{\text{Ws-}} = \frac{T_{\text{min}}^{\text{Ws}} - T_{\text{opt}}^{\text{Ws}}}{|T_{\text{opt}}^{\text{Ws}} - T_t^{\text{Ws}}|} \\ \lambda_t^{\text{Ws+}} = \frac{T_{\text{max}}^{\text{Ws}} - T_{\text{opt}}^{\text{Ws}}}{|T_{\text{opt}}^{\text{Ws}} - T_t^{\text{Ws}}|} \end{cases} \quad (25)$$

$$(1 + \lambda_t^{\text{Ws-}}) T_{\text{opt}}^{\text{Ws}} \leq T_t^{\text{Ws}} \leq (1 + \lambda_t^{\text{Ws+}}) T_{\text{opt}}^{\text{Ws}} \quad (26)$$

式中： $T_{\text{opt}}^{\text{Ws}}$ 为设定的最适宜水温。

2.3 柔性负荷补偿机制

基于阶梯型补贴的需求响应通过在用户舒适度范围内对室温及水温进行调控，改变用户的柔性冷、热负荷。为避免将需求响应用户与 RIES 捆绑为能量管理优化的刚性主体，鼓励用户参与以经济性为导向的激励型冷、热负荷需求响应。设室温与水温的补贴系数 ω 相同，则可得 RIES 根据参与需求响应力度给予用户阶梯型的调温补贴 C_t^{IDR} 。

$$C_t^{\text{IDR}} = \omega (Q_t^{\text{Cl}} c^{\text{Cl}} + H_t^{\text{Ws}} c^{\text{Ws}}) \quad (27)$$

式中： c^{Cl} 、 c^{Ws} 分别 RIES 售冷、售热单价。

在阶梯型补贴机制中，实际温度与设定温度的偏离程度不同， ω 的计算如式(28)所示。

$$\omega = \begin{cases} \omega_1 & 0 < |T_{t,x} - T_{opt,x}| \leq \theta_x \\ \omega_2 & |T_{t,x} - T_{opt,x}| > \theta_x \end{cases} \quad (28)$$

式中: x 为室温或水温; θ 为温度划分边界。偏离 θ 越远用户舒适度越小,补贴力度也越大,故 $\omega_1 < \omega_2$ 。

通过该阶梯型补贴,一方面促进用户根据激励信号主动削减负荷以降低用能成本;另一方面,通过引入温度约束和波动约束,避免因室温降低、水温升高而引起的制冷、制热负荷增加,避免因室温、水温波动过大而降低用户舒适度。

2.4 电价型需求响应

在价格型需求响应(price demand response, PDR)中,用户会根据接收到的电价信号 c_t^{Load} 调整用电行为。通常采用弹性系数矩阵表征电价变化率 $\varphi_{\Delta p,t}$ 对用电量变化率 $\varphi_{\Delta q,t}$ 的影响,对 t 时段用户对PDR的响应行为建模,如式(29)所示。

$$\begin{bmatrix} \varphi_{\Delta q,1} \\ \varphi_{\Delta q,2} \\ \vdots \\ \varphi_{\Delta q,t} \end{bmatrix} = \mathbf{E} \begin{bmatrix} \varphi_{\Delta p,1} \\ \varphi_{\Delta p,2} \\ \vdots \\ \varphi_{\Delta p,t} \end{bmatrix} \quad (29)$$

式中: \mathbf{E} 为价格型需求响应弹性矩阵。 \mathbf{E} 可用式(30)进行表示。

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \cdots & \varepsilon_{1t} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \cdots & \varepsilon_{2t} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \varepsilon_{t1} & \varepsilon_{t2} & \cdots & \varepsilon_{tt} \end{bmatrix} \quad (30)$$

式中: ε_{vv} 、 ε_{vj} 分别为第 v 和第 j 个调度时间段的自弹性系数和交叉弹性系数($v, j = 1, 2, \dots, t$)。

为确保用户正常生活不受影响,执行PDR后的负荷需求 P_t^{Load} 和实时电价 c_t^{Load} 应满足约束,如式(31)所示。

$$\begin{cases} P_{\min}^{Load} \leq P_t^{Load} \leq P_{\max}^{Load} \\ c_{\min}^{Load} \leq c_t^{Load} \leq c_{\max}^{Load} \end{cases} \quad (31)$$

式中: P_{\max}^{Load} 、 P_{\min}^{Load} 分别为 P_t^{Load} 的上、下限; c_{\max}^{Load} 、 c_{\min}^{Load} 分别为 c_t^{Load} 的上、下限。

3 RIES 能量管理优化数学模型及其求解

3.1 目标函数

建立以1d的24个时段为一调度周期、以最大化运行收益的RIES能量管理优化目标函数,如式(32)所示。

$$\max C = C^{Sale} - C^{Buy} - C^{IDR} \quad (32)$$

$$C^{Sale} = \sum_{t=1}^{24} (P_t^{Load} c_t^{Load} + Q_t^{Cl} c^{Cl} + H_t^{Ws} c^{Ws} + P_t^{sGrid} c_t^{sGrid}) \quad (33)$$

$$C^{Buy} = \sum_{t=1}^{24} [P_t^{bGrid} c_t^{bGrid} + (G_t^{GT} + G_t^{GB}) c^{Ng}] \quad (34)$$

$$C^{IDR} = \sum_{t=1}^{24} C_t^{IDR} \quad (35)$$

式中: C^{Sale} 、 C^{Buy} 分别为RIES向用户的售能收益和从外部购能的成本; c^{Ng} 为天然气价格。

3.2 约束条件

模型应满足式(36)的电功率平衡约束、式(37)的冷功率平衡约束和式(38)的热负荷平衡约束。

$$P_t^{PV} + P_t^{WT} + P_t^{GT} + P_t^{bGrid} + P_t^{dBT} = P_t^{Load} + P_t^{AC} + P_t^{sGrid} + P_t^{cBT} \quad (36)$$

式中: P_t^{PV} 、 P_t^{WT} 分别为PV与WT的出力。

$$Q_t^{AC} + Q_t^{AR} = Q_t^{Cl} \quad (37)$$

$$H_t^{GB} + H_t^{HE} = H_t^{Ws} + H_t^{AR} \quad (38)$$

除满足以上系统运行时的功率平衡外,各设备也要满足约束。尤其值得指出的是,式(21)和式(25)为非线性约束,对其线性化处理^[21]后的RIES能量管理优化模型是含多变量的混合整数线性规划问题,可调用Cplex求解优化模型。计算环境为Intel i7-4710HQ,8G内存。

4 算例分析

4.1 基础数据

以含4栋商业建筑的RIES为例进行仿真分析。建筑热工参数和设备参数分别如表1、表2所示。

表1 建筑参数

Table 1 Parameters of the buildings				
参数	建筑 A	建筑 B	建筑 C	建筑 D
$f^{Wall} / (\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	1.092	0.908	1.146	0.820
s^{Wall} / m^2	1 000	2 400	1 500	2 700
$f^{Win} / (\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	2.80	2.75	2.80	2.50
s^{Win} / m^2	450	750	600	650
体积/ m^3	5 400	24 000	12 000	30 000

RIES购、售电价格参考文献[22-26], $c^{Ng} = 3.24$ 元/ m^3 、 $c^{Cl} = c^{Ws} = 0.3$ 元/($\text{kW} \cdot \text{h}$)、 $\omega_1 = 3\%$ 、 $\omega_2 = 5\%$ 、 $T_{opt}^{In} = 22.5$ ℃、 $T_{opt}^{Ws} = 70$ ℃、 $X_i Y_i = 0.45$ 。用户购电的原始电价为0.8元/($\text{kW} \cdot \text{h}$);在弹性矩阵中,自弹性系数为-0.2、交叉弹性系数为0.033;电价增幅不超过25%;用电方式满意度不低于90%,电费支出满意度不低于100%。其中,建筑A为住宅楼,制冷时间为00:00—09:00和18:00—24:00;建筑B为写字楼,制冷时间为08:00—20:00;建筑C为公寓,制冷时间为全天;建筑D为商场,制冷时间为10:00—

表 2 RIES 参数

Table 2 Parameters of the RIES

参数	取值	参数	取值
a	2.67	λ^{GT}	0.35
b	66.2	η^{GT}	0.85
c	100	P_{down}^{GT}/kW	-60
P_{min}^{GT}/kW	50	P_{up}^{GT}/kW	60
P_{max}^{GT}/kW	500	H_{max}^{GB}/kW	500
η^{GB}	0.90	η^{cBT}	0.95
δ^{BT}	0.02	η^{dBT}	0.95
P_{max}^{cBT}/kW	80	P_{min}^{cBT}/kW	0
P_{max}^{dBT}/kW	80	P_{min}^{dBT}/kW	0
$E_{min}^{BT}/(kW \cdot h)$	60	C^{AC}	4.0
$E_{max}^{BT}/(kW \cdot h)$	360	C^{AR}	1.2
P_{max}^{AC}/kW	500	P_{max}^{bGrid}/kW	400
P_{max}^{AR}/kW	500	P_{max}^{sGrid}/kW	400
$\rho^{Air}/(kg \cdot m^{-3})$	1.2	$C^{Air}/(kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	1.0
$T_{min}^n/^\circ C$	21	$C^{Ws}/(kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	4.2
$T_{max}^n/^\circ C$	24	$T_{min}^{Ws}/^\circ C$	60
V^{Ws}/L	100	$T_{max}^{Ws}/^\circ C$	80

22:00。用户负荷与可再生能源出力曲线如图 2 所示;室外温度与太阳辐射曲线如图 3 所示;建筑室内热源如图 4 所示。

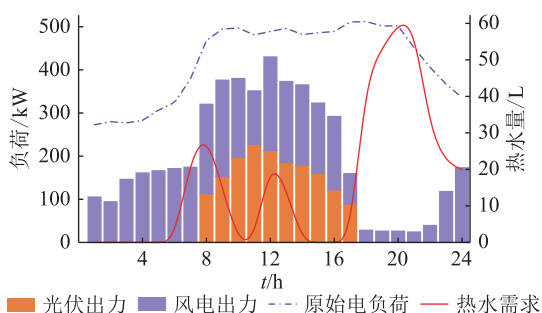


图 2 RIES 负荷与可再生能源出力

Fig.2 Load of the RIES and output of PV and WT

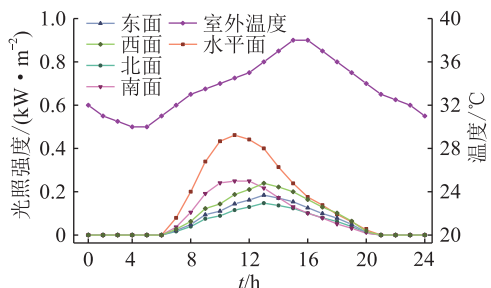


图 3 太阳辐射功率与室外温度曲线

Fig.3 Solar radiation and outdoor temperature curves

4.2 经济性对比分析

为研究 RIES 内不同运行方式对调度结果的影响,设置以下 5 种方案进行对比说明。

方案 1:冷、热负荷参与阶梯型补贴的需求响

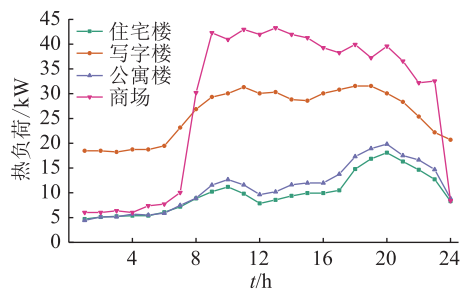


图 4 4 种建筑的室内热源曲线

Fig.4 Internal heat gains curves of the four buildings

应,电负荷参与电价型需求响应;

方案 2:冷、热负荷参与需求响应^[18],但采用固定补贴,电负荷参与电价型需求响应;

方案 3:冷、热负荷参与阶梯型补贴的需求响应,电负荷不参与电价型需求响应;

方案 4:冷、热负荷不参与需求响应,电负荷参与电价型需求响应;

方案 5:冷、热负荷不参与需求响应,电负荷不参与电价型需求响应。

5 种运行方案下运行费用组成对比如表 3 所示。

表 3 5 种方案的运行成本组成

Table 3 Operating cost components of five modes

方案	RIES 售能费用	RIES 购能成本	补贴费用	用户支出	RIES 净利润
1	10 973.11	5 766.73	60.76	10 912.35	5 145.62
2	10 993.55	5 822.29	48.57	10 944.98	5 122.69
3	11 061.16	5 911.75	60.76	11 000.40	5 088.65
4	10 927.95	5 966.76	0	10 927.95	4 961.19
5	11 040.48	6 088.31	0	11 040.48	4 952.17

由表 3 可知:首先,与未考虑任何 DR 的方案 5 相比,考虑 DR 的方案 1—方案 4 中 RIES 净利润与用户支出均优于方案 5。其次,与未考虑冷、热负荷 DR 的方案 4 相比,考虑冷、热负荷 DR 的方案 1—方案 3 中 RIES 利润均优于方案 4。再者,与不考虑电负荷 DR 的方案 3 相比,同时考虑电、冷、热负荷 IDR 的方案 1 用户支出降低 0.81%,提升用户利益,同时 RIES 净利润提高 1.12%。最后,与考虑固定补贴的方案 2 相比,采用阶梯型补贴的方案 1 虽然提高补贴费用但是减少用户的支出费用和 RIES 的购能费用,净利润提高 0.44%。综上,同时考虑阶梯型补贴的冷、热负荷需求响应和电价型需求响应的方案能够统筹协调供需资源,提升系统和用户的经济效益。

4.3 电价型需求响应对调度结果的影响分析

方案 1 中执行 PDR 后实时电价与负荷的变化

情况如图 5 所示。

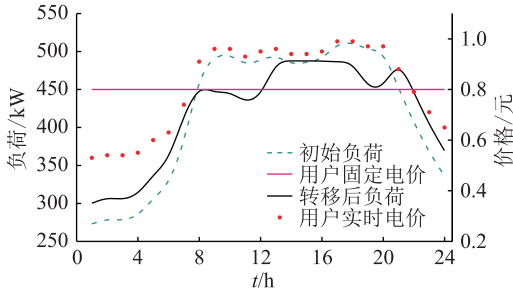


图 5 价格型需求响应下实时电价与负荷变化

Fig.5 Real-time prices and load variation of PDR

由图 5 可知,PDR 通过改变各个时刻电价高低从而影响了用户的用电习惯,引导用户错峰时移用电。由于 08:00—12:00、16:00—22:00 电价较高,用户倾向将这些时间段的负荷转移到电价较低的 00:00—07:00、23:00—24:00,结合表 3 可知,PDR 不仅降低用户支出,提升 RIES 的经济效益,还起到削峰填谷的效果。

4.4 柔性负荷对调度结果的影响分析

图 6—图 8 给出方案 1 中各机组的出力情况。

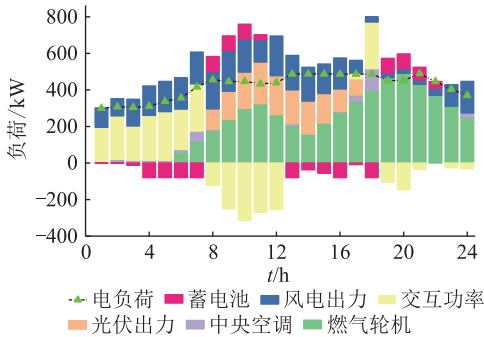


图 6 电负荷平衡

Fig.6 Balanced state of power load

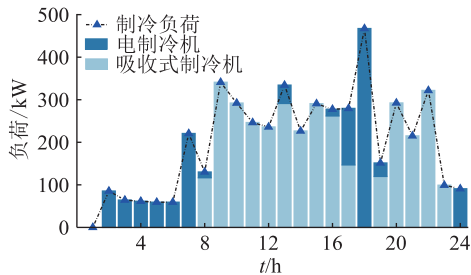


图 7 冷负荷平衡

Fig.7 Balanced state of cooling load

由图 6—图 8 可知,在 00:00—07:00,电费与负荷均较低,GT 不启动,通过系统风力发电与从外部购电满足电负荷需求,通过 AC 满足冷负荷,同时 BT 充电;在 08:00—12:00,系统电负荷基本由 GT 发电承担,而 BT 放电作为补充,通过向电网售电以

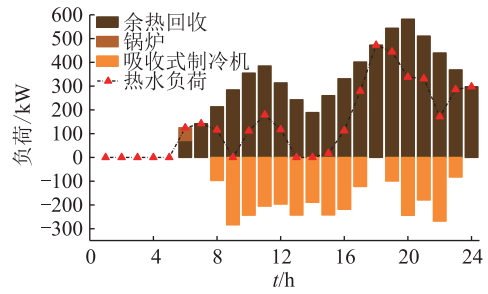


图 8 热负荷平衡

Fig.8 Balanced state of heating load

提高经济效益,此时 GT 发电余热首先满足热负荷需求,剩余热量通过 AR 制冷并以电制冷作为补充,GT 全程少量出力以补充热负荷需求。在 13:00—18:00 与 23:00—24:00 的电价平时段,负荷逐步下降,因此 GT 发电量也相对降低,此时产生的发电余热也较小,应通过 AC 提高制冷功率以满足冷负荷需求。19:00—22:00 是第二个峰电价时段,RIES 工作情况与 08:00—12:00 相似,但此时由于 WT 出力偏低,且无 PV 发电,因此 GT 出力较大,向电网售电功率也较小。

图 9 与图 10 分别为方案 1 中柔性负荷补偿机制下的室温与水温变化。

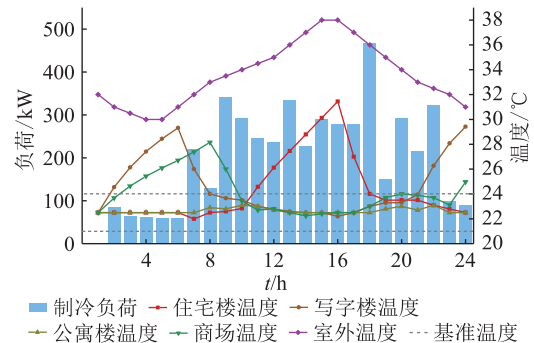


图 9 建筑室温与冷负荷

Fig.9 Indoor temperature of buildings and cooling load

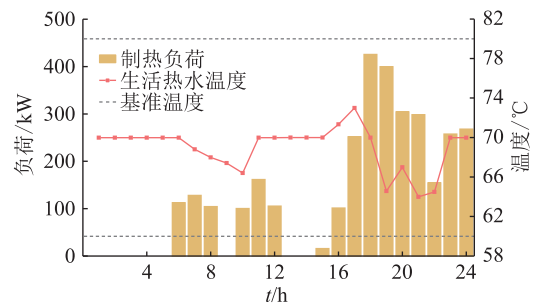


图 10 生活热水温度与热负荷

Fig.10 Hot water temperature and heating load

由图 9 可知,建筑室内温度主要受能源价格的影响,在 00:00—07:00,此时电价处于谷时,因此室

温较平稳。而在 08:00—22:00 间,由于制冷需求与电价都较高,因此通过适当调高室温可降低能源消耗,而室温约束也可以保障用户舒适度。23:00—24:00,由于室外温度降低,冷负荷需求也相对较低,因此室温也比较稳定。图 10 中水温变化规律与室温类似,但由于用户的热需求主要集中在 20:00—24:00,所以这一时段适当降低水温可提高经济性。

5 结论

文中针对含智能楼宇群的 IES,计及冷、热、电负荷参与需求侧管理对系统经济调度的影响,提出考虑综合需求响应的 RIES 能量优化管理方法,可得以下结论:

(1) 楼宇柔性冷负荷需求数学模型综合考虑建筑围护结构、室内得热等多种热量扰动因素,可以更准确地描述不同制冷功率下的室温波动情况。

(2) 冷、热负荷参与阶梯型补贴能在楼宇冷负荷需求模型与生活热水需求模型的基础上激发用户负荷削减潜力,统筹 RIES 与需求侧资源,减少用户成本支出,增加 RIES 利润。

(3) 价格型需求响应可促进用户转移负荷以达到削峰填谷与降低用能成本的效果,是 IDR 的重要组成部分。

参考文献:

- [1] 朱浩昊,朱继忠,李盛林,等. 电-热综合能源系统优化调度综述[J]. 全球能源互联网,2022,5(4):383-397.
ZHU Haohao,ZHU Jizhong,LI Shenglin,et al. Review of optimal scheduling of integrated electricity and heat systems[J]. Journal of Global Energy Interconnection,2022,5(4):383-397.
- [2] YU Y,LI J L,CHEN D Y. Optimal dispatching method for integrated energy system based on robust economic model predictive control considering source-load power interval prediction[J]. Global Energy Interconnection,2022,5(5):564-578.
- [3] 负保记,张恩硕,张国,等. 考虑综合需求响应与“双碳”机制的综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(22):11-19.
YUN Baoji,ZHANG Enshuo,ZHANG Guo,et al. Optimal operation of an integrated energy system considering integrated demand response and a 'dual carbon' mechanism[J]. Power System Protection and Control,2022,50(22):11-19.
- [4] 程杉,徐建宇,何畅,等. 计及不确定性的综合能源系统容量规划方法[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(18):17-24.
CHENG Shan,XU Jianyu,HE Chang,et al. Optimal capacity planning of an integrated energy system considering uncertainty[J]. Power System Protection and Control,2021,49(18):17-24.
- [5] 帅轩越,王秀丽,黄晶. 多区域综合能源系统互联下的共享储能容量优化配置[J]. 全球能源互联网,2021,4(4):382-392.
SHUAI Xuanyue,WANG Xiuli,HUANG Jing. Optimal configuration of shared energy storage capacity under multiple regional integrated energy systems interconnection[J]. Journal of Global Energy Interconnection,2021,4(4):382-392.
- [6] 张涛,郭玥彤,李逸鸿,等. 计及电气热综合需求响应的区域综合能源系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(1):52-61.
ZHANG Tao,GUO Yuetong,LI Yihong,et al. Optimization scheduling of regional integrated energy systems based on electric-thermal-gas integrated demand response[J]. Power System Protection and Control,2021,49(1):52-61.
- [7] 张涛,黄明娟,刘伉,等. 计及源荷不确定性和变工况特性的区域综合能源系统优化调度[J]. 智慧电力,2022,50(8):109-117.
ZHANG Tao,HUANG Mingjuan,LIU Kang,et al. Optimal scheduling of regional integrated energy system considering source-load uncertainty and variable condition characteristic[J]. Smart Power,2022,50(8):109-117.
- [8] 艾芊,郝然. 多能互补、集成优化能源系统关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化,2018,42(4):2-10,46.
AI Qian,HAO Ran. Key technologies and challenges for multi-energy complementarity and optimization of integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(4):2-10,46.
- [9] 郑国太,李昊,赵宝国,等. 基于供需能量平衡的用户侧综合能源系统电/热储能设备综合优化配置[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(16):8-18.
ZHENG Guotai,LI Hao,ZHAO Baoguo,et al. Comprehensive optimization of electrical/thermal energy storage equipments for integrated energy system near user side based on energy supply and demand balance[J]. Power System Protection and Control,2018,46(16):8-18.
- [10] TRIFONOV T O. Coordination of battery energy storage and power-to-gas in distribution systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems,2017,2(1):1-8.
- [11] 何畅,程杉,徐建宇,等. 基于多时间尺度和多源储能的综合能源系统能量协调优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报,2020,32(2):77-84,97.
HE Chang,CHENG Shan,XU Jianyu,et al. Coordinated optimal scheduling of integrated energy system considering multi-time scale and hybrid energy storage system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2020,32(2):77-84,97.
- [12] 许周,孙永辉,谢东亮,等. 计及电/热柔性负荷的区域综合能源系统储能优化配置[J]. 电力系统自动化,2020,44(2):53-59.
XU Zhou,SUN Yonghui,XIE Dongliang,et al. Optimal configuration of energy storage for integrated region energy system considering power/thermal flexible load[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(2):53-59.
- [13] 邹云阳,杨莉,冯丽,等. 考虑热负荷二维可控性的微网热电协调调度[J]. 电力系统自动化,2017,41(6):13-19.

- ZOU Yunyang, YANG Li, FENG Li, et al. Coordinated heat and power dispatch of microgrid considering two-dimensional controllability of heat loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6):13-19.
- [14] 仪忠凯,李志民. 计及热网储热和供热区域热惯性的热电联合调度策略[J]. 电网技术, 2018, 42(5):1378-1384.
YI Zhongkai, LI Zhimin. Combined heat and power dispatching strategy considering heat storage characteristics of heating network and thermal inertia in heating area[J]. Power System Technology, 2018, 42(5):1378-1384.
- [15] 郭尊,李庚银,周明,等. 计及综合需求响应的商业园区能量枢纽优化运行[J]. 电网技术, 2018, 42(8):2439-2448.
GUO Zun, LI Gengyin, ZHOU Ming, et al. Optimal operation of energy hub in business park considering integrated demand response[J]. Power System Technology, 2018, 42(8):2439-2448.
- [16] HUANGW J, ZHANG N, KANG C Q, et al. From demand response to integrated demand response: review and prospect of research and application[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1):1-13.
- [17] 张峰,杨志鹏,张利,等. 计及多类型需求响应的孤岛型微能源网经济运行[J]. 电网技术, 2020, 44(2):547-557.
ZHANG Feng, YANG Zhipeng, ZHANG Li, et al. Optimal operation of islanded micro energy grid with multi-type demand responses[J]. Power System Technology, 2020, 44(2):547-557.
- [18] 程杉,魏昭彬,黄天力,等. 基于多能互补的热电联供型微网优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11):160-168.
CHENG Shan, WEI Zhaobin, HUANG Tianli, et al. Multi-energy complementation based optimal operation of a microgrid with combined heat and power[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11):160-168.
- [19] 刘文霞,李征洲,杨粤,等. 计及需求响应不确定性的综合能源系统协同优化配置[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10):41-49.
LIU Wenxia, LI Zhengzhou, YANG Yue, et al. Collaborative optimal configuration for integrated energy system considering uncertainties of demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10):41-49.
- [20] JIN X L, MU Y F, JIA H J, et al. Dynamic economic dispatch of a hybrid energy microgrid considering building based virtual energy storage system[J]. Applied Energy, 2017, 194:386-398.
- [21] 陈锦鹏,胡志坚,陈颖光,等. 考虑阶梯式碳交易机制与电制氢的综合能源系统热电优化[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9):48-55.
CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Yingguang, et al. Thermoelectric optimization of integrated energy system considering ladder-type carbon trading mechanism and electric hydrogen production[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9):48-55.
- [22] 葛少云,刘静仪,刘洪,等. 需求响应机制下含建筑虚拟储能的能源站经济调度[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4):35-43.
GE Shaoyun, LIU Jingyi, LIU Hong, et al. Economic dispatch of energy station with building virtual energy storage in demand response mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4):35-43.
- [23] 程杉,陈梓铭,徐康仪,等. 基于合作博弈与动态分时电价电动汽车有序充放电方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21):15-21.
CHENG Shan, CHEN Ziming, XU Kangyi, et al. An orderly charging and discharging method for electric vehicles based on a cooperative game and dynamic time-of-use price[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21):15-21.
- [24] 程杉,倪凯旋,赵孟雨. 基于 Stackelberg 博弈的充换储一体化电站微电网双层协调优化调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(6):49-55, 69, 56.
CHENG Shan, NI Kaixuan, ZHAO Mengyu. Stackelberg game based bi-level coordinated optimal scheduling of microgrid accessed with charging-swapping-storage integrated station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6):49-55, 69, 56.
- [25] 程杉,钟仕凌,尚冬冬,等. 考虑电动汽车时空负荷分布特性的主动配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17):1-13.
CHENG Shan, ZHONG Shiling, SHANG Dongdong, et al. Dynamic reconfiguration of an active distribution network considering temporal and spatial load distribution characteristics of electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17):1-13.
- [26] 程杉,汪业乔,廖玮霖,等. 含电动汽车的新能源微电网多目标分层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12):63-71.
CHENG Shan, WANG Yeqiao, LIAO Weilin, et al. Bi-level multi-objective optimization of a new energy microgrid with electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12):63-71.

作者简介:



程杉

程杉(1981),男,博士,教授,研究方向为综合能源系统、智能配用电等(E-mail: hpuccqu-yzu@ctgu.edu.cn);

陈诺(1999),男,硕士在读,研究方向为新能源微电网运行;

徐建宇(1995),男,硕士在读,研究方向为微网需求侧管理。

(下转第 57 页)

Thermostatically controlled loads control for primary frequency regulation based on dynamic droop control

LIU Hui, WU Xiaoming, SU Yi

(College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Using thermostatically controlled load (TCL) as a frequency regulation resource is an effective means of maintaining power grid frequency stability caused by the high proportion integration of renewable energy power generation into the power grid. A primary frequency control strategy is proposed for the participation of TCL in regulation based on dynamic droop control. The dynamic droop control model is constructed to control the participation of TCL aggregators in frequency regulation by adjusting the droop control coefficient in real time, while considering the average state of temperature of TCL, the capacity for frequency regulation and the rate of change of system frequency. In this condition, the off state of TCL is locked for regulation up, vice versa the on state is locked for regulation downward. Therefore, the frequency can quickly return near its rated value. At the same time, to ensure the user's comfort, the priority ranking list dispatch method on the state of temperature is used to determine the order of TCL for frequency regulation. Finally, simulations on the Matlab/Simulink platform show the effectiveness of the proposed strategy in improving frequency quality and the user's comfort.

Keywords: demand response; thermostatically controlled load (TCL); droop control; frequency change rate; primary frequency regulation; state of temperature

(编辑 李栋)

(上接第 47 页)

Optimal energy management of residential integrated energy system with consideration of integrated demand response

CHENG Shan^{1,2}, CHEN Nuo^{1,2}, XU Jianyu^{2,3}, WANG Can^{1,2}, ZHONG Shiling^{1,2}

(1. Hubei Provincial Engineering Research Center of Intelligent Energy Technology

(China Three Gorges University), Yichang 443002, China; 2. College of Electrical

Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

3. State Grid Zhumadian Power Supply Company of Henan Electric Power Co., Ltd., Zhumadian 463000, China)

Abstract: In response to the problem that the factors affecting room temperature and its influence on load modeling and the problems of user comfort and energy consumption expenditure when rigidly bundling residential integrated energy system (RIES) and users are not fully considered in the energy management of RIES, the RIES energy management optimization model and its solution method are proposed in the paper for the participation of cooling and heating loads in tiered subsidy and electric loads in the tariff-type integrated demand response. Firstly, the discrete building heat balance equation is obtained by comprehensively considering the factors affecting the room temperature, and the mathematical model of the flexible but not fixed cold, heat and electricity loads of the building is established. Secondly, a tiered subsidy for cold and heat load participation and a tariff-type integrated demand response mechanism for electric load participation should be established. Then, taking into account of RIES's cost of purchase energy from the outside, cost of affording integrated demand response (IDR), and profit of selling energy to the users, an optimization model for optimizing energy management is established that maximizes RIES's net profit with consideration a series of operation constraints of the components and the system. The Cplex is used to solve the linearized model. Finally, a simulation example shows that the residential integrated energy system optimization strategy that takes into account the comprehensive demand response can coordinate the resources on both sides of supply and demand, thus improving the economic benefits of the system and users.

Keywords: residential integrated energy system (RIES); user comfort; integrated demand response (IDR); flexible load; tiered subsidy; optimal energy management

(编辑 李栋)