文章编号:1672-3961(2024)03-0149-11 DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2023.091

新农村能源系统供用能特征分析与运行优化

王超[1,2],潘麟[1],刘博[1],李申伟[1],马蕾娜[1],陈建泽[1],何斯强[2*]
(1.国网山东省电力公司青岛供电公司, 山东 青岛 266002; 2.电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东 济南 250061)

摘要:为促进农村能源系统对分布式能源的高效消纳,在供用能特征及可调潜力分析基础上,提出一种考虑各类可调资源运行特性的新农村能源系统运行优化方法,可在满足各类用能需求的同时促进分布式能源消纳。梳理各类用能负荷典型曲线及时变特征,分析其与分布式能源的协同配合潜力;考虑各类能量转换设备物理特性,建立状态转移模型及运行边界,以用能成本最低为目标建立能源系统运行优化模型;通过同类负荷聚合简化模型降低计算难度,基于 Yalmip+CPLEX 工具求解得到运行优化方案;以典型新农村能源系统为例验证所提方法效果。算例分析表明,所提方法可充分利用温控负荷、电转气负荷及电储能等可调资源促进分布式光伏消纳,相比基于规则的运行方式,弃光量降低约 58%,用能成本降低约 19%。

关键词:新农村能源系统;供用能特征分析;运行优化;农村振兴;光伏消纳
中图分类号:TM761 **文献标志码**:A
引用格式:王超,潘麟,刘博,等. 新农村能源系统供用能特征分析与运行优化[J]. 山东大学学报(工学版),2024,54(3):149-159.
WANG Chao, PAN Lin, LIU Bo, et al. Characteristic analysis and operational optimization of energy system in new rural areas[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(3):149-159.

Characteristic analysis and operational optimization of energy system in new rural areas

WANG Chao[1,2], PAN Lin[1], LIU Bo[1], LI Shenwei[1], MA Leina[1], CHEN Jianze[1], HE Siqiang[2*]
(1. Qingdao Power Supply Company of State Grid Shandong Electric Power Company, Qingdao 266002, Shandong, China; 2. Key Laboratory Power System Intelligent Dispatch and Control, Ministry of Education (Shandong University), Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: In order to promote the efficient consumption of distributed energy by the rural energy system, based on the analysis of the characteristics of energy supply and consumption and adjustable potential, an energy system operation optimization method was proposed to utilize the flexibility of various loads. The typical curves and time-varying characteristics of various types of energy loads and their synergistic potential with distributed power generation were summarized. The state function models and operation boundaries for various types of energy conversion devices were established, considering their physical characteristics, followed by the operation optimization model to minimize the energy consumption cost. The model was simplified by aggregating similar loads to reduce the calculation difficulty and was solved by programming with Yalmip+CPLEX tool to obtain the operation optimal strategy. The case study of a typical new rural energy system operation verified the proposed modeling and solving method. The simulation results showed that the proposed method could make full use of adjustable loads such as temperature-controlled load, power-to-gas load, and electric energy storage, to enhance distributed photovoltaic consumption. The amount of curtailment and the total energy cost were reduced by about 58% and 19% respectively compared with the rule-based operation method.

Keywords: new rural energy system; analysis of energy supply and consumption characteristics; optimize operation; rural revitalization; photovoltaic consumption

收稿日期:2023-05-11
基金项目:国家电网有限公司科技资助项目(2021A-008)
第一作者简介:王超(1981—),男,山东新泰人,工程师,博士,主要研究方向为电力系统及其自动化。E-mail:wangchao2116@163.com
*通信作者简介:何斯强(1999—),男,内蒙古呼伦贝尔人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统及其自动化。E-mail:202234700@mail.sdu.edu.cn

0 引言

十九大以来，以激发农村发展新活力、科技兴农、可持续发展为目标的乡村振兴战略持续推进[1]。构建以电力为核心、清洁高效、多元互补、城乡协调、统筹发展的现代农村能源体系，以绿色低碳方式满足农村用能需求成为乡村振兴的重要内容。

与城市不同，新农村能源系统在能源供给及利用方面具有自身特点。在能源供给方面，农村空间广阔，自然资源丰富，可充分利用屋顶、荒山、滩涂等开发分布式光伏（photovoltaic，PV）、风电等，实现本地分布式电源供能为主、电网能量互动双向支撑的供能模式[2]。在能源利用方面，电、气、冷、热等多种生活需求和光、热等多种生产需求快速增加[3]，如文献[2]指出农村具有分散式开发生物质、太阳能、风能的优越条件和就地利用的迫切需求；文献[3]认为农村能源转型依赖可再生能源开发与用能电气化，农村用能水平与用能条件将显著改善；文献[4]指出清洁替代与电能替代将成为新农村用能关键特征，新农村能源互联将快速发展。

与城市电网相比，农村电网较为薄弱，输电能力有限，农村分布式能源开发需以就地消纳为主，如何促进分布式能源消纳成为关键。综合能源系统（integrated energy system，IES）是提高能源利用率、减少弃电的重要技术形式。文献[5]提出一种面向园区微网的IES多目标优化设计方法，提高可再生能源利用率，兼顾环保性与节能性等综合效益；文献[6]设计了热电联供微电网运行优化方案，对含电力、热水、微电源及电热负荷的微电网运行方式进行优化；文献[7]提出一种面向社区微网的主动能量管理和协同优化方法，通过广义用户用能曲线优化促进分布式光伏消纳；文献[8]提出一个用于工业微电网的能源管理系统两阶段优化算法，兼顾可再生能源不确定因素及电池储能系统可扩展性优化系统运行；文献[9]设计了一种含风光电源、电动汽车、电池储能与热电联产机组的智能建筑能源管理系统及遗传算法求解方案，有效提高智能建筑新能源消纳和运行成本效益。

利用新型负荷可调性优化用能曲线也可促进分布式能源消纳。文献[10]提出一种基于卷积神经网络的家庭蓄热式电采暖实时运行策略快速生成方法，在兼顾用户舒适度的前提下，实时控制电采暖功率，促进新能源消纳；文献[11]提出一种基于最优潮流、电价优化和充电路径优化的网-站-车3层电力网与交通网络联合优化调度方法，通过动态电价引导电动汽车充电优化，消纳电网新能源；文献[12]构建了一种考虑弃风电量制气（power to gas，P2G）的电-气综合能源系统双层优化调度模型，通过电转气设备运行优化减少弃风电量。

上述IES研究多针对工业园区、微电网或智能建筑，应用于新农村能源系统运行优化时需结合其供用能特征；基于新型负荷可调能力的研究可融入系统统一考虑，实现多种负荷协同配合。因此，有必要结合乡村振兴背景，梳理分析能源种类、来源、用能形式等方面的变化，归纳生活及生产用能特征，进一步针对各类负荷供用能特征及可调能力，协同各类可调负荷实现新农村能源系统运行优化。

本研究在新农村供用能特性分析基础上，采用IES思想构建新农村能源系统运行优化模型，实现协同多种可调负荷促进分布式能源电力消纳的目标。介绍新农村能源系统构成，结合新农村建设趋势，梳理新农村基本电、冷、热、气负荷及生产负荷的典型曲线、时域特征及其与分布式发电的协同配合潜力，构建温控类负荷、P2G负荷、温室大棚加热负荷及分布式储能设备模型及以用电成本最低为目标的运行优化模型，给出基于Yalmip+CPLEX的求解方法，以典型新农村能源系统为例验证所提方法的应用效果。

1 新农村能源系统构成

乡村振兴和新农村建设提高了农村生活水平，改善了农业生产条件，人们对电力、燃气、供暖、热水等多形式用能需求增加，推动能源供给和消费模式呈现出前述特征。分布式发电特别是分布式光伏是新农村能源系统主要能量来源，多种用能需求主要由电力直接或间接满足，可形成以电力为核心的综合能源系统，充分利用分布式能源实现绿色、低碳和可持续用能。

新农村能源系统中主要设备及互联关系如图1所示，主要依靠风电、光伏等分布式电源及外部电网供给电力，依靠空调、热泵进行电-冷、电-热转换，满足空间制冷/制热需求，依靠热水器满足热水需求，依靠P2G设备满足燃气需求，依靠电-光、电-声等电气设备满足照明、娱乐等需求，并依靠LED照明及温控设备满足农业生产照明和温室温控的生产需求。

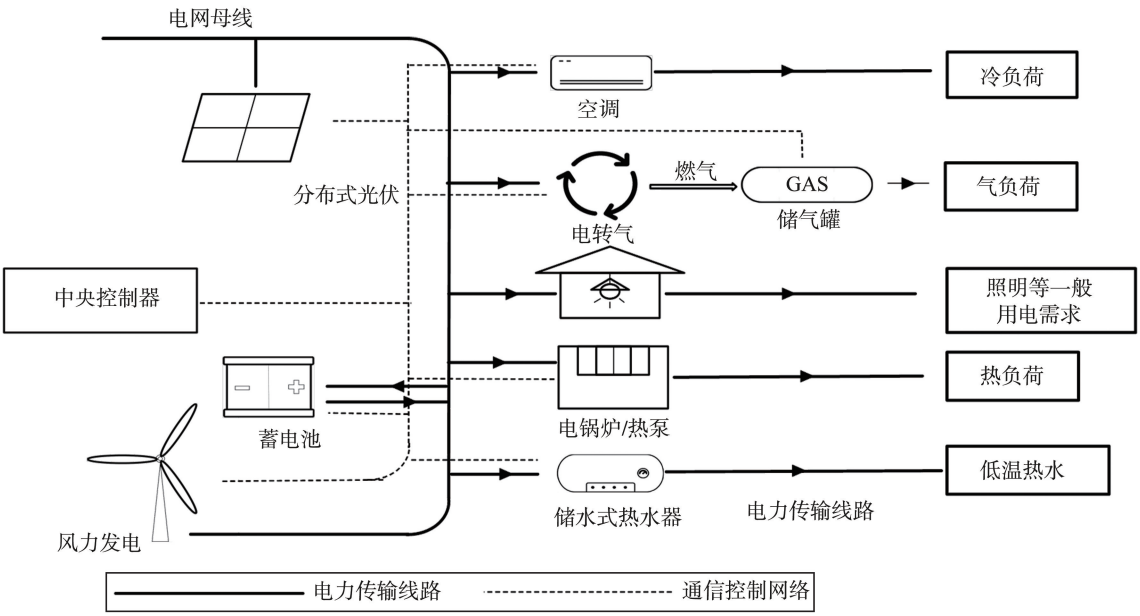


图 1　新农村能源系统构成

Fig.1　Composition of energy system in new rural areas

风光类电源表现出显著的波动性和间歇性,与农村自然负荷匹配程度将决定其消纳水平。同时,空调、热泵、热水器及大棚保暖等温控负荷具有热惯性,P2G 设备相连的气罐也具有一定储气能力,可间接实现电能的时间转移。此外,蓄电池等电能存储设施可直接实现电能时间转移,因而也是重要的可调资源。图 1 的中央控制器可通过通信控制网络获取各设备状态,完成运行优化计算,控制各设备工况,实现提高分布式能源消纳水平、降低用能成本等目标。

2　新农村用能特征及可调潜力

利用分布式能源满足电、冷、热、气等用能需求是促进分布能源消纳的关键,分布式能源出力特性与各类负荷规模及时变特征的匹配性决定利用率。以分布式光伏为例,梳理各类负荷典型曲线及其与分布式光伏出力曲线匹配性,确定各类负荷可调潜力与调整方式。

2.1　基本生活用电

社会发展和惠农政策提高了农村居民收入,家用电器持有量增加,种类日益丰富。文献[13]统计了 2010—2018 年农村家庭空调、冰箱、电视机、洗衣机及电助力车等电器变化量及使用时长,计算得出人均用电量年增长率约为 8.3%,达到 703 kWh。在时变特征方面,某地农村典型日负荷曲线如图 2 所示。由 2 图可见:基础用电负荷呈现双峰特性,高峰负荷出现在 19:00—22:00,次高峰负荷出现在 11:00—13:00,负荷低谷出现在 0:00—5:00,最大峰谷差差异显著且超过 70%;光伏出力高峰与基础用电负荷次高峰有较好重合度,有利于光伏消纳,但基本生活用电较小,消纳能力有限,且用于满足基本生活需求而相对固定,负荷无可调潜力。

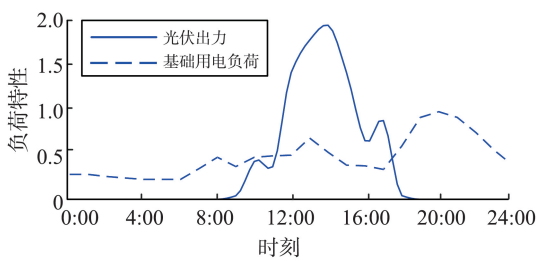


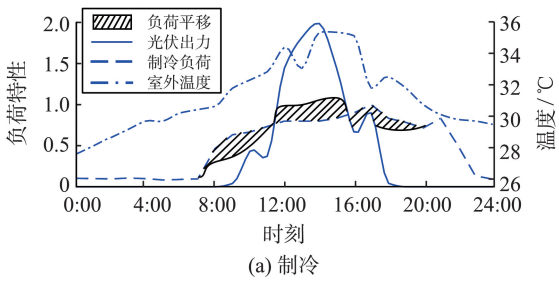
图 2　基本生活用电与光伏发电典型曲线

Fig.2　Typical curve of basic load and photovoltaic generation

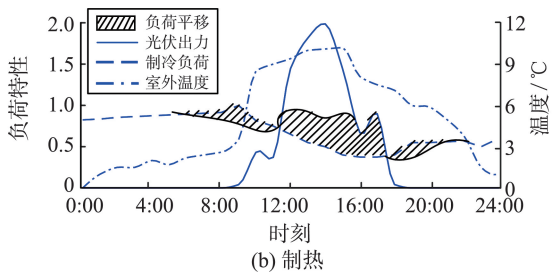
2.2　空间制冷与制热用能需求

据统计,我国农村制冷供暖负荷用能占比由 2010 年的 9%上升至 2018 年的 13%[13],而 2015 年美国居民用电负荷中空间制冷与加热占比已达 23%[14],可见制冷供暖负荷将逐步成为新农村重要能源需求。夏季典型制冷负荷曲线及环境温度如图 3(a)所示[15],由图 3(a)可见:制冷功率呈现单峰与功率平台特点,23:00—次日 7:00 为低负荷平台,8:00—11:00 快速增加,进入持续 10 h 左右的高负荷平台,负荷平台期功率波动性较小,2 个负荷平台功率差超过 80%。上述制冷负荷特征与人们开空调习惯及环境温度变化有关:夜间温度较低且多数人休息,空调关闭,制冷功率较低;次日 8:00 开始活动后空调大量开机,功率攀升,后续制冷功率随环境温度升高而升高;进入夜间后环境温度降低,

部分空调关机制冷功率又快速下降。对比制冷负荷与光伏出力可见:制冷负荷与光伏出力具有较好的重合度,有利于光伏消纳,然而制冷负荷上升时间更早且高负荷平台更宽,与光伏匹配性可进一步提升。考虑到房间温度热惯性时间常数通常在 2 h 左右[16],故可将光伏出力峰值前后制冷功率转移至峰值时段,促进光伏消纳,可平移电量为图 3(a)阴影部分。



(a) 制冷



(b) 制热

图 3 夏季制冷与冬季制热负荷典型曲线

Fig.3 Typical curves of cooling and heating loads

电采暖等电能替代工程推动电锅炉及热泵成为重要的空间制热方式,冬季典型制热负荷曲线及环境温度如图 3(b)所示[15],由图 3(b)可见:制热负荷也呈现出功率平台特点,凌晨至次日 10:00 负荷较大且波动较小,随后因环境温度上升而减小,直至 18:00 再次上升,高负荷平台与低负荷平台功率差较小,约为 60%。对比制热负荷与光伏出力可见:制热负荷与光伏出力具有反向变化特征,自然匹配性差使调节制热负荷消纳光伏的潜力更大。将制热负荷“削峰填谷”与光伏出力更匹配,可提高消纳水平,可平移电量为图 3(b)中阴影部分。

2.3 热水需求

生活水平的提高推动了热水需求,晨起盥洗、洗衣、做饭及洗澡是热水主要用水方式,典型家庭热水需求曲线如图 4 所示[17],可见热水需求主要集中在 7:00 和 21:00 前后,其他时间用水需求很小。由于空调和热泵室内外温差较小时室外温度不能准确反映实际的冷、热负荷,在分析负荷转移能力时应以实际冷、热负荷作为分析依据。热水器的水温主要受用户用水量影响,热水器的实际功率与居民用水量在曲线特征上表现出高度的一致性,可以利用用水量特性分析热水器的可调能力。对比热水用水量特性与光伏出力可见:热水器功率与光伏一致性较差,用水高峰基本都是光伏无出力时段,即用即热方式下热水需求不会增加光伏消纳量。考虑热水器惯性时间常数通常在 6 h 左右[16],故将晚间热水器负荷高峰转移至光伏峰值出力时段,从而促进光伏消纳。

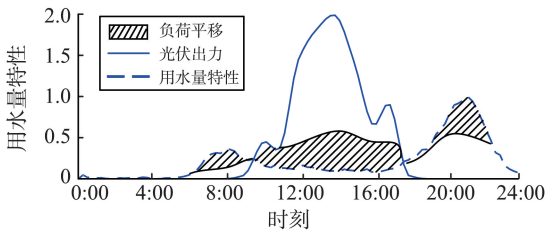


图 4 典型热水需求时间曲线

Fig.4 Typical time profile of hot water demand

2.4 燃气需求

为避免散煤燃烧带来的空气污染,煤改气成为发展方向,特别是将清洁电力转化为燃气的 P2G 技术符合低碳环保理念,可避免大规模燃气管道铺设。P2G 技术通过电解水和甲烷化 2 个过程可利用电力合成天然气实现碳循环,当前综合效率约为 45%~60%,成本约为开采天然气的 2~4 倍[18-19]。随着技术进步、设备规模扩大及廉价电力的使用,2035 年成本有望降低 80%以上[20]。尽管 P2G 当前成本较高,但其低碳技术优势在风光电力消纳[12]、电-气耦合调度[21]等应用方向吸引了大量研究者,特别是随着“氢进万家”等一系列国家示范工程的推进[22],现如今在交通运输、工业和建筑用能等多个场景开辟了试点示范应用,形成了供需侧完整的产业链,为未来 P2G 在民用行业的广泛应用提供范例,在满足居民日常炊事需求的同时,扩大新能源并网的消纳潜力。

典型燃气需求曲线如图 5 所示,主要特征为与炊事对应的三峰两谷特点明显:7:00—8:00、12:00—13:00和 18:00—20:00 为炊事集中时段,对应峰值逐渐增加,其余时段用气较少,最大峰值用气速率约为 0.05 L/h。燃气中午需求高峰与光伏匹配性较好,有利于光伏消纳,早峰需求与晚峰需求可进一步转移至中午时段,促进光伏消纳。

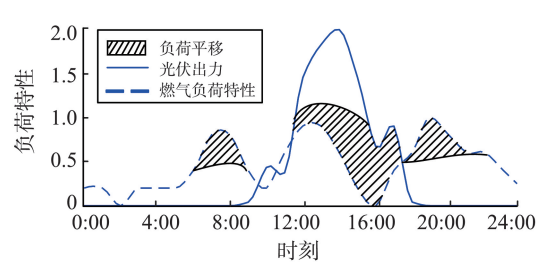


图 5 典型燃气需求曲线

Fig.5 Typical gas demand curve

2.5　农业生产用电负荷

科技进步推动科技农业发展,以温室大棚补光和温度控制为代表的新型农业生产负荷增加,通过精准的光照和温度控制,可将温室维持在适合植物健康生长的环境,提高高附加值蔬菜、水果产量和品质,避免雾霾、阴雨天气和温度变化对农业生产的影响。科技农业依赖新型 LED 照明和电锅炉、热泵等提供的光照和温度控制。植物补光的控制方式要根据具体的植物及其生长阶段调整,过强或过弱的光照都会影响植物的正常生长。为了维持植物生长的关键因素——光量子通量密度,补光控制需要严格的控制方式[23],故该类负荷可调性低,难以用于促进分布式能源消纳。温室大棚温度控制方式与前述空间制热相似,通过温控设备进行温度调节以满足植物生长的需要,应维持温室 12 ~ 34 ℃,保证植物光合作用效率,具有很大可调空间。

3　新农村能源系统运行优化

在满足各类负荷用能需求基础上,通过改变用能时段可提高用能需求与光伏出力的匹配性,进而促进光伏消纳。上述调节过程需要满足各类能源转换设备物理特性约束及系统整体约束,可建模为以用能成本最低为目标,以设备运行特性和系统平衡特性为约束的优化控制问题。

3.1　设备模型

本研究主要考虑分布式光伏、温控负荷、电转气负荷和电储能等,各设备模型如下。

(1)分布式光伏

分布式光伏将太阳辐射能量转化为电能,在标准额定条件(太阳辐照度 G_{STC} 为 1 000 W/m^2,相对大气光学质量为 AM1.5,温度 T_{STC} 为 25 ℃)下得到光伏输出功率

$$P_{\mathrm{PV}}=P_{\mathrm{STC}}\frac{G_{\mathrm{c}}}{G_{\mathrm{STC}}}[1+K(T_{\mathrm{c}}-T_{\mathrm{STC}})], \tag{1}$$

式中:P_{STC} 为标准额定条件下光伏额定输出功率;G_{c} 为工作点的辐照度;K 为功率温度系数,$K=-0.004\ 5$;T_{c} 为光伏板实际运行温度。

(2)温控负荷

空调、热泵、热水器可满足空间制热、制冷或热水加热需求,均可用热力学方程描述。其中,房屋与温室大棚均属于空间温控负荷,状态变化规律可采用如下差分方程描述[24]:

$$T_{\mathrm{ri},t}=\left(\frac{(T_{\mathrm{ev},t-\Delta t}-T_{\mathrm{ri},t-\Delta t})}{C_{\mathrm{a}}m_{\mathrm{a}}R}+\frac{M_{\mathrm{AC},i,t}\eta_{\mathrm{AC},i}P_{\mathrm{AC},i,t}}{C_{\mathrm{a}}m_{\mathrm{a}}}\right)\Delta t+T_{\mathrm{ri},t-\Delta t}, \tag{2}$$

式中:$T_{\mathrm{ri},t}$ 为 t 时段室内温度;$T_{\mathrm{ev},t-\Delta t}$ 为 $t-\Delta t$ 时段室外环境温度;$T_{\mathrm{ri},t-\Delta t}$ 为 $t-\Delta t$ 时段室内温度;m_{a} 为封闭室内空气的质量;C_{a} 为空气的比热容;R 为房屋热阻;$P_{\mathrm{AC},i,t}$ 为 t 时段温控设备额定电功率,制热为正,制冷为负;$\eta_{\mathrm{AC},i}$ 为能效系数;Δt 为差分方程离散仿真的步长;$M_{\mathrm{AC},i,t}$ 为表征设备工作状态的 0-1 变量,当 $T_{\mathrm{ri},t-\Delta t}>T_{\mathrm{AC},i,\max}$ 时,$M_{\mathrm{AC},i,t}=1$,当 $T_{\mathrm{ri},t-\Delta t}<T_{\mathrm{AC},i,\min}$ 时,$M_{\mathrm{AC},i,t}=0$,其中 $T_{\mathrm{AC},i,\max}$、$T_{\mathrm{AC},i,\min}$ 分别为室温控制上下限。当室温高于最大允许温度时,空调开机制冷,室温低于最小允许温度时,空调关机(热泵的工作过程与此相反,当室温高于最大允许温度时关机,室温低于最小允许温度时开机制热),而室温在允许范围内时开关机状态保持不变。由于温控设备在开关机间来回切换,故通常称为 bang-bang 控制。

储水式电热水器也可用热力学方程描述,但与空间温控不同,热水器模型除建模加热、散热过程外,还需考虑用水与进水导致的存水热量变化,此时水温 $T_{\mathrm{WH},t}$ 与电功率 P_{WH} 之间关系为:

$$T_{\mathrm{WH},t}=\left(\frac{(T_{\mathrm{ri},t-\Delta t}-T_{\mathrm{WH},t-\Delta t})}{C_{\mathrm{w}}m_{\mathrm{WH}}R_{\mathrm{WH}}}+\frac{M_{\mathrm{WH},t}\eta_{\mathrm{WH}}P_{\mathrm{WH}}}{C_{\mathrm{w}}m_{\mathrm{WH}}}\right)\Delta t+\frac{m_{\mathrm{wu},t}(T^{\mathrm{in}}_{\mathrm{w},t-\Delta t}-T^{\mathrm{out}}_{\mathrm{w},t-\Delta t})}{m_{\mathrm{WH}}}+T_{\mathrm{WH},t-\Delta t}, \tag{3}$$

式中:C_{w} 为水的比热容;$m_{\mathrm{wu},t}$ 为 t 时段用户消耗热水质量;$T_{\mathrm{WH},t-\Delta t}$、$T^{\mathrm{in}}_{\mathrm{w},t-\Delta t}$、$T^{\mathrm{out}}_{\mathrm{w},t-\Delta t}$ 分别为 $t-\Delta t$ 时段热水器水温、进水和出水温度;m_{WH}、R_{WH}、η_{WH} 分别为热水器储水总质量、热阻、热效率;$M_{\mathrm{WH},t}$ 为热水器 t 时段启停控制变量,也采用 bang-bang 控制。

(3)电转气负荷

尽管 P2G 技术尚未成熟,但考虑其发展前景和山东等地区快速推进“氢进万家”试点,本研究假定新农村燃气需求由 P2G 满足。P2G 技术消耗电能产生天然气的过程可描述为:

$$E_{\mathrm{P2G},t}=\eta_{\mathrm{P2G}}P_{\mathrm{P2G},t}, \tag{4}$$

$$S_{\mathrm{P2G},t}=\frac{E_{\mathrm{P2G},t}}{H_{\mathrm{HVgas}}}, \tag{5}$$

式中,$E_{\mathrm{P2G},t}$ 和 $S_{\mathrm{P2G},t}$ 分别为 t 时段电转气得到的能量和体积,H_{HVgas} 为天然气高热值,$P_{\mathrm{P2G},t}$、η_{P2G} 分别为电转气电功率及转换效率。

P2G 制造的燃气可存入储气设备暂存,表征储气罐状态的储气量

$$S_{\mathrm{gas},t}=S_{\mathrm{gas},t-\Delta t}(1-\delta_{\mathrm{GES}})+\Delta tS_{\mathrm{P2G},t,\mathrm{gas}}\eta_{\mathrm{gas,in}}-\Delta tS_{\mathrm{gas},t,\mathrm{out}}/\eta_{\mathrm{gas,out}}, \tag{6}$$

式中,$S_{\mathrm{gas},t,\mathrm{out}}$ 为气储能设备 t 时段的用气量,$S_{\mathrm{gas},t-\Delta t}$

为 $t-\Delta t$ 时段储气罐的储气量,$S_{\mathrm{P2G},t,\mathrm{gas}}$ 为 P2G 设备总制气量,δ_{GES}、$\eta_{\mathrm{gas,in}}$、$\eta_{\mathrm{gas,out}}$分别为气储能设备的自耗率、输入和输出转化效率。

(4)电储能

蓄电池用于存储多余电能并在负荷高峰时段释放,可采用充放电效率与存储电量间关系描述,动态数学模型为:

$$E_t=\begin{cases}E_{t-\Delta t}(1-\delta)+\Delta t P_{\mathrm{ESS},t}\eta_{\mathrm{ch}}, & P_{\mathrm{ESS},t}>0\\ E_{t-\Delta t}(1-\delta)+\Delta t P_{\mathrm{ESS},t}/\eta_{\mathrm{dis}}, & P_{\mathrm{ESS},t}<0\end{cases}, \tag{7}$$

式中,$P_{\mathrm{ESS},t}$、E_t 分别为蓄电池 t 时段的电功率(充电为正,放电为负)和总能量,$E_{t-\Delta t}$为蓄电池 $t-\Delta t$ 时段储存的电能,δ 为数值较小的自耗率,η_{ch}、η_{dis}分别为充、放电效率。

3.2 系统运行优化模型

除本地供用能外,新农村能源系统通过联络线与电网相连,实现互相支撑,在本地供能不足时从电网买电,在本地供能过剩时向电网售电。考虑到分时电价已十分普及和联络线输电能力有限,以计入分时电价的用电成本最低为目标,考虑联络线功率交换限制,此时系统运行优化模型如下。

(1)目标函数

系统运行的总用电成本

$$C_{\mathrm{opt}}=\sum_{t=1}^{N}P_{\mathrm{buy},t}C_{\mathrm{buy},t}-\sum_{t=1}^{N}P_{\mathrm{sell},t}C_{\mathrm{sell},t}, \tag{8}$$

式中,N 为调度总时段数,$P_{\mathrm{buy},t}$、$C_{\mathrm{buy},t}$、$P_{\mathrm{sell},t}$、$C_{\mathrm{sell},t}$分别为 t 时段系统总购电功率、购电电价、售电功率和售电电价。

(2)约束条件

运行优化需满足各设备运行边界约束及与电网交换功率容量约束,具体包括供用能功率平衡、温控设备运行边界、P2G 设备运行边界、储能设备运行边界、联络线容量限值等。

①供用能功率平衡约束。新农村能源系统与电网交互功率

$$P_{\mathrm{grid},t}=\sum_{i=1}^{n}P_{\mathrm{con},i,t}+P_{\mathrm{load},t}-P_{\mathrm{PV},t}, \tag{9}$$

式中,$P_{\mathrm{con},i,t}$为第 i 个耗能设备(包括空调、热水器、电转气以及储能充放电功率等)在 t 时段的耗电功率;$P_{\mathrm{load},t}$、$P_{\mathrm{PV},t}$分别为 t 时段居民基础用电负荷和光伏出力。

②温控设备运行边界约束。温控负荷运行边界主要为温度约束,室温、水温和温室大棚温度约束均可表示为:

$$T_{i,\min}\leqslant T_i\leqslant T_{i,\max}, \tag{10}$$

式中 $T_{i,\min}$、$T_{i,\max}$分别为第 i 台温控设备的温度下限和上限约束。

③P2G 设备运行边界约束。P2G 设备运行边界主要为功率约束和储气量约束,即:

$$P_{\mathrm{P2G,min}}\leqslant P_{\mathrm{P2G},t}\leqslant P_{\mathrm{P2G,max}}, \tag{11}$$

$$\lambda_{\mathrm{min,GS}}C_{\mathrm{GS}}\leqslant S_{\mathrm{gas},t}\leqslant\lambda_{\mathrm{max,GS}}C_{\mathrm{GS}}, \tag{12}$$

式中,$P_{\mathrm{P2G,min}}$、$P_{\mathrm{P2G,max}}$分别为 P2G 设备的功率下限和上限约束,C_{GS} 为储气罐最大储气量,$S_{\mathrm{gas},t}$、$\lambda_{\mathrm{max,GS}}$、$\lambda_{\mathrm{min,GS}}$分别为储气罐储气量和允许的最大与最小比例。

④储能设备运行边界约束。电储能需要满足功率以及储存状态约束,即:

$$-P_{\mathrm{dis,max}}\leqslant P_{\mathrm{ch},t}\leqslant P_{\mathrm{ch,max}}, \tag{13}$$

$$\lambda_{\mathrm{min,ES}}C_{\mathrm{ES}}\leqslant E_t\leqslant\lambda_{\mathrm{max,ES}}C_{\mathrm{ES}}, \tag{14}$$

式中,$P_{\mathrm{ch,max}}$、$P_{\mathrm{dis,max}}$分别为蓄电池充、放电最大功率,C_{ES}为蓄电池最大容量,E_t、$\lambda_{\mathrm{max,ES}}$、$\lambda_{\mathrm{min,ES}}$分别为蓄电池储能量和允许的最大与最小比例。

⑤联络线容量限值约束。交换功率受到联络线容量约束,超出约束则会导致弃风弃光或切负荷,可表示为:

$$P_{\mathrm{grid,min}}\leqslant P_{\mathrm{grid},t}\leqslant P_{\mathrm{grid,max}}, \tag{15}$$

式中 $P_{\mathrm{grid,min}}$ 和 $P_{\mathrm{grid,max}}$ 分别为联络线最大和最小功率。

3.3 模型求解

联立式(1)~(15)得到新农村能源系统运行优化模型,是一个决策变量包括空调/热泵启停状态、热水器启停状态、P2G 制气功率和蓄电池充电功率等的混合整数优化模型。为降低决策变量数量过多带来的求解困难,本研究按类型将多可控资源聚合为单个资源进行求解,此时决策变量为各类可控资源聚合功率,可控资源聚合方法参考文献[25]。模型化简后,基于 yalmip 工具包在 MATLAB 环境中建立以空调/热泵、热水器、P2G 及储能聚合功率为决策变量的运行优化模型,调用 CPLEX 可求解得到各可控资源的各时段功率。

4 算例

为展示新农村能源系统供用能特征并验证所提运行优化方法的有效性,基于典型系统开展仿真分析。假定新农村包括 100 户居民,其中空调/热泵拥有率 40%、热水器拥有率 50%、温室大棚拥有率 20%、P2G 设备拥有率 30%、户均一般电力负荷峰值为 1.5 kW(典型曲线见图 2)、分布式光伏拥有率为 35%且户均容量 20 kW、电储能拥有率 10%且户均

容量 10 kWh,能源系统与电网正向和反向交换功率限制分别为 600 kW 和 200 kW。

上述系统包含了空调/热水器、P2G 等生活用能设备,温室大棚生产用能设备,电池储能电力存储设备和供能设备 PV,可满足居民电、热、冷、气等负荷需求。为模拟各类需求设备差异性,采用蒙特卡洛抽样法生成空调、热水器、温室大棚、P2G 与储气、电储能等设备各项参数,各设备参数分布特征如附录中附表 1、2 所示。

4.1　运行场景

本研究主要考虑 4 种运行场景:传统用能需求下增设光伏(场景 1)、仅考虑新农村用能需求但不装光伏(场景 2)、同时考虑新农村用能需求及分布式光伏(场景 3)、考虑新农村用能需求及分布式光伏与运行优化(场景 4)。场景 1、2 分别仅考虑新农村能源系统中的能源供给或能源需求变化,场景 3 同时考虑二者变化,但空调/热泵、热水器和 P2G 设备采用 bang-bang 控制以维持空间或热水温度及储气罐气量在设定水平,场景 4 在场景 3 基础上采用第 3 章给出的运行优化方法。所有场景采用图 6 所示的分时电价曲线,促使系统在正午消纳更多的光伏,考虑分时电价后需要利用分段线性化进行目标函数的构建,结合 CPLEX 求解器进行求解。其中购电电价为售电电价加输配电价(0.298 4 元/(kWh))。场景 1~3 采用差分法仿真生成,场景 4 优化步长为 15 min。

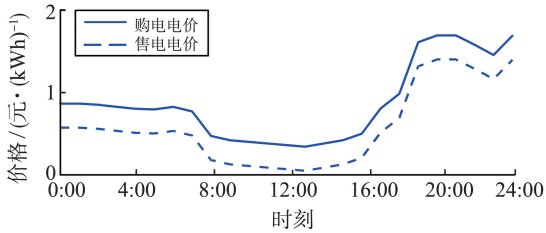


图 6　分时电价曲线

Fig.6　Electricity price curve

4.2　结果与讨论

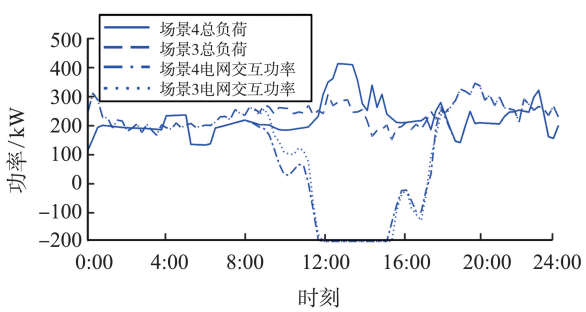
不同运行场景下总用电量、购售电量与电费、PV 发电量与弃电量等运行指标如表 1 所示。场景 1 负荷总量小,分布式能源消纳能力低,PV 弃电率高达 38.6%;场景 2 总用电量显著增加,相比场景 1,用电量和用电成本分别增加了 227.5% 和 309.6%;场景 3 用能成本与 PV 弃电率分别下降了 14.6% 和 53.9%,说明新农村能源系统光伏消纳能力提升且分布式光伏也可明显降低用能成本;场景 4 用能成本与 PV 弃电率分别进一步下降 18.7% 和 58%,表明本研究所提的协同可调资源运行优化方法可显著降低系统用能成本和 PV 弃电量。

表 1　不同场景下新农村能源系统运行指标

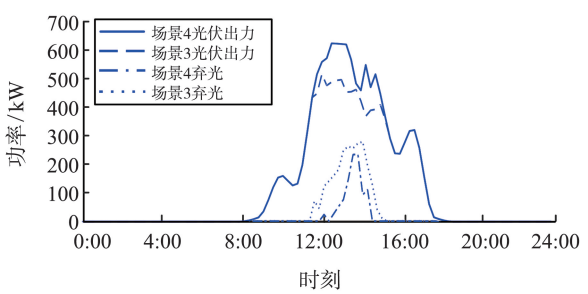
Table 1　Operation indexes ofvarious scenarios

运行场景	总用电量/(kWh)	总购电量/(kWh)	总售电量/(kWh)	总购售电成本/元	总购电成本/元	总售电收益/元	PV 总发电量/(kWh)	PV 总弃电量/(kWh)
场景 1	1 759.6	1 127.4	1 336.3	1 234.5	1 422.6	188.0	1 968.5	1 235.1
场景 2	5 763.6	5 763.6	0	5 057.3	5 057.3	0	0	0
场景 3	5 763.6	4 070.6	941.5	4 224.3	4 320.5	96.1	2 634.4	569.1
场景 4	5 385.8	3 324.1	907.6	3 433.6	3 517.6	84.0	2 969.2	234.3

场景 3 和场景 4 下总负荷、电网交互功率及 PV 出力和弃光功率曲线如图 7 所示。由于联络线返送功率限制,在 PV 高峰出力时段出现弃光,场景 4 通过运行优化提升了 PV 高峰时段总负荷,降低了其他时段总负荷,使总用能负荷与光伏出力曲线更加趋同变化,匹配性更高,从而更多利用 PV 电量,减小弃光。



(a) 系统总负荷与电网交互功率

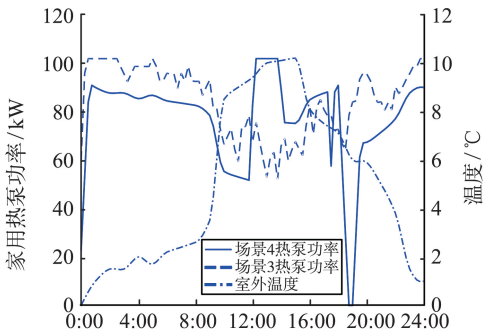


(b) 光伏出力和弃光

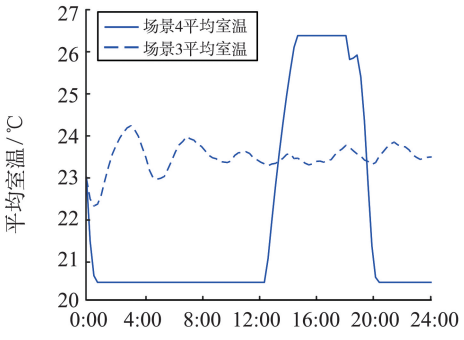
图 7　IES 总负荷和光伏出力

Fig.7　IES total load and PV output

场景 3 和场景 4 家用热泵、热水器、P2G 设备、温室大棚热泵及电储能优化前后的功率及状态曲线如图 8~12 所示。场景 3 各负荷特征仅与环境及用户用能需求有关，如家用热泵功率与环境温度负相关，环境温度越低，家用热泵温度越高，热水器及 P2G 功率基本与热水需求及燃气需求变化规律一致。场景 4 各负荷功率以尽量利用弃光为目标进行调整，如家用热泵功率在 PV 出力高峰前后降低，在高峰时段提升，热水器及 P2G 功率也显著转移至 PV 出力高峰时段。用能时段差异进一步导致设备状态参数也存在显著差异，如家用热泵负荷对应的室温在场景 3 下基本维持为允许范围中点，而场景 4 下则维持为最高值（PV 出力高峰时段）或最低值（PV 出力非高峰时段），但设备状态参数总是处在允许范围内，不会对用户体验产生显著影响。



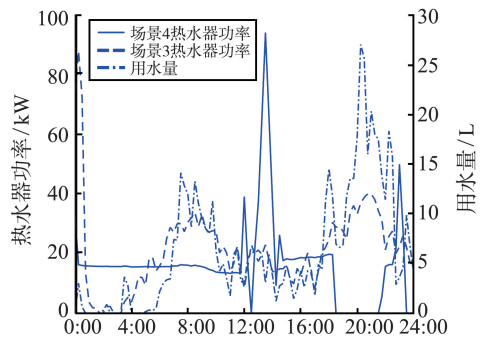
(a) 家用热泵功率



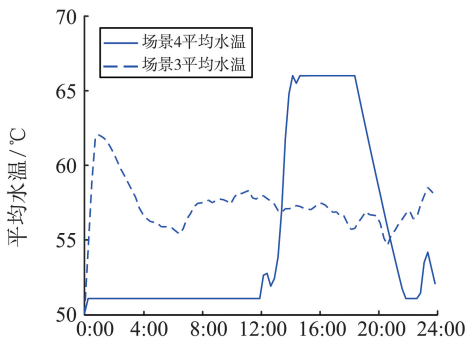
(b) 平均室温

图 8 家用热泵运行状态

Fig.8 Domestic heat pump operation status



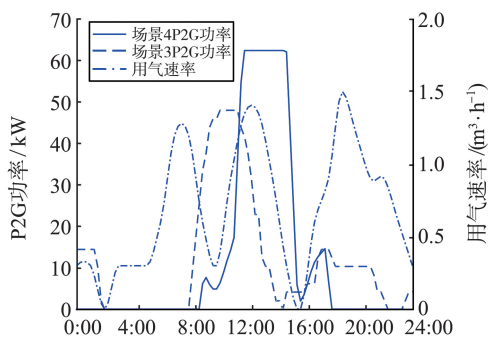
(a) 热水器功率



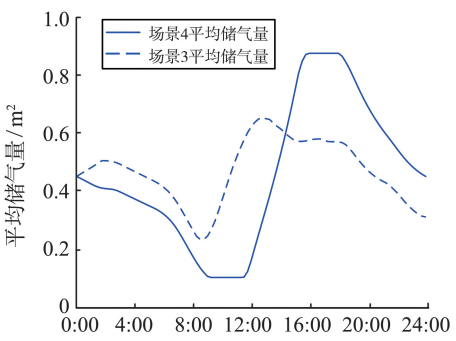
(b) 平均水温

图 9 热水器运行状态

Fig.9 Water heater operation status



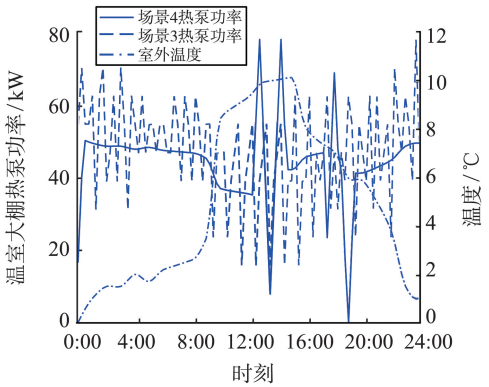
(a) 总负荷



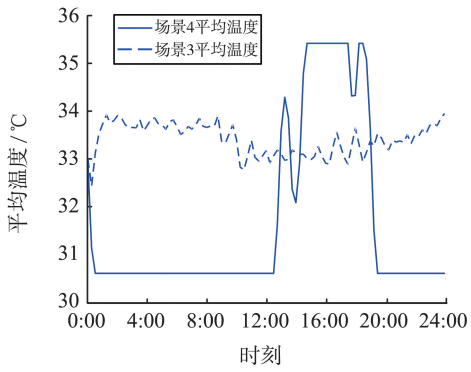
(b) 平均储气量

图 10 P2G 运行状态

Fig.10 P2G operation status



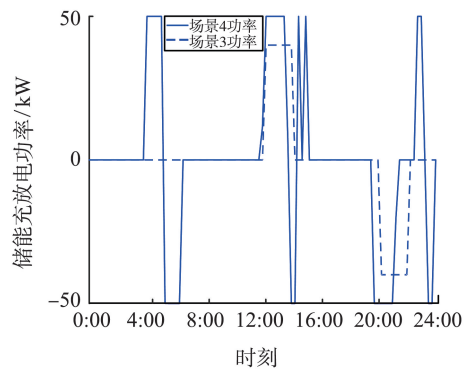
(a) 温室大棚热泵功率



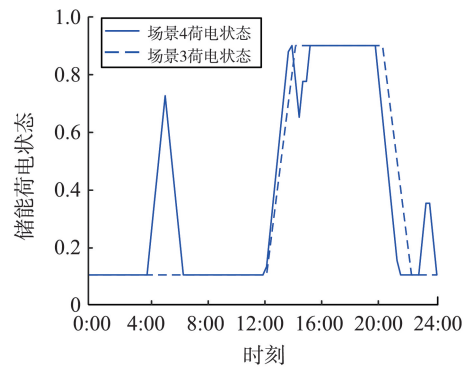
(b) 平均温度

图 11　温室大棚热泵运行状态

Fig.11　Greenhouseheat pump operation status



(a) 储能充放电功率



(b) 储能荷电状态

图 12　蓄电池运行状态

Fig.12　Electrical energy storage operation status

5　结束语

随着乡村振兴战略实施和新农村建设推进,农村供用能特征正发生深刻变化:以分布式光伏为代表的分布式能源逐渐成为新农村主要能量来源,电、气、冷、热等多种能源需求为分布式能源消纳提供了良好条件,协同各类可控负荷可进一步提高能源系统运行效率,减小弃光与用能成本。对考虑新农村供能特征、用能特征、供用能特征及供用能特征加运行优化的典型算例仿真结果表明:在满足新农村用能需求基础上,开发分布式光伏,用能成本可降低约 15%,但弃光率约 18%;所提运行优化方法通过协同冷、热、气等多能转换设备的可调能力,使用能成本进一步降低 18%,弃光率降至 7%左右。运行优化后系统可同步将新农村内部清洁能源供能率提升至 55.2%左右,逐渐接近零外部供能的理想目标和绿色、低碳、可持续供能的现代乡村供能系统理想范式。

参考文献:

[1] 欧迎红. 农村振兴战略视域下农村生态文明建设路径[J]. 农家参谋, 2022(10): 10-12.
OU Yinghong. The path of rural ecological civilization construction in the perspective of rural revitalization strategy[J]. The Farmers Consultant, 2022(10): 10-12.

[2] 韩艳素. 新能源在农村振兴中的应用及发展探析[J]. 现代农业科技, 2021(5): 185-187.
HAN Yansu. Exploring the application and development of new energy in rural revitalization [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2021(5): 185-187.

[3] 冯凯辉, 李琼慧, 黄碧斌, 等. 中国农村能源发展关键问题[J]. 中国电力, 2022, 55(6): 1-8.
FEND Kaihui, LI Qionghui, HUANG Bibin, et al. Key issues on rural energy development in China[J]. Electric Power, 2022, 55(6): 1-8.

[4] 刘卫东, 李民, 赵冠, 等. 以农村能源互联网建设为引领的农村电气化提升工程实践研究[J]. 农电管理, 2020(12): 41-43.
LIU Weidong, LI Min, ZHAO Guan, et al. Study on rural electrification enhancement project led by rural

energy internet construction in practice[J]. Rural Power Management, 2020(12): 41-43.

[5] 周灿煌, 郑杰辉, 荆朝霞, 等. 面向园区微网的综合能源系统多目标优化设计[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1687-1697.
ZHOU Canhuang, ZHENG Jiehui, JING Zhaoxia, et al. Multi-objective optimal design of integrated energy system for park-level microgrid[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1687-1697.

[6] 李正茂, 张峰, 梁军, 等. 含电热联合系统的微电网运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3569-3576.
LI Zhengmao, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Optimization on microgrid with combined heat and power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3569-3576.

[7] 侯媛媛, 曾君, 罗燕, 等. 社区微网主动能量管理协同与优化方法研究[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1548-1557.
HOU Yuanyuan, ZENG Jun, LUO Yan, et al. Research on collaborative and optimization methods of active energy management in community microgrid[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1548-1557.

[8] MOHY-UD-DIN G, VU D, MUTTAQI K, et al. An integrated energy management approach for the economic operation of industrial microgrids under uncertainty of renewable energy[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2): 1062-1073.

[9] KHAN M, ASAR A, ULLAH N, et al. Modeling and optimization of smart building energy management system considering both electrical and thermal load[J]. Energies, 2022, 15(2): 574.

[10] 杨桂兴, 王维庆, 姚红雨, 等. 面向广域分布的家庭蓄热式电采暖集群控制方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(8): 56-62.
YANG Guixing, WANG Weiqing, YAO Hongyu, et al. Control method of wide-area distributed household regenerative electric heating clusters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(8): 56-62.

[11] 麻恒远, 马恒瑞. 考虑新能源消纳的网-站-车协同优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(3): 103-108.
MA Hengyuan, MA Hengrui. Grid-station-vehicle cooperative optimal scheduling considering new energy consumption[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(3): 103-108.

[12] 张儒峰, 姜涛, 李国庆, 等. 考虑电转气消纳风电的电-气综合能源系统双层优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5668-5678.
ZHANG Rufeng, JIANG Tao, LI Guoqing, et al. Bi-level optimization dispatch of integrated electricity-natural gas systems considering P2G for wind power accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5668-5678.

[13] 李媛媛, 牛叔文, 李真, 等. 我国农村家庭电力消费特征分析研究[J]. 中国能源, 2021, 43(4): 67-74.
LI Yuanyuan, NIU Shuwen, LI Zhen, et al. Research on the characteristics of electricity consumption of rural households in China[J]. Energy of China, 2021, 43(4): 67-74.

[14] PAIGE J, COLIN M, DANIEL S, et al. Electrification futures study: end-use electric technology cost and performance projections through 2050[R]. Golden, USA: Electrification Futures Study, 2017.

[15] 姜鑫. 区域综合能源系统供需预测研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
JIANG Xin. Research on energy supply-demand forecast of local-area integrated system[D]. Xi′an: Xi′an University of Science and Technology, 2020.

[16] HEITKOETTER W, SCHYSKA B, SCHMIDT D, et al. Assessment of the regionalised demand response potential in Germany using an open source tool and dataset[J]. Advances in Applied Energy, 2021, 1: 100001.

[17] SHI Q, LI F, LIU G, et al. Thermostatic load control for system frequency regulation considering daily demand profile and progressive recovery[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6259-6271.

[18] SCHIEBAHN S, GRUBE T, ROBINIUS M, et al. Power to gas: technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(12): 4285-4294.

[19] 宋鹏飞, 侯建国, 姚辉超, 等. 电制气技术为电网提供大规模储能的构想[J]. 现代化工, 2016, 36(11): 1-6.
SONG Pengfei, HOU Jianguo, YAO Huichao, et al. The idea of providing large scale energy storage for power grid by PtG process[J]. Modern Chemical Industry, 2016, 36(11): 1-6.

[20] International Energy Agency. The future of hydrogen[R]. Paris, French: International Energy Agency, 2019.

[21] CHEN S, CONEJO A, WEI Z. Gas-power coordination: from day-ahead scheduling to actual operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(2): 1532-1542.

[22] 王延斌, 门军辉. “氢进万家”从蓝图走进现实[N]. 科技日报, 2022-05-31(6).

[23] LI Y, NIU P, SU Z. Design of greenhouse monitoring and control system based on LED lighting[C]//2015 12th China International Forum on Solid State Lighting (SSLCHINA). Shenzhen, China: IEEE, 2015: 123-126.

[24] 李亚平, 姚建国, 雍太有, 等. 居民温控负荷聚合功率及响应潜力评估方法研究[J]. 中国电机工程学报,

2017, 37(19): 5519-5528.
LI Yaping, YAO Jianguo, YONG Taiyou, et al. Estimation approach to aggregated power and response potential of residential thermostatically controlled loads [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5519-5528.

[25] 李力, 董密, 宋冬然, 等. 分布式的温控负荷集群负荷跟随控制[J/OL]. 中国电机工程学报. (2022-12-16)[2023-5-30]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20221215.1555.003.html.

(编辑:孙亚彤)

附录

附表 1　用能设备参数
Table 1　Device parameters

设备	额定功率/kW	热阻/(℃·kW^{-1})	热容/(kWh·℃$^{-1}$)	能效系数/转换效率	温度上限/℃	温度下限/℃
居民住宅空调	U(1.6, 5.1)	U(2.5, 3.0)	U(0.7, 2.8)	U(2.8, 3.2)	U(26, 27)	U(20, 21)
温室大棚空调	U(23.2, 29.6)	U(0.525, 0.875)	U(9, 14)	U(3.5, 4.5)	U(35, 36)	U(30, 31)
热水器	U(1.5, 3.0)	U(160, 240)	U(0.058, 0.116)	U(0.85, 0.90)	U(65, 67)	U(50, 52)
P2G	U(2.0, 2.5)	—	—	U(0.6, 0.7)	—	—

注:“—”表示设备不含有此类参数;$U(a,b)$表示变量在 a 与 b 之间满足均匀分布。

附表 2　储能设备统计参数
Table 2　Statistical parameters of energy storage

储能形式	设备容量	最大存储状态	最小存储状态	每小时自耗率/%	充放效率	最大充放电功率/kW
电储能	100 kWh	0.9	0.1	0.04	0.95	50
气储能	U(0.48, 0.52) m^3	0.9	0.1	0.10	0.98	—

·通知消息·

山东大学 5 本期刊入选 RCCSE 中国核心学术期刊

近日,RCCSE《中国学术期刊评价研究报告(第七版)》正式发布,由山东大学主办的《山东大学学报(理学版)》《山东大学学报(医学版)》《山东大学学报(工学版)》《山东大学耳鼻喉眼学报》《隧道与地下工程灾害防治》5 本中文期刊均入编 RCCSE 第 7 版中国核心学术期刊。这标志着山东大学主办系列期刊影响力进一步提升,对进一步扩大期刊传播范围、加强期刊学术质量建设等具有重要意义。

RCCSE 中国学术期刊评价体系是目前国内公认的七大学术期刊评价体系之一,由中国科教评价研究院、武汉大学中国科学评价研究中心、武汉大学图书馆、中国科教评价网联合研制,该项目组在学术期刊评价方法、评价指标、评价管理、评价系统的理论研究和实践应用方面均取得了重要进展,已经形成了相对成熟、完善、科学的学术期刊评价体系,相关研究成果已成为信息资源管理部门、出版管理部门、科研成果管理部门、期刊出版机构和广大科研人员的重要参考工具。

山东大学科技期刊社深入学习宣传贯彻党的二十大精神和习近平总书记给《文史哲》编辑部全体编辑人员重要回信精神,聚焦学校“双一流”建设和重点工作任务,扎实推进“强刊兴学”计划,以期刊高质量发展为重点,积极推动各刊国际学术影响力提升,努力创办世界一流科技期刊,为服务学校“双一流”建设、服务科技强国建设、实现高水平科技自立自强贡献科技期刊力量。

(作者:张延欢,宋艳)

来源:山东大学新闻网

网址:https://www.view.sdu.edu.cn/info/1021/189992.htm