

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.10.001

计及设备变工况能效非线性的综合能源系统 精细化协同优化运行方法

Refined collaborative optimized operation of integrated energy systems considering
nonlinear energy efficiency of equipment under variable operating conditions

赵慧荣¹,李天晨¹,周全²,彭道刚^{1*}

ZHAO Huirong¹,LI Tianchen¹,ZHOU Quan²,PENG Daogang^{1*}

(1.上海电力大学 自动化工程学院,上海 200090; 2.国网浙江省电力有限公司经济技术研究院,杭州 310008)

(1.College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2.Economic and Technological Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Company
Limited, Hangzhou 310008, China)

摘要:含冷热电气多能源耦合的综合能源系统涉及能源转换设备、能源运输设备等,这些设备具有非线性变工况特性,易导致较大的供需匹配偏差,需优化分配多台同种设备变工况运行时出力。为此提出了计及设备变工况能效非线性的综合能源系统精细化协同优化运行方法。建立系统内各类设备非线性变工况运行特性的协同优化运行架构,对非线性变工况设备运行特性曲线进行分段线性化处理;增加泵的能耗计算与管道流量平衡约束等,以提高综合能源系统的供需平衡与运行可靠性;以日运行成本最小为优化目标,建立优化配置模型。以某综合能源系统为例,设计多个场景进行仿真验证,仿真结果表明,考虑多台同种设备变工况特性可有效降低系统运行成本,减小供需偏差。

关键词:综合能源系统;多能源耦合;非线性变工况;供需平衡;优化调度;出力分配

中图分类号:TK 01⁹:TM 721

文献标志码:A

文章编号:2097-0706(2023)10-0001-09

Abstract: Multiple energies including electricity, heat, cold and gas are coupled in the integrated energy system (IES). Energy conversion equipment and energy transportation equipment installed in the system feature nonlinear operation under variable conditions, leading to the magnificent gap between supply and demand. And the output allocation among multiple units of the same type is uneven under variable operating conditions. Therefore, a refined collaborative optimization method for the IES considering the non-linearity of equipment under variable operating conditions is proposed. Firstly, the cooperative optimized operation architectures for different types of units under nonlinear operation and variable working conditions are constructed. Then, nonlinear operation curves of the units under variable conditions are segmented and linearized. Taking the energy consumption of pumps and pipeline flow balance constraint into consideration can improve the supply-demand balance and the reliability of the IES. The optimization scheduling model takes the minimum daily operating cost as the optimization goal. The model is simulated on a IES under multiple scenarios. The simulation results show that considering the non-linear operation characteristic of different units of the same type under variable working conditions can effectively reduce the operating cost and supply-demand gap of power systems.

Keywords: IES; multi-energy coupling; non-line variable working condition; supply-demand balance; optimized scheduling; output allocation

0 引言

在能源结构绿色低碳转型的背景下,改变传统

能源系统建设路径和发展模式、着力构建综合能源系统(Integrated Energy System, IES)将成为实现“双碳”目标的重要方式^[1]。IES作为一种包含冷、热、电、气等多种能源的多能耦合系统,涉及能源转换、能源运输等设备,可通过对不同设备的出力进行统一规划及调度,为IES用户提供可靠、经济、低碳的能源^[2-3]。

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5100-2021-19559A-0-5-SF)
Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5100-2021-19559A-0-5-SF)

由于 IES 的精细化建模与求解效率存在矛盾, 为方便求解, 大多数研究方法对系统内设备进行简化建模, 最常见的是将设备的能效设置为恒定常数^[4-6]。然而, 由于大多数设备的效率受负载率、温度、气压、湿度等因素影响, 实际运行中系统的能量转换、能源消耗发生偏转, 出现供需不平衡, 从而降低系统的可靠性^[7]。为解决设备变工况运行非线性给优化模型带来的影响, 文献[8]考虑负载率、环境、设备进出口温度等因素对设备运行效率的影响, 对多个设备进行精细化变工况特性建模, 以系统配置成本最优为目标, 对园区 IES 进行优化配置。文献[9]考虑设备负载率对设备运行效率的影响, 采用多项式拟合设备变工况特性, 并提出了一种园区 IES 两阶段优化方案。文献[10-12]总结了部分设备的变工况运行特性拟合方程。然而, 引入较多非线性方程会增加求解难度, 因此, 文献[13-17]对设备非线性变工况特性进行了分段线性化处理, 将模型表示为混合整数线性模型。目前研究大多将同种设备看成一个整体, 在考虑设备非线性变工况特性后, 易忽视系统内多台同种设备的出力情况, 因此如何对多台同种设备的出力进行合理分配成了一个难点; 同时, 将多台同种设备纳入 IES 进行建模, 极大增加了求解难度。

IES 中设备众多, 大多数研究侧重于能量转换设备, 较少关注 IES 内能源运输设备(如水泵、风机)的优化运行。事实上, 能源运输设备的耗能会随运行方案的改变而发生变化, 因此关注能源运输设备的耗能不仅能提升 IES 模型的精确度, 还能提高优化运行方案的可靠性及多能源协同效果。

鉴于此, 本文提出计及设备变工况能效非线性的 IES 精细化协同优化运行方法。和已有的研究工作相比, 本文的创新和贡献如下。

(1) 区别于设备能效系数取定值的简化建模方法, 本文针对 IES 中主要能量转换设备在变工况过程中的能效非线性特性进行精细化建模, 为系统精细化协同优化运行, 尤其是多台同类设备在变工况运行过程中的出力优化分配提供了模型基础。

(2) 本文所提出的 IES 精细化协同优化运行方法, 充分考虑了泵与风机等能量运输设备的能源消耗对系统运行优化的影响, 在系统运行优化问题构建中增加了能源运输设备能耗计量模型以及设备管道之间的流量平衡约束。

1 IES 组成及供能结构

本文以上海某能源站为例, 进行源-荷优化运行调度研究。该能源站为燃气冷热电三联供 IES,

具体供能结构如图 1 所示。在供电系统中, 能源站除了可以直接从外部电网购电, 还可以利用燃气内燃机(GT)、光伏(PV)设备联合运行供电; 同时, 能源站内的多余电量可以卖给电网, 以提高运行的经济性。在供热系统中, 可以采用电锅炉(EB)耗电供热, 烟气热水型溴化锂机组(LB)可吸收 GT 的余热给能源站供热, 燃气锅炉(GB)消耗天然气实现燃气供热, 通过电、气联供保障园区供热可靠性。在供冷系统中, 采用双工况离心式冷水机组(DCWC)、电制冷机(EC)以及 LB 联合 GT 供冷等多种形式。其中, DCWC 有空调工况与制冰工况, 空调工况直接供应冷负荷, 制冰工况将乙二醇输送到蓄冰盘管(ISC)内储冷; 同时, 安装蓄电池(ES)、储热罐(HS)与 ISC, 实现用能的低存高放, 提高能源站的经济性和灵活性。

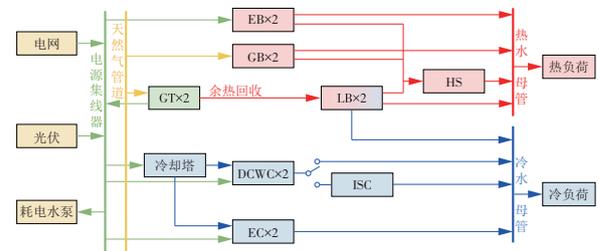


图 1 IES 供能结构

Fig. 1 Structure of the IES

2 基于变工况特性的 IES 设备模型

在 IES 运行中, 设备的运行工况会根据负荷、环境或能源的特性进行大范围、高频次的更改, 设备运行效率也会发生改变。因此, 本文对系统内能源转换效率易受负载率影响的 GT, GB, LB, DCWC, EC 等能量转换设备以及能耗与运输量成非线性关系的循环水泵等能量运输设备进行精细化变工况特性建模。

2.1 光伏设备

光伏设备的实际输出功率主要与当前辐照度和工作温度有关。

$$P_{PV}(t) = P_{PV}^r \frac{E(t)}{E_{ST}} P_{loss}(t) \eta_{DC-DC}, \quad (1)$$

式中: $P_{PV}(t)$ 为 t 时刻光伏设备输出功率, kW; P_{PV}^r 为光伏设备的额定输出功率, kW; $E(t)$ 和 E_{ST} 分别为 t 时刻实际辐照度和标准辐照度, kW/m^2 ; η_{DC-DC} 为光伏设备的 DC-DC 变换器效率, %; $P_{loss}(t)$ 为由于温度升高而产生的功率损耗。

$$P_{loss}(t) = 1 + \lambda(t - 25), \quad (2)$$

$$t = t_a + \frac{E(t)}{800} (t_{st} - 20), \quad (3)$$

式中: λ 为温度系数; t 为工作温度; t_a 为实际环境温

度; t_{si} 为标准工作温度。

2.2 燃气内燃机

燃气内燃机将空气与天然气进行混合燃烧,产生高温、高压的烟气,驱动活塞做功产生电能;同时,剩余尾气与缸套水可进入烟气热水型溴化锂机组进行余热回收再利用。燃气内燃机的发电效率、供热效率主要受负载率的影响,排烟流量、排气温度、温比、环境温度则为次要影响因素,因此主要考虑负载率对效率的影响^[18]。

$$P_{GT,out}^e(t) = \eta_{GT}^e(t)P_{GT,in}(t), \quad (4)$$

$$\begin{cases} \eta_{GT}^e = k_{GT,i}^e(t)R_{GT}^e(t) + b_{GT,i}^e(t) \\ R_{GT,i}^e(t) \leq R_{GT}^e(t) \leq R_{GT,i+1}^e(t) \end{cases}, \quad (5)$$

$$P_{GT,out}^h(t) = \eta_{GT}^h(t)P_{GT,in}(t), \quad (6)$$

$$\begin{cases} \eta_{GT}^h = k_{GT,i}^h(t)R_{GT}^h(t) + b_{GT,i}^h(t) \\ R_{GT,i}^h(t) \leq R_{GT}^h(t) \leq R_{GT,i+1}^h(t) \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $P_{GT,out}^e(t)$, $P_{GT,out}^h(t)$ 分别为输出的电、热功率; η_{GT}^e , η_{GT}^h 分别为燃气内燃机的实际发电效率、供热效率; $P_{GT,in}(t)$ 为消耗的天然气功率; $k_{GT,i}^e(t)$, $k_{GT,i}^h(t)$ 分别为发电、供热第*i*段线的斜率; $b_{GT,i}^e(t)$, $b_{GT,i}^h(t)$ 分别为发电、供热第*i*段线的截距; $R_{GT}^e(t)$, $R_{GT}^h(t)$ 分别为电、热负载率; $R_{GT,i}^e(t)$, $R_{GT,i+1}^e(t)$, $R_{GT,i}^h(t)$, $R_{GT,i+1}^h(t)$ 分别为发电、供热第*i*段线的两 endpoints。

2.3 燃气锅炉

燃气锅炉可通过天然气进行供热,供热效率主要受负载率的影响^[19]。

$$P_{GB,out}(t) = \eta_{GB}(t)P_{GB,in}(t), \quad (8)$$

$$\eta_{GB}(t) = k_{GB}(t)R_{GB}(t) + b_{GB}(t), \quad (9)$$

式中: $\eta_{GB}(t)$ 为燃气锅炉效率; $P_{GB,in}(t)$ 为消耗的天然气功率; $P_{GB,out}(t)$ 为燃气锅炉输出功率; $R_{GB}(t)$ 为燃气锅炉负载率; $k_{GB}(t)$, $b_{GB}(t)$ 均为线性系数。

2.4 电锅炉

电锅炉通过消耗电力进行供热,其供热效率主要受环境温度、进出水温度影响,较少受负载率影响,因此采用恒定转换效率模型。

$$P_{EB,out}(t) = \eta_{EB}(t)P_{EB,in}(t), \quad (10)$$

式中: $\eta_{EB}(t)$ 为电锅炉转换效率; $P_{EB,in}(t)$, $P_{EB,out}(t)$ 分别为消耗的电功率与产热功率。

2.5 烟气热水型溴化锂机组

烟气热水型溴化锂机组在制热、制冷时吸收燃气内燃机的排烟热量和缸套水热量。烟气型溴化锂机组制热时采用恒定转换效率模型,制冷时能效比(Coefficient of Performance, COP)与吸收的热量为非线性关系^[20]。

$$P_{LB,out}^h(t) = \eta_{LB}^h(t)P_{LB,in}(t), \quad (11)$$

$$P_{LB,out}^c(t) = \eta_{LB}^c(t)P_{LB,in}(t), \quad (12)$$

$$\begin{cases} \eta_{LB}^c(t) = k_{LB,i}^c(t)R_{LB}(t) + b_{LB,i}^c(t) \\ R_{LB,i}^c(t) \leq R_{LB}(t) \leq R_{LB,i+1}^c(t) \end{cases}, \quad (13)$$

式中: $P_{LB,out}^h(t)$, $P_{LB,out}^c(t)$ 分别为输出的热、冷功率; $\eta_{LB}^h(t)$, $\eta_{LB}^c(t)$ 分别为制热、制冷效率; $P_{LB,in}(t)$ 为吸收的热量; $k_{LB,i}^c(t)$, $b_{LB,i}^c(t)$ 分别为第*i*段线的斜率与截距; $R_{LB}(t)$ 为设备负载率; $R_{LB,i}(t)$, $R_{LB,i+1}(t)$ 为第*i*段线的两 endpoints。

2.6 双工况离心式冷水机组

双工况离心式冷水机组的COP主要与冷却水进水温度和负荷率有关,而IES中冷却水进水温度为恒定值,因此COP主要受负荷率影响。双工况离心式冷水机组存在制冰工况和空调工况^[21],其效率为

$$\begin{cases} \eta_{WC}^j(t) = k_{WC,i}^j(t)R_{WC}(t) + b_{WC,i}^j(t) \\ R_{WC,i}^j(t) \leq R_{WC}(t) \leq R_{WC,i+1}^j(t) \end{cases}, \quad (14)$$

式中: $j \in (1, 2)$ 分别代表制冰工况、空调工况; $\eta_{WC}^j(t)$ 为机组效率; $R_{WC}(t)$ 为机组负载率。

2.7 电制冷机

电制冷机是通过消耗电能推动压缩机工作而产生制冷量,其COP主要与负载率有关^[22]。

$$P_{EC,out}(t) = C_{OP,EC}(t)P_{EC,in}(t), \quad (15)$$

$$C_{OP,EC}(t) = k_{EC}(t)R_{EC}(t) + b_{EC}(t), \quad (16)$$

式中: $P_{EC,out}(t)$ 为输出的冷功率; $P_{EC,in}(t)$ 为消耗的电功率; $R_{EC}(t)$ 为电制冷机负载率; $k_{EC}(t)$, $b_{EC}(t)$ 均为线性系数。

2.8 循环水泵

循环水泵分为一次侧、二次侧水泵,为IES内用户提供热能、冷能,循环水泵消耗的电力功率为^[23]

$$P_P = \frac{q_{m,P} g h_P}{10^6 \times \eta_P}, \quad (17)$$

$$h_P = 2 \sum_{i \in n} h_i + h_c, \quad (18)$$

$$q_{m,P} = \frac{P_{P,in,i}(t)}{c_p(t_{in} - t_{out})}, \quad (19)$$

式中: P_P 为循环水泵消耗的电功率; $q_{m,P}$ 为通过水泵的质量流量; g 为重力加速度; η_P 为循环水泵的效率; h_P 为水泵的水头; h_c 为最小的水头差; h_i 为管网水头损失; n 为管网关键路径中压降最大的管段; c_p 为管道中溶质的比热容; $P_{P,in,i}(t)$ 为流入泵的冷热功率; t_{in} , t_{out} 分别为进水温度和出水温度。

3 IES优化运行模型

本文以冷热电气耦合的IES为对象,以系统经济成本最小为目标,考虑设备非线性变工况特性、能源运输设备及管道流量平衡约束,建立IES优化模型。

3.1 目标函数

系统经济成本主要为电网交互收益 I_{grid} 、用户交互收益 $I_{\text{u}}^{\text{sell}}$ 及购气费用 C_{gas} 。目标函数为

$$f_{\text{inc}} = I_{\text{grid}} + I_{\text{u}}^{\text{sell}} - C_{\text{gas}} \quad (20)$$

与电网交互收益为

$$I_{\text{grid}} = \sum_{t=1}^{24} [p_{\text{e,g}}^{\text{sell}}(t)P_{\text{grid}}^{\text{sell}}(t) - p_{\text{e}}^{\text{buy}}(t)P_{\text{grid}}^{\text{buy}}(t)], \quad (21)$$

式中: $p_{\text{e,g}}^{\text{sell}}(t)$ 为运营商向电网售电价, 元/(kW·h); $P_{\text{grid}}^{\text{sell}}(t)$ 为运营商向电网售电功率, kW; $p_{\text{e}}^{\text{buy}}(t)$ 为运营商购电价, 元/(kW·h); $P_{\text{grid}}^{\text{buy}}(t)$ 为运营商向电网购电功率, kW。

购气费用包含燃气内燃机和燃气锅炉供能所需燃料产生的费用。

$$C_{\text{gas}} = p_{\text{gas}} \sum_{t=1}^{24} \frac{P_{\text{gas}}^{\text{buy}}(t)}{Q_{\text{NG}}} = p_{\text{gas}} \sum_{t=1}^{24} \left[\frac{P_{\text{GT,e}}(t)}{\eta_{\text{GT,e}} Q_{\text{NG}}} + \frac{P_{\text{GT,h}}(t)}{\eta_{\text{GT,h}} Q_{\text{NG}}} + \frac{P_{\text{GB,h}}(t)}{\eta_{\text{GB,h}} Q_{\text{NG}}} \right], \quad (22)$$

式中: p_{gas} 为天然气价格, 元/m³; $P_{\text{gas}}^{\text{buy}}(t)$ 为购买天然气的功率; Q_{NG} 为天然气热值, 取 9.7 kW·h/m³。

3.2 约束条件

3.2.1 设备自身约束

设备自身有容量约束, 如式(23)所示; 为了满足工程实际情况, 燃气内燃机在低谷电价时段通常不开机, 如式(24)所示; 双工况离心式制冷机组无法同时存在制冰工况与空调工况, 如式(25)所示; 为避免同类设备在优化时切换启动, 造成设备的频繁启停, 需要设置同类设备的启动优先级约束, 如式(26)所示。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{GT}}(t) \leq P_{\text{GT,max}}(t) \\ 0 \leq P_{\text{GB}}(t) \leq P_{\text{GB,max}}(t) \\ 0 \leq P_{\text{EB}}(t) \leq P_{\text{EB,max}}(t) \\ 0 \leq P_{\text{LB}}(t) \leq P_{\text{LB,max}}(t) \\ 0 \leq P_{\text{WC}}^1(t) \leq P_{\text{WC,max}}^1(t) \\ 0 \leq P_{\text{WC}}^2(t) \leq P_{\text{WC,max}}^2(t) \\ 0 \leq P_{\text{P}}(t) \leq P_{\text{P,max}}(t) \end{cases}, \quad (23)$$

$$P_{\text{GT}}(t':t'') = 0, \quad (24)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{WC}}^1(t) \leq P_{\text{WC,max}}^1(t)\xi_{\text{WC}}^1(t) \\ 0 \leq P_{\text{WC}}^2(t) \leq P_{\text{WC,max}}^2(t)\xi_{\text{WC}}^2(t) \\ \xi_{\text{WC}}^1(t) + \xi_{\text{WC}}^2(t) \leq 1 \end{cases}, \quad (25)$$

$$\sum_{z=1} P_{k,z+1} \geq P_{k,z}, \quad (26)$$

式中: t', t'' 分别为低谷电价时段的起始、结束时刻; $P_{\text{WC}}^1(t), P_{\text{WC,max}}^2$ 为双工况离心式冷水机组功率; $\xi_{\text{WC}}^1(t), \xi_{\text{WC}}^2(t)$ 为双工况离心式冷水机组工况标志位, 取值为 0 或 1; $P_{k,z}$ 为 k 类第 z 个设备的功率。

3.2.2 供能可靠性约束

$$P_{\text{grid}}^{\text{buy}}(t) + P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{GT,out}}^{\text{e}}(t) + P_{\text{es,out}}(t) = P_{\text{grid}}^{\text{sell}}(t) + P_{\text{EB,in}}^{\text{e}}(t) + P_{\text{LB,in}}(t) + P_{\text{WC,in}}(t) + P_{\text{EC,in}}(t) + P_{\text{es,in}}(t) + P_{\text{load}}^{\text{e}}(t), \quad (27)$$

$$P_{\text{hs,in}}(t) + P_{\text{load}}^{\text{h}}(t) = P_{\text{GT,out}}^{\text{h}}(t) + P_{\text{GB,out}}(t) + P_{\text{EB,out}}(t) + P_{\text{hs,out}}(t) + P_{\text{LB,out}}(t), \quad (28)$$

$$P_{\text{load}}^{\text{c}}(t) = P_{\text{EC,out}}(t) + P_{\text{LB,out}}(t) + P_{\text{WC,out}}^2(t) + P_{\text{EC,out}}(t) + P_{\text{cs,out}}(t), \quad (29)$$

$$P_{\text{gas}}^{\text{buy}}(t) = P_{\text{GT,in}}(t) + P_{\text{GB,in}}(t), \quad (30)$$

$$P_{\text{cs,in}}(t) = P_{\text{WC,out}}^1(t), \quad (31)$$

式中: $P_{\text{es,in}}, P_{\text{es,out}}$ 分别为蓄电池充、放电功率; $P_{\text{hs,in}}(t), P_{\text{hs,out}}(t)$ 分别为蓄热罐蓄、释热功率; $P_{\text{cs,in}}, P_{\text{cs,out}}$ 分别为蓄冰盘管蓄、释冷功率; $P_{\text{load}}^{\text{e}}(t)$ 为电负荷; $P_{\text{load}}^{\text{h}}(t)$ 为热负荷; $P_{\text{load}}^{\text{c}}(t)$ 为冷负荷。

3.2.3 储能设备约束

为了避免储能设备同时充放能量, 需设置充放状态唯一标志, 并且储能单位时间内充放能量具有上限, 以蓄电池为例设置如下约束, 蓄热罐和蓄冰盘管等同。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{es,in}}(t) \leq P_{\text{es,max}}\xi_{\text{es,in}} \\ 0 \leq P_{\text{es,out}}(t) \leq P_{\text{es,max}}\xi_{\text{es,out}} \\ \xi_{\text{es,in}} + \xi_{\text{es,out}} \leq 1 \end{cases}, \quad (32)$$

式中: $\xi_{\text{es,in}}, \xi_{\text{es,out}}$ 分别为蓄电池充、放状态标志位, 取值为 0 或 1; $P_{\text{es,max}}$ 为单位时间内充放电上限。

同时, 需施加 SOC 约束, 避免设备深度充放能, 以延长使用寿命, 以蓄电池为例设置如下约束

$$S_{\text{OC,min}} \leq S_{\text{OC,es}} \leq S_{\text{OC,max}}, \quad (33)$$

式中: $S_{\text{OC,max}}, S_{\text{OC,min}}$ 分别为蓄电池 SOC 的上、下限。

3.2.4 管道流量平衡约束

本文假设换热器在工作前后管路的冷、热功率相同, 不存在冷、热功率的损耗, 即

$$P_{\text{L,in}}(t) = P_{\text{L,out}}(t), \quad (34)$$

式中: $P_{\text{L,in}}(t), P_{\text{L,out}}(t)$ 分别为工作前、后管路的冷热功率。

同时, 为了满足负荷侧所需的冷、热量, 二次侧泵质量流量应满足

$$\sum q_{m,P} = q_{m,L}(t), \quad (35)$$

式中: $q_{m,L}(t)$ 为负荷所需的质量流量。

3.3 求解方法

本文所构建的优化配置模型属于混合整数非线性规划问题, 将该问题通过分段线性化转化为混合整数线性规划问题, 基于 Matlab R2021b 仿真平台通过 Yalmip 工具箱调用 Cplex 求解器对优化配置模型进行求解。IES 优化调度流程如图 2 所示。

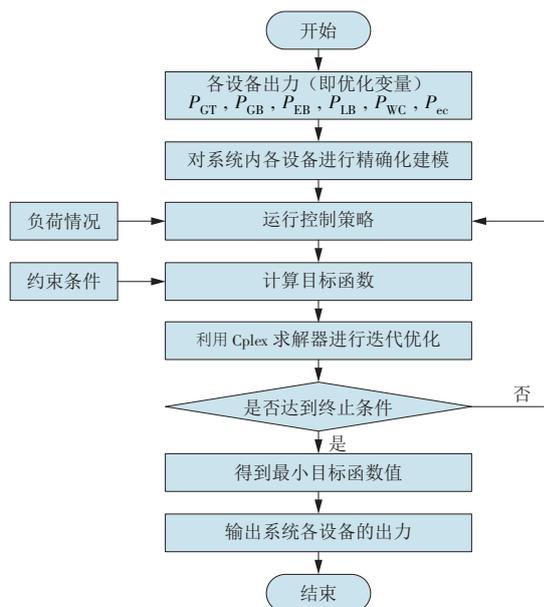


图 2 IES 优化调度流程

Fig. 2 Optimized scheduling of the IES

4 算例分析

4.1 算例介绍

将能源站进行日负荷聚类,并根据典型日的环境温度、光照强度计算光伏发电量。购电电采用 35 kV 分时电价:08:00—15:00, 18:00—21:00 为高峰时段,购电价为 1.193 4 元/(kW·h);06:00—08:00, 15:00—18:00, 21:00—22:00 为平价时段,购电价为 0.663 0 元/(kW·h); 22:00—次日 06:00 为低谷时段,购电价为 0.265 2 元/(kW·h)。燃气内燃机消耗天然气价格为 4.10 元/m³,燃气锅炉消耗天然气价格为 5.18 元/m³。图 3 为典型日负荷、光伏发电功率、电价曲线。

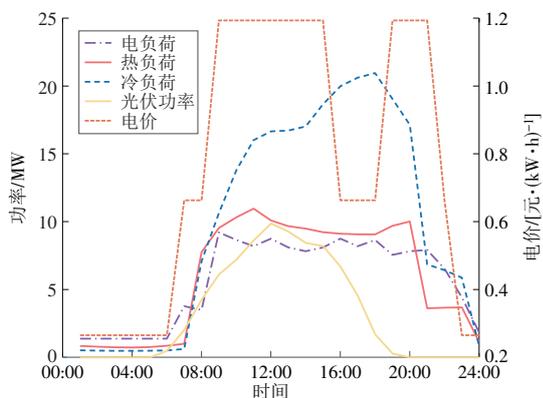


图 3 典型日负荷、光伏发电功率、电价曲线

Fig. 3 Load and PV output on a typical day and electricity price

设备相关参数见表 1,变工况特性如图 4 所示。能源站热、冷负荷供水如图 5 所示。主供回路管道供热时的供水温度为 60℃,回水温度为 50℃;供冷时的供水温度为 6℃,回水温度为 12℃。

表 1 设备相关参数

Table 1 Parameters of different units

设备	参数	数值
电锅炉	最大制热量/kW	2 200.0
	数量/台	2
	效率/%	93
燃气锅炉	最大制热量/kW	3 200.0
	数量/台	2
燃气内燃机	最大发电量/kW	1 000.0
	数量/台	2
溴化锂机组	最大制热量/kW	1 200.0
	最大制冷量/kW	1 250.0
	数量/台	2
双工况冷水机组	最大制冷量/kW	4 220.0
	最大制冰量/kW	2 778.0
	数量/台	2
电制冷机	最大制冷量/kW	7 500.0
	台数	2
蓄冰盘管	最大蓄冰量/kW	43 929.6
	充、放效率/%	97
	最大充放量/(kW·h)	5 600
蓄热罐	最大蓄热量/kW	25 000.0
	充、放效率/%	97
	最大充放量/(kW·h)	3 200

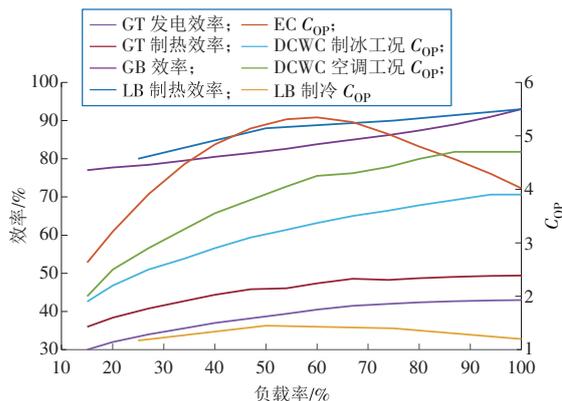


图 4 设备变工况特性

Fig. 4 Efficiencies of the equipment under variable operating conditions

4.2 多场景仿真结果对比与分析

本节设置 4 个场景来验证本文所提方法的合理性与有效性。

场景 1:考虑单台多类型能量转换设备的变工况运行特性及泵的能耗。

场景 2:考虑多台多类型能量转换设备的恒定效率运行特性及泵的能耗(采用设备满负载率下的能量转换效率)。

场景 3:考虑多台多类型能量转换设备的变工况运行特性及泵的能耗。

场景 4:只考虑多台多类型能量转换设备的变工况运行特性,不考虑泵的能耗。

由表 2 可知:运行成本由高到低分别是场景 2, 1, 4, 3;场景 2 的购气成本、购电成本最高,这是由于

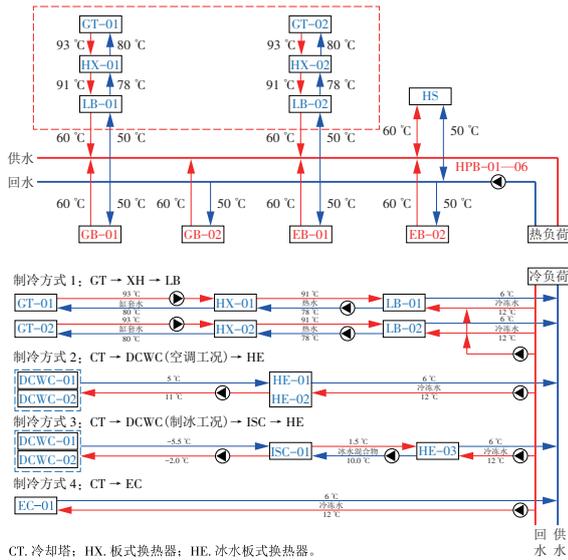


图 5 能源站热、冷负荷供回水示意

Fig. 5 Supply and return water for heating and cooling in a power station

场景 2 中能量转换设备为恒定效率,优化过程中不考虑某些设备存在最佳工况,例如:电制冷机在 100% 负载率下 COP 为 4.02,而 60% 负载率时 COP 最高为 5.35,随着负载率的增加,COP 加速下降,导致该场景下优化方案会产生额外的费用并造成能源浪费;相较于场景 1,2,场景 3,4 都采用设备变工况非线性建模,日运行成本明显减少,设备能够有

效运行在最佳工况点附近;相较于场景 3,场景 1 依旧存在一些成本差异,这是由于场景 1 将多台同种设备看成一个整体,没有合理分配设备的出力,从而产生了一些额外的费用。

实际运行中,由于设备运行效率与仿真效率存在偏差,致使优化运行方案与实际负荷需求之间存在偏差,即供需匹配偏差。热能的偏差主要是由热能生产设备(燃气锅炉、溴化锂机组)变工况运行导致的;冷能的偏差主要是由冷能生成设备(电制冷机、双工况离心式冷水机组、溴化锂机组)变工况运行导致的;电能的偏差主要是由燃气内燃机变工况运行导致的,燃气内燃机的余热也会影响溴化锂机组的出力;冰能的偏差主要是由(双工况离心式冷水机组)变工况运行导致的。从能量偏差总额看,场景 2 的偏差最大,这是恒效率出力引起的能量偏差;场景 2 的电偏差为 0,这是由于燃气内燃机与溴化锂机组一直处于联合满负荷运行状态,而场景 2 采用的恒效率为满负载率下的效率,因此电偏差为 0;场景 3 的各个能量偏差都比场景 1 小,表明针对所有设备进行精细化建模,可以合理分配多台同种设备出力;3 个场景中冷能的偏差始终为 0,这是由于蓄冰盘管的容量偏大,导致双工况冷水机组一直在制冰工况下满负荷运行。

表 2 不同场景仿真运行结果

Table 2 Simulated operation results under different scenarios

场景	日运行成本/元			供需匹配偏差/(kW·h ⁻¹)				泵耗电量/(kW·h)
	购气成本	购电成本	总成本	电能	热能	冷能	冰能	
1	75 891.13	82 396.04	158 287.17	7.37	54.54	4.55	0	1 196.5
2	77 456.17	83 425.32	160 878.49	0	514.68	4 632.51	0	1 314.6
3	77 057.46	80 576.41	157 633.87	0.20	28.63	0	0	1 206.4
4	76 998.42	80 887.48	157 885.90	3.51	28.64	0	0	1 250.6

不同场景下,泵的电能消耗也有所不同。从场景 3 与场景 4 的对比中发现:如果不考虑泵的能耗,将导致泵消耗电能增大;同时,这些泵消耗的电能将影响其他设备出力,从而影响系统运行的可靠性,造成能量缺口。

4.3 基于多台变工况优化运行结果分析

场景 3 的优化运行结果如图 6 所示。受分时电价与天然气价格的影响,燃气内燃机只在高峰电价时段运行,由于溴化锂机组的制冷效率高于制热效率,燃气内燃机与溴化锂机组组成的联供系统一直处于供冷工况。结合图 6b 与图 7 可见:22:00—次日 06:00 低谷电价时段电锅炉出力优先于燃气锅炉,高峰电价时段则相反;同时,由图 6b 的 06:00—07:00,20:00—21:00,21:00—22:00 发现,面对小

负荷热量需求时,高峰电价时段燃气锅炉出力优先于电锅炉,平价时段电锅炉出力优先于燃气锅炉,而面对大负荷热量需求时,无论是高峰电价时段还是平价时段,燃气锅炉出力始终优先于电锅炉。造成这种情况的原因是在面对小负荷热量需求时,燃气锅炉效率低,便宜的燃气价格不足以支持系统优先选择燃气锅炉出力,而在面对大负荷热需求时,燃气锅炉效率上升,此时电价昂贵,系统会优先选择燃气锅炉出力。

由图 6c 与图 7 可知,电制冷机与双工况离心式冷水机组运行时联合蓄冰盘管使自身保持在高 COP 状态下运行,从而保障系统运行的经济性,减少能源浪费。

由图 7 可见:分配多台同种变工况设备出力时,

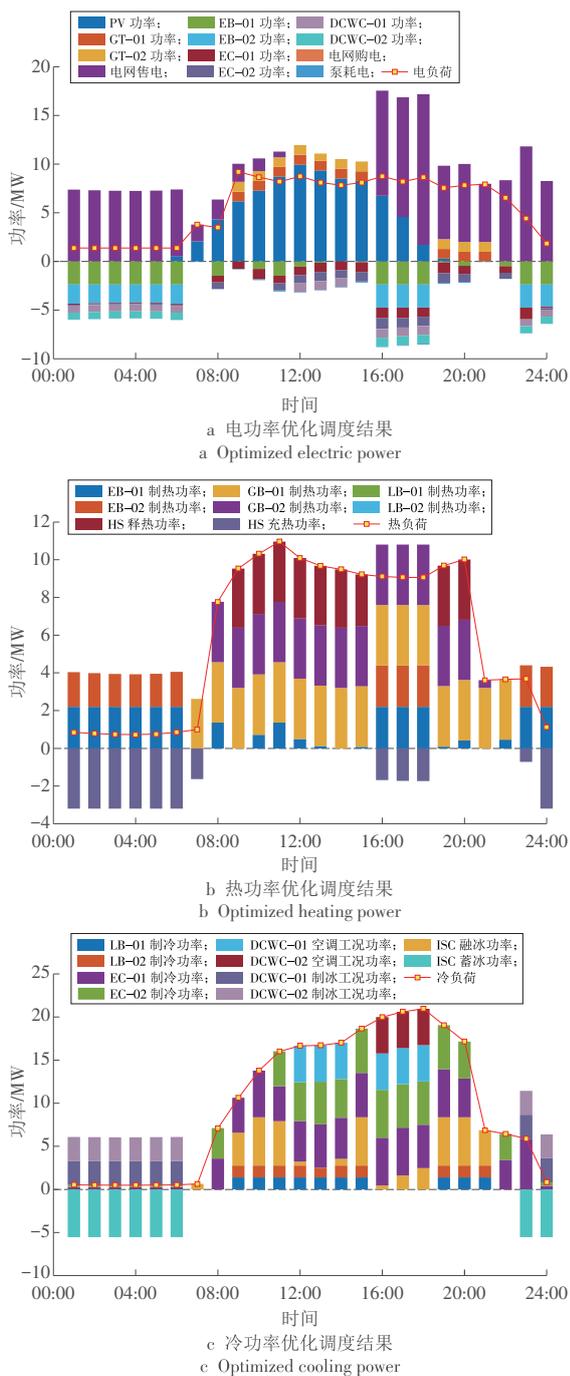


图 6 场景 3 的优化运行结果

Fig. 6 Optimized scheduling results under scenario 3

会优先保证其整体运行在最优工况下,如 07:00, 21:00—22:00,由于燃气轮机效率与负荷率呈正比,因此会优先使其中一台设备达到最佳工况点;而电制冷机在负载率为 58% 时 COP 达到最大值,因此电制冷机会优先保证设备在最佳工况下运行,如 08:00—22:00 电制冷机始终保持在最大 COP 下运行。由此可见,多台同种设备变工况精细化建模更能精准把握设备合理出力,减少能源浪费。

如图 8 所示,所有储能设备的 SOC 状态均稳定在 0.1~0.9,避免储能设备过度充放。

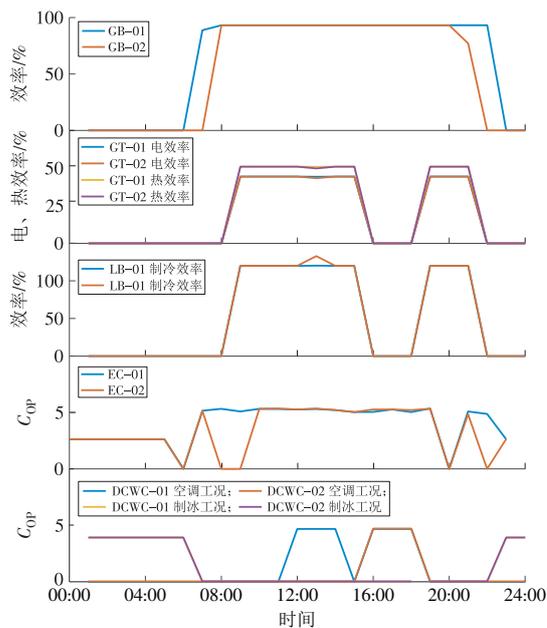


图 7 设备变工况运行曲线

Fig. 7 Operation curves of the units under variable operating conditions

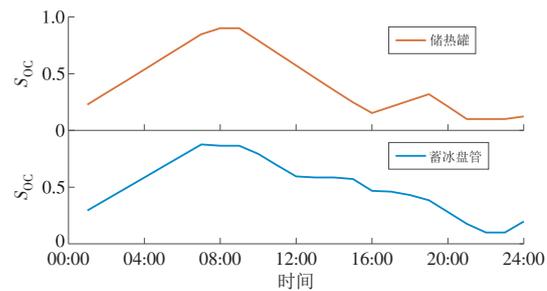


图 8 储能设备 SOC 曲线

Fig. 8 SOC of the energy storage device

5 结论

本文提出了一种计及设备变工况能效非线性的 IES 精细化协同优化运行方法,以上海某能源站为例进行了多种设备的精细化建模并通过仿真验证了该方法的合理性与有效性,得到以下结论。

(1) 定参数模型会影响综合能源管理的决策,增加运行成本,导致供需不平衡。

(2) 计及设备变工况能效非线性的 IES 精细化协同优化运行方法,能够更加合理地分配设备出力,有效减少系统运行成本,提高系统运行的可靠性与经济调度的精确性。

(3) 考虑能源运输设备的能耗,能够提高模型的准确性,减少 IES 用能缺口。

参考文献:

[1] 曾鸣. 构建综合能源系统打好实现碳达峰碳中和这场硬仗[N]. 人民日报, 2021-07-28(09).

- [2]黄银恒,李猛,庞毅,等.区域综合能源系统容量配置和调度策略优化方法研究[J].综合智慧能源,2023,45(6):34-41.
HUANG Yinheng, LI Meng, PANG Yi, et al. Research on optimization method for capacity allocation and scheduling strategy of regional integrated energy systems[J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(6): 34-41.
- [3]SHARMA S, VERMA A, XU Y, et al. Robustly coordinated Bi-level energy management of a multi-energy building under multiple uncertainties [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(1):3-13.
- [4]徐恒志,周博文,李广地,等.含水热泵的区域综合能源系统低碳运行优化研究[J].综合智慧能源,2022,44(1):39-48.
XU Hengzhi, ZHOU Bowen, LI Guangdi, et al. Research on optimal operation of the regional integrated energy system with water-source heat pumps [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(1):39-48.
- [5]王成山,吕超贤,李鹏,等.园区型综合能源系统多时间尺度模型预测优化调度[J].中国电机工程学报,2019,39(23):6791-6803.
WANG Chengshan, LYU Chaoxian, LI Peng, et al. Multiple time-scale optimal scheduling of community integrated energy system based on model predictive control [J]. Proceeding of the CSEE, 2019, 39(23):6791-6803.
- [6]SHEN X, GUO Q, SUN H. Regional integrated energy system planning considering energy price uncertainties: A two-stage stochastic programming approach[J]. Energy Procedia, 2019, 158:6564-6569
- [7]李云鸷,刘吉臻,马素玲,等.基于变工况模型的综合能源系统源-荷互动多目标优化调度[J].电网技术,2022,46(7):2472-2485.
LI Yunzhi, LIU Jizhen, MA Suling, et al. Source-load interactive multi-objective optimal dispatching of integrated energy system based on off-design model [J]. Power System Technology, 2022, 46(7):2472-2485.
- [8]王强钢,吴雪翥,杨龙杰,等.考虑设备变工况特性和灵活性供需匹配的园区综合能源系统优化配置模型[J].电力自动化设备,2023,43(3):20-28,37.
WANG Qianggang, WU Xuehui, YANG Longjie, et al. Optimal allocation model of community integrated energy system considering off-design performance of device and flexible supply-demand matching [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(3):20-28, 37.
- [9]温港成,石鑫,张怡,等.考虑设备变工况特性的园区综合能源系统两阶段规划优化方法研究[J].综合智慧能源,2022,44(10):1-11.
WEN Gangcheng, SHI Xin, ZHANG Yi, et al. Research on two-stage planning optimization approach for community integrated energy systems considering off-design conditions [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(10):1-11.
- [10]程浩忠,胡泉,王莉,等.区域综合能源系统规划研究综述[J].电力系统自动化,2019,43(7):2-13.
CHENG Haozhong, HU Xiao, WANG Li, et al. Review on research of regional integrated energy system planning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7):2-13.
- [11]李建林,田立亭,程林,等.考虑变工况特性的微能源系统优化规划(一)基本模型和分析[J].电力系统自动化,2018,42(19):18-26,49.
LI Jianlin, TIAN Liting, CHENG Lin, et al. Optimal planning of micro-energy system considering off-design performance part one general model and analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19):18-26, 49.
- [12]荆朝霞,袁灼新,胡荣兴,等.供能设备模型对冷热电联供微网系统经济调度的影响[J].南方电网技术,2016,10(8):32-39.
JING Zhaoxia, YUAN Zhuoxin, HU Rongxing, et al. Effect of component models on economic dispatch of CCHP-type microgrid [J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(8):32-39.
- [13]赵海彭,苗世洪,李超,等.考虑冷热电需求耦合响应特性的园区综合能源系统优化运行策略研究[J].中国电机工程学报,2022,42(2):573-589.
ZHAO Haipeng, MIAO Shihong, LI Chao, et al. Research on optimal operation strategy for park-level integrated energy system considering cold-heat-electric demand coupling response characteristics [J]. Proceeding of the CSEE, 2022, 42(2):573-589.
- [14]HUANG W J, ZHANG N, WANG Y, et al. Matrix modeling of energy hub with variable energy efficiencies [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 19:105876.
- [15]李鹏,王加浩,黎灿兵,等.计及源荷不确定性与设备变工况特性的园区综合能源系统协同优化运行方法[J/OL].中国电机工程学报,2023:1-14 [2023-06-12].
<https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotals-ZGDC20230106004.htm>.
LI Peng, WANG Jiahao, LI Canbing, et al. Collaborative optimal scheduling of the community integrated energy system considering source-load uncertainty and equipment off-design performance [J/OL]. Proceeding of the CSEE, 2023: 1-14 [2023-06-12]. <https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotals-ZGDC20230106004.htm>.
- [16]HEIDARI A, MORTAZAVI S S, BANSAL R C. Stochastic effects of ice storage on improvement of an energy hub optimal operation including demand response and renewable energies [J]. Applied Energy, 2020, 261(1):114393.
- [17]DENG S, WU Q H, JING Z X, et al. Optimal capacity

configuration for energy hubs considering part-load characteristics of generation units [J]. Energies, 2017, 10 (12):1966.

[18]杨承,王平,刘换新,等.分布式燃气-蒸汽联合循环供能系统热经济性分析[J].中国电机工程学报,2019,39(18):5424-5432,5590.

YANG Cheng, WANG Ping, LIU Huanxin, et al. Thermo-economic analysis on gas-steam combined cycle-based distributed energy supply system [J]. Proceeding of the CSEE, 2019, 39(18):5424-5432, 5590.

[19]董文杰,田志强,姚玉斌,等.计及多能设备变工况运行特性的综合能源系统日前优化调度[J].可再生能源,2022,40(10):1372-1379.

DONG Wenjie1, TIAN Zhiqiang1, YAO Yubin, et al. Day-ahead optimal dispatch of the integrated energy systems considering off-design operation characteristics of multi energy facilities [J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(10):1372-1379.

[20]谢娜,韩高岩,吕洪坤,等.烟气热水型溴化锂吸收式制冷机组的仿真及性能分析[J].热能动力工程,2020,35(4):40-45.

XIE Na, HAN Gaoyan, LYU Hongkun, et al. Simulation and performance analysis of gas and hot water type LiBr-H₂O absorption refrigeration [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(4):40-45.

[21]周天宇,王升,张治平,等.永磁同步变频离心式冰蓄冷双工况机组运行能效分析[J].制冷与空调,2019,19(8):69-74,79.

ZHOU Tianyu, WANG Sheng, ZHANG Zhiping, et al. Analysis on operational energy efficiency of dual-mode

permanent-magnetic synchronous frequency-convertible centrifugal water chiller for ice storage [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2019, 19(8):69-74, 79.

[22]李玉街,王琪玮.中央空调冷水机组能源效率与负荷率动态匹配节能技术[J].智能建筑电气技术,2012,6(4):81-84.

LI Yujie, WANG Qiwei. Energy-saving technologies of dynamic adaptation between energy efficiency and load rate for the chillers of central air-conditioning [J]. Electrical Technology of Intelligent Buildings, 2012, 6(4):81-84.

[23]刘学智,严正,张沛超.综合能源系统建模从入门到实践[M].上海:上海交通大学出版社,2021.

(本文责编:刘芳)

收稿日期:2023-06-16;修回日期:2023-07-11
 上网日期:2023-08-17;附录网址:www.ienergy.cn

作者简介:

赵慧荣(1990),女,副教授,博士,从事智能发电、综合能源系统建模、优化及控制等方面的研究,hrzhao@shiep.edu.cn;

李天晨(1997),男,在读硕士研究生,从事能源系统数据驱动建模、仿真与优化控制等方面的研究,2630355591@qq.com;

周全(1983),男,高级工程师,硕士,从事电网规划、能源经济、电网建设项目管理及电力企业碳管理等方面的工作,zhoudennis@163.com;

彭道刚*(1977),男,教授,博士,从事智能发电、智慧能源和能源互联网等方面的研究,pengdaogang@126.com。

*为通信作者。

广告索引

郑州科润机电工程有限公司 (后插 1)
 华电水务科技股份有限公司(跨版) (后插 2,3)
 华电环保系统工程技术有限公司(跨版) (后插 4,5)
 中国华电科工集团有限公司新能源
 技术开发公司 (后插 6)
 国家能源生物燃气高效制备及综合利用技术
 研发(实验)中心 (后插 7)
 华电综合智慧能源科技有限公司 (后插 8)
 华电通用轻型燃机设备有限公司 (后插 9)

郑州华电能源科技有限公司(跨版) (后插 10,11)
 华电重工股份有限公司(跨版) (后插 12,13)
 中国华电科工集团有限公司能源建设
 分公司(跨版) (后插 14,15)
 华电科工安全环境质量科学研究所 (后插 16)
 山东华电节能技术有限公司 (后插 17)
 《综合智慧能源》 (后插 18)
 华电郑州机械设计研究院有限公司 (封三)
 中国华电科工集团有限公司 (封底)