新能源发电与分时电价下的纺织园区微电网经济优化

钱　涛[1]，Muhammad Afzal[2]，韩玉蓉[3]，单英浩[1]
（1. 东华大学信息与智能科学学院，上海 201620；
2. 上海诚兴机械电子有限公司，上海 201400；
3. 国网舒城县供电公司，安徽 六安 231300）

摘要：针对纺织园区节能减排的迫切需求，研究以微电网系统为载体，集成光伏、风电、热电联产、燃气锅炉、电锅炉和储能设备，结合分时电价机制开展优化建模，求解出能源配置的优化方案与最低经济运营成本。结果表明，通过合理配置新能源、储能及各类设备，不仅能优化园区整体经济效益，还能维持供电与供热的平衡，提升能源自给能力。研究可为纺织等工业园区的绿色可持续发展提供技术参考。

关键词：纺织园区；微电网；分时电价；经济优化；节能减排
中图分类号：F 426　　**文献标志码**：A

Economic optimization of microgrid in textile industrial parks with new energy and time-of-use pricing

Qian Tao[1], *Muhammad Afzal*[2], *Han Yurong*[3], *Shan Yinghao*[1]
(1. School of Information and Intelligent Science, Donghua University, Shanghai 201620, China;
2. Shanghai Chengxing Machinery and Electronics Co., Ltd., Shanghai 201400, China;
3. State Grid Shucheng Electric Power Co., Ltd., Lu'an 231300, Anhui, China)

Abstract: In response to the urgent need for energy conservation and emission reduction in textile industrial parks, this study adopted a microgrid system that integrates photovoltaic, wind power, combined heat and power, gas boilers, electric boilers, and energy storage devices. Combined with a time-of-use pricing mechanism, an optimization model was established. The optimal energy allocation scheme and minimum economic operation cost were derived through model solving. The results show that the rational configuration of renewable energy, energy storage, and various equipment, not only optimizes the overall economic performance of the park, but also maintains the balance between power and heat supply while improving energy self-sufficiency. The research can provide technical references for the green and sustainable development of textile and other industrial parks.

Key words: textile industrial park; microgrid; time-of-use pricing; economic optimization; energy saving and emission reduction

随着我国能源需求增长和国民环保意识提升，　尤其“双碳”目标的提出，工业领域对可持续能源解

基金项目：魏桥教研创新基金（H1042302）；上海市探索者计划（24TS1410100）；上海市“科技创新行动计划”扬帆计划（21YF1400100）
收稿日期：2025-02-27
作者简介：钱涛，男，2002年生，在读硕士研究生，主要研究方向为虚拟电厂优化调度，2242082@mail.dhu.edu.cn
通信作者：单英浩，男，1991年生，博士，副教授，主要研究方向为智能电网、虚拟电厂、电力电子技术，shanyh@dhu.edu.cn

决方案的需求日益迫切。纺织业作为典型的劳动和技术双密集型产业，其显著特点是生产过程中能耗较高，且存在明显的电热负荷需求[1]。因此，纺织行业在保障生产效率的同时，面临着节能减排的重要挑战。包含新能源发电的微电网，因能够整合可再生能源、优化能源配置、提高能源自给率并降低用能成本而受到越来越多的关注。尽管微电网已在多个工业领域获得初步应用，并已有在纺织行业取得应用的相关报道[2-3]，但针对其经济性的技术研究仍相对不足。

分时电价根据电力供需情况设定差异化的电价，引导用户在电价较高的用电高峰时段减少用电，转向在电价较低的低谷时段增加用电，进而实现电力资源的优化配置与削峰填谷的目标[4]。高耗能的纺织园区若充分利用分时电价机制与峰谷电价差价，可有效降低总体用电成本，提升经济效益。

本文首先介绍纺织园区微电网系统的结构和组成。其次进行数学建模，探索光伏、风电、热电联产、燃气锅炉、电锅炉及储能系统的最优配置方案，并结合分时电价机制，分析能源配置方案的经济效益。最后通过求解优化模型，实现系统总经济成本的最小化。研究致力于为纺织园区提供可行的微电网设计方案，同时为其他类似工业园区的能源管理和运行提供有价值的技术参考。

1 面向纺织园区的新能源发电微电网

研究构建了专为纺织园区设计的综合微电网系统，融合光伏、风电、热电联产、燃气锅炉、电锅炉及储能机制，形成电力与热能的综合保障供应体系[5-6]。该系统充分利用纺织园区内的空间资源，部署高效能的光伏组件和风力发电设备，将自然能源转化为清洁电能。同时，采用热电联产技术，结合燃气轮机或内燃机进行发电，并回收余热用于加热水或产生蒸汽，以有效满足纺织园区印染等生产环节的热能需求。此外，燃气锅炉和电锅炉作为辅助热源，可在热电联产系统无法完全满足需求时，保障园区内热能供应的稳定性。

完成储能系统配置后，当电力需求波动或可再生能源供应不稳定时，该系统能够迅速响应，释放或吸收电能，从而确保电力供应的稳定性和可靠性。在发生电网故障等紧急情况下，储能系统还可作为应急电源，为关键设备或区域提供临时电力支持，保障纺织园区运营的持续性。

纺织园区微电网电力部分的连接方式如图 1 所示。主电网经配电变压器后，通过公共耦合点(PCC)与纺织园区进行电力交互。微电网内部采用混合式交直流供电形式，为便于控制，还设有局部控制器(LC)和中央控制器。局部控制器与中央控制器实时监测能源生成、储存、消耗及需求情况，通过智能调度

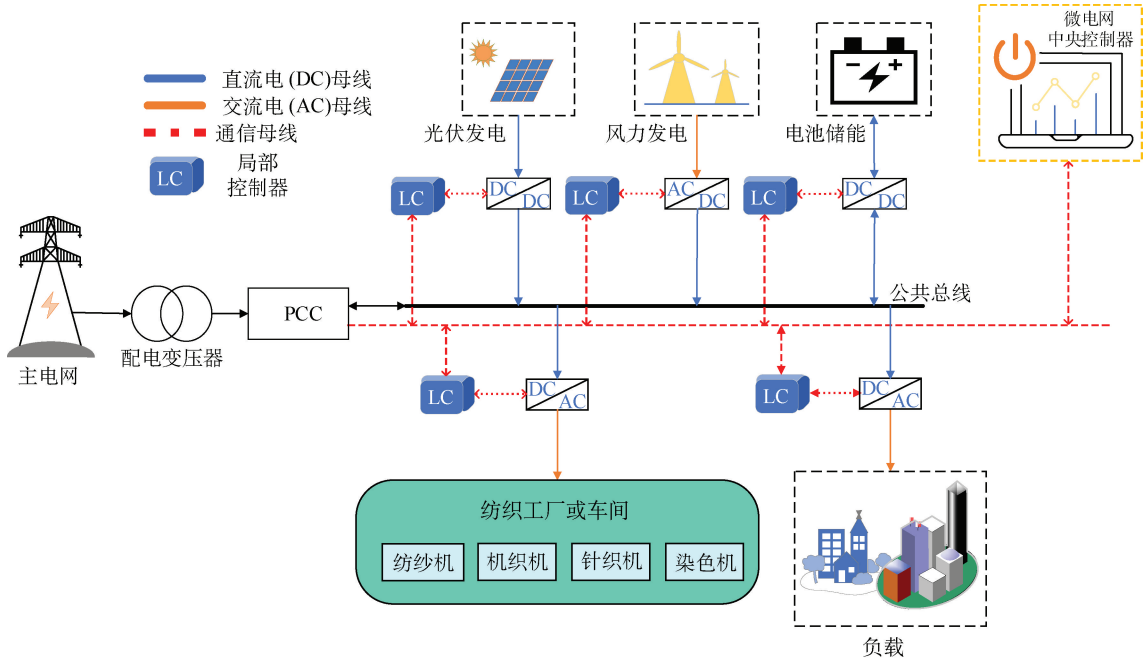


图 1 纺织园区微电网架构图

Fig. 1 Microgrid architecture of the textile industrial park

实现能源的最优分配，有助于降低运营成本和对环境的不良影响，为纺织园区的绿色发展提供有力支撑。

2　系统架构与模型建立

纺织园区作为高能耗产业集中区，面临着节能减排和成本控制的双重挑战。下面将介绍用于评估该系统经济性的数学模型。首先是目标函数的定义及其组成部分——购电成本 C_{Ebuy}、购气成本 C_{Gasbuy} 和运维成本 C_{om}。优化目标即最小化总运行成本，其计算式为：

$$\min C_{\mathrm{total}} = C_{\mathrm{Ebuy}} + C_{\mathrm{Gasbuy}} + C_{\mathrm{om}} \tag{1}$$

其中：

$$C_{\mathrm{Ebuy}} = \sum_{t=1}^{24} P_{\mathrm{e,buy}}(t) \times P_{\mathrm{price}}(t) \tag{2}$$

$$C_{\mathrm{Gasbuy}} = P_{\mathrm{gas}} \times 3\ 600 \times \sum_{t=1}^{24} (Q_{\mathrm{g,CHP}}(t) + Q_{\mathrm{g,GB}}(t)) \tag{3}$$

$$C_{\mathrm{om}} = C_{\mathrm{PV,om}} + C_{\mathrm{WP,om}} + C_{\mathrm{CHP,om}} + C_{\mathrm{GB,om}} + C_{\mathrm{EB,om}} + C_{\mathrm{EES,om}} \tag{4}$$

式中，$P_{\mathrm{e,buy}}(t)$ 表示每小时的购电量，单位为 kWh。$P_{\mathrm{price}}(t)$ 表示每小时的购电价格，单位为元/kWh。P_{gas} 表示每立方米天然气的价格，单位为元/m^3。$Q_{\mathrm{g,CHP}}(t)$ 和 $Q_{\mathrm{g,GB}}(t)$ 分别表示热电联产机组和燃气锅炉每小时的天然气消耗量，单位为 m^3。$C_{\mathrm{PV,om}}$、$C_{\mathrm{WP,om}}$、$C_{\mathrm{CHP,om}}$、$C_{\mathrm{GB,om}}$、$C_{\mathrm{EB,om}}$、$C_{\mathrm{EES,om}}$ 分别表示光伏系统运维成本、风电设备运维成本、热电联产系统运维成本、燃气锅炉运维成本、电锅炉运维成本、储能系统运维成本。

接下来将描述各类设备的能量产出与消耗关系及其对总体经济效益的影响。光伏系统的功率输出模型及其相关的运维成本计算方法如下所述。

功率输出：

$$P_{\mathrm{e,PV}}(t) = S_{\mathrm{PV}} \times \eta_{\mathrm{PV}} \times I(t) \times 0.001 \tag{5}$$

式中，$P_{\mathrm{e,PV}}(t)$ 表示光伏系统每小时的功率输出，单位为 kW。S_{PV} 表示光伏系统安装面积，单位为 m^2。η_{PV} 表示光伏系统的光电转换效率。$I(t)$ 表示每小时的太阳辐照度，单位为 W/m^2。

运维成本：

$$C_{\mathrm{PV,om}} = C_{\mathrm{PV,omf}} + C_{\mathrm{PV,omw}} \tag{6}$$

式中，固定运维成本 $C_{\mathrm{PV,omf}} = 0.02 \times Q_{\mathrm{PV}}$，可变运维成本 $C_{\mathrm{PV,omw}} = 0.03 \times \sum_{t=1}^{24} P_{\mathrm{e,PV}}(t)$，$Q_{\mathrm{PV}}$ 表示光伏系统容量，单位为 kW。

风电设备的功率输出模型和运行维护的成本如下所述。

功率输出：

$$P_{\mathrm{e,WP}}(t) = \begin{cases} N_{\mathrm{WP}} \times 222.2 \times (v_{\mathrm{W}}(t) - 4) & 4 \leqslant v_{\mathrm{W}}(t) < 12 \\ N_{\mathrm{WP}} \times Q_{s,\mathrm{WP}} & 12 \leqslant v_{\mathrm{W}}(t) \leqslant 20 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{7}$$

式中，$P_{\mathrm{e,WP}}(t)$ 表示风电设备每小时的功率输出，单位为 kW。N_{WP} 表示风电设备的台数。$v_{\mathrm{W}}(t)$ 表示风速，单位为 m/s。$Q_{\mathrm{s,WP}}$ 表示每台风电设备额定容量，单位为 kW。

运维成本：

$$C_{\mathrm{WP,om}} = 0.07 \times \sum_{t=1}^{24} P_{\mathrm{e,WP}}(t) \tag{8}$$

热电联产系统需要计算其电功率和热功率输出，以及合理的运维成本管理，计算式如下所述。

电功率输出：

$$P_{\mathrm{e,CHP}}(t) = 0.4 \times Q_{\mathrm{g,CHP}}(t) \times a_{\mathrm{g}} \tag{9}$$

式中，a_{g} 表示每立方米天然气的能量含量，单位为 kJ/m^3。

热功率输出：

$$P_{\mathrm{h,CHP}}(t) = 0.5 \times Q_{\mathrm{g,CHP}}(t) \times a_{\mathrm{g}} \tag{10}$$

运维成本：

$$C_{\mathrm{CHP,om}} = C_{\mathrm{CHP,omf}} + C_{\mathrm{CHP,omw}} \tag{11}$$

式中，固定运维成本 $C_{\mathrm{CHP,omf}} = 0.02 \times Q_{\mathrm{CHP}}$，可变运维成本 $C_{\mathrm{CHP,omw}} = 0.03 \times \sum_{t=1}^{24} P_{\mathrm{e,CHP}}(t)$，$Q_{\mathrm{CHP}}$ 表示热电联产机组容量，单位为 kW。

燃气锅炉的热功率输出及相应的运维成本通过式(12)和式(13)来计算。

热功率输出：

$$P_{\mathrm{h,GB}}(t) = 0.88 \times Q_{\mathrm{g,GB}}(t) \times a_{\mathrm{g}} \tag{12}$$

运维成本：

$$C_{\mathrm{GB,om}} = C_{\mathrm{GB,omf}} + C_{\mathrm{GB,omw}} \tag{13}$$

式中，固定运维成本 $C_{\mathrm{GB,omf}} = 0.03 \times Q_{\mathrm{GB}}$，可变运维成本 $C_{\mathrm{GB,omw}} = 0.02 \times \sum_{t=1}^{24} P_{\mathrm{h,GB}}(t)$，$Q_{\mathrm{GB}}$ 表示燃气锅炉容量，单位为 kW。

电锅炉在微电网中的输入功率与热功率输出关系如下所述。

电功率输入：$P_{\mathrm{e,EB}}(t)$

热功率输出：

$$P_{h,EB}(t)=0.95\times P_{e,EB}(t) \tag{14}$$

运维成本：

$$C_{EB,om}=C_{EB,omf}+C_{EB,omw} \tag{15}$$

式中，固定运维成本 $C_{EB,omf}=0.03\times Q_{EB}$，可变运维成本 $C_{EB,omw}=0.04\times\sum_{t=1}^{24}P_{h,EB}(t)$，$Q_{EB}$ 表示电锅炉容量，单位为 kW。

储能系统容量变化规律及运维成本计算如下所述。

容量变化：

$$Q_{e,EES}(t+1)=0.98\times Q_{e,EES}(t)+(P_{e,EESc}(t)\times 0.9-P_{e,EESdisc}(t)/0.9) \tag{16}$$

式中，$Q_{e,EES}(t)$表示储能系统中每小时的剩余电量，$P_{e,EESc}(t)$表示储能系统中每小时的充电量，$P_{e,EESdisc}(t)$表示储能系统中每小时的放电量，单位均为 kW。

运维成本：

$$C_{EES,om}=C_{EES,omf}+C_{EES,omw} \tag{17}$$

式中，固定运维成本 $C_{EES,omf}=0.05\times Q_{EES}$，可变运维成本 $C_{EES,omw}=0.04\times\sum_{t=1}^{24}(P_{e,EESc}(t)+P_{e,EESdisc}(t))$，$Q_{EES}$ 表示储能系统容量，单位为 kW。

满足园区供电和供热平衡是实现经济优化和系统稳定运行的关键[7]，其中，电功率平衡需要匹配发电与用电来避免电力过剩或短缺，而热功率平衡则要考虑热源满足生产的热能需求。此外，还需对上述园区设备的容量约束进行设定，具体如下所述。

电功率平衡：

$$P_{e,buy}(t)+P_{e,PV}(t)+P_{e,WP}(t)+P_{e,CHP}(t)+P_{e,EESdisc}(t)-P_{e,EESc}(t)-P_{e,EB}(t)=L_e(t) \tag{18}$$

热功率平衡：

$$P_{h,CHP}(t)+P_{h,GB}(t)+P_{h,EB}(t)=L_h(t) \tag{19}$$

容量约束：

$$0\leqslant P_{e,buy}(t),\ 0.2\times Q_{CHP}\leqslant P_{e,CHP}(t)\leqslant Q_{CHP},\ 0.1\times Q_{EB}\leqslant P_{h,EB}(t)\leqslant Q_{EB},\ 0.2\times Q_{GB}\leqslant P_{h,GB}(t)\leqslant Q_{GB},\ 0\leqslant Q_{e,EES}(t)\leqslant Q_{EES},\ Q_{e,EES}(0)=0.2\times Q_{EES},\ Q_{e,EES}(24)=0.2\times Q_{EES},\ 0\leqslant P_{e,EESc}(t)\leqslant 0.3\times Q_{EES},\ 0\leqslant P_{e,EESdisc}(t)\leqslant 0.3\times Q_{EES} \tag{20}$$

其中，电负荷 $L_e(t)$和热负荷 $L_h(t)$分别表示每小时的电力需求和热力需求，单位均为 kW。设备参数包括：光伏系统安装面积 $S_{PV}=40\ 000\ m^2$，光伏系统额定容量 $Q_{PV}=5\ 000$ kW，风电台数 $N_{WP}=4$，单台额定容量 $Q_{s,WP}=2\ 000$ kW，热电联产容量 $Q_{CHP}=25\ 000$ kW，燃气锅炉容量 $Q_{GB}=18\ 000$ kW，电锅炉容量 $Q_{EB}=16\ 000$ kW，储能系统容量 $Q_{EES}=10\ 000$ kW 等。

3 仿真与结果分析

光伏和风电有助于减少对传统化石能源的依赖，并有效降低碳排放。但二者的发电功率受天气条件的影响显著，具有较强的波动性和不确定性。纺织园区全天 24 h 内光伏和风电的出力情况如图 2 所示。

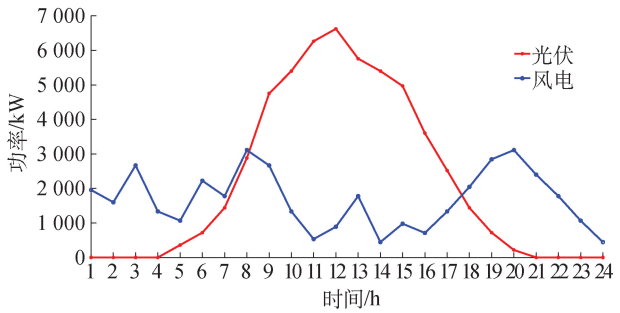


图 2 纺织园区新能源出力曲线

Fig. 2 New energy output curves of the textile industrial park

纺织业作为能源密集型产业，其生产过程对电力和热力的需求较大。其中，电负荷受生产线运作时间、设备启动频率等因素影响，而热负荷则更多取决于生产工艺要求和环境温度变化。纺织园区全天 24 h 内电负荷和热负荷的变化情况如图 3 所示。

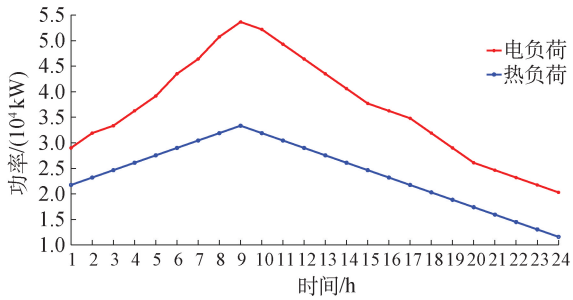


图 3 纺织园区电负荷与热负荷

Fig. 3 Electric load and heat load of the textile industrial park

本文引入的全天 24 h 分时电价情况如图 4 所示。该纺织园区采用三段制电价，其中高峰时段（9:00－12:00）电价为 0.8 元/kWh，平段时段（8:00－9:00、12:00－13:00、14:00－15:00）为

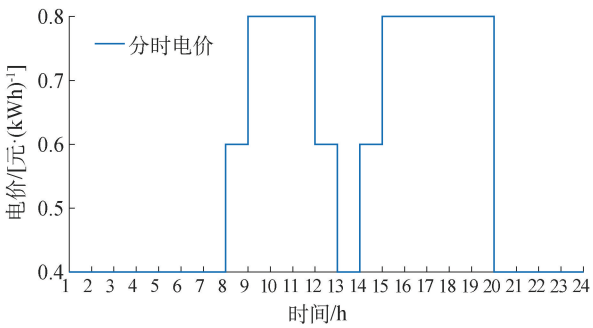


图 4　纺织园区分时电价

Fig. 4　Time-of-use pricing in the textile industrial park

0.6 元/kWh，低谷时段 13:00－14:00、20:00－次日 8:00 为 0.4 元/kWh。

纺织园区全天 24 h 的电功率平衡情况如图 5 所示。可见，电力供应的类型和方式相较于电力消耗更为多元。新能源发电能在一定程度上减少外购电量，热电联产也能提供部分电力供应，储能系统则通过灵活充放电调节电力平衡。上午 7:00 时，因该时段电价处于低谷，系统将最大限度采购外部电力，用于储能充电、电锅炉用电及其他电力负荷。进入 8:00 后，随着电价开始上涨，储能电池停止充电，同时效率更高的热电联产系统相应增加供电量。

相较于电力供应，热力供应的调度策略更具直接性。图 6 展示了全天 24 h 内整个纺织园区热功

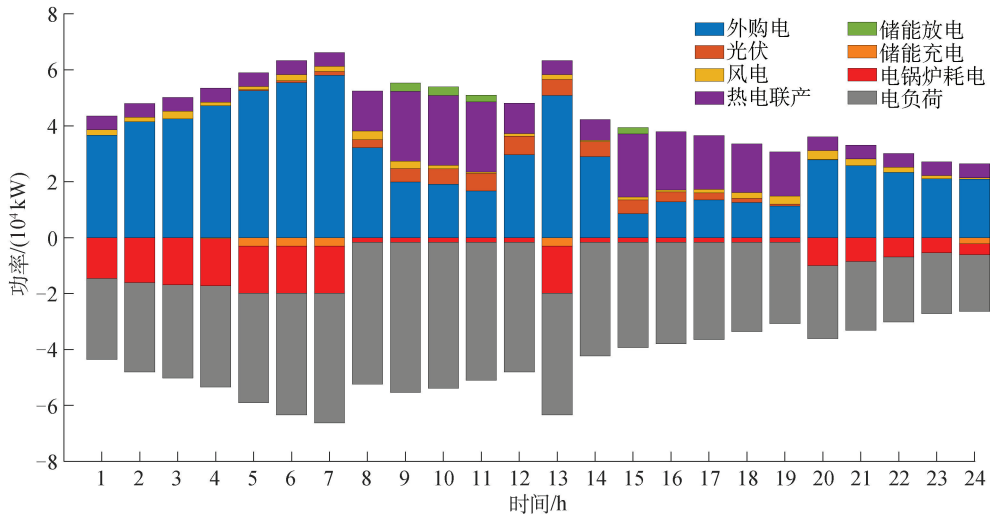


图 5　纺织园区电功率平衡

Fig. 5　Electric power balance in the textile industrial park

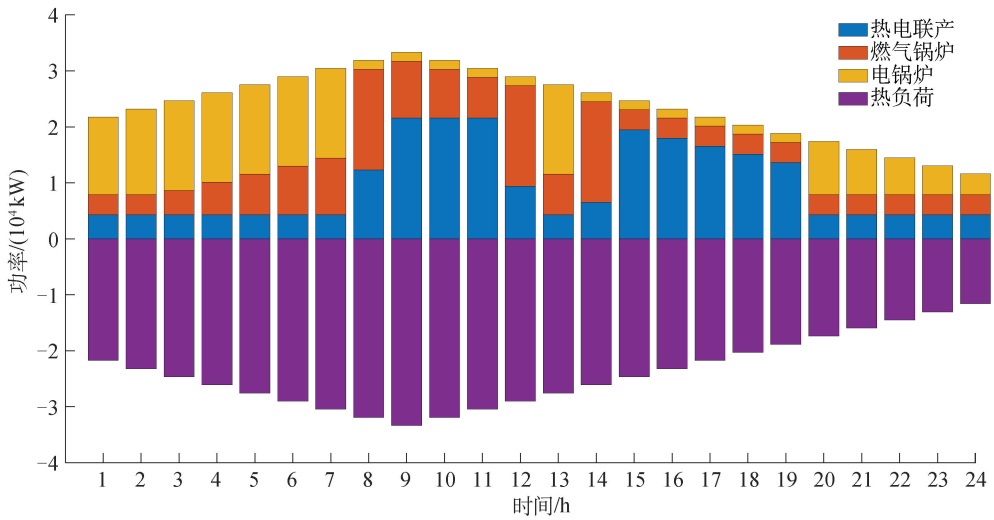


图 6　纺织园区热功率平衡

Fig. 6　Heat power balance in the textile industrial park

率平衡的情况。在电价较低时段，优先采用外购电力驱动电锅炉产生热量。当电价上升后，则由热电联产系统作为主要热源满足热能需求。

纺织园区全天 24 h 内的运营成本的构成如图 7 和图 8 所示，主要包括购电、购气与运维 3 项。其中，购电成本为 347 321 元，购气成本为 339 635 元，运维成本为 26 017 元，总计 712 973 元。在总成本构成中，购电占比为 48.71%，购气占比为 47.64%，运维占比为 3.65%。

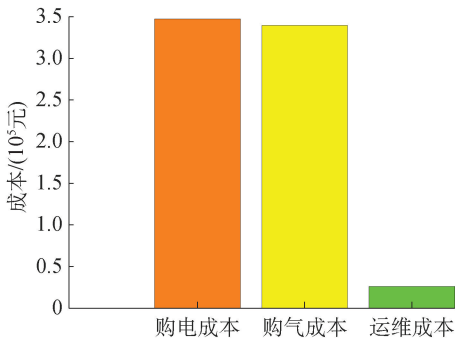


图 7 纺织园区各部分成本

Fig. 7 Cost components of the textile industrial park

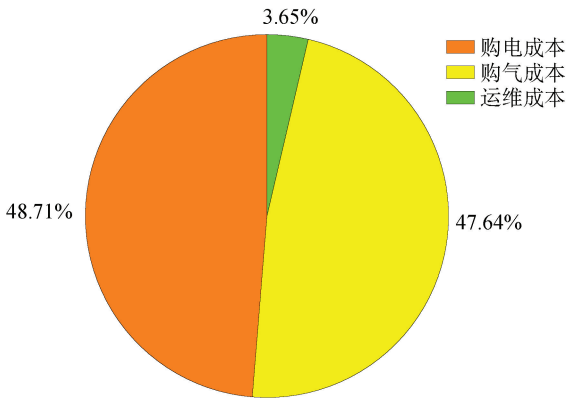


图 8 纺织园区各部分成本占比

Fig. 8 Proportion of cost components in the textile industrial park

通过协调该纺织园区内设备的运行，在确保供电与供热平衡的同时，实现成本的最小化。该过程优化了可再生能源的利用，并优化了电储能系统的充放电策略。

4 结束语

在“双碳”目标背景下，构建纺织园区微电网已成为纺织行业能源转型和可持续发展的重要方向。本文对纺织园区综合微电网系统进行建模，探索并优化了光伏、风电、热电联产、燃气锅炉、电锅炉及储能系统的配置方案。在分时电价机制下，通过协调各设备运行，在确保供电与供热平衡的同时，提升了可再生能源的利用效率，优化了储能系统的充放电策略，实现了经济效益的最大化。未来研究可通过智能调度、碳交易策略及多园区协同等方式，持续提升纺织园区能源系统的经济性、灵活性与环保效益。

参 考 文 献

[1] 李京蓉. 低碳经济背景下纺织产业经济发展现状及应对策略[J]. 纺织报告，2024，43(12)：39-41.

[2] 孙美娇，庞娟，潘成. 纺织品生产过程中的节能减排与碳排放控制技术[J]. 印染助剂，2024，41(9)：7-12.

[3] 薛燕. “双碳”目标下福建省绿色制造体系建设的实践和思考[J]. 能源与环境，2024(4)：58-60.

[4] 刘忠，黄彦铭，朱光明，等. 含风-光-电氢混合储能的多微电网系统容量优化配置方法[J]. 发电技术，2025，46(2)：240-251.

[5] 陈子航，朱彦卿，宋宁峰. 风光水储联合发电系统优化调度方法研究[J]. 武汉大学学报(工学版)，2024，57(12)：1775-1784.

[6] 时庆，朱亮亮. 基于综合潮流的电热耦合系统分布式能源规划[J]. 湖北电力，2019，43(3)：1-9.

[7] 杨伟，钱进，王康，等. 基于多能互补的区域综合能源系统低碳经济调度[J]. 贵州大学学报(自然科学版)，2025，42(2)：48-56.

《国际纺织导报》欢迎投稿

https://gfzb.cbpt.cnki.net mc@dhu.edu.cn