

基于改进PSO算法的风-光-储一体化微能源网 优化运行研究

廖天阳

(广东中南股份有限公司, 广东 韶关 512000)

摘要: 微能源网可实现多种能源的转换, 有效解决能源供需匹配和可再生资源利用问题, 满足用户对电能、热能和冷能的需求, 是能源互联中的重要发展单元, 实现能源体系向清洁低碳转型, 具有推广价值。在分析各类设备的运行特性的基础上, 建立微能源网的系统模型, 提出以经济性、环保性和能源利用率为目标联合优化策略, 使微能源网系统综合效益最大化。求解算法方面, 提出基于轮盘赌算法的改进 PSO 算法, 实现粒子搜索机制的多元化, 提高计算准确度的同时, 确保 PSO 算法实现全局最优。选取某工业园作为仿真分析对象, 算例数据表明, 包含风 - 光 - 储设备、冷 / 热 / 电联供和电 / 气转换设备的微能源网系统能实现能源均衡配置。多目标联合优化后, 综合协调经济性、环保性和能源利用率三个目标达成系统运行最优, 使系统综合效益最大化。

关键词: 风 - 光 - 储; 微能源网; 多目标优化; 改进 PSO 算法

Research on energy optimization operation of wind-photovoltaic-storage micro-energy network based on improved PSO algorithm

LIAO Tianyang

(Guangdong Zhongnan Co., Ltd., Shaoguan 512000, China)

Abstracts: Micro-energy network can achieve the conversion of multiple energy sources, effectively solve the problem of energy supply and demand matching and renewable resource utilization, meet the needs of users for electricity, heat and cold energy, and is an important development unit in energy interconnection. It realizes the transformation of the energy system to clean and low-carbon, and has promotion value. On the basis of analyzing the operational characteristics of various devices, this article establishes a system model of the micro energy grid and proposes a joint optimization strategy aimed at economy, environmental protection, and energy utilization efficiency, in order to maximize the comprehensive benefits of the micro energy grid system. In terms of solving algorithms, an improved PSO algorithm based on roulette wheel algorithm is proposed to diversify particle search mechanisms, improve computational accuracy, and ensure that the PSO algorithm achieves global optimization. Selecting an industrial park as the simulation analysis object, the example data shows that a micro energy grid system containing wind light storage equipment, cold/hot/electricity combined supply, and electricity/gas conversion equipment can achieve energy balance configuration. After multi-objective joint optimization, by comprehensively coordinating the economic, environmental, and energy utilization goals, the optimal system operation is achieved, maximizing the comprehensive benefits of the system.

Key words: wind-solar-storage; micro-energy network; multi-objective optimization; improved PSO algorithm

0 引言

能源互联时代，微能源网是其中一个重要网络单元。微能源网可实现多种能源的转换，满足用户对电能、热能和冷能的需求^[1]，系统主要由微型燃气轮机、分布式风-光伏发电系统、储能系统、制冷设备和能源转换设备构成。微能源网可作为独立的闭环单元，实现能源自足。用户既是能源生产者，也是能源消费者。微能源网可与电力电网实现耦合互联，同时实现削峰填谷的负荷均衡匹配^[2]。而且，微能源网覆盖区域广，在城市偏远地区，能够有效解决能源供应和可再生资源利用问题，切实改善边远地区的生活质量。微能源网对可再生资源的利用，有利于我国能源体系向清洁低碳能源转型^[3]，减少环境污染，达成碳达峰、碳中和目标。

文献[4]以含光热的微能源系统为研究对象，为微能源网内的各个设备建立了数学模型，系统以冷/热/电联合供应提高能源利用效率。文献[5]从运营商和用户角度出发，对微能源系统优化进行研究，研究能源运营商、储能运营商和光伏用户，以配电网为例介绍了微能源网系统中互补系统的构成。文献[6]重点研究了包含冷/热/电联供（CCHP）系统的微能源网，结合实际案例将冷/热/电联供系统与三种能量单独供能系统进行对比分析。文献[7]对包含储能设备的微能源网进行研究，建立了优化调度模型，进而分析了储能设备对微能源网优化的影响。文献[8]

综合考虑冷/热/电联供（CCHP）以及电转气技术（P2G），实现不同类型的能量之间的耦合转换，并建立了数学模型，分析了不同能源类型的微能源网优化运行。文献[9]通过分析微能源网的碳排放，制定最低碳排放优化运行策略，以系统运行成本和碳排放量为目标，得到优化运行策略。

综上，有关微能源网的研究取得了较多成果。但是对于综合考虑风-光-储、冷/热/电联供以及电转气的系统性研究较少。本文首先建立了整个微能源网的系统模型，对各类设备的运行特性进行了分析，并建立了数学模型。然后创新性地提出以经济性、环保性和能源利用率目标的联合优化策略，使微能源网系统综合效益最大化。有关求解算法方面，提出基于轮盘赌算法的改进PSO算法，实现了粒子搜索机制的多元化，提高了计算准确度的同时，确保PSO算法不会陷入局部最优。最后，在某工业园区算例中验证了优化策略的有效性。

1 微能源网络模型

微能源网需要满足电负荷、冷负荷和热负荷的能源平衡。微能源网由光伏发电系统、风力发电系统、储能设备、燃气锅炉和制冷设备组成。

1.1 微能源网系统结构

微能源网通过不同能源之间的相互转换协调能源需求，将电-气-冷-热联系起来，系统的基本框架如图1所示。

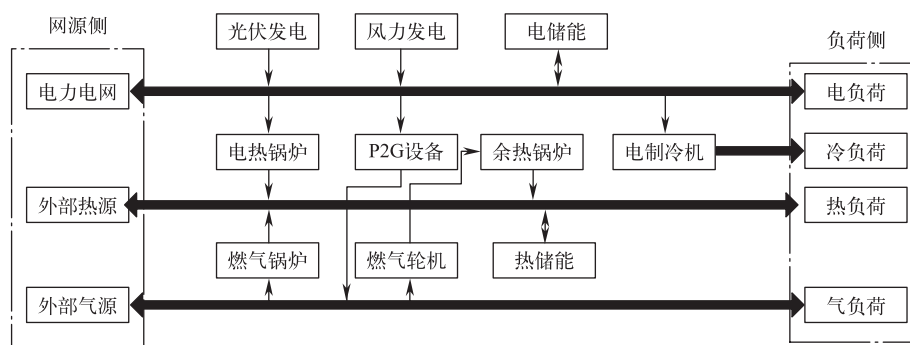


图1 微能源网基本框架

Fig. 1 Micro energy grid basic framework

微能源网按照多能互补的方式运行, 实现不同能源之间的转换, 并且能够解决环境污染和应对能源危机问题。系统内的清洁能源有光伏发电、风力发电以及外部天然气源, 削减化石能源的使用。储能方面包括电储能和热储能。负荷主要包括用电负荷、气动负荷、制冷设备和供热设备。

1.2 冷/热/电联供特性

冷/热/电联供简称CCHP, 利用天然气清洁能源和电能实现供热、供冷。CCHP机组一般由燃气轮机、制冷机和余热锅炉组成, 利用系统内的能源转换, 满足用户的电负荷、热负荷和冷负荷需求。

冷/热/电联供系统中通过热回收装置和热转换装置吸收燃气轮机在发电时产生的热量。冷/热/电联供系统中, 燃气轮机利用燃气产生热能进而发电, 为系统提供电能, 供电过程中, 高温烟气的余热可以驱动吸收式的制冷机进行制冷。同时, 余热锅炉回收余热, 并进行供热, 实现能源多级利用, 提升能源效率的同时, 减少环境污染, 具有较好的经济性和环境友好性^[10]。

冷/热/电联供系统的数学模型如下。

1) t 时刻燃气轮机的供电功率为

$$P_{e,t}^{gt} = \eta^{gt} P_{g,t}^{gt} \quad (1)$$

式中, η^{gt} 为燃气轮机的发电效率系数; $P_{g,t}^{gt}$ 为微型燃气轮机在 t 时刻消耗的天然气功率, 单位为kW。

2) 产热功率为

$$P_{h,t}^{gt} = \zeta^{gt} P_{e,t}^{gt} \quad (2)$$

式中, ζ^{gt} 为电热比。

3) 余热功率为

$$P_{y,t}^{gt} = P_{h,t}^{gt} \frac{1 - \eta^{gt} - \eta_{los}}{\eta^{gt}} \quad (3)$$

式中, η_{los} 为利用余热的损耗率。

4) 电制冷机的功率为

$$P_{h,t}^{ec} = P_{h,t}^{ec} \eta^{ec} \quad (4)$$

式中, $P_{h,t}^{ec}$ 为 t 时刻的输入功率, 单位为kW; η^{ec} 为电制冷机的制冷效率。

5) 吸收式制冷机的功率为

$$P_{y,t}^{ac} = P_{h,t}^{ac} \eta^{ac} \quad (5)$$

式中, $P_{h,t}^{ac}$ 为 t 时刻吸收热量的功率, 单位为kW; η^{ac} 为吸收式制冷机吸收热量与产出冷负荷之比。

1.3 电转气设备特性

电转气设备实现电能和气体燃料的双向转换, 实际是一种气体储能系统。通常是分布式能源, 例如光伏和风能发电, 在电功率输出高峰期, 且完全满足微能源网内的用电设备需求尚有余量的情况下, 将电能转换成可以储存的氢气或者进一步转换为甲烷^[11]。其他时段, 再通过燃气轮机将氢气转换为电能。

电转气设备利用电能将外部输入的水和CO₂通过电解和甲烷化反应, 将电能转换为气体燃料进行储能, 能源转换效率为30%~60%。其转换功率的数学表达式为

$$P_{g,t}^{pg} = \eta^{pg} P_{e,t}^{pg} \quad (6)$$

式中, η^{pg} 为电转气设备的转换效率; $P_{e,t}^{pg}$ 为电转气设备耗电功率, 单位为kW。

1.4 分布式光伏发电系统

分布式光伏发电系统是最常见的可再生资源, 光伏发电是利用光生伏特原理, 将太阳能转换为电能。分布式光伏的输出电功率与环境因素直接相关, 具有典型的时间特性, 其输出电功率的数学表达式为

$$P_{p,t}^{pv} = P_{stc} \frac{G_{p,t}^{pv}}{G_{stc}} \left[1 + k(T_a + 30 \frac{G_{p,t}^{pv}}{1000} - T_r) \right] \quad (7)$$

式中, P_{stc} 为标准测试条件下光伏电池的输出功率, 单位为kW; $G_{p,t}^{pv}$ 为 t 时刻光伏板接收的光照强度, 单位为W/m²; G_{stc} 为标准测试条件下光照强度, 单位为W/m²; k 为功率温度系数; T_a 为外界环境温度, 单位为℃; T_r 为参考温度, 取25℃。

分布式光伏发电系统的典型日功率输出特性如图2所示。

1.5 分布式风机发电系统

风能发电是另一种常见的可再生资源, 可循环利用。将风力发电系统的历史出力数据和对应的风速数据作为基础条件, 可拟合得出风力发电系统的功率特性^[12]。风力发电系统输出功率的数学表达式为

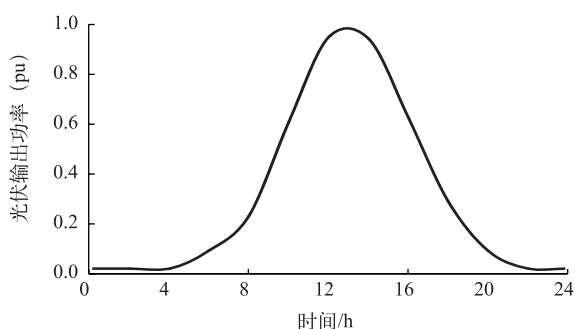


图2 光伏发电系统典型日功率输出特性

Fig. 2 Typical daily power output characteristics of photovoltaic power generation systems

$$P_{p,t}^{\text{wt}} = \begin{cases} 0.5 C_p \rho T_m v^3, & v_{\text{in}} \leq v < v_r \\ P_r^{\text{wt}}, & v_r \leq v \leq v_{\text{out}} \end{cases} \quad (8)$$

式中, C_p 为风能利用系数; ρ 为空气密度, 单位为 kg/m^3 ; T_m 为风电机组叶片的垂直投影面积, 单位为 m^2 ; v 为实际风速, 单位为 m/s ; P_r^{wt} 为风电机组的额定功率, 单位为 kW ; v_{in} 为风电机组的切入风速, 单位为 m/s ; v_r 为风电机组的额定风速, 单位为 m/s ; v_{out} 为风电机组的切除风速, 单位为 m/s 。

分布式风力发电系统的典型日功率输出特性如图3所示。

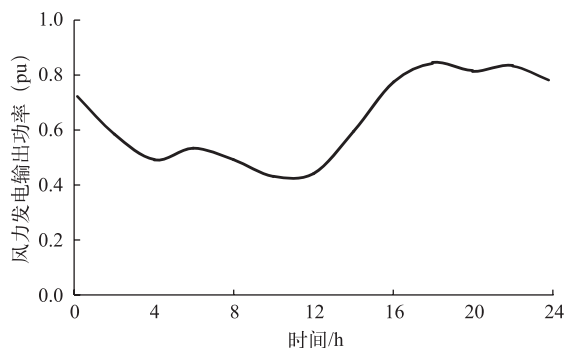


图3 风力发电系统典型日功率输出特性

Fig. 3 Typical daily power output characteristics of wind power generation systems

1.6 储能设备特性

为了平衡可再生能源输出功率的时间特性, 储能技术成为解决功率输出与用电负荷需求不匹配问题的关键^[13]。在微能源网中综合利用多元储能设备, 可有效地协调、分配可再生能源。

(1) 电储能设备

微能源网中, 利用大型蓄电池是储存电能的

一种常见方式, 电储能设备可实现高储低释, 解决供需平衡问题, 但是电储能设备容量有限。

电储能设备容量为

$$E(t) = E(t-1) + (P_{e,t}^{\text{xc}} \eta_c - \frac{P_{e,t}^{\text{xd}}}{\eta_d}) \Delta t \quad (9)$$

式中, $P_{e,t}^{\text{xc}}$ 为 t 时段的电储能设备充电功率, 单位为 kW ; $P_{e,t}^{\text{xd}}$ 为 t 时段的电储能设备放电功率, 单位为 kW ; η_c 为电储能设备的充电效率; η_d 为电储能设备的放电效率。

(2) 热储能设备

微能源网中, 热储能是另一种常用的储能技术。热储能设备的容量为

$$S(t) = S(t-1) + (P_{e,t}^{\text{gx}} \eta_x - \frac{P_{e,t}^{\text{gs}}}{\eta_s}) \Delta t \quad (10)$$

式中, $P_{e,t}^{\text{gx}}$ 为 t 时段的热储能设备储热功率, 单位为 kW ; $P_{e,t}^{\text{gs}}$ 为 t 时段的热储能设备放热功率, 单位为 kW ; η_x 为热储能设备的储热效率; η_s 为热储能设备的放热效率。

2 微能源网优化运行

微能源网系统包含分布式光伏、风力发电系统, 外部电网、热网以及天然气能源, 多元储能设备, 相对于传统的能源供应结构, 微能源网在利用可再生资源、节能减排方面具有独特优势。针对微能源网的运行, 在考虑经济性的基础条件下, 还应考虑环保性和能源综合利用效率。

在环保性方面, 充分利用系统中的分布式光伏、风力发电系统, 对于出力高峰期, 要及时启动储能设备, 或者实现电转气, 进行阶梯利用能源, 优化冷/热/电联供系统, 调节光伏、风电出力间歇性问题, 实现最佳匹配, 在减少能源浪费的同时, 还能有效减少 SO_2 、 CO_2 和氮氧化合物的排放, 兼顾经济性和环保性。

在能源综合利用方面, 冷/热/电联供系统内的可再生资源利用率较高, 系统的节能性较高。综合考虑电负荷、热负荷、冷负荷以及气负荷, 通过联合优化能源利用效率, 实现不同种类能源之间的自动转换以及储能, 同时实现能源就地供应, 降低能源运输损耗, 提高能源利用率^[14]。因

此, 相对于传统的考虑单一经济性的运行优化, 多目标的联合优化能取得更全面的效果。

2.1 目标函数

目标函数应考虑经济性、环保性和能源利用率三个方面的内容, 在满足用户用能需求的基础上, 提升系统的净收益, 降低系统的环境成本, 减少系统能源弃能量。

(1) 经济性

经济性以微能源网系统的日净收益为目标函数, 具体的表达式为

$$F_1(t) = B_{ps}(t) - C_{ps}(t) \quad (11)$$

式中, $B_{ps}(t)$ 为微能源网的总收益; $C_{ps}(t)$ 为微能源网的总成本。

微能源网的总收益为

$$B_{ps}(t) = \sum P_e Q_e(t) + P_h Q_h(t) + P_g Q_g(t) \quad (12)$$

式中, P_e 为供给用户的电价, 元/(kW·h); P_h 为供给用户的热能价格, 元/GJ; P_g 为供给用户的燃气价格, 单位为元/m³; $Q_e(t)$ 为系统内的用电量, 单位为kW·h; $Q_h(t)$ 为系统内的供热量, 单位为GJ; $Q_g(t)$ 为系统内的供气量, 单位为m³。

微能源网的总成本为

$$C_{ps}(t) = \sum (\sum \mu_i P_i + \frac{C_0 - C_{re}}{T^{re}}) \quad (13)$$

式中, μ_i 为设备运行的单位成本; P_i 为设备运行时的功率; C_0 为设备购置时的初始投资; C_{re} 为设备现在的残余价值; T^{re} 为设备剩余的使用寿命。

(2) 环保性

环保性应以环境代价最小为目标, 为此, 取环境代价的倒数作为优化目标函数, 表达式为

$$F_2(t) = 1 / \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^m P_i(t) (P_{ai} + P_{bi}) \delta_i \quad (14)$$

式中, $P_i(t)$ 为第 i 种设备在 t 时段的功率; P_{ai} 为第 i 种设备的环境代价; P_{bi} 为第 i 种设备产生污染物的治理费用; δ_i 为污染物的排放系数。

(3) 能源利用效率

能源利用效率可以用弃能率进行考察。微能源网的弃能率越低, 能源综合利用效率越高。因此, 以弃能率的倒数作为能源利用效率的优化目

标函数, 表达式为

$$F_3(t) = \frac{\sum_{i=1}^T (P_i^{wt} + P_i^{pv})}{\sum_{i=1}^T (P_{i,cr}^{wt} + P_{i,cr}^{pv})} \quad (15)$$

式中, P_i^{wt} 为风力发电机组的发电总量; P_i^{pv} 为光伏发电机组的发电总量; $P_{i,cr}^{wt}$ 为风力发电机组的弃能量; $P_{i,cr}^{pv}$ 为光伏发电机组的弃能量。

综上所述, 系统总的多目标联合优化的目标函数为

$$F(t) = F_1(t) + F_2(t) + F_3(t) \quad (16)$$

2.2 基于改进 PSO 算法的优化求解

粒子群算法 (PSO) 是对简化群体社会模型的仿生算法, 通过观察鸟类动物的觅食行为, 发掘群体中对信息共享的演化优势。PSO 算法依据鸟类飞行空间的约束条件, 将鸟类看作一个粒子进行模拟, 通过粒子运动寻找最佳位置, 进而得到问题的最优解^[15]。

PSO 算法具有收敛速度快、准确度高的特点。但是迭代机制较为单一, 在算法运行后期, 所有粒子均向最优解的位置聚拢, 粒子的特性趋向同化, 丧失多样性, 有可能导致问题求解陷入局部最优。为了解决此问题, 提出基于轮盘赌选择算子的改进 PSO 算法, 改善迭代选择机制。

在一个 d 维的搜索空间内, 存在一个由 n 个粒子组成的种群, 第 i 个粒子所在的位置可表示为 $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{id}]$, 该粒子的飞行速度可表示为 $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, \dots, v_{id}]$, 粒子利用飞行速度进行迭代, 每迭代一次位置, 计算目标函数的适应度。粒子在飞行搜索过程中会找到一个最优位置, 使得目标函数取得最大值, 即找到最优解。

(1) 搜索机制1

种群中的粒子专注于自身周围的搜索空间, 主要用于维持粒子种群的多样性, 搜索表达式为

$$v_{ij}^{k+1} = \omega v_{ij}^k + c_1 r_1 (x_{ij}^k - P_{bi}) \quad (17)$$

式中, v_{ij}^{k+1} 为第 $k+1$ 次迭代中第 i 个粒子第 j 维的速度; ω 为权重系数, 决定搜索能力的强弱; v_{ij}^k 为第 k 次迭代中第 i 个粒子第 j 维的速度; c_1 为学习因子, 决定迭代速度; r_1 为随机数, 保持粒子的

随机性； x_{ij}^k 为第 k 次迭代中第 i 个粒子第 j 维的位置； P_{bi} 为每一次迭代中的最优粒子个体。

(2) 搜索机制2

利用当前最优解和当次迭代最优解，平衡全局搜索能力和局部搜索能力。该模式可避免陷入局部最优解，漏掉全局最优解的情况，搜索表达式为

$$v_{ij}^{k+1} = \omega v_{ij}^k + c_1 r_1(x_{ij}^k - P_{bi}) + c_2 r_2(x_{ij}^k - g_{bi}) \quad (17)$$

式中， c_2 为学习因子； r_2 为随机数； g_{bi} 为当前的最优粒子个体，代表目前得到的最优解。

(3) 搜索机制3

利用当前最优解，专注于局部搜索，有利于提高PSO算法的准确度。搜索表达式为

$$v_{ij}^{k+1} = \omega v_{ij}^k + c_2 r_2(x_{ij}^k - g_{bi}) \quad (18)$$

PSO算法寻找最优解的过程中，根据粒子对历史搜索轨迹的判断，结合轮盘赌算法，选择执行具体的搜索机制。对于单个粒子而言，最初执行任何一种搜索机制的概率均相同，为1/3。随着迭代次数增多，适应度值越高的个体，选择搜索机制1的概率越大，概率与适应度值成正比；选择搜索机制2、3的概率越小，概率与适应度值成反比。改进PSO算法，实现了粒子搜索机制的多元化，具有多样性好、准确度高和不易陷入局部最优的优势。改进PSO算法的基本流程如图4所示。

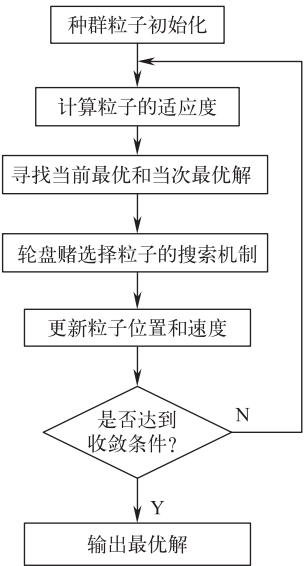


图 4 改进 PSO 算法的基本流程

Fig. 4 Basic process of improving PSO algorithm

3 算例分析

3.1 算例基本数据

选取某工业园作为算例分析对象，验证微能源网优化运行方案的可行性和有效性。工业园区的能源和设备参数见表1。

表 1 园区的能源和设备参数

Tab. 1 Energy and equipment parameters

设备名称	功率最小值 / kW	功率最大值 / kW	运维成本 / (元 / kW)
光伏发电	0	50	0.015
风力发电	0	100	0.032
燃气轮机	0	55	0.045
燃气锅炉	0	40	0.012
外部电网	- 50	50	-

工业园区的能量储存及能量转换设备的效率参数见表2。

表 2 能量转换效率参数

Tab. 2 Energy conversion efficiency

设备名称	效率
电储能设备充电	0.87
电储能设备放电	0.92
热储能设备储热	0.90
热储能设备放热	0.88
锅炉热效率	0.78
热交换机系数	0.55
吸收式制冷机制冷系数	1.33
电制冷机制冷系数	3.5

工业园区的典型日负荷数据见表3。

表 3 典型日负荷数据

Tab. 3 Typical daily load data

时段 / h	电负荷 / kW	热负荷 / kW	冷负荷 / kW
1	32.86	40.37	29.66
2	25.73	33.24	34.31
3	22.18	42.18	26.11
4	28.98	28.27	26.13
5	40.78	32.57	25.79
6	69.01	27.58	38.66
7	82.23	24.02	29.74
8	76.18	20.82	28.68
9	85.84	18.71	39.06
10	97.99	19.42	32.28
11	85.51	29.44	35.51

(续)

时段/h	电负荷/kW	热负荷/kW	冷负荷/kW
12	45.16	27.31	36.96
13	51.61	29.11	36.61
14	81.62	20.91	37.70
15	80.21	18.42	35.93
16	80.94	20.58	30.58
17	79.16	21.67	35.95
18	83.46	28.47	31.33
19	82.41	26.67	30.98
20	90.28	29.57	28.86
21	49.94	31.37	28.51
22	34.59	35.67	26.38
23	25.32	30.33	27.83
24	28.55	32.84	30.71

工业园区的不同种类的能源价格见表4。

表 4 能源价格
Tab. 4 Energy prices

类别	时段	内部价格 / [元 / (kW·h)]	外部价格 / [元 / (kW·h)]
电价	谷时（23:00—7:00）	0.32	0.34
	平时（11:00—14:00、 18:00—23:00）	0.67	0.72
	峰时（7:00—11:00、 14:00—18:00）	1.12	1.17
热价	谷时（21:00—6:00）	0.28	0.29
	平时（6:00-9:00、 12:00—18:00）	0.49	0.51
	峰时（9:00—12:00、 18:00—21:00）	0.67	0.74
冷价	-	0.23	0.25
气价	-	-	0.29

污染物排放的环境成本见表5。

表 5 污染物排放的环境成本

Tab. 5 Environmental costs of pollutant emissions

污染物类型	排放系数 /[g/ (kW·h)]	环境代价 / (元 /kg)	治理成本 / (元 /kg)
CO ₂	359	0.09	0.008
SO ₂	0.002	4.95	0.83
氮氧化物	0.001	6.61	1.65

3.2 优化结果分析

综合考虑经济性、环保性和能源利用率三个方面，以式（15）为目标函数，通过改进PSO算法，对风-光-储一体化的多能源微电网进行优化分析。

多目标联合优化的能源利用情况如图5所示，电负荷供应情况如图6所示，热负荷供应情况如图7所示，冷负荷供应情况如图8所示。

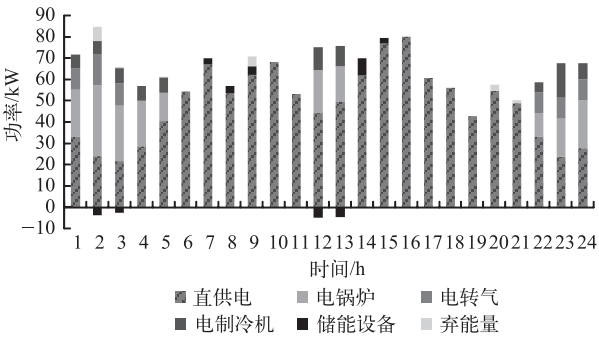


图 5 能源利用情况

Fig. 5 Energy utilization situation

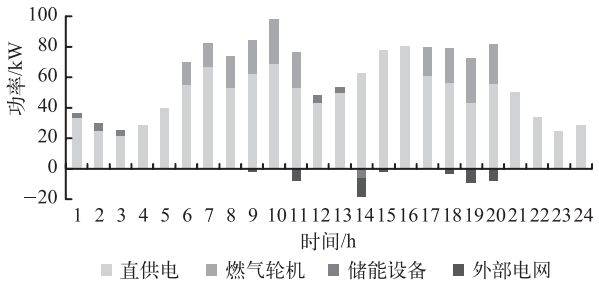


图 6 电负荷供应情况

Fig. 6 Power supply situation

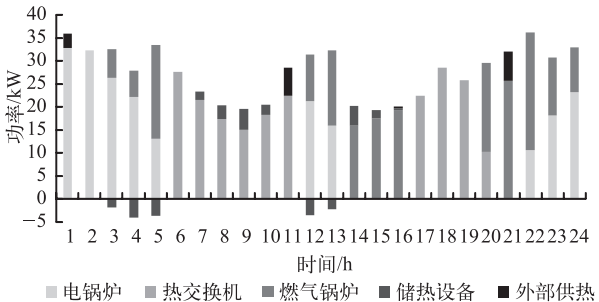


图 7 热负荷供应情况

Fig. 7 Thermal energy supply situation

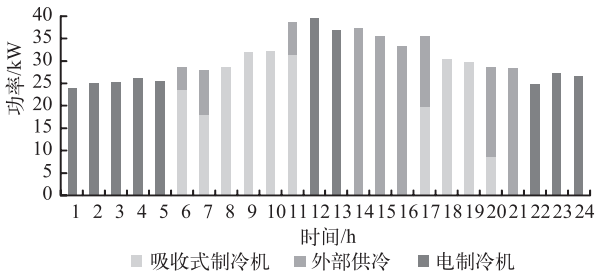


图 8 冷负荷供应情况

Fig. 8 Cold energy supply situation

1) 在光伏、风力发电的同时,电、气能源转换设备均投入运行,电负荷可由风-光发电、燃气轮机发电、储能设备和电网供电。热负荷可由电锅炉、热交换机、储热设备和外部供热网供热。冷负荷可由电制冷机、吸收式制冷机转换热能和外部供冷提供。

2) 用电低谷期,可依靠风-光可再生能源满足用电需求。用电高峰期,燃气轮机启动,储能设备投入,用电负荷由风-光发电系统和燃气轮机发电共同满足,减少对外部电网的供电需求。

3) 电锅炉可以利用风-光发电输出高峰时的多余电能,转换为部分热能供给系统用户,不足部分由燃气锅炉补齐。在风-光发电不满足用电负荷需求时,系统供热全部由燃气锅炉提供。系统内部电能充足时,投运电锅炉制热成本较低,同时外部热价较低,蓄热设备可适当进行热量储存。外部供热的高价阶段,可利用燃气轮机的发电余热,通过热交换机将余热转换,不足的部分由储热设备补充。

4) 风-光发电满足用电需求且尚有余量时,供冷采用电制冷机。燃气轮机投入运行时,吸收式制冷机的出力增加,可转换余热。

经过多目标联合优化,单日系统净收益为700.6元,环境成本为27.86元,弃能率为6.38%。根据多目标优化的结果可知,系统净收益不是最高的,环境成本和弃能率也并非最低值,但协调三个目标达成系统运行最优,使系统综合效益最大化。

4 结束语

微能源网包含多种能源,储能设备、能量转换设备关联整个系统的运行。合理配置资源、适时启动能源转换和储能设备,提升系统的能源利用效率,是微能源网协调运行的关键。微能源网系统内的风-光-储一体化、冷/热/电联供和电转气设备,在降低运行成本的同时,可有效减少环境污染,实现能源互补利用。在分析各能源、设备和负荷的运行特性基础上,利用改进PSO算法对微能源网的运行进行多目标优化,得到如下

结论:

1) 分析微能源网的供能结构,建立冷/热/电联供、电转气及风-光-储设备的数学模型,为系统优化运行奠定基础。

2) 提出基于轮盘赌算法的改进PSO算法,实现粒子搜索机制的多元化,确保种群多样性,提升求解准确度,为获得微能源网多目标优化运行的最优解提供有力保障。

3) 选取某工业园作为算例分析对象,利用改进PSO算法对园区微能源网进行多目标优化。从能源利用方面看,包含风-光-储设备、冷/热/电联供和电转气设备的微能源网系统能实现能源均衡配置,满足园区内部能源需求;从供电角度分析,用电低谷期,依靠风-光发电可满足用电需求,用电高峰期,燃气轮机启动,储能设备投入,共同满足用电需求,无须依赖外部电网供应;从供热角度分析,电锅炉和燃气锅炉分时段运行,在充分利用可再生资源的同时,尽量减少外部供热;从供冷角度分析,风-光发电满足用电需求且尚有余量时,供冷采用电制冷机,燃气轮机投入运行时,供冷采用吸收式制冷机。

4) 多目标联合优化后,单日系统净收益为700.6元,环境成本为27.86元,弃能率为6.38%,综合协调经济性、环保性和能源利用率三个目标达成系统运行最优,使系统综合效益最大化。

参考文献

- [1] 俞发强,张名捷,程语,等.需求响应下的并网型风-光-沼微能源网优化配置[J].上海交通大学学报,2023,57(1):10-16.
- [2] 马喜平,杨燕静,沈渭程,等.基于改进量子粒子群算法的微能源网优化运行[J].电网与清洁能源,2022,38(7):47-53.
- [3] 米阳,付起欣,赵海辉,等.考虑源荷多区间不确定集和综合需求响应的微能源网鲁棒优化调度[J].上海交通大学学报,2023,64(22):43-51.
- [4] 任洪波,王广涛,李琦芬,等.供需互动视角下区域综合能源系统设备配置与运行策略协同优化

- 研究[J]. 热力发电, 2020, 49(3): 60-67.
- [5] 顾洁, 白凯峰, 时亚军. 基于多主体主从博弈优化交互机制的区域综合能源系统优化运行[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3119-3134.
- [6] 匡慧子, 李薇, 王旭, 等. 太阳能“冷-热-电”联供系统集成建模与运行优化[J]. 太阳能学报, 2023, 44(5): 80-87.
- [7] 伍仰金, 郭茜婷, 郑传良, 等. 考虑储能共享的风光储集群联合优化运行及竞标策略[J]. 电气工程学报, 2023, 18(1): 219-227.
- [8] 陈莉, 杨飏. 含P2G-CCHP的综合能源系统两阶段鲁棒优化模型[J]. 电力学报, 2022, 37(5): 422-429.
- [9] 冯奕, 应展烽, 颜建虎. 考虑碳排放成本的多能互补微能源网储能装置优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 92-99.
- [10] 崔文倩, 魏军强, 赵云灏, 等. 双碳目标下含重力储能的配电网多目标运行优化[J]. 电力建设, 2023, 44(4): 45-53.
- [11] 朱娟娟, 段奕琳, 闫群民, 等. 基于BAS-IMOPSO算法的风电系统储能优化配置[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 180-187.
- [12] 陈曦, 付文龙, 张海荣, 等. 考虑新能源发电不确定性的含微电网群共享储能优化调度[J]. 电网技术, 2023, 12(3): 18-25.
- [13] 马瑾, 马少清, 马睿. 基于源网荷储协调优化的主动配电网运行[J]. 自动化应用, 2023, 64(5): 208-211.
- [14] 李军徽, 孙大朋, 朱星旭, 等. 光伏高渗透率下分布式储能群间协同的电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 29(9): 57-63.
- [15] 刘子祺, 苏婷婷, 何佳阳, 等. 基于多目标粒子群算法的配电网储能优化配置研究[J]. 综合智慧能源, 2023, 37(7): 35-41.

作者简介

廖天阳(1971—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为可再生能源优化调度、能源节能环保等。

(收稿日期: 2023-06-24)