

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201556

基于排序交叉优化算法的冷热电联供微电网经济调度

李 坚, 吴亮红, 张红强, 王 维, 贾 睿

(湖南科技大学信息与电气工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为提高冷热电联供微电网运行的灵活性, 减少运行成本, 将地源热泵引入微网, 建立一种包含风机、光伏、微型燃气轮机、地源热泵、燃料电池、蓄电装置和蓄冷/热装置的冷热电联供型微电网经济优化模型, 并提出一种排序交叉优化算法对各机组的出力进行优化调度。同时, 为了满足负荷平衡等式约束和各机组出力约束, 提出一种启发式约束处理方法。为验证所提模型和算法的有效性, 对微电网夏季和冬季典型运行场景进行了仿真实验, 并与其他四种优化算法的结果进行比较。实验结果表明, 所提出的算法具有良好的全局收敛性能, 所求成本较其他四种优化算法更低, 是一种求解冷热电联供微电网经济调度的有效方法。

关键词: 排序学习; 纵横交叉算法; 冷热电联供; 地源热泵; 经济调度

Microgrid economic dispatch of combined cooling, heating and power based on a rank pair learning crisscross optimization algorithm

LI Jian, WU Lianghong, ZHANG Hongqiang, WANG Wei, JIA Rui

(School of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: To improve the flexibility of a combined cooling, heating and power microgrid and reducing operation costs, the ground source heat pumps are integrated into the microgrid in this paper. An economic optimization model with fans, photovoltaics, micro gas turbines, ground source heat pumps, fuel cells, and electricity storage is established. To optimize the output of each unit, a rank pair learning-based Crisscross Optimization algorithm is developed. A heuristic constraint processing method is developed to satisfy the constraints of load balance and output of each unit. To verify the effectiveness of the proposed model and algorithm, an simulation experiment consisting of typical operation scenarios in summer and winter is conducted, and the results are compared with other four optimization algorithms. The results indicate that the proposed algorithm has good global convergence performance and lower cost than the other four optimization algorithms. Thus, the proposed algorithm is an effective method for solving the economic dispatch of a combined cooling, heating and power microgrid.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61672226), the Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2018JJ2137), and Excellent Youth Project of Education Department of Hunan Province (No.19B200).

Key words: rank pair learning; crisscross optimization algorithm; CCHP; ground source heat pump; economic dispatch

0 引言

随着当今资源枯竭和环境污染日趋严重, 分布式发电技术日益受到重视^[1-3]。相对于大电网, 微电网运行方式更加灵活, 可调度性更强, 为各种分布

式能源的开发和利用提供了技术支持。冷热电联供(Combined Cooling Heating and Power, CCHP)系统在发电的同时可以将燃气轮机产生的废热用于制热或制冷, 实现能量的梯级利用, 并减少系统的污染气体排放量, 具有良好的社会和经济效益。近年来, CCHP 系统在微电网中得到了广泛的应用^[4-6]。

对于冷热电联供微电网优化运行, 国内外已有大量相关研究。文献[7]提出了描述冷热电联供系统组成和结构的母线式结构, 建立了日前动态经济调

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61672226); 湖南省自然科学基金项目资助(2018JJ2137); 湖南省教育厅优秀青年项目资助(19B200)

度的 0-1 混合整数规划模型, 并通过算例测试了该模型的有效性与合理性。文献[8]在分时电价及微电网并网运行条件下, 建立了计及附加机会收益的冷热电联供型微电网动态调度模型, 采用基于模拟退火的粒子群优化算法对调度模型进行动态寻优, 从而求得调度周期内各电源的最佳经济出力。文献[9]建立了含能源转换设备和储能设备的 CCHP 系统模型, 采用 Cplex 优化工具箱进行求解, 结果表明加入储能装置能有效提高 CCHP 系统的能量利用率。文献[10]构建了一种热电联供供需双侧多能协同优化策略模型, 并运用带个体差异蚁群算法与粒子群优化算法相结合的组合算法(PSO-IVACO)进行求解, 结果表明该模型能够有效提高新能源的消纳。文献[11]建立了电能与天然气不同费率结构的协同优化模型, 并运用改进的粒子群算法对所提经济目标进行优化求解, 算例分析表明该方法能够平抑清洁能源的波动, 实现多种电能的完全消纳。文献[12]从能量管理方向出发, 提出了一种含主从博弈的能量互联网系统分布式能源管理模型, 并通过不同的算例验证了该模型的鲁棒性与可行性。

地源热泵作为一种高效的可再生能源利用设备, 近年来备受关注。因此本文将地源热泵与 CCHP 结合, 建立一种包含地源热泵、风机、光伏、微型燃气轮机、燃料电池、蓄电装置和蓄冷/热装置的冷热电联供微电网系统。在满足各种约束的条件下, 建立了以各个分布式电源的发电成本和运行成本最小为目标函数的经济优化模型, 并提出一种排序交叉优化算法(Rank Pair Learning Crisscross Optimization, RPLCSO)对模型进行求解。实验结果表明, 与其他四种智能优化算法相比, 本文提出的算法具有良好的优化性能, 是一种求解冷热电联供微电网优化调度的有效方法。

1 冷热电联供设备模型

冷热电联供型微电网的主要设备有微型燃气轮机、溴冷机组、地源热泵机组、燃料电池、风力发电机组、光伏、储电装置和储冷/热装置。同时, 该系统与大电网相连, 可以在电价较低时从电网购电, 电价较高时向电网售电。该系统所需的天然气由燃气公司提供, 其系统结构如图 1 所示。

1.1 微型燃气轮机模型

微型燃气轮机是一种小型热力发电机, 在发电的同时可以回收余热为用户供热, 其发电效率与输出功率的关系可以用式(1)表示^[13]。

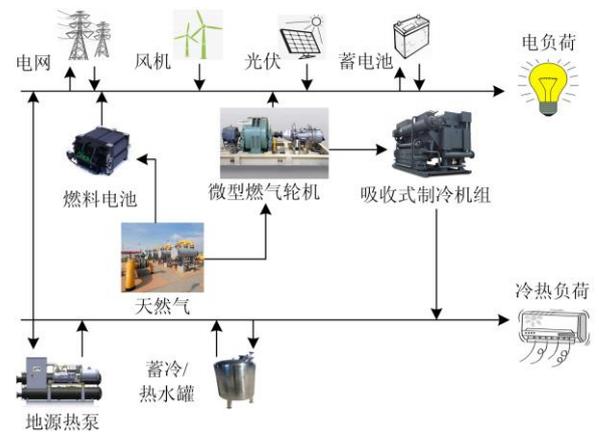


图 1 冷热电联供微电网结构图

Fig. 1 Microgrid structure diagram of CCHP

$$\eta_{MT} = 0.0753\left(\frac{P_{MT}}{65}\right)^3 - 0.3095\left(\frac{P_{MT}}{65}\right)^2 + 0.4174\frac{P_{MT}}{65} + 0.1068 \quad (1)$$

式中: P_{MT} 为微型燃气轮机输出的电功率大小; η_{MT} 为微型燃气轮机的发电效率。

1.2 吸收式制冷机模型

制冷机一般选用溴化锂吸收式制冷机, 将微型燃气轮机排出的废热制冷。其模型表示为^[14]

$$Q_{MT}(t) = \frac{P_{MT}(t)(1 - \eta_{MT} - \eta_L)}{\eta_{MT}} \quad (2)$$

$$Q_{AM}(t) = \eta_{rec} C_{AM} Q_{MT}(t) \quad (3)$$

式中: $Q_{MT}(t)$ 、 $Q_{AM}(t)$ 分别为 t 时刻微型燃气轮机的废热排放量和吸收式制冷机组的制冷功率; η_L 为微型燃气轮机的热损失系数; η_{rec} 为吸收式制冷机组的废热回收率; C_{AM} 为吸收式制冷机组的制冷系数。本文中 η_L 、 η_{rec} 、 C_{AM} 分别取 0.15、0.85、1.36。

1.3 燃料电池模型

燃料电池是一种将燃料经过化学反应产生电能的设备, 具有能量转化率高、污染排放少等特点, 其工作效率与输出功率的关系可表示为^[15]

$$\eta_{FC} = -0.0023P_{FC} + 0.6735 \quad (4)$$

式中: η_{FC} 为燃料电池的工作效率; P_{FC} 为燃料电池的输出电功率。

1.4 地源热泵机组模型

地源热泵是一种利用浅层地热资源, 既能制热又能制冷的高效节能空调技术, 比常规中央空调节能 40% 以上, 在大型公共建筑节能中潜力巨大。其模型为^[16]

$$Q_{HP}(t) = C_{OP} \cdot P_{HP}(t) \quad (5)$$

式中: $Q_{HP}(t)$ 、 $P_{HP}(t)$ 分别为 t 时刻地源热泵产生的冷/热功率和地源热泵消耗的电功率; C_{OP} 为地源热泵的制冷/热系数, 本文中 $C_{OP} = 4$ 。

1.5 储能装置模型

储能装置包括电储能和冷热储能装置。电储能装置一般采用蓄电池, 冷热储能装置采用水蓄冷设备。它们具有相似的运行特征, 其模型可表示为^[17]

$$S_{ES}(t) = \begin{cases} S_{ES}(t-1) \cdot (1-\tau) + P_{ES, ch}(t) \cdot \eta_{ch} \cdot \Delta t \\ S_{ES}(t-1) \cdot (1-\tau) - P_{ES, dis}(t) / \eta_{dis} \cdot \Delta t \end{cases} \quad (6)$$

式中: $S_{ES}(t)$ 、 $S_{ES}(t-1)$ 分别为储能装置 t 和 $t-1$ 时刻的容量; τ 为储能损失系数; $P_{ES, ch}(t)$ 、 $P_{ES, dis}(t)$ 分别为 t 时刻储能装置充放能功率大小; η_{ch} 、 η_{dis} 为充放能效率。

2 冷热电联供微电网优化模型

2.1 目标函数

考虑冷热电联供型微电网并网运行时经济效益最高, 建立由燃料成本、设备维护成本、启停成本、购售电成本和制冷收益组成的优化模型, 其优化目标函数为

$$\min C = \sum_{t=1}^{24} (C_F(t) + C_{OM}(t) + C_{ST}(t) + C_E(t) - C_{CH}(t)) \quad (7)$$

式中: C 为微电网运行的总成本; $C_F(t)$ 为 t 时刻机组的燃料成本; $C_{OM}(t)$ 为 t 时刻机组的维护成本; $C_{ST}(t)$ 为 t 时刻的启停成本; $C_E(t)$ 为 t 时刻向大电网购售电收入; $C_{CH}(t)$ 为 t 时刻制冷或制热收入。

(1) 燃料成本

$$C_F(t) = \frac{c}{L_{HV}} \left(\frac{P_{MT}(t)}{\eta_{MT}} + \frac{P_{FC}(t)}{\eta_{FC}} \right) \Delta t \quad (8)$$

式中: c 为天然气价格, 本文取 2.5 元/m^3 ; L_{HV} 为天然气低热值, 本文取 9.7 kWh/m^3 。

(2) 设备维护成本

$$C_{OM}(t) = \sum_{i=1}^N (k_i P_i(t) + k_{ES} |P_{ES}|) \Delta t \quad (9)$$

式中: k_i 为第 i 台机组的维护系数; k_{ES} 为储存装置的维护系数; $P_i(t)$ 为在 t 时刻机组 i 的输出功率大小。

(3) 启停成本

$$C_{ST}(t) = \sum_{i=1}^N \max \{0, U_i(t) - U_i(t-1)\} C_{ST, i} \Delta t \quad (10)$$

式中: $U_i(t)$ 为 t 时刻机组 i 的启停状态, $U_i(t)$ 为 1 时表示机组启动, $U_i(t)$ 为 0 时表示机组关闭; $C_{ST, i}$ 为机组 i 的启动成本, 微型燃气轮机、燃料电池、地源热泵的启动成本分别为 1.94、2.24 和 1.32 元。

(4) 购售电费用

$$C_E(t) = \begin{cases} C_b(t) P_{grid}(t) & P_{grid}(t) > 0 \\ C_s(t) P_{grid}(t) & P_{grid}(t) < 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $C_b(t)$ 、 $C_s(t)$ 分别为 t 时刻的购电价格和售电价格; $P_{grid}(t)$ 为 t 时刻购电量或售电量。

(5) 制冷/热收益

$$C_{CH}(t) = C_{co} Q_{co}(t) \quad (12)$$

式中: C_{co} 为冷/热收益单价, 本文 0.1 元/kWh ; Q_{co} 为 t 时刻卖出的冷/热量。

2.2 约束条件

(1) 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_i(t) + P_{grid}(t) + P_{BS}(t) - P_{HP}(t) = P_{load}(t) \quad (13)$$

$$Q_{AM}(t) + Q_{HP}(t) + Q_{CS}(t) = Q_{load}(t) \quad (14)$$

(2) 各机组出力上下限约束

$$P_i^{\min} \leq P_i(t) \leq P_i^{\max} \quad (15)$$

(3) 爬坡功率约束

$$P_i(t) - P_i(t-1) < UR_i \quad (16)$$

$$P_i(t-1) - P_i(t) < DR_i \quad (17)$$

(4) 启停约束

$$(T_i^{\text{on}}(t-1) - T_{U, i})(U_i(t-1) - U_i(t)) \geq 0 \quad (18)$$

$$(T_i^{\text{off}}(t-1) - T_{D, i})(U_i(t) - U_i(t-1)) \geq 0 \quad (19)$$

(5) 电网交换功率约束

$$P_{grid}^{\min} \leq P_{grid}(t) \leq P_{grid}^{\max} \quad (20)$$

(6) 储能装置约束

$$\lambda_{\min} S_{ES} \leq S_{ES}(t) \leq \lambda_{\max} S_{ES} \quad (21)$$

$$-P_{ch, \max} < P_{ES}(t) < P_{dis, \max} \quad (22)$$

式(13)~式(22)中: $P_{BS}(t)$ 、 $Q_{CS}(t)$ 分别为 t 时刻蓄电池和蓄冷装置的出力大小; $P_{load}(t)$ 、 $Q_{load}(t)$ 分别为 t 时刻的电负荷与冷负荷; P_i^{\max} 、 P_i^{\min} 分别为机组 i 输出功率上限和下限; P_{grid}^{\max} 、 P_{grid}^{\min} 分别为与电网交换功率的上限与下限; UR_i 、 DR_i 分别为可控机组爬坡上限与下限; $T_i^{\text{on}}(t)$ 、 $T_i^{\text{off}}(t)$ 分别为机组 i 在 t 时段开关机的时间; $T_{U, i}$ 、 $T_{D, i}$ 分别为机组 i 的最小开机与关机时间; S_{ES} 为储能装置的额定容量; λ_{\min} 、 λ_{\max} 分别为储能装置最小与最大容量系数; $P_{ch, \max}$ 、 $P_{dis, \max}$ 分别为储能装置最大充放能功率。

3 排序交叉优化算法

3.1 纵横交叉优化算法

纵横交叉优化(Crisscross Optimization, CSO)算法是一种启发式优化算法。CSO 算法主要由横向交叉操作、纵向交叉操作和选择操作等三种算子组成。其中横向交叉操作是为了提高该算法的全局认知能力^[18],而纵向交叉操作是为了提高该算法的自身认知能力^[19]。此外,CSO 算法采用贪婪的选择策略,这样能保证算法总是向着适应度最优的方向进化。

CSO 算法先产生一个由 M 行 D 列矩阵 $X(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})(i=1, 2, \dots, M)$ 组成的初始种群,其中, M 为种群大小, D 为求解问题的维数。然后通过横向交叉和纵向交叉产生新的子代,这些子代称为中庸解,分别用 $MS_{h,c}$ 和 $MS_{v,c}$ 来表示。最后采用贪婪选择方式选择子代与父代中较优解作为占优解,占优解将作为下一次迭代中的父代。

横向交叉是对种群中两个不同个体的相同维数进行一种算术交叉。如对粒子 X_i 、 X_j 的第 d 维交叉,则它们的子代可以表示为

$$\begin{cases} MS_{h,c}(i,d) = r_1 \times X_{i,d} + (1-r_1) \times X_{j,d} + \\ \quad c_1 \times (X_{i,d} - X_{j,d}) \\ MS_{h,c}(j,d) = r_2 \times X_{j,d} + (1-r_2) \times X_{i,d} + \\ \quad c_2 \times (X_{j,d} - X_{i,d}) \end{cases} \quad (23)$$

式中: r_1 、 r_2 分别取[0,1]的随机数; c_1 、 c_2 分别取[-1,1]的随机数; $X_{i,d}$ 、 $X_{j,d}$ 分别表示父代个体 X_i 、 X_j 的第 d 维变量; $MS_{h,c}(i,d)$ 、 $MS_{h,c}(j,d)$ 分别表示经过横向交叉之后产生的第 d 维子代。

纵向交叉是将种群中同一个体的不同维度进行交叉,如对个体 X_i 的第 d_1 、 d_2 维进行纵向交叉,可以表示为

$$MS_{v,c}(i,d_1) = r \times X_{i,d_1} + (1-r) \times X_{i,d_2} \quad (24)$$

式中: X_{i,d_1} 、 X_{i,d_2} 分别表示父代个体 X_i 中的第 d_1 、 d_2 维; r 为[0,1]之间的随机数; $MS_{v,c}(i,d_1)$ 为纵向交叉后产生的第 d_1 维子代。

纵横交叉完毕后,子代与父代个体进行比较,通过选择算子保留适应度高的个体作为下一次迭代的父代个体,适应度差的个体被淘汰。

虽然纵横交叉算法采用独特的纵向交叉与横向交叉操作使得算法表现出强大的全局收敛能力,但是横向交叉是随机选择两个个体进行交叉,没有优秀个体进行指导使得算法的收敛速度较慢。本文将排序学习策略运用到纵横交叉算法中,通过优秀

个体对较差个体的学习指导,从而提高学习效率和算法的收敛速度。排序学习策略(Rank Pair Learning, RPL)的灵感来自于班级中学生的成对辅导,成绩较差的学生向成绩较好的学生配对学习,往往能够提高整个班级的学习效率。智能优化算法中适应性较差的个体向适应性更优的个体学习,则能提高种群的学习效率。

为了最大程度地提高学习者和被学习者之间的总适应度差异,根据个体的适应度排名对它们进行分类。按照适应度值大小将所有个体平均分配到两组,适应度较优的样本组(GE)与适应度较低的学习组(GL)。随后,GL 中的个体会根据排名向 GE 中的个体一一配对学习(GE 中最优个体对应 GL 中最优个体,GE 中最差个体对应 GL 中最差个体)。而 GE 中的个体为整个种群中较优的个体,向种群中最优个体 G_{best} 学习。RPL 的框架如图 2 所示。由于排序学习的引入,不再随机选择两个子代进行横向交叉,需要对横向交叉算子进行改进,改进后的横向交叉算子如式(25)所示。

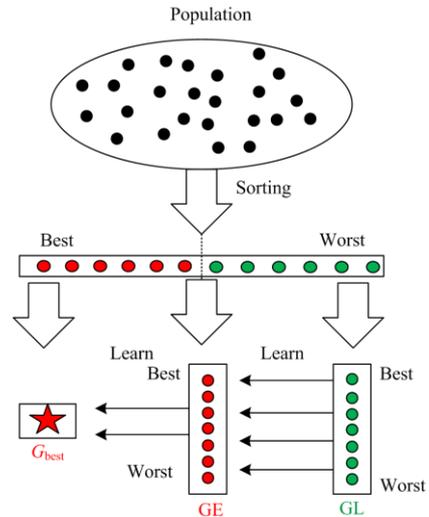


图 2 排序学习框架图

Fig. 2 Framework diagram of ranked pair learning

$$\begin{cases} MS_{h,c}^{GL}(i,d) = r_1 \times X_{i,d}^{GE} + (1-r_1) \times X_{i,d}^{GL} + \\ \quad c_1 \times (X_{i,d}^{GE} - X_{i,d}^{GL}) \\ MS_{h,c}^{GE}(i,d) = r_2 \times G_{best,i,d} + (1-r_2) \times X_{i,d}^{GE} + \\ \quad c_2 \times (G_{best,i,d} - X_{i,d}^{GE}) \end{cases} \quad (25)$$

式中: $X_{i,d}^{GE}$ 为样本组中第 i 个、 d 维个体; $X_{i,d}^{GL}$ 为学习组中第 i 个、 d 维个体; $MS_{h,c}^{GE}(i,d)$ 、 $MS_{h,c}^{GL}(i,d)$ 分别为经过横向交叉之后样本组和学习组产生的中庸解。

3.2 RPLCSO 算法流程

由于 RPLCSO 结合了排序学习策略, 优秀个体引导较差个体学习, 种群中较差个体迅速向种群中较优秀个体学习, 使得算法前期收敛速度非常快, 而 CSO 中的横向交叉机制使得算法表现出强大的全局收敛性能, 纵向交叉机制使得种群保持更好的多样性, 从而易于跳出局部最优解。算法具体流程图如图 3 所示。

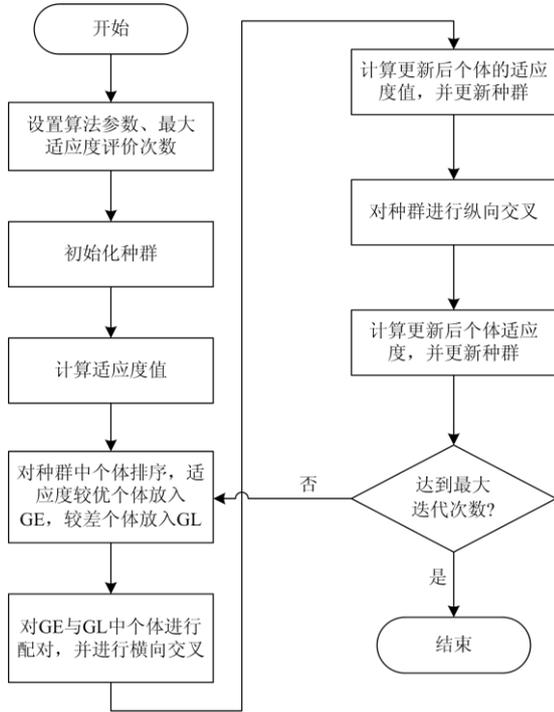


图 3 RPLCSO 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of RPLCSO algorithm

Step1: 设置优化算法的参数, 变量的范围和算法迭代终止条件。

Step2: 在解的可行区域内随机初始化种群。

Step3: 计算每个个体的适应度值。

Step4: 按照适应度值对种群中个体进行排序, 适应度值较优个体放入 GE 组中, 适应度值较差的个体放入 GL 组中。

Step5: GE 与 GL 组中的个体配对并根据式(25)进行横向交叉。

Step6: 计算更新后中庸解的适应度值, 若更优则用该中庸解更新父代。

Step7: 按式(24)对种群进行纵向交叉操作。

Step8: 计算更新后中庸解的适应度值, 若更优则用该中庸解更新父代。

Step9: 判断是否达到最大迭代次数, 若达到则结束, 否则返回 Step4 继续执行。

4 约束处理方法

经过算法更新后的子代可能不能满足等式约束和不等式约束, 本文将边界吸收机制与罚函数法相结合, 来保证解的可行性。具体步骤如下所述。

首先根据机组出力上下限, 按式(26)对种群进行初始化, 式中 $rand()$ 为在 $[0,1]$ 上均匀分布的随机数。

$$P_{i,t} = P_i^{\min} + (P_i^{\max} - P_i^{\min}) \times rand() \quad (26)$$

然后将决策变量排列为 T 行 n 列矩阵, 其中每一行向量表示在 T 时刻所有机组出力大小, 每一列向量表示第 n 台机组在所有时间段内出力大小。

$$P = \begin{bmatrix} P_1^1 & P_2^1 & \dots & P_n^1 \\ P_1^2 & P_2^2 & \dots & P_n^2 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ P_1^T & P_2^T & \dots & P_n^T \end{bmatrix} \quad (27)$$

对于机组的爬坡约束, 当 $t=1$ 时, 令 $P_{i,1}^{\min} = P_i^{\min}$, $P_{i,1}^{\max} = P_i^{\max}$; 当 $t>1$ 时, 各可控机组的出力上下限为

$$P_{i,t+1}^{\max} = \min[P_i^{\max}, (P_{i,t} + UR_i)] \quad (28)$$

$$P_{i,t+1}^{\min} = \max[P_i^{\min}, (P_{i,t} - DR_i)] \quad (29)$$

对于储能装置出力上下限约束, 当 $t=1$ 时, 令

$$P_{i,1}^{\max} = \min[P_i^{\max}, (S^{\max} - S(1))] \quad (30)$$

$$P_{i,1}^{\min} = \max[P_i^{\min}, S(1)] \quad (31)$$

当 $t>1$ 时, 储能出力上下限按如下方式处理。

$$P_{i,t+1}^{\max} = \min[P_i^{\max}, (S^{\max} - S(t))] \quad (32)$$

$$P_{i,t+1}^{\min} = \max[P_i^{\min}, (S^{\min} - S(t))] \quad (33)$$

式中, S^{\max} 、 S^{\min} 分别为储能装置容量的上下限。然后将决策矩阵 P 中的元素与 $P_{i,t}^{\min}$ 、 $P_{i,t}^{\max}$ 对比, 如果超出范围则用边界 $P_{i,t}^{\min}$ 、 $P_{i,t}^{\max}$ 取代该元素。

对于功率平衡等式约束的处理采用罚函数法, 将等式约束转换成无约束的问题来求解; 经过罚函数处理后的目标函数如下:

$$G(t) = \sum_{i=1}^N P_i(t) + P_{\text{grid}}(t) + P_{\text{BS}}(t) - P_{\text{HP}}(t) - P_{\text{load}}(t) \quad (34)$$

$$H(t) = Q_{\text{AM}}(t) + Q_{\text{HP}}(t) + Q_{\text{CS}}(t) - Q_{\text{load}}(t) \quad (35)$$

$$\min C = \sum_{i=1}^{24} (C_F(t) + C_{\text{OM}}(t) + C_{\text{ST}}(t) + C_E(t) - C_{\text{CH}}(t) + \alpha \times G^2(t) + \beta \times H^2(t)) \quad (36)$$

式中, α 、 β 为大于零的惩罚因子。

5 算例分析

为了验证本文所提算法在求解冷热电联供微电

网优化运行中的优越性,以某并网运行的微电网为例进行仿真计算。算例以 24 h 为调度周期(时间间隔为 1 h)。风电和光伏出力按照预测功率出力,风光预测功率及负荷预测功率^[20]如图 4 和图 5 所示。机组各运行参数见文献[21-22];储能设备的参数见文献[23];各个时段电价见文献[24]。优化算法中的关键参数如下:种群大小 $NP=100$,最大迭代次数 $G_{max}=1000$,纵向交叉竞争算子 $P_v=0.8$ 。

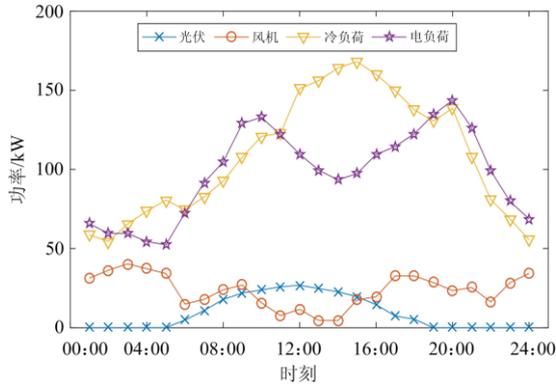


图 4 夏季典型日风光及冷电负荷曲线图

Fig. 4 Curves of wind turbine, photovoltaic and load outputs curve in typical summer day

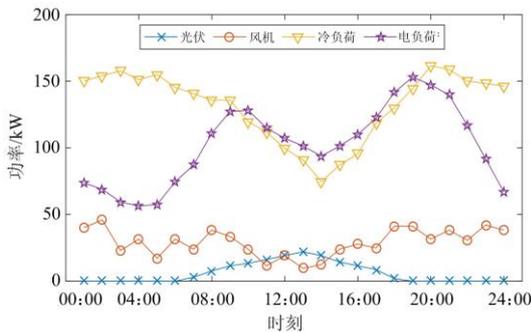


图 5 冬季典型日风光及热电负荷曲线图

Fig. 5 Curves of wind turbine, photovoltaic and load outputs curve in typical winter day

5.1 夏季优化结果

由图 6 可知,在 23:00—06:00 时段微型燃气轮机发电成本较高,但电价便宜,优先考虑从电网买电,不足部分由燃料电池补充。这时蓄电池将便宜的电能储存起来,而微型燃气轮机因为发电成本较高,处于停机状态。07:00—15:00 与 18:00—21:00 时段处于用电高峰时期,电价也较高,不再从电网购电,微型燃气轮机与燃料电池共同发电满足电负荷需求,这时蓄电池将用电低谷时储存的电能释放出来,多余的电能售给电网。整个周期中蓄电池在用电低谷时储存电能,用电高峰时卖出电能,充分运

用峰谷差减小系统的运行成本。

由图 7 可知,由于在 23:00—06:00 时段冷负荷较少,且电价便宜,地源热泵优先制冷,并利用便宜的电价在蓄冷装置中储存一部分冷量。在 07:00—15:00 与 18:00—21:00 时段由于微型燃气轮机参与发电产生冷量,地源热泵不再制冷,蓄冷装置释放储存冷量。在 15:00—18:00 时段电价回落,地源热泵利用该时段便宜电价制冷,并且储存一部分冷量。蓄冷装置在低峰负荷时蓄能,高峰负荷时放能,达到削峰填谷的目标。地源热泵作为一种高效制冷设备,在电价较低且冷负荷较低时代替微型燃气轮机制冷,在用冷负荷较高时辅助燃气轮机制冷,从而降低制冷成本。将地源热泵装置与冷热电联供系统结合能有效地提高热电联供系统的灵活性与经济性。

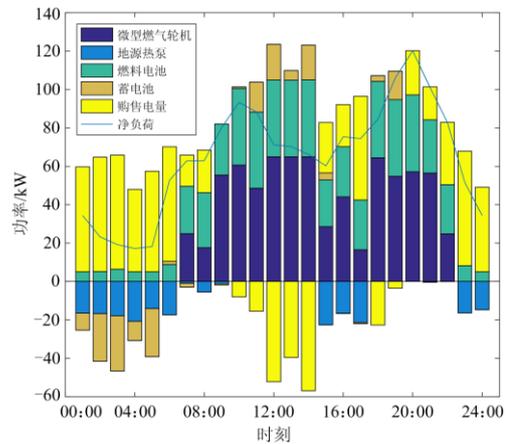


图 6 优化调度后电负荷供给情况

Fig. 6 Electricity load supply after optimization of dispatch

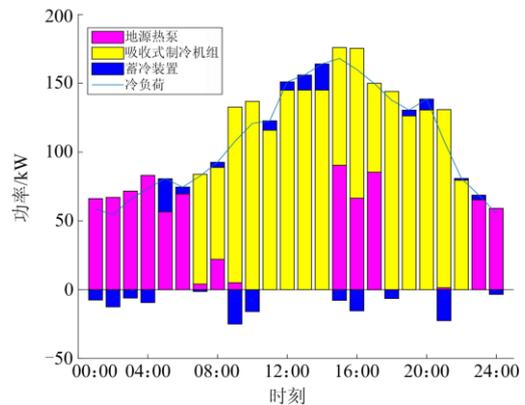


图 7 优化调度后冷负荷供给情况

Fig. 7 Cool load supply after optimization of dispatch

5.2 冬季优化结果

由图 8 和图 9 可知,冬季白天各时段机组出力情况与夏季相似,储能装置在负荷较低时蓄能,负

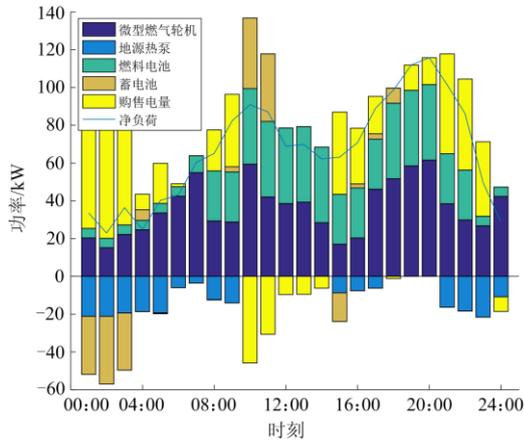


图 8 优化调度后电负荷供给情况

Fig. 8 Electricity load supply after optimization of dispatch

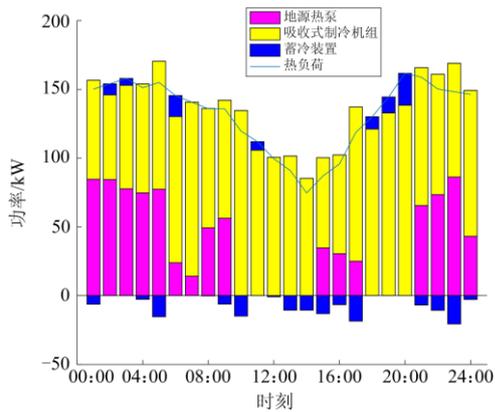


图 9 优化调度后热负荷供给情况

Fig. 9 Heat load supply after optimization of dispatch

荷高时放能, 削峰填谷来降低成本。但冬季晚间所需热负荷较大, 地源热泵不能满足热负荷需求, 晚间微型燃气轮机一直处于运行状态。

5.3 算法性能比较

为验证 RPLCSO 算法在求热电联供微电网优化运行问题上的有效性和优越性, 与其他四种智能优化算法进行对比试验, 即粒子群算法 PSO、自适应差分纵横交叉算法 ADE-CSO^[25]、自适应差分进化算法 ADE^[26]和纵横交叉算法 CSO^[27]。各算法运行 30 次所得成本情况如表 1 所示, 平均适应度进化

表 1 四种算法 30 次运行结果的统计情况

Table 1 Statistics of the results of 30 runs of the four algorithms

算法	$FC_{\text{mean}}/\text{元}$		成本节约率/%	
	夏季	冬季	夏季	冬季
RPLCSO	786	998	—	—
PSO	2 236	2 171	64	54
ADE	1 193	1 815	34	45
CSO	1 178	1 326	33	24
ADE-CSO	1 032	1 189	23	16

曲线如图 10 和图 11 所示。由表 1 可知, RPLCSO 具有良好的全局搜索能力, 相比其他四种优化算法, 获得了最优运行成本。此外, 由图 10 和图 11 可知, 由于引入了排序学习策略, RPLCSO 具有更快的收敛速度。

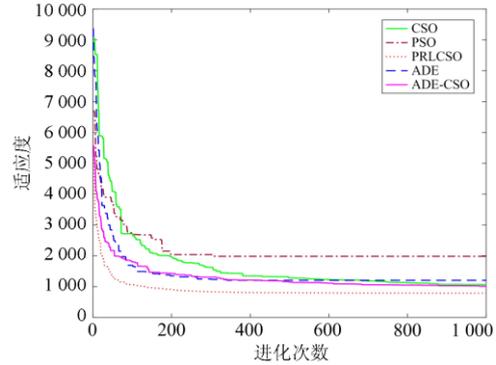


图 10 夏季运行适应度曲线

Fig. 10 Summer operation fitness curve

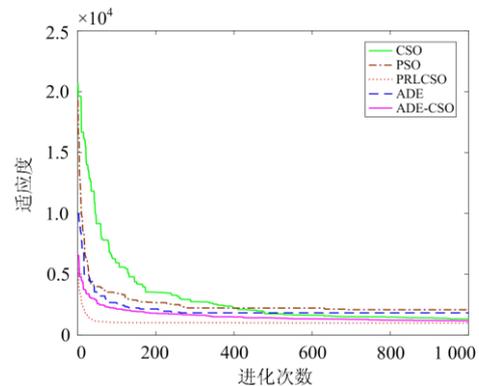


图 11 冬季运行适应度曲线

Fig. 11 Winter operation fitness curve

6 结论

本文将地源热泵与冷热电联供型微电网相结合, 建立了一种含有地源热泵的冷热电联供型微电网经济调度模型。为高效求解所建立的调度模型, 提出了一种排序交叉优化算法。其中: 所提交叉策略在搜索过程中具有避免早熟收敛、摆脱局部最优的潜力; 排序学习策略能有效提高种群中个体的学习效率, 加快收敛。同时, 提出了一种启发式约束处理方法将不可行解调整为可行解。最后, 用所提算法对冷热电联供型微电网经济调度进行了仿真求解。实验结果表明, 加入地源热泵后, 冷热电联供型微电网的经济性与灵活性得到了提高。与其他四种优化算法相比, 本文所提 RPLCSO 算法在求解精度与收敛速度上具有更优的结果, 是一种求解冷热

电联供型微电网经济调度的有效方法。

参考文献

[1] 朱翰超, 马蕊. 考虑需求侧管理的冷热电联供微电网优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(42): 140-146.
ZHU Hanchao, MA Rui. Optimal configuration method of CCHP microgrid considering demand side management[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(42): 140-146.

[2] 贾要勤, 张微, 侯艺杰. 微电网下垂控制的运行策略及 PCC 处联络功率控制[J]. 电源学报, 2019, 17(4): 123-129.
JIA Yaoqin, ZHANG Wei, HOU Yijie. Droop control strategies for microgrid and power control at PCC[J]. Journal of Power Supply, 2019, 17(4): 123-129.

[3] 董开松, 李守东, 马喜平, 等. 基于含储热的热电联产与抽水蓄能的风电消纳协调控制策略[J]. 电源学报, 2018, 16(4): 52-61.
DONG Kaisong, LI Shoudong, MA Xiping, et al. Coordinated control strategy for wind power accommodation based on cogeneration with heat storage and pumped storage[J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(4): 52-61.

[4] 贲保记, 白森珂, 张国. 基于混沌自适应粒子群算法的冷热电联供系统优化[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 124-129.
YUN Baoji, BAI Senke, ZHANG Guo. Optimization of CCHP system based on a chaos adaptive particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 124-129.

[5] 刘辉, 刘强, 张立, 等. 考虑需求侧协同响应的热电联供微网多目标规划[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 43-51.
LIU Hui, LIU Qiang, ZHANG Li, et al. Multi objective programming of thermo electric microgrid considering demand side coordinated response[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 43-51.

[6] 孙强, 谢典, 聂青云, 等. 含电-热-气负荷的园区综合能源系统经济优化调度研究[J]. 中国电力, 2020, 53(4): 79-88.
SUN Qiang, XIE Dian, NIE Qingyun, et al. Research on economic optimization scheduling of park integrated energy system with electricity-heat-cool-gas load[J]. Electric Power, 2020, 53(4): 79-88.

[7] 王成山, 洪博文, 郭力, 等. 冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 26-33.
WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li, et al. A general modeling method for optimal dispatch of combined cooling, heating and power microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 26-33.

[8] 李正茂, 张峰, 梁军, 等. 计及附加机会收益的冷热电联供型微电网动态调度[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 8-15.
LI Zhengmao, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Dynamic scheduling of CCHP type of microgrid considering additional opportunity income[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 8-15.

[9] 刘涤尘, 马恒瑞, 王波, 等. 含冷热电联供及储能的区域综合能源系统运行优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 113-120.
LIU Dichen, MA Hengrui, WANG Bo, et al. Distributed hierarchical coordinated control of active distribution network with multiple microgrids based on sparse communication optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 113-120.

[10] 曾鸣, 韩旭, 李冉, 等. 能源互联微网系统供需双侧多能协同优化策略及其求解算法[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 409-417.
ZENG Ming, HAN Xu, LI Ran, et al. Multi energy synergistic optimization strategy of micro energy internet with supply and demand sides considered and its algorithm utilized[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 409-417.

[11] 熊焰, 吴杰康, 王强, 等. 风光气储互补发电的冷热电联供优化协调模型及求解方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3616-3625.
XIONG Yan, WU Jiekang, WANG Qiang, et al. An optimization coordination model and solution for combined cooling, heating and electric power system with complimentary generation of wind, PV, gas and energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3616-3625.

[12] 张彦, 张涛, 孟繁霖, 等. 基于模型预测控制的能源互联网系统分布式优化调度研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6829-6845.
ZHANG Yan, ZHANG Tao, MENG Fanlin, et al. Model predictive control based distributed optimization and scheduling approach for the energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6829-6845.

[13] 陈柏翰, 冯伟, 孙凯, 等. 冷热电联供系统多元储能及孤岛运行优化调度方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(15): 3231-3243.
CHEN Bohan, FENG Wei, SUN Kai, et al. Multi energy storage system and islanded optimal dispatch method of CCHP[J]. Transactions of China Electrical Society, 2019,

- 34(15): 3231-3243.
- [14] 陈前宇. 基于改进 PSO 算法的微网经济运行优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
CHEN Qianyu. Research on economic operation optimization in micro-grid based on improved PSO algorithm[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [15] 李乐. 微网的经济运行研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
LI Le. Study of economic operation in microgrid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [16] 陈程, 陈星莺, 张健钊, 等. 考虑分时电价的地源热泵系统随机运行优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 57-64.
CHEN Cheng, CHEN Xingying, ZHANG Jianzhao, et al. Stochastic operational optimal strategy for ground source heat pump system under TOU price[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 57-64.
- [17] 吴成辉, 林声宏, 夏成军, 等. 基于模型预测控制的微电网群分布式优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 531-538.
WU Chenghui, LIN Shenghong, XIA Chengjun, et al. Distributed optimal dispatch of microgrid cluster based on model predictive control[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 531-538.
- [18] 蔡妙妆, 李慧, 杜绵阳, 等. 改进纵横交叉算法在电力系统环境经济调度方面的研究[J]. 广东电力, 2017, 30(1): 46-51.
CAI Miaozhuang, LI Hui, DU Jinyang, et al. Research on improved vertical and horizontal intersection algorithm in power system environment and economy dispatching[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(1): 46-51.
- [19] 刘凯. 纵横交叉算法在地区电网无功优化中的研究与应用[D]. 广州: 广东工业大学, 2015.
LIU Kai. Research and application of crisscross optimization algorithm on reactive power optimization of regional power grid[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015.
- [20] 杨志鹏, 张峰, 梁军, 等. 含热泵和储能的冷热电联供型微网经济运行[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1735-1743.
YANG Zhipeng, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Economic generation scheduling of CCHP microgrid with heat pump and energy storage[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1735-1743.
- [21] 罗毅, 刘明亮. 计及风险备用约束的孤网系统环保经济调度[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2705-2711.
LUO Yi, LIU Mingliang. Research on environmental and economic dispatch for isolated microgrid system taken risk reserve constraints into account[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2705-2711.
- [22] 吴雄, 王秀丽, 王建学, 等. 微网经济调度问题的混合整数规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 1-8.
WU Xiong, WANG Xiuli, WANG Jianxue, et al. Economic generation scheduling of a microgrid using mixed inter programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 1-8.
- [23] MARNAY C, VENKATARAMANAN G, STADLER M, et al. Optimal technology selection and operation of commercial building microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 975-982.
- [24] 伍惠铖, 王淳, 左远龙, 等. 基于分时电价和蓄电池实时控制策略的家庭能量系统优化[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 24-30.
WU Huicheng, WANG Chun, ZUO Yuanlong, et al. Home energy system optimization based on time-of-use price and real-time control strategy of battery[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 24-30.
- [25] 梅盼盼, 吴亮红, 张红强, 等. 含风电电力系统动态经济调度的差分纵横交叉优化[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(6): 1179-1187.
MEI Panpan, WU Lianghong, ZHANG Hongqiang, et al. Differential cross optimization of dynamic economic scheduling in wind power system[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(6): 1179-1187.
- [26] LU Y, ZHOU J, QIN H, et al. An adaptive hybrid differential evolution algorithm for dynamic economic dispatch with valve point effects[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(7): 4842-4849.
- [27] MENG A, HU H, HAO Y, et al. Crisscross optimization algorithm for large-scale dynamic economic dispatch problem with valve point effects[J]. Energy, 2015, 93: 2175-2190.

收稿日期: 2020-12-15; 修回日期: 2021-02-24

作者简介:

李 坚(1996—), 男, 硕士, 研究领域为综合能源系统优化运行与控制; E-mail: 963953957@qq.com

吴亮红(1977—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究领域为智能优化算法、电力系统优化调度等; E-mail: lhwu@hnust.edu.cn

张红强(1979—), 男, 博士, 讲师, 研究领域为群机器人系统、群体智能、优化与智能控制等。E-mail: zhanghongqiang@hnust.edu.cn

(编辑 姜新丽)