

基于鸡群算法的微网经济运行优化

胡汉梅, 李静雅, 黄景光

(三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 文中分析微网中微电源包括光伏发电、风力发电、微燃机、柴油发电机和燃料电池的电气特性,构建微电网优化运行的模型,以微网的经济成本和环境成本最小为目标函数,充分考虑了电压越限、功率平衡、微电源出力限制等约束条件,应用鸡群算法进行求解。解决了粒子群算法易早熟、易陷入局部最优解的问题。并通过典型的微网系统进行仿真分析,仿真结果验证了该算法的有效性。

关键词: 微网; 优化运行; 鸡群算法; 微电源

Economic Operation Optimization of Micro-grid Based on Chicken Swarm Optimization Algorithm

HU Hanmei, LI Jingya, HUANG Jingguang

(College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China)

Abstract: This paper analyzes the electrical characteristic of micro power sources in micro-grid including photo-voltaics generation, wind power, micro gas turbine, diesel generators and fuel cells. Taking the economic and environmental cost of the micro-grid as objective function, the paper establishes the multi-objective economic dispatch model with the constraints of over limited voltage, power balance, micro power sources supply. It can apply the CSO algorithm in the optimization which can solve the disadvantage of premature and falling into local optimal solution of the PSO. Simulation results verify the correctness of the proposed model and the availability of the algorithm.

Key words: micro-grid; operation optimization; chicken group algorithm; micro power

0 引言

微网是一种新型能源网络化供应与管理技术,能给可再生能源系统的接入提供便利、避免分布式电源对大电网的冲击、实现需求侧管理及现有能源的最大化利用^[1-4]。

目前,微网运行优化研究使用的主要是智能算法,如粒子群算法、遗传算法、人工神经网络算法、进化算法和模拟退火算法等。文[4]应用改进万有引力搜索算法解决多目标多约束的微网优化运行问题。文[5]采用改进的非劣排序遗传算法对基于多状态建模的独立型微网多目标优化配置模型进行了求解。文[6]运用小生境的遗传算法对多目标模型进

行求解,得到微电网中的最优运行情况。文[7]提出了一种综合效益最大的多目标微电网运行优化调度的模型。在考虑了微电网中分布式电源的一些约束条件的基础上,采用粒子群算法和细菌觅食算法相结合的算法对不同权重系数下的模型进行求解。文[8]利用遗传算法对并网和孤网2种模式下的微电网的运行优化调度模型进行仿真求解,得出经过优化后的微电网运行能够降低系统的运行成本。文[9]采用基于实数编码的改进自适应遗传算法对孤网运行和并网运行的微电网系统进行数值求解,优化各个微电源运行中的功率输出。文[10]研究自适应的遗传算法,将遗传算法和层次分析的方法结合起来,制定出优化微电网运行的不同策略,采用基于自适应的遗传算法对模型进行求解。文[11]采

收稿日期:2016-07-19; 修回日期:2016-08-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51477090)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51477090).

用改进常规细菌觅食算法对微电网优化运行调度模型进行求解,实现对微电网的动态调度。

鸡群算法^[12-13]是一种新生的仿生学启发式算法,原理为:鸡群根据适应度值的大小划分为几组,每组均由一只公鸡、多只母鸡和某些小鸡构成,每种鸡都有各自不同的觅食规律,等级秩序下不同的鸡之间也存在着竞争,因此不同个体通过各自的运动规律来修正自己的位置,减小对应的适应度值,以此来获得更好的觅食位置。鸡群算法通过模仿鸡群的种群智慧可以很好地解决优化问题,文中就是利用鸡群算法来解决微电网运行优化问题。

1 微网优化运行问题数学模型

1.1 微电网的总体结构

此微网中含有3条馈线分别是A、B、C,使得整个网络呈现为放射状。3条馈线通过微网的主隔离装置(一般是静态开关)和配电网相连,这是实现孤网与并网2种运行模式平滑无缝转换的关键,见图1。

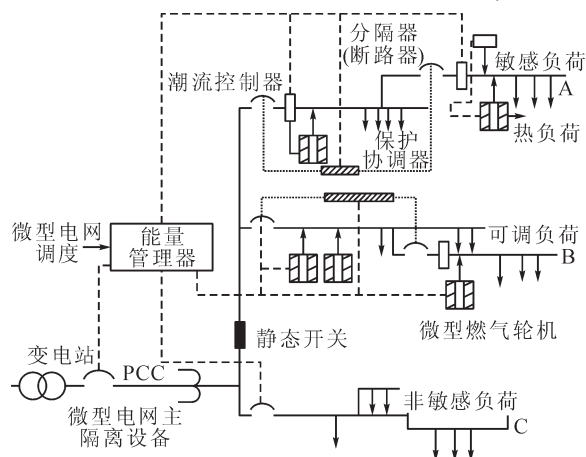


图1 微网基本结构图

Fig. 1 Basic structure of microgrid

文中考虑微网并网运行时,与外部电网之间的电能交易问题、各微源之间的机组组合问题和电能调度问题,从而实现其经济运行。

1.2 并网经济运行优化策略

微网并网运行时,考虑在满足内部负荷需求和保证供电可靠性的前提下,进行经济优化,使得在微网运行成本最小、环境治理费最少的同时可获得利益的最大化。根据上述的要求,制定的策略如下:

1) 风能发电和光伏发电优先考虑,火电机组污染大,能不用则不用;

2) 冷热电三联供系统优化策略:微燃机出力满足冷/热负荷需求;

3) 当蓄电池放电,剩余容量为额定容量的30%时,其循环充放电次数可达1200次,从经济性出

发,考虑蓄电池使用寿命。文中假设蓄电池充放电交替进行,初始状态为额定容量,若放电剩余容量为额定容量的30%时,停止放电,进入充电状态,充电时,达到额定容量时停止充电,进入放电状态。且单位时间内充放电最大功率为额定容量的20%。

4) 在其他机组所发电量无法满足全部电负荷需求时,首先考虑蓄电池放电,若蓄电池尚未达到最大放电限制时,则向外部电网售电。

5) 若蓄电池放电仍无法满足电负荷需求时,则对微燃机的发电成本与购电电价进行比较:若发电成本高于购电电价时,则关闭该机组,从外部电网购电来满足电力负荷需求;若发电成本低于购电电价,则该机组发电来满足电力负荷需求,若在满足需求后,则将发电成本与售电电价进行比较,若发电成本低于售电电价,则考虑多发电并向外部电网出售,否则不多发电。

1.3 微网并网经济运行数学模型

根据上述的优化策略,文中的目标函数是由6部分组成,分别为:①微源的燃料成本;②微源的运行维护成本;③微源的环境成本;④购电成本;⑤售电成本;⑥蓄电池的重置费用。将其综合考虑起来作为微电网的经济成本,通过求取该目标函数的最优解来验证优化策略的可行性。

目标函数为

$$F(P) = \sum_{i=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^N C_i[P(t)] + \sum_{i=1}^N OM_i[P(t)] + \sum_{i=1}^N ENC_i[P(t)] + M_{bat} + [C_b(t) \times P_b(t) - C_s(t) \times P_s(t)] - \sum_{i=1}^N (C_{shi} - C_{sci}) \right\} \quad (1)$$

式(1)中: $F(P)$ 为微网经济运行成本; $C_i[P(t)]$ 为微型燃气轮机和火电机组的燃料成本, i 来表示种类; $OM_i[P(t)]$ 为微型燃气轮机和火电机组的运行维护成本,同理 i 表示种类; $ENC_i[P(t)]$ 为微型燃气轮机和火电机组的环境成本函数; $C_b(t)$ 、 $C_s(t)$ 为 t 时刻的购电价和售电价; $P_b(t)$ 、 $P_s(t)$ 为购买和出售的电量; C_{shi} 、 C_{sci} 为微型燃气轮机的制冷、制热收益; N 为微源数量; T 为整个优化周期时段; S 为蓄电池的购买费用, n 为蓄电池充放电循环次数, P 为蓄电池在24h内充放电次数, $M_{bat} = (T/24) \times (S/nP)^{[14]}$,文中优化时间为1天,蓄电池购买费用低而充放电次数很多,则一般蓄电池重置费用可忽略。

1.4 约束条件

1) 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_i + P_{\text{bat}} + P_{\text{buy}} - P_{\text{sell}} = P_{\text{load}} \quad (2)$$

2) 为电源输出容量约束

$$P_i^{\min} < P_i < P_i^{\max} \quad (3)$$

3) 火电机组爬坡率约束

$$\text{增负荷时: } P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq P_{\text{up},i}; \quad (4)$$

$$\text{减负荷时: } P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq P_{\text{down},i} \quad (5)$$

4) 蓄电池约束

$$P_{\text{bat}}^{\min} < P_{\text{bat}}(t) < P_{\text{bat}}^{\max}; \quad (6)$$

$$S_{\text{socmin}} < S_{\text{soc}}(t) < S_{\text{socmax}} \quad (7)$$

5) 火电机组启停次数约束

在优化约束时间内起或停次数

$$n < T/24 \quad (8)$$

6) 最小启停时间约束

$$\begin{cases} t_{\text{on}} \leq t_{\text{up}} \\ t_{\text{off}} \leq t_{\text{down}} \end{cases} \quad (9)$$

式(2)–(9)中: P_i 为微源的输出功率; P_{bat} 为蓄电池输出功率; P_{buy} 和 P_{sell} 分别为购入和售出电量; P_{load} 为总负荷; $P_i^{\min}$ 和 $P_i^{\max}$ 分别为机组最小出力 and 最大出力; $P_{\text{up},i}$ 和 $P_{\text{down},i}$ 分别为负荷上升和下降的爬坡率; $P_{\text{bat}}(t)$ 为 t 时刻蓄电池的输出功率, 充电时为正值, 放电时为负值; $P_{\text{bat}}^{\min}$ 和 $P_{\text{bat}}^{\max}$ 分别为蓄电池输出功率的下限和上限; $S_{\text{soc}}(t)$ 分别为蓄电池在 t 时刻的剩余容量, S_{socmin} 和 S_{socmax} 分别是蓄电池剩余容量的最小值和最大值; t_{on} 和 t_{off} 为机组运行、停运的时间; t_{up} 和 t_{down} 分别为规定的机组最小运行、停机时间。

2 鸡群算法在微网中的应用

2.1 鸡群优化算法简介

新型的仿生学算法—鸡群优化算法, 它模拟鸡群的等级制度和鸡群的群体活动行为。在特殊的等级制度下鸡群中不同鸡种搜寻食物时存在着竞争。公鸡搜索食物能力强, 适应值小; 母鸡其次; 小鸡搜索食物能力最弱, 适应值最大。

为了简化, 文中通过下列规则理想化鸡群算法:

1) 鸡群按公鸡个数来分组, 每组由一只公鸡、一些母鸡和小鸡组成, 有几只公鸡就有几组。

2) 分组中, 公鸡搜索能力最强, 处于统治地位, 适应值最小; 搜索能力稍差的母鸡紧跟在公鸡周围搜索食物, 适应度值稍大; 其中一些母鸡还带领小鸡, 小鸡搜索能力最差, 只在母鸡周围搜索食物, 适应度值最大, 实现局部搜索功能。

3) 在等级制度下, 分组中公鸡的统治关系和母鸡—小鸡的母子关系将会改变。

4) 通过适应度值来建立这种等级秩序, 并随机分

组建立公鸡与母鸡的关系, 随机建立母鸡—小鸡的母子关系。鸡群中, 适应度值越小的个体越占有优势, 可以优先获得食物, 并且统领适应度值大的个体。适应度值最小的个体对应鸡群中的公鸡, 稍大的对应于母鸡, 最大的对应于小鸡, 在这种等级秩序下它们以组为单位合作, 并按照各自的运动规律更新位置, 进行搜索, 最终搜索到最佳的觅食位置, 即得到最优解。

2.2 位置更新策略

因为不同的鸡种有不同的运动规律, 因此, 以下 3 种个体的位置更新策略各不相同。

2.2.1 公鸡的位置更新策略

适应度好的公鸡能够在更大的范围内搜索食物, 而且比适应度差的公鸡能够优先获得食物实现全局搜索, 它的位置更新受随机选取的其他公鸡位置的影响, 则更新策略见式(10)–(11)。

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t \times [1 + \text{Randn}(0, \delta^2)]; \quad (10)$$

$$\delta^2 = \begin{cases} 1 & f_i \leq f_s \\ e^{\frac{(f_i - f_s)}{|f_i| + \varepsilon}} & f_i \leq f_s \\ s \in [1, RN] & s \neq i \end{cases} \quad (11)$$

式(10)–(11)中: 第 i 只公鸡位置的第 j 维的值表示为 s 表示当前的迭代次数, 表示服从期望值为 0, 方差值为 2 的正态分布随机数, 第 i 只公鸡的适应度为 f_i , 随机选取公鸡 s 的适应度为 f_s , 分母中加上无穷小数 ε , 避免除数为零。

2.2.2 母鸡的位置更新策略

母鸡跟随伙伴公鸡搜索食物, 位置更新受伙伴公鸡位置影响。由于母鸡的偷食行为, 位置更新又与其它公鸡和母鸡有关系, 则更新策略见式(12)–(14)。

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + k_1 \times \text{Rand} \times (x_{r_1,j}^t - x_{i,j}^t) + k_2 \times \text{Rand} \times (x_{r_2,j}^t - x_{i,j}^t); \quad (12)$$

$$k_1 = e^{\frac{f_i - f_{r_1}}{|f_i| + \varepsilon}}; \quad (13)$$

$$k_2 = e^{f_i - f_{r_2}} \quad (14)$$

式(12)–(14)中: Rand 是一个服从 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数, 该母鸡的伙伴公鸡 r_1 的适应度值为 f_{r_1} , k_1 表示其伙伴公鸡对其的影响因子, 其他公鸡和母鸡中随机选取个体 r_2 的适应度值为 f_{r_2} , k_2 为其他鸡对其的影响因子。

2.2.3 小鸡的位置更新策略

小鸡在其母亲周围搜寻食物, 它的搜索能力最差, 位置受到母亲公鸡的影响, 则更新策略见式(15)。

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + P \times (x_{m,j}^t - x_{i,j}^t) \quad (15)$$

式(15)中: 母亲母鸡 m 位置的第 j 维数值为 $x_{m,j}$, 母亲母鸡的位置对小鸡位置的影响因子为 P , 其为随机函数随机生成, 取值范围一般为 $(0, 2)$ 。

2.3 算法步骤

文中提出的优化算法流程见图2,步骤如下:

1)初始化参数。初始配置算法参数,主要是鸡群的大小、迭代的次数、种群关系的更新频率、个体位置的维度、公鸡母鸡小鸡在鸡群中的比例等。

2)初始化鸡群。鸡群按适应度值排序分级,公鸡为前 RN 个个体,小鸡为最末 CN 个个体,其余均为母鸡。将鸡群按公鸡数分成 RN 个组,母鸡随机分配到个组中,确定公鸡和母鸡的伙伴关系。随机选取 MN 个母鸡,随机统领小鸡,确定母鸡小鸡的母子关系。

3)迭代开始,先判断是否需要更新分组,是否需要更新鸡群中的关系,需要则更新鸡群分组和鸡群中的关系;否则,公鸡、母鸡和小鸡的位置分别按照各自的位置更新策略,对各自位置逐个进行更新,同时计算更新位置的适应度值。

4)个体位置更新。新位置的适应度值与原位置适应度值相比,如果新的位置的适应度值小就更新个体位置,否则就保持原来的位置不变。

5)达到最大迭代次数后停止迭代,并输出最优解,否则回到第3步,循环迭代进行搜索。

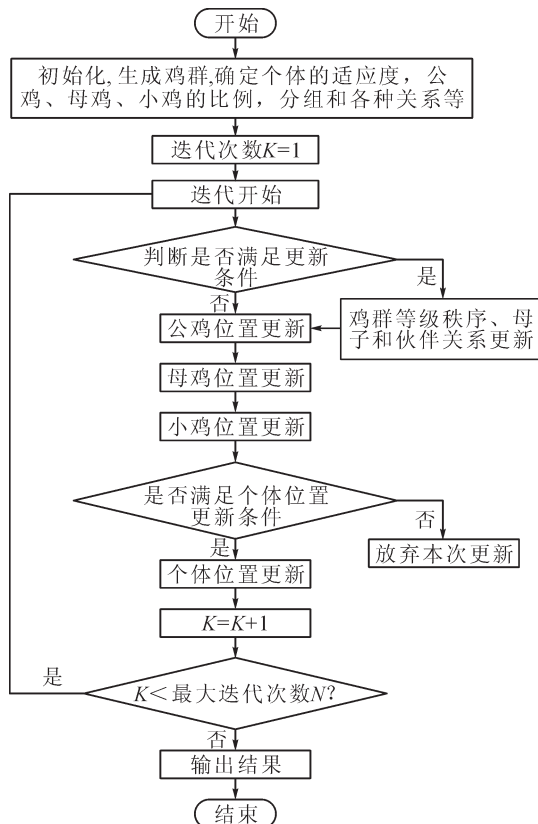


图2 算法流程

Fig. 2 The process of algorithm

3 算例

文中采用微网结构,见图3,图4-11为算例的

基础数据,能源价格表详见文[15],设备技术性能参数详见文[16],环境效益折价详见文[17-19]。夏季典型日冷电负荷曲线的数据来源于文[20]。设定鸡群规模为100,公鸡、母鸡、小鸡各占20%、60%、20%,母子关系影响因子 M 取值:0.4~0.9,鸡群关系更新代数5,迭代总次数为300。

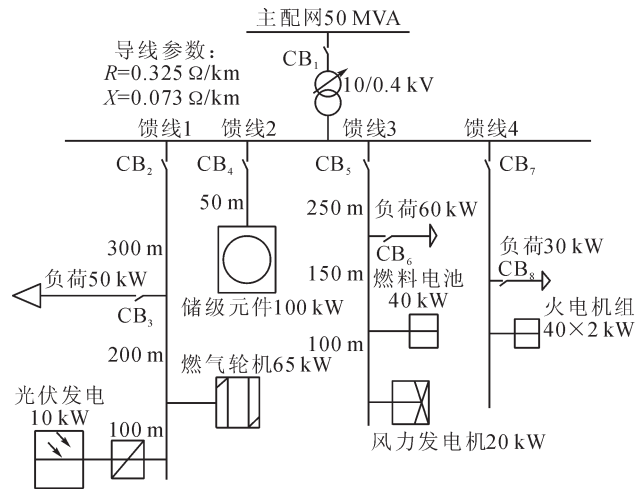


图3 系统仿真图

Fig. 3 System simulation diagram

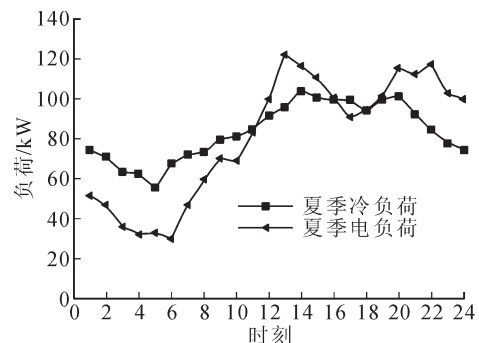


图4 冷电负荷曲线

Fig. 4 Cold electric load curve

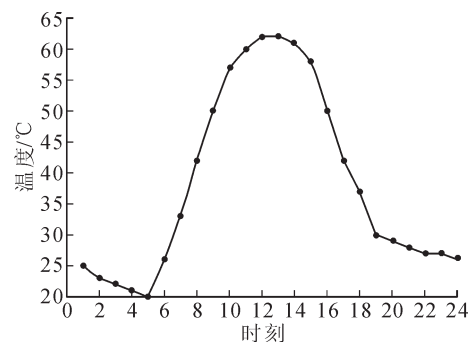


图5 电池板温度曲线

Fig. 5 Ambient temperature curve

火电机组出力曲线图见图12。从图12可知,火电机组消耗燃料及其环境治理费用比较高,则优化结果显示,火电机组在优化时间段内未出力。微源出力曲线见图13,购/售电曲线图见图14。

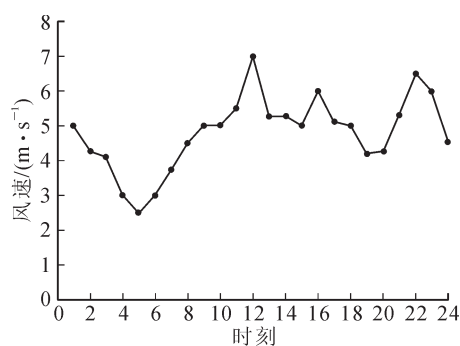


图 6 风速曲线

Fig. 6 Wind velocity curve

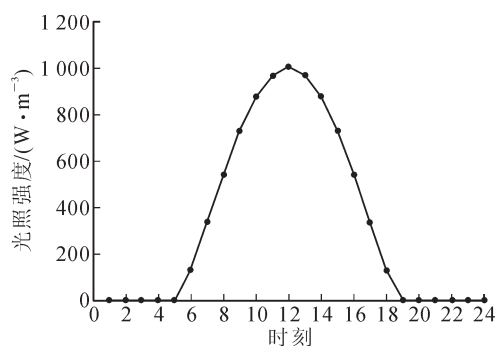


图 7 光照强度曲线

Fig. 7 Light intensity curve

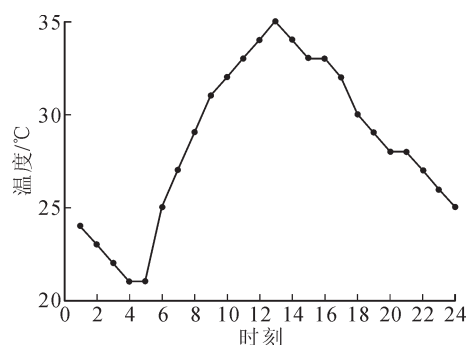


图 8 环境温度曲线

Fig. 8 Environmental temperature curve

以谷时段(23:00-6:00 时刻)为例进行分析, 见图 9-14。

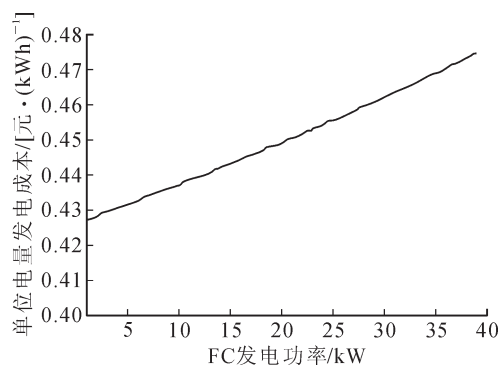


图 9 FC 发电功率图

Fig. 9 FC power generation diagram

根据图 9、10, 谷时段 MT、FC 发电成本均大于

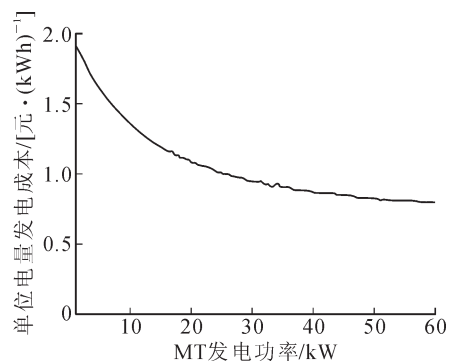


图 10 MT 发电功率图

Fig. 10 MT power generation diagram

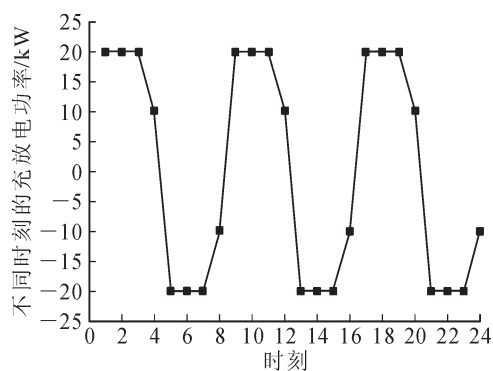


图 11 蓄电池充放电图

Fig. 11 Battery charge and discharge diagram

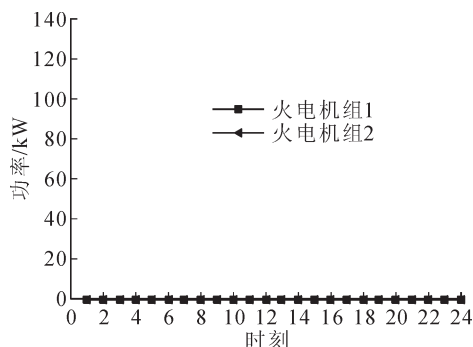


图 12 火电机组出力曲线图

Fig. 12 Output curve of thermal power plant

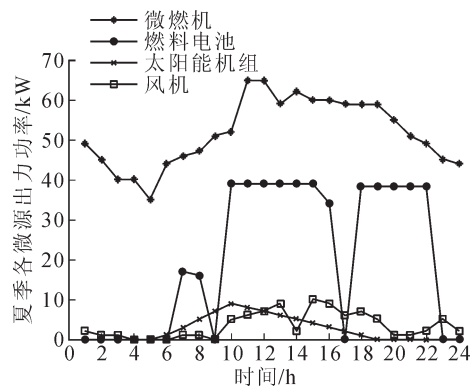


图 13 微源出力曲线图

Fig. 13 Output curve of microsource

购电电价和售电电价, 因此谷时段 FC 不发电, MT 在满足冷负荷需求后不多发电。但若仍有剩余的发电

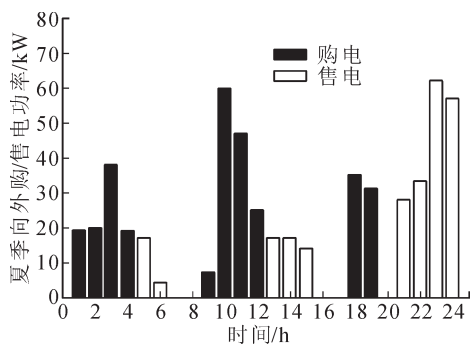


图 14 购/售电曲线图

Fig. 14 Buy/sell electricity curve

电量,则应先考虑给蓄电池充电,若满足蓄电池充电后仍有剩余发电量,则向外部电网出售。此时段未满足的电荷需求首先通过蓄电池放电满足,若蓄电池达到最大放电功率仍无法满足电荷需求,从外部电网购电来满足电荷需求。蓄电池按照图 11 进行充放电,若有剩余电量,同样向外部电网售电。

根据图 12-14:23:00-24:00,MT 满足冷负荷需求时,发电功率小于需要满足的电负荷,且蓄电池需要充电,所以向外部电网购电满足电负荷需求和蓄电池充电需求;1:00,蓄电池满足电负荷需求后向外部电网售电;2:00-4:00,MT 满足冷负荷需求时,发电功率大于需要满足的电负荷,多余出力 and 蓄电池放电功率都向外部电网出售;5:00-6:00,MT 满足冷负荷时发电功率大于需要满足的电负荷,但不足以给蓄电池充电,微网向外部电网购电给蓄电池充电。

通过以上分析,利用微电网并网运行时优化运行数学模型中微源发电成本函数、购/售电收益函数、制冷收益函数,可得微网在夏季典型日内满足冷、电负荷的同时,达到微网收益最大化的并网运行净发电成本也就是目标函数所对应的值,见图 15。

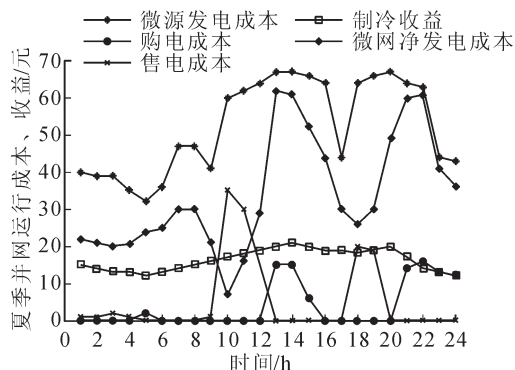


图 15 成本曲线图

Fig. 15 Cost graph

算法比较图见图 16。鸡群算法在前期的寻优的能力更强,粒子群算法相对来说要慢一些,在搜寻的过程粒子群算法容易陷入早熟,处于停顿的状态

中,而鸡群算法在陷入局部的最优解的时候经过短暂的迭代运算后能够很快跳出局部最优解,避免了陷入早熟的现象。从图 15 看到,鸡群优化算法经 69 次的迭代运算后趋于稳定,收敛的结果为 3 282.05 元,粒子群算法经 120 次的迭代运算后趋于稳定,收敛的结果 3 660.26 元。因此可得,鸡群算法在收敛速度和最终优化结果上要优于粒子群算法。

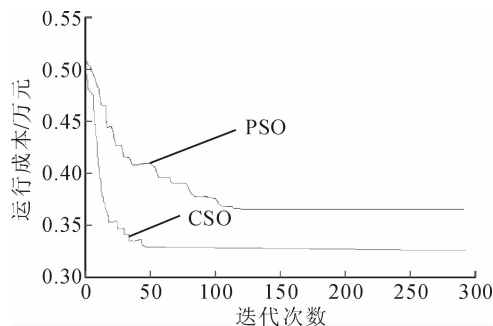


图 16 算法比较图

Fig. 16 Algorithm comparison chart

4 结语

文中建立了微电网系统各个结构的数学模型,提出优化策略,采用鸡群算法,在 MATLAB 中对微电网在夏季并网的运行进行了仿真求解,对各时刻每种微电源的输出功率进行了分析,并且将鸡群算法优化的结果和粒子群算法优化的结果进行了比较,通过最终的结果验证了文中提出的优化策略的可行性,也验证了鸡群算法具有更好的寻优能力以及能避免陷入早熟的优点。

参考文献:

- [1] LASSETER R, AKHIL A, MARNAY C, et al. Integration of distributed energy resources[C]//Proceedings of Consortium for Electric Reliability Technology Solutions. California: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2002:2-6.
- [2] 王成山,王守相. 分布式发电功能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20):1-4.
WANG Chengshan, WANG Shouxiang. Research on some problems of distributed generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (20): 1-4.
- [3] 李鹏,张玲,王伟,等. 微网技术应用与分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20):109-115.
LI Peng, ZHANG Ling, WANG Wei, et al. Application and analysis of micro grid technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 109-115.
- [4] 李鹏,余伟娜,周泽远,等. 基于改进万有引力搜索算法的微网优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3073-3079.
LI Peng, YU Weina, ZHOU Zeyuan, et al. Operation opti-

- mization of micro grid based on improved universal search algorithm[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2014, 34(19): 3073-3079.
- [5] 余金龙, 赵文会, 赵波, 等. 基于多状态建模的独立型微电网优化配置[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6): 11-17.
YU Jinlong, ZHAO Wenhui, ZHAO Bo, et al. Optimal configuration of independent microgrid based on multi state modeling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 11-17.
- [6] 路欣怡, 黄杨琦, 刘念, 等. 含风光柴蓄的海岛独立微电网多目标优化调度方法[J]. 现代电力, 2014, 31(5): 43-48.
LU Xinyi, HUANG Yangqi, LIU Nian, et al. Multi objective optimization scheduling method for island independent microgrid with wind and water diesel storage[J]. Modern Electric Power, 2014, 31(5): 43-48.
- [7] 薛贵挺, 张焰, 刘玉娇, 等. 基于克隆选择算法的微电网多目标运行优化[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 16-21.
XUE Guiting, ZHANG Yan, LIU Yujiao, et al. Multi objective optimization of micro grid based on clonal selection algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 16-21.
- [8] 周开乐, 沈超, 丁帅, 等. 基于遗传算法的微电网负荷优化分配[J]. 中国管理科学, 2014, 22(3): 68-73.
ZHOU Kaile, SHEN Chao, DING Shuai, et al. Optimal allocation of micro grid load based on genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Management Science, 2014, 22(3): 68-73.
- [9] 王晨. 基于混合蛙跳算法的微电网运行优化[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
WANG Chen. Based on the micro grid operation and SFLA[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.
- [10] 赵媛媛, 艾芊, 余志文, 等. 考虑多种因素评的微电网优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 23-30.
ZHAO Yuanyuan, AI Qian, YU Zhiwen, et al. Consider a variety of factors assessment of the micro grid optimizations scheduling[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 23-30.
- [11] 彭春华, 谢鹏, 詹骥文, 等. 基于改进细菌觅食算法的微网鲁棒经济调度[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2392-2398.
PENG Chunhua, XIE Peng, ZHAN Jiwen, et al. Based on improving modified bacterial foraging algorithm of micro grid robust economic dispatch[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2392-2398.
- [12] MENG X, LIU Y, GAO X Z, et al. A new bio-inspired algorithm: chicken swarm optimization[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2014, 8794(1): 86-94.
- [13] SMITH C L, ZIELINSKI S L. The startling intelligence of the common chicken[J]. Scientific American, 2014, 2(2): 73-83.
- [14] 刘娇娇, 王致杰, 袁建华, 等. 基于 POS 算法的风光储能微电网优化调度研究[J]. 华东电力, 2014, 42(8): 1534-1539.
LIU Jiaojiao, WANG Zhijie, YUAN Jianhua, et al. Study on optimal scheduling of wind energy storage micro grid based on POS algorithm[J]. East China Electric Power, 2014, 42(8): 1534-1539.
- [15] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 3(4): 7-14.
DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al. Contains sodium sulfur battery energy storage micro network system economic operation optimization[J]. Chinese Electrical Engineering Journal, 2011, 3(4): 7-14.
- [16] 张颖媛. 微网系统的运行优化与能量管理研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
ZHANG Yingyuan. Operation optimization and energy management of micro grid system[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014.
- [17] MORGANTOWN W. Emission rates for new DG technologies[EB/OL]. <http://www.raponline.org/ProjDocs/DREmsRul/Collfile/DG Emissions>, 2001-05-21.
- [18] PIPATTANASOMPORN M, WILLINGHAM M, RAHMAN S. Implications of on-site distributed generation for commercial/industrial facilities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1): 206-212.
- [19] 魏学好, 周浩. 中国火力发电行业减排污染物的环境价值标准估算[J]. 环境科学研究, 2003, 16(1): 53-56.
WEI Xuehao, ZHOU Hao. Estimation of environmental value standard for emission reduction of pollutants in China thermal power industry[J]. Environmental Science Research, 2003, 16(1): 53-56.
- [20] 郭力, 许东, 王成山, 等. 冷电联供分布式供能系统能量优化管理[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 96-100.
GUO Li, XU Dong, WANG Chengshan, et al. Energy optimization management of distributed energy supply system for distributed energy supply system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19): 96-100.

胡汉梅(1965—), 女, 教授, 硕士生导师, 从事电力系统及其自动化专业的科研与教学工作。

李静雅(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为微电网的优化运行。

黄景光(1968—), 男, 博士, 副教授, 从事信号分析和电力系统继电保护方面的研究。