

# 基于改进鸟群算法的微电网并网优化调度研究

杨文荣, 马晓燕, 徐茂林, 边鑫磊

(省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 河北工业大学, 天津 300130)

**摘要:** 以分析微电网并网优化调度中不同模型对优化的影响和解决传统智能算法在多目标函数寻优时易早熟收敛、陷入局部最优、收敛速度和精度差等问题为目的, 采用二元对比定权法将以运行成本、环境污染处理费用为目标的多目标优化模型转化为单目标优化模型, 并应用了一种新型生物启发式群智能算法——鸟群算法, 该算法以鸟类觅食、警惕和飞行行为为依据, 其性能优于粒子群和微分进化算法, 因其认知和群体行为调节参数易使种群收敛精度和迭代次数偏大, 通过线性微分递减策略改进惯性权重、线性调整认知系数和社会系数来改进鸟群算法, 以此对不同模型进行优化。本文对不同目标函数的优化结果和两种算法的仿真结果做了对比, 验证了多目标优化模型和改进算法的有效性。

**关键词:** 微电网; 改进鸟群算法; 并网; 优化调度

**DOI:** 10.12067/ATEEE1702016

**文章编号:** 1003-3076(2018)02-0053-08

**中图分类号:** TM73

## 1 引言

因全球能源危机和环境污染问题日益突出, 太阳能、风能等可再生清洁能源得到迅速发展。风光出力的间歇性和随机性以及负荷的波动性等不确定因素威胁着电力系统的安全稳定运行, 同时在孤岛、偏远区域和微电源渗透率高的一些地区, 难以实现供电要求。微电网是一种将分布式电源、储能装置、负荷和保护装置等结合起来的小型发配电系统, 可有效解决上述问题<sup>[1-3]</sup>。

微电网的优化调度即在满足负荷需求和微电源约束条件等的前提下, 使微电源的发电成本、停电损失、污染排放等达到最小。目前大部分研究方向集中在模型的优化、调度策略的完善或有效的智能算法<sup>[4,5]</sup>。文献[6]利用监控和数据采集系统(SCADA)控制孤岛型智能微电网, 采用混合线性整数规划算法(MILP)计算各分布式电源的出力, 以达到最优的方案。但由于目标函数和约束条件及微电网系统的复杂性, MILP有一定局限性。文献[7]提出了一个基于净现值的主从式目标函数, 通过二次规划算法和粒子群算法(PSO)最小化运行成本和停

电损失, 采用模糊逻辑工具箱在 Pareto 曲线中寻找“从目标函数”中最优策略, 然后运用 PSO 的不断迭代最终解决“主目标函数”中的优化问题, 但 PSO 易陷入局部最优且收敛速度慢。文献[8]考虑光伏发电、风力发电和内燃机发电, 用蓄电池来储存发电单元的剩余电量。仿真证明蓄电池在运行过程中根据可再生能源和负荷的需要自由充放电比限制蓄电池充放电策略运行成本要低。

文献[9]为一种分级式控制策略, 针对 PSO 可能不收敛以及参数过多难以确定等问题, 利用量子机制和波函数来表示解的情况, 通过求解薛定谔函数和蒙特卡洛模型找出粒子的相应位置, 即采用量子粒子群算法(QPSO)优化微电源的出力, 使系统的经济成本最小。仿真证明 QPSO 算法优于 PSO, 但此模型未考虑污染物的排放。文献[10]以系统经济和环保成本最小为优化目标, 从临时 Pareto 解中筛选出  $N$  个拥挤距离最大的个体作为精英保留, 采用此改进遗传算法对微电源的出力进行优化, 证明了改进算法可以跳出局部最优解, 且多目标函数的优化结果比单目标函数更经济环保。文献[6-10]的算法对于复杂超高维的问题难以求得理想效果,

**收稿日期:** 2017-02-10

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51777054)、河北省自然科学基金项目(E2015202241)

**作者简介:** 杨文荣(1969-), 女, 河北籍, 教授, 研究方向为工程电磁场与磁技术、微电网的保护、控制与优化调度运行; 马晓燕(1992-), 女, 河北籍, 硕士研究生, 研究方向为微电网的优化运行。

且考虑单因素不利于微电网的调度研究。

鸟群算法 (Bird Swarm Algorithm, BSA) 是 Xian-Bing Meng 等人在 2015 年提出的一种新型生物启发式全局优化算法, 来源于对鸟群觅食、警惕和飞行行为的模仿以及对鸟群觅食过程中共享信息的研究, BSA 具备调节参数少、收敛精度高和鲁棒性能好等特点, 已验证 BSA 在优化函数方面优于 PSO 和微分进化算法 (DE)<sup>[11]</sup>。因 BSA 的认知行为和群体行为调节参数易导致进化种群收敛精度和迭代次数偏大, 通过在 BSA 基础上引入线性微分递减策略的惯性权重和线性调整的学习系数, 来提高收敛速度和搜索精度。本文采用改进的鸟群算法 (IBSA) 对微电网并网运行模式下的夏季典型日进行调度分析, 建立了考虑微电源的经济性和环保性的优化调度模型, 最后通过各目标函数下微电网的调度情况和 IBSA、BSA 算法的对比, 验证了本文调度模型和 IBSA 算法的正确性。

## 2 并网运行方式下微电网优化调度数学模型

本文采用的分布式电源为可再生清洁不可控机组光伏电池 (Photovoltaic Cells, PV) 和风力发电机 (Wind Turbine, WT)、效率高污染小的可控机组燃料电池 (Fuel Cell, FC) 和微型燃气轮机 (Micro Turbine, MT)、平抑可再生能源发电功率波动的储能蓄电池 (Storage Battery, BT), 微电源的出力模型如文献 [12-14] 中所述。微电网优化调度的目标是在各种约束条件下优化微电源的出力使得系统的经济性和环保性达到最好。

### 2.1 目标函数

#### 2.1.1 微电网系统的经济性成本最低

目标函数为:

$$\min C_{1,COST} = \min(C_{FC\&MT} + C_{OM} + C_{DP} + C_{grid}) \quad (1)$$

$$C_{FC\&MT}(t) = \sum_{i=1}^{24} C \frac{1}{LHV} \left[ \frac{P_{FC}(t)}{\eta_{FC}(t)} + \frac{P_{MT}(t)}{\eta_{MT}(t)} \right] \quad (2)$$

$$\eta_{FC}(t) = -0.0023P_{FC}(t) + 0.6735 \quad (3)$$

$$\eta_{MT}(t) = 0.0753 \left[ \frac{P_{MT}(t)}{65} \right]^3 - 0.3095 \left[ \frac{P_{MT}(t)}{65} \right]^2 +$$

$$0.4174 \frac{P_{MT}(t)}{65} + 0.1068 \quad (4)$$

$$C_{OM}(t) = \sum_{i=1}^{24} \sum_{i=1}^N K_{OM,i} P_i(t) \quad (5)$$

$$C_{DP}(t) = \sum_{i=1}^{24} \sum_{i=1}^N \frac{ADCC_i}{P_{fc_i} \cdot 8760 \cdot k_i} P_i(t) \quad (6)$$

$$ADCC_i = C_{cost,i} \frac{r_i (1 + r_i)^{L_i}}{(1 + r_i)^{L_i} - 1} \quad (7)$$

$$C_{grid}(t) = \sum_{i=1}^{24} c_{buy}(t) P_{buy}(t) - c_{cell}(t) P_{sell}(t) \quad (8)$$

式中,  $C_{FC\&MT}$ 、 $C_{OM}$ 、 $C_{DP}$  和  $C_{grid}$  分别为分布式电源的燃料、运行维护、折旧和与主网电能互购成本<sup>[14,15]</sup>;  $N$  为微电源种类数;  $C$  为天然气价格;  $LHV$  为天然气低热值;  $P_{FC}(t)$ 、 $P_{MT}(t)$  分别为  $t$  时刻 FC 和 MT 的输出功率;  $\eta_{FC}(t)$ 、 $\eta_{MT}(t)$  分别为  $t$  时刻 FC 和 MT 的发电效率;  $K_{OM,i}$ 、 $P_i(t)$  分别为第  $i$  种分布式电源的运行维护系数和在  $t$  时刻的输出功率;  $ADCC_i$  为微电源  $i$  的年均折旧资本;  $C_{cost,i}$  为单位容量初始安装成本;  $k_i$ 、 $r_i$ 、 $L_i$ 、 $P_{fc_i}$  分别为微电源的容量因数、年折旧利率 (6%)、折旧年限和额定功率;  $c_{buy}(t)$ 、 $c_{cell}(t)$  分别为  $t$  时刻的购售电电价;  $P_{buy}(t)$ 、 $P_{sell}(t)$  分别为  $t$  时刻的购售电功率。

#### 2.1.2 微电网系统的污染物处理费用最小

本文污染物指  $CO_2$ 、 $SO_2$  和  $NO_x$ , 目标函数为:

$$\min C_{2,COST} = C_{DG,i} + C_{grid,i} \quad (9)$$

$$C_{DG,i} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^3 \left[ \alpha_j \sum_{i=1}^N \beta_{i,j} P_i(t) \Delta t \right] \quad (10)$$

$$C_{grid,i} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^3 \left[ \alpha_j \beta_{grid,j} P_{grid}(t) \Delta t \right] \quad (11)$$

式中,  $C_{DG,i}$ 、 $C_{grid,i}$  分别为微电源  $i$  和主网的排污治理费用 (微电源中产生污染的为 FC 和 MT);  $\alpha_j$  为第  $j$  种污染物单位排污处理成本;  $\beta_{i,j}$ 、 $\beta_{grid,j}$  分别为微电源  $i$  和主网的第  $j$  种污染物排放系数;  $P_{grid}(t)$  为  $t$  时刻微电网与主网的交互功率;  $\Delta t$  为时间间隔。

#### 2.1.3 微电网系统的综合效益最好

综合考虑经济成本和环境污染因素, 由于两目标函数数量纲相同, 故用线性加权求和法将多目标转化为单目标, 再用二元对比定权法确定权重系数<sup>[16]</sup>。本文取经济性重要性等级“稍稍”在环保性之上, 通过建立重要性定性排序标度矩阵  $E$  和经过一致性检验, 将模糊语气算子转换为隶属度指标的非归一化权重向量  $[1, 0.739]$ , 归一化后得到的指标的权重向量  $W = [0.575, 0.425]$ , 目标函数为:

$$\min C = 0.575 C_{1,COST} + 0.425 C_{2,COST} \quad (12)$$

### 2.2 约束条件

(1) 功率平衡约束

$$P_L(t) - P_{BT}(t) = P_{PV}(t) + P_{WT}(t) + P_{FC}(t) + P_{MT}(t) + P_{grid}(t) \quad (13)$$

式中,  $P_{BT}(t)$  为蓄电池充放电功率,放电为正,充电为负;  $P_{PV}(t)$ 、 $P_{WT}(t)$  分别为光伏电池、风机的出力;  $P_L(t)$  为微电网负荷。

(2) 微电源输出的功率约束

$$P_{i, \min} \leq P_i \leq P_{i, \max} \quad (14)$$

式中,  $P_{i, \max}$ 、 $P_{i, \min}$  分别为微电源的有功出力上、下限。

(3) 微电网和主网间的交互功率约束

$$P_{grid, \min} \leq P_{grid} \leq P_{grid, \max} \quad (15)$$

式中,  $P_{grid, \max}$ 、 $P_{grid, \min}$  分别为传输容量上、下限。

(4) 储能蓄电池的运行约束

$$P_{BT, i, \min} \leq P_{BT, i} \leq P_{BT, i, \max} \quad (16)$$

$$E_{BT}(0) = E_{BT}(T) \quad (17)$$

$$SOC_{\min} \leq SOC \leq SOC_{\max} \quad (18)$$

式中,  $P_{BT, i, \max}$ 、 $P_{BT, i, \min}$  分别为蓄电池充放电功率最大值、最小值;  $SOC_{\max}$ 、 $SOC_{\min}$  分别为蓄电池荷电状态允许的最大值、最小值;  $E_{BT}(0)$ 、 $E_{BT}(T)$  分别为蓄电池一个调度周期的初始储能和最终储能。

### 3 改进鸟群算法及微电网优化调度求解步骤

#### 3.1 鸟群算法仿生学基本原理

BSA 算法是根据鸟类觅食、警惕和飞行行为衍生出的生物启发式算法,这些社会行为和活动的本质是群体智能,鸟群从社会活动中获取最佳食物的位置即对应于目标函数中寻找最优解。鸟类的行为简化规则如下:

(1) 规则 1: 每只鸟随机决定在警惕和觅食行为之间转换身份。

(2) 规则 2: 当选择觅食时, 鸟类及时记录和更新该个体和种群先前最好的觅食位置, 并以信息的方式共享于整个种群, 以此来更好地寻找食物。

(3) 规则 3: 当保持警惕状态时, 每只鸟都试图向种群的中心位置飞去, 此行为受到种群间竞争的干扰, 高储备量的鸟类更容易飞到种群的中心位置。

(4) 规则 4: 鸟类会定期飞到另一个区域, 当到达终点时, 鸟类将会在生产者和乞食者之间转换, 食物储存量多的为生产者, 反之为乞食者。其他鸟类则随机选择成为生产者或乞食者。

(5) 规则 5: 生产者积极寻找食物, 乞食者则随机跟随生产者寻找食物。

鸟群规模设为  $N$ , 飞行空间维度为  $D$ ,  $x_i^t$

( $i \in [1, 2, \dots, N]$ ) 代表第  $i$  只鸟在  $t$  时刻的觅食或飞行位置。

#### 3.1.1 觅食行为

规则 1 为随机决策, 若  $rand(0, 1) < p$  ( $p \in (0, 1)$ ), 鸟类选择觅食, 否则保持警惕。

每只鸟由自身和群体的经验来寻找食物。规则 2 用数学公式表示如下:

$$x_{i, j}^{t+1} = x_{i, j}^t + (p_{i, j} - x_{i, j}^t)C \cdot rand(0, 1) + (g_j - x_{i, j}^t)S \cdot rand(0, 1) \quad (19)$$

式中,  $j \in [1, 2, \dots, D]$ ;  $rand(0, 1)$  代表  $(0, 1)$  之间的独立均匀分布数;  $C$  和  $S$  ( $C, S > 0$ ) 分别为认知系数和社会系数;  $p_{i, j}$  为第  $i$  只鸟的先前最优位置;  $g_j$  为种群的先前最优位置。

#### 3.1.2 警惕行为

根据规则 3, 鸟类在试图飞向种群的中心时会不可避免地与其他鸟类发生竞争。因此每只鸟不会直接飞向种群的中心, 这些行为可表示为:

$$x_{i, j}^{t+1} = x_{i, j}^t + A_1(mean_j - x_{i, j}^t) \cdot rand(0, 1) + A_2(p_{k, j} - x_{i, j}^t) \cdot rand(-1, 1) \quad (20)$$

$$A_1 = a_1 \cdot \exp\left(-\frac{pFit_i}{sumFit + \varepsilon}N\right) \quad (21)$$

$$A_2 = a_2 \cdot \exp\left(\frac{pFit_i - pFit_k}{|pFit_k - pFit_i| + \varepsilon} \frac{N \cdot pFit_k}{sumFit + \varepsilon}\right) \quad (22)$$

式中,  $k$  ( $k \neq i$ ) 为  $[1, N]$  之间的随机正整数;  $a_1, a_2 \in [0, 2]$ ;  $pFit_i, pFit_k$  分别为第  $i, k$  只鸟的最佳适应度值;  $sumFit$  为种群最佳适应度值之和;  $\varepsilon$  为用来避免零分割的计算机中很小的常数;  $mean_j$  为整个种群中第  $j$  维的平均位置。

#### 3.1.3 飞行行为

因捕食者的威胁、觅食或其他原因, 鸟类将会飞向另一个区域, 此时他们将会重新觅食。一些鸟作为生产者来寻找食物, 另一些则根据这些生产者找到的食物信息来寻找食物, 规则 4 可以区分出鸟类生产者和乞食者, “生产者”的数学表达式为:

$$x_{i, j}^{t+1} = x_{i, j}^t + randn(0, 1) \cdot x_{i, j}^t \quad (23)$$

式中,  $randn(0, 1)$  为服从均值为 0、标准差为 1 的 Gaussian 中的一个随机数。

“乞食者”的数学表达式为:

$$x_{i, j}^{t+1} = x_{i, j}^t + (x_{k, j}^t - x_{i, j}^t) \cdot FL \cdot rand(0, 1) \quad (24)$$

式中,  $k \in [1, 2, \dots, N], k \neq i$ ;  $x_{i, j}^t, x_{k, j}^t$  分别为第  $i$  只鸟(乞食者)和第  $k$  只鸟(生产者)  $t$  时刻在  $j$  维空间的飞行位置;  $x_{i, j}^{t+1}$  为乞食者在下一时刻的位置; 因  $t$

时刻乞食者需随机跟随一位生产者,利用生产者发出的食物信息来觅食,则  $FL(FL \in [0,1])$  为飞行过程中乞食者跟随生产者寻找食物的概率,作用是控制位置差量  $x_{k,j}^t - x_{i,j}^t$  对飞行的影响。假定每一只鸟每隔  $FQ(FQ$  为正整数) 时间段就会从一个地方飞向另一个地方。

### 3.2 改进鸟群算法 (IBSA)

#### 3.2.1 线性微分递减策略的惯性权重的改进

惯性权重是鸟群算法的重要改进参数,通过设置惯性权重可以改变上一时刻觅食位置对当前时刻位置的影响。迭代初期较大的惯性权重能使 BSA 算法保持较强的全局搜索能力,迭代后期较小的惯性权重有利于算法更精确的局部搜索。为了更好地平衡 BSA 算法的全局与局部搜索能力,本文采用线性微分递减策略<sup>[17]</sup>,计算公式为:

$$\frac{dw(t)}{dt} = \frac{2(w_{\max} - w_{\min})}{t_{\max}} t \quad (25)$$

式(25)可转化为:

$$w(t) = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{t_{\max}^2} t^2 \quad (26)$$

式中,  $w_{\max}$ 、 $w_{\min}$  分别为惯性权重的最大值和最小值,本文取  $w_{\max} = 0.9$ ,  $w_{\min} = 0.4$ ;  $t_{\max}$  为最大迭代次数;  $t$  为当前迭代次数。随着迭代的进行,惯性权重由 0.9 线性递减到 0.4。

#### 3.2.2 线性调整学习系数

BSA 算法中  $C$  和  $S$  分别代表认知系数和社会系数,学习因子可以调整自身认知经验和社会经验的比重值。鸟群搜索觅食的前期  $C$  取较大值,  $S$  取较小值,增加认知经验的比重,使鸟类的全局搜索能力增强;搜寻觅食的后期  $C$  取较小值,  $S$  取较大值,增加搜寻食物的社会经验的比重,使得局部搜索增强,线性调整的学习系数更新公式为:

$$C' = C_s + \frac{C_e - C_s}{t_{\max}} t \quad (27)$$

$$S' = S_s + \frac{S_e - S_s}{t_{\max}} t \quad (28)$$

式中,  $C_e = S_s = 0.5$ ;  $C_s = S_e = 2.5$ 。

改进后的觅食公式为:

$$x_{i,j}^{t+1} = wx_{i,j}^t + (p_{i,j} - x_{i,j}^t) C' \cdot rand(0,1) + (g_j - x_{i,j}^t) S' \cdot rand(0,1) \quad (29)$$

### 3.3 IBSA 算法求解微电网并网优化调度步骤

针对第 2 节建立的微电网优化调度模型,每个微电源的出力为待优化的参数,鸟群中每个个体所

处的空间位置为优化变量,适应度函数的大小表示该位置的优劣,根据鸟群觅食、警惕和飞行行为来不断更新鸟类个体的空间位置,直至寻找到群体最佳位置,即微电源的最优出力<sup>[18,19]</sup>。具体步骤如下:

(1) 初始化 BSA 算法中各参数和不同种类微电源的出力上下限,输入夏季典型日 24h 的用电情况。利用式(30)初始化微电源在空间的位置。

$$x_i^t = lb + (ub - lb) \cdot rand(1, D) \quad (30)$$

式中,  $x_i^t$  为微电源  $i$  在  $t$  时刻的位置;  $ub$ 、 $lb$  分别为微电源的出力上、下限。

(2) 计算各目标函数的适应度值,并从中随机选取个体最优和全局最优位置。

(3) 采用线性微分递减策略改进惯性权重,并线性调整认知系数和社会系数。

(4) 依据鸟类觅食、警惕和飞行行为更新种群,限定微电源的出力满足式(13)~式(18)约束,将微电源的功率平衡等式约束转换为不等式判定,在超过范围之后加入不同程度的惩罚因子。

(5) 计算新种群适应度值,与前一时刻适应度值作比较,剔除劣解,留下优解,更新历史最优解。

(6) 判断是否满足终止条件,若达到要求,输出最终最优解,否则  $t+1$  返回至步骤(4)继续迭代,直至满足终止条件或者达到最优解<sup>[20]</sup>。

## 4 算例分析

本文以工作在并网运行模式下的包含 PV、WT、FC、MT、BT 和负荷的微电网系统为例,其中 PV 和 WT 工作在最大功率点跟踪模式(MPPT),本文以最大化利用可再生能源为前提,基于改进的鸟群算法,采用 MATLAB R2014a 编写了适用于微电网算例的优化调度程序。

### 4.1 微电网基础数据

本文计算周期为 1 天,24 个时段,每小时代表 1 个时段,图 1 为夏季典型日负荷出力曲线图,全天温度、风速、光照强度数据曲线分别如图 2~图 4 所示,由此计算出的 PV 和 WT 出力如图 5 所示。微电网系统分布式电源参数、污染物处理排放系数以及全天分时电价分别如表 1~表 3 所示。

数学模型主要参数为:PV 参数:标准测试条件下光照强度为  $1000 \text{ W/m}^2$ ,参考温度为  $25^\circ\text{C}$ ,功率温度系数为  $-0.0047/^\circ\text{C}$ ;WT 参数:切入、切出和额定风速分别为  $2.5 \text{ m/s}$ 、 $25 \text{ m/s}$  和  $12 \text{ m/s}$ ;FC、MT 参数:天然气价格取  $2.5 \text{ 元/m}^3$ ,天然气低热值取  $9.7$

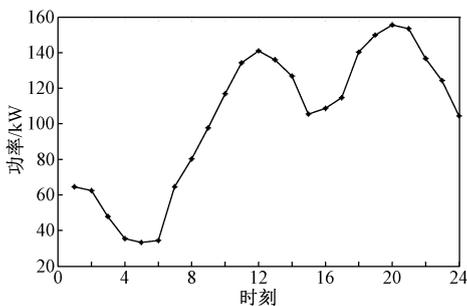


图1 24h 负荷出力曲线图  
Fig. 1 Load output curve in 24h

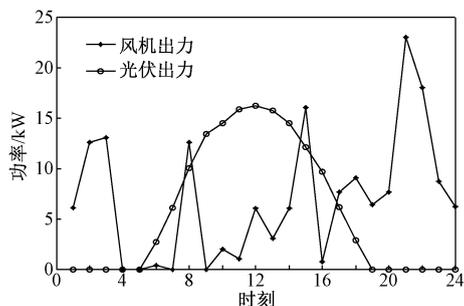


图5 24h 风光出力曲线图  
Fig. 5 WT and PV output curve in 24h

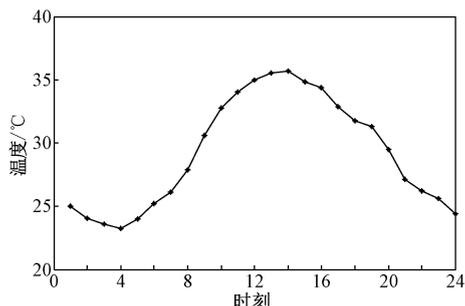


图2 24h 温度曲线图  
Fig. 2 Temperature curve in 24h

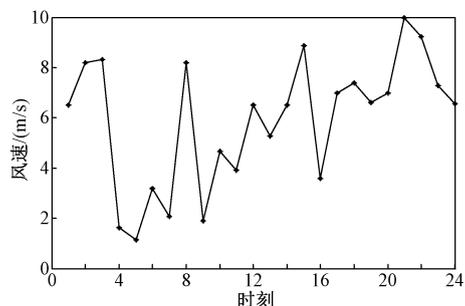


图3 24h 风速曲线图  
Fig. 3 Wind speed curve in 24h

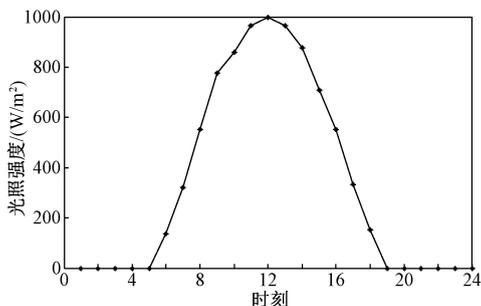


图4 24h 光照强度曲线图  
Fig. 4 Light intensity curve in 24h

表1 各分布式电源基础数据

Tab. 1 Basic data of distributed power

| 微电源类型 | 出力下限/kW | 出力上限/kW | $K_{OM,i}$ | 容量因数 (%) | 折旧年限/年 | 单位容量初始安装成本/(万元/kW) |
|-------|---------|---------|------------|----------|--------|--------------------|
| PV    | 0       | 20      | 0.0096     | 29.34    | 20     | 6.650              |
| WT    | 0       | 40      | 0.0296     | 22.13    | 10     | 2.375              |
| FC    | 0       | 40      | 0.0293     | 36.73    | 10     | 4.275              |
| MT    | 0       | 65      | 0.0419     | 54.99    | 15     | 1.609              |
| BT    | -30     | 30      | 0.0450     | 32.67    | 10     | 0.087              |

表2 污染物处理排放系数

Tab. 2 Pollutant discharge coefficient

| 污染物             | $\alpha_j/$<br>(元/kg) | $\beta_{FC}/$<br>(g/(kW·h)) | $\beta_{MT}/$<br>(g/(kW·h)) | $\beta_{grid}/$<br>(g/(kW·h)) |
|-----------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| CO <sub>2</sub> | 0.21                  | 489.4                       | 184                         | 889                           |
| SO <sub>2</sub> | 14.842                | 0.003                       | 0.001                       | 1.8                           |
| NO <sub>x</sub> | 62.964                | 0.014                       | 0.619                       | 1.6                           |

表3 购电和售电电价

Tab. 3 Purchase and sale of electricity price

| 分时类别 | 时段              | 购电价格/<br>(元/(kW·h)) | 售电价格/<br>(元/(kW·h)) |
|------|-----------------|---------------------|---------------------|
| 峰时段  | 10:00 ~ 15:00   | 0.83                | 0.65                |
|      | 18:00 ~ 21:00   |                     |                     |
| 平时段  | 7:00 ~ 10:00    | 0.49                | 0.38                |
|      | 15:00 ~ 18:00   |                     |                     |
|      | 21:00 ~ 23:00   |                     |                     |
| 谷时段  | 23:00 ~ 次日 7:00 | 0.17                | 0.13                |

主网购电为正,售电为负。

## 4.2 仿真结果

### 4.2.1 微电网系统不同目标函数下出力曲线分析

采用改进的鸟群算法,分别对微电网的经济性、环保性和采用二元对比定权法的综合性目标函数进行分析,PV和WT始终以MPPT模式最先出力,24h的优化出力曲线如图6~图8所示,不同目标函数下的成本对比如表4所示。

(kW·h)/m<sup>3</sup>;BT参数:最大储能量150kW·h,每小时充放电功率限值为-30kW、30kW,初始荷电状态为0.2,荷电状态上、下限为1和0.2,充电为负,放电为正;微电网与主网的最大交互功率为50kW,从

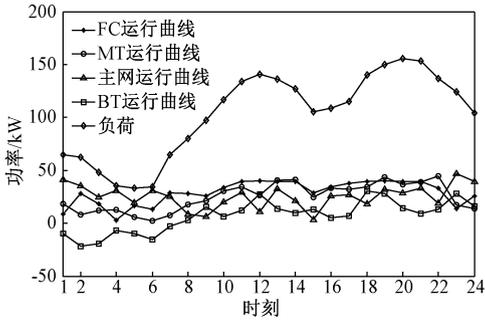


图6 运行成本最低情况下优化调度曲线

Fig.6 Optimal scheduling curve under lowest operating cost

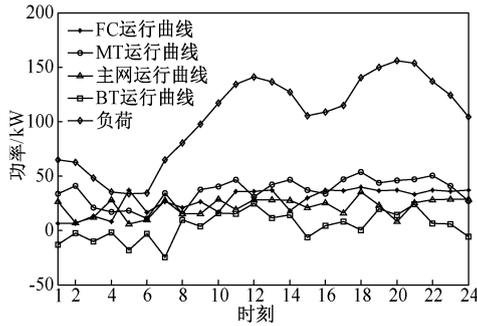


图7 污染物处理费用最低情况下优化调度曲线

Fig.7 Optimal scheduling curve under lowest cost of pollutant treatment

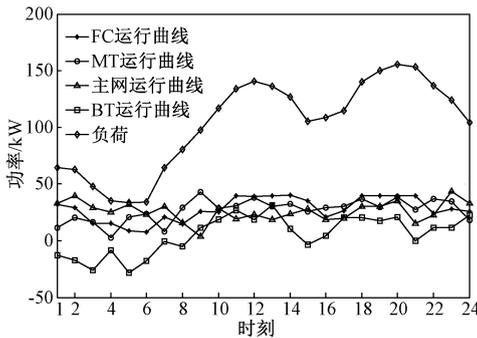


图8 综合效益最大情况下优化调度曲线

Fig.8 Optimal scheduling curve under condition of comprehensive benefit

表4 不同目标函数成本

Tab.4 Cost of different objective functions

| 目标函数   | 运行成本/元  | 环境费用/元 |
|--------|---------|--------|
| 运行成本最小 | 2140.55 | 324.31 |
| 环境费用最小 | 2540.00 | 308.85 |
| 综合成本最低 | 2257.24 | 312.12 |

由图6可知,在经济成本最低情况下由于FC的运行成本低于MT,除电网电价谷时段,其余时刻优化调度时优先考虑FC。1:00~7:00时段,电网

负荷较轻,电网电价处于谷时段,优先考虑从主网购电,主网发出的电量、FC和MT向负荷供电的剩余电量给BT充电。夏季典型日11:00~14:00、18:00~21:00时段处于用电高峰期,FC接近满发,不足的功率由MT、BT放电和从主网购电来提供。

由图7可知,污染物处理费用最低的模型下,在FC、MT和主网同时进行调峰时,环境污染度最小的MT发挥了主要作用,其次是FC,最后是主网。夏季典型日10:00~15:00光照非常充足,此时光伏出力增加,8:00、15:00和晚间风速很大,风机出力增加,虽然此时蓄电池吸收能量,但是由于用电负荷很高,8:00以后蓄电池始终处于放电状态。

由图8可知,综合考虑经济成本和环境污染处理费用,在1:00~7:00用电谷时段,电价较低,此时优先从主网购电来满足负荷需求,晚间风速大,风机出力增加,因此使用从电网购电和微电源出力剩余电量给BT充电。夏季用电负荷普遍偏高,故在8:00后BT一直保持放电状态。11:00~15:00、18:00~21:00时段为用电高峰期,FC接近满发来使运行成本降低,其余时刻利用污染度小的MT优先出力。

由表4可知,夏季典型日综合成本最低目标函数中,运行成本与环境费用均介于运行成本最小与环境费用最低目标函数下的运行成本与环境费用之间,综合考虑经济性与环境污染处理费用的多目标优化调度很好地协调了经济与环境之间的平衡。

#### 4.2.2 BSA、IBSA两种智能算法对比分析

本文采用的BSA参数如下:迁移周期 $FQ = 10$ ,  $a_1 = a_2 = 1.5$ ,  $C = S = 1.5$ ;IBSA参数如下: $FQ = 10$ ,  $a_1 = a_2 = 1.5$ ,其余参数3.2节已经给出;两种算法种群规模均为300,迭代300次。针对本文提出的微电网优化模型,两种算法均独立运行30次,求取平均值,对比结果如图9和表5所示。

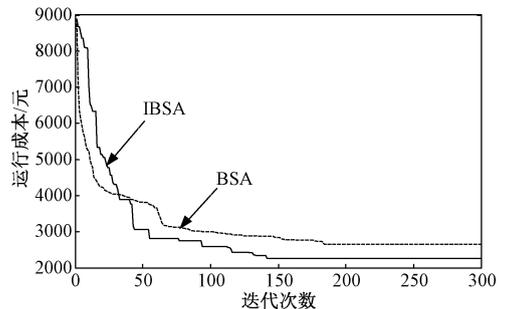


图9 综合目标函数下的适应度收敛曲线对比图

Fig.9 Contrast curve of fitness convergence curve under comprehensive objective function

表5 算法运行时间与收敛次数对比

Tab.5 Comparison of running time and convergence times

| 算法   | 运行时间/s | 收敛次数 | 运行成本/元  |
|------|--------|------|---------|
| BSA  | 35.87  | 182  | 2647.97 |
| IBSA | 35.82  | 141  | 2257.24 |

综上所述,在同等种群规模和迭代次数条件下,IBSA 算法相比 BSA 算法其收敛速度、收敛次数和寻优精度更好,由此证明了 IBSA 算法的优越性。

## 5 结论

本文建立了微电网并网运行模式下考虑运行成本和环境处理费用的优化调度模型,采用新型生物启发式算法——改进的鸟群算法分别优化经济性、环保性和综合性目标函数下各分布式电源的出力,并比较了 IBSA 和 BSA 两种算法的优劣。结果表明,多目标优化调度有效协调了经济与环境之间的平衡,比单目标情况下的结果更加经济环保和高效,同时 IBSA 算法的收敛速度和寻优精度均优于 BSA 算法。算例仿真结果验证了模型和 IBSA 算法的正确性。

## 参考文献 (References):

[1] 宋璇坤,韩柳,鞠黄培,等 (Song Xuankun, Han Liu, Ju Huangpei, et al.). 中国智能电网技术发展实践综述 (A review on development practice of smart grid technology in China) [J]. 电力建设 (Electric Power Construction), 2016, 37 (7): 1-11.

[2] 李鹏,窦鹏冲,李雨薇,等 (Li Peng, Dou Pengchong, Li Yuwei, et al.). 微电网技术在主动配电网中的应用 (Application of microgrid technology in active distribution network) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2015, 35 (4): 8-16.

[3] 尤毅,刘东,钟清,等 (You Yi, Liu Dong, Zhong Qing, et al.). 主动配电网优化调度策略研究 (Research on optimal schedule strategy for active distribution network) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2014, 38 (9): 177-183.

[4] 王成山,武震,李鹏 (Wang Chengshan, Wu Zhen, Li Peng). 微电网关键技术研究 (Research on key technologies of microgrid) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2014, 29 (2): 1-12.

[5] 刘文胜,毛晓明,陈志勇 (Liu Wensheng, Mao Xiaoming, Chen Zhiyong). 微网优化运行研究进展与展望 (A review on microgrid optimal operation) [J]. 电工电

能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2012, 31 (2): 64-68.

[6] Lazar E, Petreus D, Eitz R, et al. Optimal scheduling of an islanded microgrid based on minimum cost [A]. International Spring Seminar on Electronics Technology [C]. 2016. 290-295.

[7] Moradi M H, Eskandari M, Mahdi Hosseinian S. Operational strategy optimization in an optimal sized smart microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6 (3): 1087-1095.

[8] Toma L, Tristiu I, Bulac C, et al. Optimal generation scheduling strategy in a microgrid [A]. IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific [C]. 2016. 491-496.

[9] 黄晨,张靠社 (Huang Chen, Zhang Kaoshe). 基于量子粒子群算法的微电网优化调度 (Micro grid scheduling optimization based on quantum particle swarm optimization (PSO) algorithm) [J]. 电网与清洁能源 (Power System and Clean Energy), 2016, 32 (2): 72-76.

[10] 赵磊,曾芬钰,王霜,等 (Zhao Lei, Zeng Fenyu, Wang Shuang, et al.). 基于经济性与环保性的微电网多目标优化调度研究 (Research on multi-objective optimal operation of microgrid based on economic and environmental protection) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2015, 51 (6): 127-132.

[11] Meng X B, Gao X Z, Lu L H, et al. A new bio-inspired optimisation algorithm: Bird swarm algorithm [J]. Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence, 2015, 28 (4): 673-687.

[12] 张丽娟 (Zhang Lijuan). 含多种分布式电源的微网系统环保经济优化调度研究 (Research on environmental and economic optimal dispatch of microgrid with multi-distributed generation) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2015.

[13] 肖浩,裴玮,孔力,等 (Xiao Hao, Pei Wei, Kong Li, et al.). 综合能源微网运行优化调度方法研究 (Research on optimal operation method of integrated energy microgrid system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (12): 1-11.

[14] 段程煜 (Duan Chengyu). 基于粒子群算法的微电网优化调度研究 (The research on optimal scheduling of microgrid based on particle swarms optimization (PSO)) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2014.

[15] 周晓燕,刘天琪,沈浩东,等 (Zhou Xiaoyan, Liu Tianqi, Shen Haodong, et al.). 含多种分布式电源的

- 微电网经济调度研究 (Research on economic dispatch of microgrid with multi-distributed generation) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2013, 32 (1): 5-8.
- [16] 钟宇峰, 黄民翔, 叶承晋 (Zhong Yufeng, Huang Minxiang, Ye Chengjin, et al.). 基于电池储能系统动态调度的微电网多目标运行优化 (Multi-objective optimization of microgrid operation based on dynamic dispatch of battery energy storage system) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2014, 34 (6): 114-121.
- [17] 梅真 (Mei Zhen). 基于改进粒子群算法的微电网优化运行策略研究 (Research on the optimal operation strategy of micro-grid based on improved PSO) [D]. 武汉: 湖北工业大学 (Wuhan: Hubei University of Technology), 2015.
- [18] 崔东文, 金波 (Cui Dongwen, Jin Bo). 改进鸟群算法及其在梯级水库优化调度中的应用 (Improved bird swarm algorithm and its application to reservoir optimal operation) [J]. 三峡大学学报 (自然科学版) (Journal of China Gorges University (Natural Sciences)), 2016, 38 (6): 7-14.
- [19] 崔东文, 金波 (Cui Dongwen, Jin Bo). 鸟群算法-投影寻踪回归模型在多元变量年径流预测中的应用 (Application of the bird swarm algorithm - projection pursuit regression model to prediction of multivariate annual runoff) [J]. 人民珠江 (Pearl River), 2016, 37 (11): 26-30.
- [20] 曾嵘, 彭春华, 王奎, 等 (Zeng Ceng, Peng Chunhua, Wang Kui, et al.). 基于鸟群算法的微电网多目标运行优化 (Multi-objective operation optimization of micro grid based on bird swarm algorithm) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2016, 44 (13): 117-122.

## Research on scheduling optimization of grid-connected micro-grid based on improved bird swarm algorithm

YANG Wen-rong, MA Xiao-yan, XU Mao-lin, BIAN Xin-lei

(State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** In order to analyze the influence of different models on the optimization of micro-grid connected optimal scheduling and to solve the problems such as premature convergence, local optimization, slow convergence speed and poor precision when the traditional intelligent algorithm is used in the optimization of multiple objective functions, we use the dualistic factor contrast method to transform the multi-objective into single-objective optimization model, which is based on the operation cost and the cost of environmental pollution treatment. Meanwhile, this paper introduces a new kind of bio-inspired swarm intelligence algorithm named Bird Swarm Algorithm (BSA). The algorithm is based on bird foraging, vigilance and flight behavior, and its performance is better than particle swarm optimization algorithm and differential evolution algorithm. Because of the BSA adjustment parameters of cognitive behavior and group behavior, the convergence precision of the evolutionary population and the number of iterations are large, and linear differential decreasing inertia weight and learning coefficient linear adjustment are used to improve BSA, then different models were optimized. Finally, the effectiveness of the multi-objective optimization model and the improved algorithm is verified by comparing the optimization results of different objective functions and the simulation results of the two algorithms.

**Key words:** micro-grid; improved bird swarm algorithm; grid connection; scheduling optimization