

# 风-光-抽水蓄能联合发电系统的优化运行

杨森,张青,高立艾

(河北农业大学 机电工程学院,河北 保定 071001)

**摘要:**针对风-光-抽水蓄能联合发电系统各部分出力不佳导致的收益不高问题,通过改进粒子群万有引力混合算法,将混沌算法、惯性权重和改进步长因子引入传统的粒子群万有引力算法,解决传统算法的寻优能力弱、精度不高的问题.将改进后的粒子群万有引力算法应用于实际工程算例当中,优化联合发电系统各部分的出力,进而得到最大经济效益.与粒子群算法、万有引力算法和未改进粒子群万有引力算法对比,结果表明,改进后的算法精度最佳,迭代数最少.优化后的联合发电系统各部分出力,所达到的经济效益最大.

**关键词:**出力优化;混沌算法;惯性权重;步长因子;改进粒子群万有引力算法

**中图分类号:**TM732

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-1565(2021)01-0106-07

## Optimal operation of wind-light-pumped storage combined power generation system

YANG Sen, ZHANG Qing, Gao Liai

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China)

**Abstract:** Considering the wind - light - joint pumped storage power generation system low output due to the fact that each part is of low output, and to improve particle swarm gravitation hybrid algorithm, inertia weight and chaos algorithm were introduced into the traditional particle swarm algorithm of gravity. The capability and precision of the traditional algorithm optimization were Improved. precision is not high. The improved particle swarm gravitation algorithm is applied to a practical engineering example to optimize the output of each part of the co-generation system and obtain the maximum economic benefit. The results show that the improved algorithm has the best accuracy and the shortest iteration times. After the optimization of the output of each part of the joint generation system, the largest economic benefits were achieved.

**Key words:** output optimization;chaos algorithm;inertia weight;step factor;improved particle swarm gravity algorithm

当今社会,科学技术、工业水平和生活质量得到了飞速的发展,不免过度依赖于一次能源.能源的不合理使用导致环境污染和能源匮乏问题日益凸显.可再生能源如风能、太阳能、水能等二次能源,得到了世界各国的广泛关注<sup>[1-3]</sup>.风力发电、光伏发电和储能装置联合运行的并网技术日渐成熟,优化其运行成了不可避免且至关重要的课题.因为风力资源和光资源在自然界中具有不确定性,所以如果运用不当,就会出现严重的弃

收稿日期:2020-04-07

基金项目:河北省重点研发计划项目(20327307D);河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2020145)

第一作者:杨森(1995—),男,河北保定人,河北农业大学在读硕士研究生,主要从事地方电力系统及其自动化研究.

E-mail: 779488410@qq.com

通信作者:张青(1964—),女,辽宁大连人,河北农业大学教授,主要从事电气工程研究.E-mail: auhzhangq@163.com

风弃光现象.在风电和光伏发电系统中,将抽水蓄能系统作为一种特殊的储能装置,可以与其合理配合,在系统调峰过程中缓解电网压力,提高风电、光伏的消纳水平<sup>[4-6]</sup>.

文献[7]建立了抽水蓄能-风力和光伏电站联合发电的数学模型,对联合发电系统进行了出力特性分析和功率预测,采用多变异自适应遗传算法优化抽水蓄能电站的出力值,但是计算过程中稳定性有所欠缺.文献[8]提出了同时动态调整学习因子和惯性权重的粒子群算法,对风-光-抽水蓄能联合发电模型进行求解,但在采用惩罚函数来处理约束条件时,对惩罚因子的选取有些困难.文献[9]通过风-光-抽水蓄能的联合运行,使系统的综合出力更好地适应负荷特性,提高风电、光伏消纳能力,并建立了联合优化模型,但是只介绍了系统出力跟随负载曲线,没有考虑到联合发电系统的经济效益.文献[10]构建了风-光-抽水蓄能联合发电系统模型,提出了一种基于电力市场环境下的联合运行方法,但是采用的改进遗传算法精度较低,联合发电系统的出力优化不够精确,寻优能力较弱.文献[11]提出基于改进万有引力搜索算法,解决微网中多约束优化问题,但是算法的运行时间比较长,需要的参数较多.

本文通过改进粒子群万有引力算法,引入混沌算法与惯性权重,并改进步长因子,在风-光-抽水蓄能联合发电系统的基础上,以经济效益最大化为目标建立数学模型,优化联合发电系统出力,得出联合发电系统最佳出力值.

## 1 联合发电系统

### 1.1 联合发电系统结构

风力发电和光伏发电因受风能和光能资源的影响,具有很强的波动性和季节性.在风、光资源充足时,如果不合理调配,不仅很容易导致资源的浪费,还会因为波动性对电网造成损失.在用电低峰期时,光伏和风力发电系统发出的电能一部分用于并网和负载使用,另一部分带动主厂房的水泵将下水库的水抽到上水库,将多余电能转化为势能储存起来;在用电高峰期时,光伏和风力发电系统发出的电不够负载使用,蓄能电站将上水库的水引向下水库,将势能转化为电能.联合发电系统结构如图 1 所示.抽水蓄能电站作为储能系统,就是实现在势能和电能之间转化,间接将风光发电系统的剩余电量储存起来,实现能源利用率最大化.

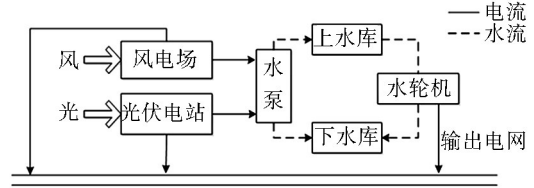


图 1 联合发电系统

Fig.1 structure of co-generation system

### 1.2 联合发电系统数学模型

#### 1.2.1 目标函数

以联合发电系统的经济效益最大化为目标,建立目标函数.目标函数为

$$E_{\max} = \sum_{t=0}^{23} [C_{t_1} \times (P_{pv} + P_w + P_p) - C_{qs} \times N_{qp}^t - C_{ts} \times N_{sp}^t - \delta \times C_k \times P_n],$$

$$P_n = |P_{pv} + P_w + P_p - P_{plan}|, \quad (1)$$

式中, $E_{\max}$ 为最大收益; $C_{t_1}$ 为 $t$ 时刻上网电价; $C_{qs}$ 、 $C_{ts}$ 为抽水蓄能水泵启、停成本; $C_k$ 为出力偏差惩罚电价; $N_{qp}^t$ 、 $N_{sp}^t$ 分别为 $t$ 时刻抽水蓄能水泵启、停台数; $\delta$ 为出力偏差惩罚系数; $P_{pv}$ 、 $P_w$ 、 $P_p$ 、 $P_{plan}$ 分别为光伏电站、风力电场、抽水蓄能直接输送到大电网的功率以及计划出力; $P_n$ 为系统出力偏差,且

上述目标函数中,在最高效利用资源的同时,寻求风-光-抽水蓄能的最佳出力情况,使得联合发电系统的收益最大化.

#### 1.2.2 约束条件

出力偏差约束为

$$(1-\alpha)P_{plan} \leq P_{pv} + P_w + P_p \leq (1+\alpha)P_{plan}, \quad (2)$$

式中, $\alpha$ 为系统运行过程中,相对于 $P_{plan}$ 允许的最大偏差.

上、下水库水量平衡约束<sup>[12]</sup>为

$$\begin{cases} V_t^u = V_{t-1}^u + f_u(P_{cp}, H_{yc}) - f_d(P_p, H_{st}) \\ V_t^d = V_{t-1}^d - f_u(P_{cp}, H_{yc}) + f_d(P_p, H_{st}) \end{cases}, \quad (3)$$

式中,  $V_t^u$ 、 $V_t^d$  分别为上、下水库在  $t$  时刻的存水量;  $V_{t-1}^u$ 、 $V_{t-1}^d$  分别为  $t-1$  时刻上、下水库的存水量.  $f_u(P_{cp}, H_{yc})$  表示抽水功率  $P_{cp}$  和扬程  $H_{yc}$  该时刻下抽到上水库中的水量, 关系式为

$$Q_t = \frac{P_{cp} \eta_{tc}}{9.81 H_{yc}}, \quad (4)$$

式中,  $Q_t$  为  $t$  时刻电站流量;  $\eta_{tc}$  为  $t$  时刻抽水效率.

$f_d(P_p, H_{st})$  表示抽水蓄能发电功率  $P_p$  和水头  $H_{st}$ , 该时刻下因发电流到下水库的水量, 关系式为

$$Q_t = \frac{P_p}{9.81 H_{st} \eta_{tf}}, \quad (5)$$

式中,  $Q_t$  为  $t$  时刻电站流量;  $\eta_{tf}$  为  $t$  时刻的发电效率.

水库库容约束

$$\begin{cases} V_{\min}^u \leq V_t^u \leq V_{\max}^u \\ V_{\min}^d \leq V_t^d \leq V_{\max}^d \end{cases}. \quad (6)$$

一天循环首末时刻水量差约束

$$\varphi_{\min} \leq V_{24} - V_0 \leq \varphi_{\max}. \quad (7)$$

输出功率平衡约束

$$\begin{cases} P_{pv}^t + P_w^t = P_{pv}^{to} + P_w^{to} + P_{cp}^t \\ P_{pv}^t + P_w^t + P_p^t = P_{pv}^{to} + P_w^{to} \end{cases}, \quad (8)$$

式中,  $P_{pv}^t$ 、 $P_w^t$ 、 $P_p^t$  为  $t$  时刻风、光伏电站和抽水蓄能电站的发电功率,  $P_{pv}^{to}$ 、 $P_w^{to}$  为  $t$  时刻风、光伏电站的直接输送到负载的功率,  $P_{cp}^t$  为  $t$  时刻抽水蓄能电站的抽水功率.

风电场、光伏电站输出功率约束

$$\begin{cases} P_w^{\min} \leq P_w \leq P_w^{\max} \\ P_{pv}^t + P_w^t = P_p^t + P_{pv}^{to} + P_w^{to} \end{cases}. \quad (9)$$

抽水蓄能机组功率约束

$$P_p^{\min} \leq P_p \leq P_p^{\max}. \quad (10)$$

## 2 算法介绍

### 2.1 粒子群万有引力混合算法(PSOGSA)

万有引力搜索算法(gravitational search algorithm, GSA)<sup>[13]</sup>是 2009 年第 1 次由 Esmat 等提出. 传统 GSA 算法运行过程中缺乏一定的记忆性和群体交流, 在位置更新时, 当前粒子仅对目前迭代中的位置起作用, 对其他的粒子没有信息共享的能力, 进而就会出现算法早熟、容易陷入局部最优的现象. 为了防止万有引力搜索算法的弊端出现, 引入粒子群算法.

粒子群算法中, 对于个体而言, 不仅每个个体都具有记忆性, 而且每个个体都保存了自己搜索到的最优信息; 对于整个群体而言, 群体则会保留目前迭代状态下群体最优信息. 将粒子群算法的优点与万有引力搜索算法相结合, 可以充分克服 GSA 算法早熟、容易陷入局部最优的不足.

粒子群万有引力算法(particle swarm optimization and gravitational search algorithm, PSOGSA)<sup>[14]</sup>中个体的速度和位置更新公式为

$$v_j^h(t+1) = c_1 \times \beta_1 \times (pbest_j^h - x_j^h(t)) + c_2 \times \beta_2 \times (gbest^h - x_j^h(t)) + \beta_3 \times v_j^h(t) + a_j^h(t), \quad (11)$$

$$x_j^h(t) = x_j^h(t-1) + v_j^h(t), \quad (12)$$

式中,  $pbest_j^h$  为种群中第  $j$  个粒子的最优位置(个体极值);  $gbest^h$  为整个种群的最优位置(群体极值);  $a_j^h(t)$  为粒子  $j$  在第  $h$  维的加速度.  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$  均为  $[0, 1]$  的随机数. 当  $c_1$ 、 $c_2$  为 0 时, 混合算法的速度更新公式为万有引力搜索算法的速度更新公式.

## 2.2 改进粒子群万有引力混合算法 (IPSOGSA)

### 2.2.1 更新初始位置

算法初期,所有粒子的初始位置是随机的,有可能出现粒子分布稠密不均而导致算法收敛速度变慢,进而陷入局部最优.为解决此问题,引入混沌理论算法来进行初始化,混沌理论算法

$$y(n+1) = 4y^3(n) - 3y(n), \quad (13)$$

式中,  $y(n) \in (-1, 1)$ , 且  $y(n) \neq 0$ .

初始化的方法:在  $H$  维空间里的  $Z$  个粒子个体,先随机产生第 1 个  $H$  维向量  $y_1$  的个体,再利用式(13)对  $y_1$  进行  $Z-1$  次迭代,产生  $Z-1$  个个体,取值为  $[-1, 1]$ ,

$$x_{ij} = x_{fmin} + \frac{(x_{fmax} - x_{fmin})(y_{ij} + 1)}{2}, \quad (14)$$

式中,  $x_{ij}$  为目标种群里粒子  $i$  在  $j$  维度上的值;  $x_{fmax}$ 、 $x_{fmin}$  分别表示为个体取值的上、下限;  $y_{ij}$  表示混沌算法下粒子  $i$  在  $j$  维度上的值.

### 2.2.2 引入惯性权重

在原始 PSOGAS 算法里,位置更新时,局部与全局之间作用没有明显的界限;迭代后期,随着个体间的距离变小,引力也随之增大,就会在局部或者全局极值附近出现振荡现象,导致无法稳定在最优值位置.引入惯性权重  $\omega'$ ,可以很好地平衡全局探索能力和局部开发能力,即

$$\omega' = 1 - \frac{0.2(f_i - f_{min})}{f_{max} - f_{min}}, \quad (15)$$

式中,  $f_i$  为第  $i$  个粒子的适应度值;  $f_{max}$ 、 $f_{min}$  分别为最优个体和最差个体适应度值.故改进后位置更新公式为

$$x_j^h(t) = \omega' x_j^h(t-1) + v_j^h(t). \quad (16)$$

### 2.2.3 改进步长因子

由文献[15]可知,  $g_{best}$  加入到速度矢量中会削弱寻优能力.文献[15]对  $c_1$ 、 $c_2$  处理时,前期的自适应程度较低,所以对  $c_1$ 、 $c_2$  进行以下修正:

$$\begin{cases} c_1 = -\ln\left(1 + \frac{a^2}{A}\right) \\ c_2 = \ln\left(1 + \frac{a^2}{A}\right) \end{cases}, \quad (17)$$

式中,  $a$  是迭代数,  $A$  是最大迭代数.

### 2.2.4 算法步骤

1) 初始化混合算法参数.初始化算法种群数量、迭代数等参数,用混沌理论初始化粒子的位置;

2) 计算初始适应度值.根据式(1)计算初始位置下各粒子的适应度值;

3) 更新步长因子和速度.根据当前迭代数,采用式(17)更新  $c_1$ 、 $c_2$ ,并代入式(11)计算当前各粒子速度;

4) 更新粒子位置.找出最优个体和最差个体适应度值,进而以式(15)和(16)更新种群中每个粒子的位置;

5) 更新适应度值.将更新位置的粒子以式(1)为适应度函数,计算当前迭代数下各粒子新的适应度值;

6) 检验是否达到最优条件.判断算法迭代数是否达到最大,或者连续若干次最优值是否保持不变,若满足,则停止搜索,否则转向 3).

算法流程如图 2 所示.

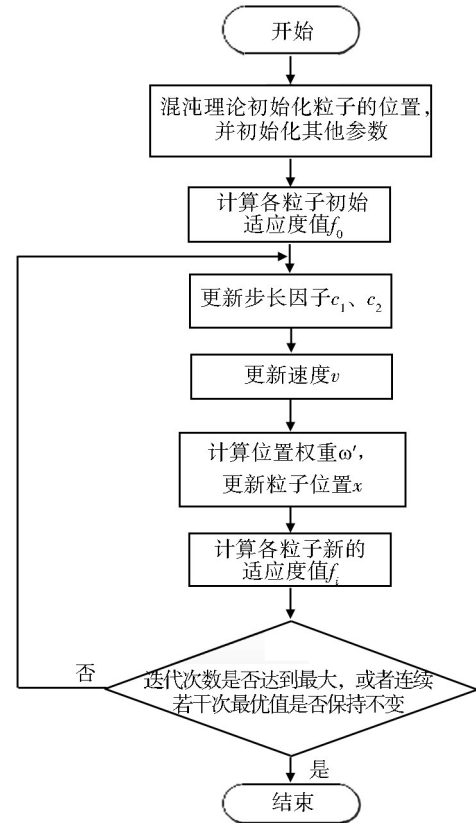


图 2 算法流程

Fig.2 Flow chart of algorithm

### 3 算例分析与实验结果

联合发电系统及算法初始化数据设置如下:最大迭代  $T=1\ 000$  次,维数  $n=3$ ,种群规模  $Z=600$ ;风电场、光伏电站的装机容量分别为  $3\ 000$ 、 $1\ 000$  MW,抽水蓄能机组为  $4\times 300$  MW;设置出力偏差在  $P_{\text{plan}}$  的  $5\%$ ;发电效率  $0.8$ ;抽水效率  $0.938$ ;抽水蓄能单机启、停成本  $2\ 000$  元/次;惩罚系数  $\delta=1.5$ ;抽水蓄能的水头/扬程为  $311$  m;抽水蓄能上、下库总库容分别为  $4.38\times 10^7\ \text{m}^3$ 、 $3.764\times 10^7\ \text{m}^3$ ;上、下水库调节库容为  $2.775\ 5\times 10^7\ \text{m}^3$ ;一天  $0:00$  上水库蓄水为  $2.0\times 10^7\ \text{m}^3$ ,首末时刻库容差  $5\times 10^6\ \text{m}^3$ . 根据电力市场分时上网电价设定参考电价,如图 3 所示.

采用 IPSOGSA 算法优化风-光-抽水蓄能联合发电系统,计算得出联合系统各系统出力值、抽水蓄能启停台数和算法迭代数,结果见表 1.计算得出总经济效益,并分别与 PSO、GSA、PSOGSA 算法比较分析.

在实际工程算例当中,人为设定  $19:00$  至次日  $7:00$  没有光照,光伏出力为  $0$ .

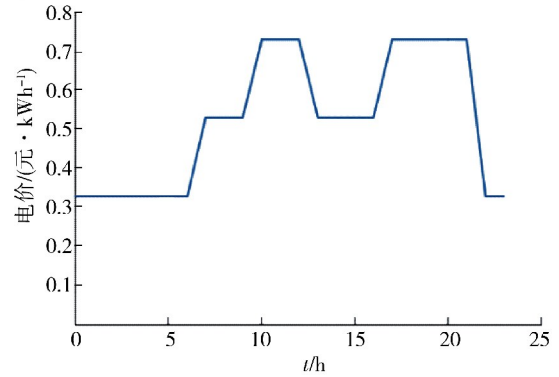


图 3 分时上网电价

Fig.3 Time-of-use feed-in tariff

表 1 IPSOGSA 优化后联合发电系统出力结果

Tab. 1 Output results of ipsogsa optimized co-generation system

时刻	电价/元	风电/MW	光伏/MW	抽水蓄能/MW	抽水蓄能水泵/台	迭代/次
0:00	0.33	2 711	0	-910	3	577
1:00	0.33	2 507	0	-902	3	555
2:00	0.33	2 099	0	-687	2	541
3:00	0.33	1 987	0	-675	2	552
4:00	0.33	1 914	0	-564	2	571
5:00	0.33	1 993	0	-539	2	604
6:00	0.33	2 109	0	-602	2	597
7:00	0.53	2 188	0	-623	2	547
8:00	0.53	2 373	327	-682	2	507
9:00	0.53	2 772	509	-928	3	554
10:00	0.73	1 364	986	606	2	581
11:00	0.73	1 560	1 000	945	3	603
12:00	0.73	2 010	993	692	2	590
13:00	0.53	2 180	889	341	1	593
14:00	0.53	2 070	772	312	1	566
15:00	0.53	1 995	685	303	1	547
16:00	0.53	2 002	534	313	1	526
17:00	0.73	2 250	433	397	1	437
18:00	0.73	2 620	329	504	2	571
19:00	0.73	2 720	0	899	3	553
20:00	0.73	2 773	0	902	3	527
21:00	0.73	2 671	0	709	2	511
22:00	0.33	2 576	0	-332	1	538
23:00	0.33	2 751	0	-896	3	505



抽水蓄能出力的数值为负值,表示抽水蓄能输出功率,蓄能电站处于发电状态,工作方式为上水库的水流向下水库,将势能转化为电能,风、光联合出力高于电网计划出力;数值为正值时,状态与负值相反。

一天当中,20:00时,风电场出力达到峰值2773MW,同时抽水蓄能出力相对较高,达到902MW,这是因为一天当中达到了风力最大值,抽水蓄能电站由上水库向下水库放水量加大,说明此时进入了用电高峰期,负载达到了峰值,风-光-抽水蓄能共同向大电网输电,风光联合发电系统低于电网计划出力;0:00时,抽水蓄能出力达到负峰值910MW,此时用电负荷较少,此时主要依靠大电网供电,但是因天气原因,风电场出力较多时,多余电量在蓄能电站转化为势能,使得抽水蓄能电站出力较大。

在4种算法情况下,联合系统出力与计划出力对比如图4所示。由图4可知,联合系统在IPSOGSA算法下,更接近出力计划,精度最大,波动性最小,偏差也最小。

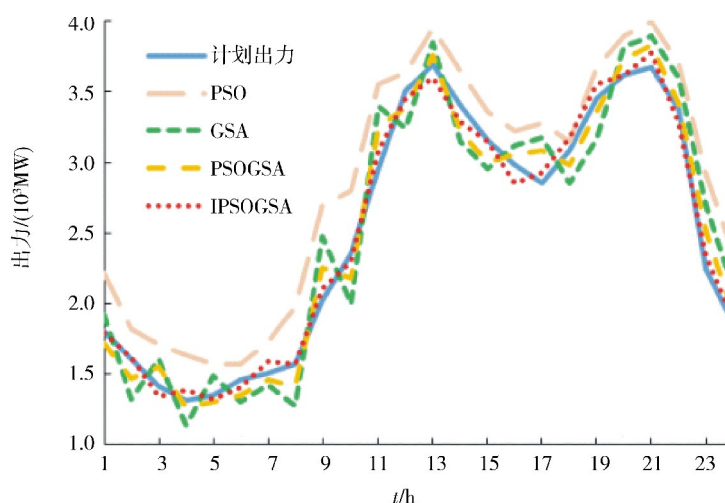


图4 4种算法下联合系统出力与计划出力对比

Fig. 4 Comparison of joint system output and planned output under four algorithms

优化后,根据式(1)得出:风-光-抽水蓄能联合发电系统在一天的总收益为1079.4万元,PSO、GSA、PSOGSA分别得到的总收益为891.3、949.7、991.9万元;IPSOGSA算法迭代在500~605次,PSO、GSA、PSOGSA迭代数分别为900~975、775~850、650~750。由于篇幅限制,本文以11:00时为例,分别对比4种算法下的迭代数和收益即适应度值,对比结果如图5所示。

由此可以得出,利润方面本文算法IPSOGSA能够更高于PSO、GSA、PSOGSA算法,是由于迭代过程中,粒子位置更新时改进了步长因子,令步长因子采用自适应值,使得算法在探索与开发2个阶段逐步过渡,粒子向最优解加速,在计算精度方面更具有优势。在算法初期引入混沌算法初始化粒子位置,使初始粒子分布均匀,便于算法在寻优过程中更好地把握初始粒子位置,加快了收敛速度,使得迭代数更少,可以充分满足工程需要。此外,加入惯性权重,各部分出力优化过程中避免出现“出力振荡”的现象。

综上所述,通过改进的粒子群万有引力算法(IP-SOGSA)迭代次少、寻优能力和稳定性强,应用此算法优化后的联合发电系统经济效益最大。

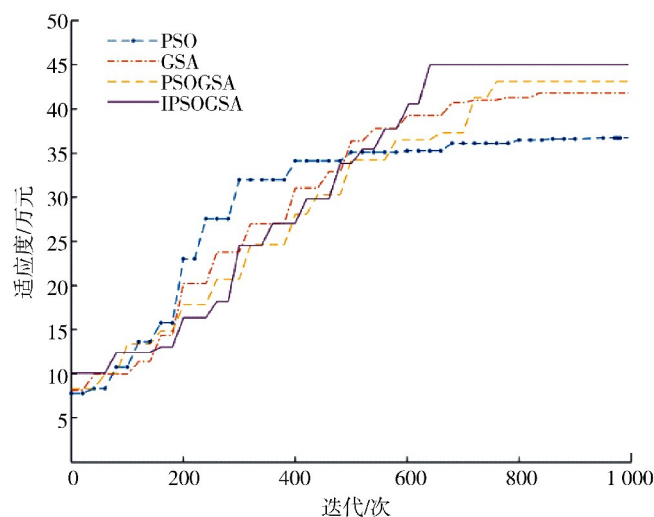


图5 11:00时不同算法适应度对比

Fig.5 Fitness comparison of different algorithms at 11:00

## 4 结 论

本文在粒子群万有引力混合算法基础上,引入混沌算法,加入惯性权重并改变步长因子,提高了算法的寻优能力,通过算例验证了其优越性;将改进的算法应用于优化对风-光-抽水蓄能联合发电系统的出力,通过对比计划出力曲线与 4 种算法下的出力曲线、在同一时刻条件下不同算法的迭代数与经济效益,IPSO GSA 算法更接近计划出力曲线,达到的利润高于其他算法所计算出的利润,并且迭代数更少。

### 参 考 文 献:

- [1] 张宁,康重庆,肖晋宁,等.风电容量可信度研究综述与展望[J].中国电机工程学报,2015,35(1):82-94.DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.2015.01.011.
- [2] AEIDAPU M, KANWARJIT S S. Hybrid wind/photovoltaic energy system developments: critical review and findings[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 52: 1135-1147.DOI:10.1016/j.rser.2015.08.008.
- [3] 丁明,王伟胜,王秀丽,等.大规模光伏发电对电力系统影响综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):1-14.DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.01.001.
- [4] 邹金,赖旭,汪宁渤.以减少电网弃风为目标的风电与抽水蓄能协调运行[J].电网技术,2015,39(9):2472-2477.DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2015.09.015.
- [5] 王辉,崔建勇.对应光伏并网的抽水蓄能电站优化运行[J].电网技术,2014,38(8):2095-2101.DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2014.08.012.
- [6] BUENO C, CARTA J A. Technical-economic analysis of wind-powered pumped hydro storagesystems[J]. Solar Energy, 2005,78(3): 382-405.
- [7] 郭伟钊.抽水蓄能、风力和光伏电站群联合运行研究[D].北京:华北电力大学,2011.
- [8] 吕优.风-光-抽水蓄能联合发电系统优化调度研究[D].西安:西安理工大学,2018.
- [9] 马实一.风电-光伏-抽水蓄能联合优化运行模型建立与应用[J].供用电,2018, 35(1): 80-85.DOI:10.19421/j.cnki.1006-6357.2018.01.014.
- [10] 马实一,李建成,段聪,等.基于电力市场背景的风-光-抽水蓄能联合优化运行[J].新能源,2019,47(8): 43-49.
- [11] 李鹏,徐伟娜,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.DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.19.005.
- [12] 钱晨昊.抽水蓄能与风光联合运行成本效益研究[D].北京:华北电力大学,2018.
- [13] RASHEDI E, NEZAMABADI-POUR H, SARYZZDI S. GSA: A gravitational search algorithm [J]. Information sciences, 2009, 179(13): 2232-2248.DOI:10.1016/j.ins.2009.03.004.
- [14] MIRJALILI S, LWEIS A. Adaptive gbest-guided gravitational search algorithm [J]. Neural Computing and Application, 2014, 25(7/8): 1-16.DOI:10.1007/s00521-014-1640-y
- [15] 马力,刘丽涛.万有引力搜索算法的分析与改进[J].微电子学与计算机,2015,32(9):76-80.DOI:10.19304/j.cnki.issn1000-7180.2015.09.015.

(责任编辑:王兰英)