

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.06.007

# 基于 LQ-GSA 的独立型微网容量优化配置

黄保乐, 袁晓玲

(河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**独立型微网容量优化配置是微网规划建设中的重要环节,文中提出一种基于莱维飞行的量子引力搜索算法(LQ-GSA)对独立型微网系统中的风力发电、光伏发电和蓄电池容量进行优化配置。在保证系统供电可靠性和新能源消纳的基础上,建立以平准化能源成本为优化目标的独立型微网容量优化配置模型,通过引入收缩扩张系数动态调整策略和莱维飞行改进量子引力搜索算法以增强算法的全局寻优能力。利用文中所建立的模型进行仿真分析,并与其他万有引力搜索算法和粒子群算法结果比较,算例结果表明所提算法具有较高的求解精度和稳定性,能够保证独立微网系统的经济可靠运行。

**关键词:**独立型微网;量子引力搜索算法;莱维飞行;收缩扩张系数;优化配置

**中图分类号:**TM71

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2019)06-0047-08

## 0 引言

长期以来,偏远地区(如岛屿、山脉和荒漠)电力通常由消耗化石能源的传统发电机提供,价格昂贵的同时也会排放大量二氧化碳,因此能源问题成为限制其发展的重要因素。由太阳能、风能及储能装置组成的独立型微网系统能够弥补传统电网远距离输电建设成本高、能量损耗大等不足,现已逐渐成为解决偏远地区供电问题的关键技术<sup>[1-4]</sup>。微网的优化过程较为复杂,其优化配置问题是微网规划、设计以及建设的核心问题之一,合理的配置是保证系统经济、稳定运行的基础<sup>[5-6]</sup>,因此研究微网优化配置方法对微网建设具有重要意义。

微网容量优化问题是一个包含多变量的复杂非线性优化问题,群体智能优化算法已成为解决该问题的主要方法之一<sup>[7]</sup>。文献[8]利用杂交粒子群算法和风光互补组合系数对万有引力搜索算法进行改进,分析网内负载的使用情况,为住宅微网建设提供了一种可行的方案。文献[9]通过在标准和声搜索算法中引入莱维飞行与搜索偏好机制,提出一种基于莱维飞行和声搜索算法的孤岛微网系统优化设计方法,加强了算法全局搜索能力和收敛速度。文献[10]提出一种改进细菌觅食算法用于求解混合微网电源优化配置问题,并用该方法全面评估分布式电源的经济性。文献[11]利用多目标自适应差分进化算法对具有蓄电池容量的风/光/柴微网进行优化配置,为研究人员选择最优容量配置提供了理论基础。

量子引力搜索算法(quantum inspired gravitational search algorithm, QGSA)由 Mohadeseh Soleimanpour-Moghadam 等人在 2012 年提出,该算法是在万有引力搜索算法(gravitational search algorithm, GSA)的基础上提出的一种新型智能优化算法<sup>[12]</sup>。相比于 GSA 和其他同类智能优化算法,QGSA 的收敛性能有显著优势<sup>[13-14]</sup>。但是,QGSA 算法依然存在全局寻优能力差的问题,仍需对其进行改进,进一步提高算法寻优性能。

针对含风力发电、光伏发电和蓄电池的独立型微网容量优化配置问题,首先,在保证微网供电可靠性和新能源消纳的基础上,以系统平准化能源成本最小为优化目标;然后,采用收缩扩张(contraction-expansion, CE)系数动态调整策略和莱维飞行,对量子引力搜索算法进行改进,提出基于莱维飞行的量子引力搜索算法(quantum inspired gravitational search algorithm based on levy flight, LQ-GSA),并将该算法与其他万有引力搜索算法和粒子群(particle swarm optimization, PSO)算法进行比对,验证文中所提优化模型和算法的有效性。

## 1 微网优化配置模型

文中提出的独立型微网系统架构如图 1 所示。其中,风力发电机(wind turbine, WT)、光伏电池板(photovoltaic panel, PV)和储能电池(battery, BAT)分别通过各自整流器或逆变器接入微网直流母线。

### 1.1 微网出力模型

#### 1.1.1 风机模型

风力发电机组的输出功率与风速之间的关系可以描述为<sup>[15-18]</sup>:

收稿日期:2019-06-21;修回日期:2019-08-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577049)

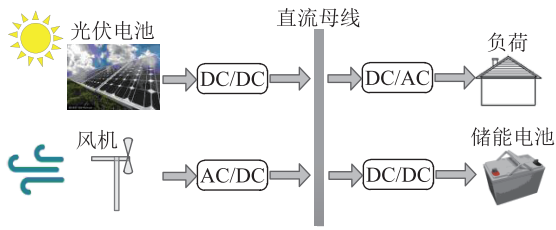


图1 微网系统简化模型

Fig.1 Structure of standalone microgrid

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq v < v_{ci} \\ P_r \frac{v(t) - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_r & v_r \leq v < v_{co} \\ 0 & v_{co} \leq v \end{cases} \quad (1)$$

式中： $v_{ci}$  为风力机组切入风速； $v_{co}$  为切出风速； $v_r$  为额定风速； $P_r$  为风力发电机组额定输出功率。

### 1.1.2 光伏模型

光伏板实际输出功率可由标准额定条件下的输出功率、光照强度得到<sup>[19-20]</sup>：

$$P_{PV} = \begin{cases} cP_{rs} & 0 \leq r < R_{CR} \\ dP_{rs} & R_{CR} \leq r < R_{SRS} \\ P_{rs} & R_{SRS} \leq r \end{cases} \quad (2)$$

式中： $P_{PV}$  为标准额定条件下光伏额定输出功率； $P_{rs}$  为光伏板额定功率； $R_{CR}$  为一个特定的辐射点集，一般取  $150 \text{ W/m}^2$ ； $R_{SRS}$  为标准额定条件下太阳辐照度，一般取  $1000 \text{ W/m}^2$ ；参数  $c$  和  $d$  的计算参考文献[15]。

### 1.1.3 蓄电池模型

电池荷电状态 (state of charge, SOC) 表示电池使用过后剩余的电量，是衡量蓄电池剩余电量的重要参数<sup>[21-23]</sup>，由前一时刻剩余电量和相邻时刻充放电功率决定。

$$\begin{cases} \text{充电: } S_{SOC}(t+1) = S_{SOC}(t) - \Delta t P_d(t) / \eta_d \\ \text{放电: } S_{SOC}(t+1) = S_{SOC}(t) + \Delta t P_c(t) / \eta_c \end{cases} \quad (3)$$

式中： $S_{SOC}(t+1)$ ， $S_{SOC}(t)$  分别为第  $t+1$ 、 $t$  个时段结束时的剩余电量； $P_c(t)$ ， $P_d(t)$  分别为  $t$  时刻冲、放电功率； $\eta_c$ ， $\eta_d$  分别为  $t$  时刻冲、放电效率； $\Delta t$  为采样步长，取  $\Delta t = 1$ 。

## 1.2 目标函数

文中以风机台数  $N_{WT}$ 、光伏板数量  $N_{PV}$  和蓄电池个数  $N_{BAT}$  作为优化变量，在保证系统供电可靠性的前提下，以平准化能源成本 (levelized cost of energy, LCOE) 最小为优化目标，即：

$$\min F(x) = L_{LCOE} \quad (4)$$

平准化能源成本是衡量独立微网系统经济性

的重要指标<sup>[24]</sup>，其数学表达式如下所示：

$$L_{LCOE} = \frac{N_{PC} C_{RF}}{\sum_{t=1}^{8760} E_{load}(t)} \quad (5)$$

式中： $E_{load}(t)$  为微网逐时负荷需求； $N_{PC}$  为工程寿命周期内的总净现值成本； $C_{RF}$  为贴现率。

$$\begin{cases} N_{PC} = C_1 + C_{OM} + C_R - C_S \\ C_{RF} = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $C_1$ ， $C_{OM}$ ， $C_R$ ， $C_S$  分别为系统各组件的初始投资费用、运营维护费用、置换费用和设备残值； $r$  为实际贷款利率； $n$  为系统工程寿命周期。

## 1.3 约束条件

### 1.3.1 装机容量约束

$$N_{imin} < N_i < N_{imax} \quad (7)$$

式中： $N_{imin}$ ， $N_{imax}$  分别为系统允许的第  $i$  种电源（主要包括风机、光伏和蓄电池）的最大和最小安装数量。

### 1.3.2 功率平衡约束

$$P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{BAT}(t) + P_{loss}(t) - P_1(t) - P_{waste}(t) = 0 \quad (8)$$

式中： $P_{WT}(t)$ ， $P_{PV}(t)$ ， $P_{BAT}(t)$ ， $P_1(t)$  分别为  $t$  时刻风机发电功率、光伏发电功率、电池充放电功率及负荷功率； $P_{loss}(t)$ ， $P_{waste}(t)$  分别为  $t$  时刻系统缺电量和浪费功率。

### 1.3.3 蓄电池容量约束

$$S_{SOC,min} < S_{SOC}(t) < S_{SOC,max} \quad (9)$$

式中： $S_{SOC}(t)$  为  $t$  时刻蓄电池容量； $S_{SOC,min}$  为蓄电池最大放电深度时的电荷容量； $S_{SOC,max}$  为蓄电池满荷时的容量。

### 1.3.4 可靠性约束

供电可靠性用负荷缺电率<sup>[25]</sup> (loss of power supply probability, LPSP) 表示。通常情况下，负荷缺电率只要在一个系统允许范围即可，即：

$$L_{LPSP} = \frac{\sum_{i=1}^m \left( P_1(t) - \sum_{i=1}^2 P_i(t) \right)}{\sum_{t=1}^{8760} P_1(t)} < L_{LPSP,max} \quad (10)$$

式中： $L_{LPSP,max}$  为负荷最大允许缺电率，文中取 5%。

### 1.3.5 能量溢出比约束

能量溢出比 (energy wastage rate, EWR) 指在时间  $T$  内系统溢出的能量与可再生能源发出总能量的比值<sup>[26]</sup>，通常情况下，能量溢出比在一定的允许范围即可，即：

$$E_{\text{EWR}} = \frac{\sum_{t=1}^T \left( \sum_{i=1}^2 P_i(t) - P_l(t) \right)}{8.760 \sum_{t=1}^T (P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{PV}}(t))} < E_{\text{EWR,max}} \quad (11)$$

式中:  $E_{\text{EWR,max}}$  为系统最大允许浪费率,文中取 30%。

## 2 算法模型及其改进

### 2.1 QGSA

QGSA 是量子计算与 GSA 的结合。在 GSA 中,粒子间通过引力作用实现优化信息共享,质量较小的粒子朝向质量较大的粒子运动,以此来搜索整个解空间<sup>[27]</sup>。在 QGSA 中,粒子一般通过薛定谔方程进行位置更新,算法过程描述如下。

步骤 1:初始化算法中所有粒子的位置,并设置迭代次数与算法中的参数。在  $D$  维搜索空间内随机生成  $N$  个粒子,其中粒子的位置可表示为  $X_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^k, \dots, x_i^D)$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ 。

步骤 2:计算每个粒子的适应度值。

步骤 3:选择群体中的  $k_{\text{best},j}$  和  $p_{\text{best},j}$ 。设在  $t$  时刻只允许拥有最好适应度值的  $k$  个粒子对其他粒子起作用。 $k_{\text{best},j}$  为前  $k$  个粒子中拥有最优适应值时的粒子位置; $p_{\text{best},j}$  为单个粒子在迭代过程中适应度值最优时的粒子位置,每次迭代后,若当前粒子适应度值最优,则使用当前粒子位置替换  $p_{\text{best},j}$ 。

步骤 4:更新  $M_{\text{best},i}$ 。更新公式如下:

$$M_{\text{best},i} = \frac{\sum_{j=1}^K \frac{1}{D_{i,j}} k_{\text{best},j}}{\sum_{l=1}^K \frac{1}{D_{i,l}}} \quad (12)$$

$$D_{i,l} = \|X_i - k_{\text{best},l}\| \quad (13)$$

式中:  $D_{i,j}$  为粒子  $i$  和粒子  $j$  的欧式距离;  $D_{i,l}$  为粒子  $i$  和粒子  $l$  的欧式距离。

步骤 5:更新粒子吸引子位置  $P_{i,j}$ 。

$$P_{i,j} = \frac{c_1 M_{\text{best},i} + c_2 p_{\text{best},i}}{c_1 + c_2} \quad (14)$$

式中:  $c_1, c_2$  为在  $[0, 1]$  之间的随机数。

运用蒙特卡罗方法,得到粒子位置  $X_i$  的更新公式为:

$$X_i(t+1) = P_{i,j}(t) \pm \frac{L_{i,j}(t)}{2} \ln \left( \frac{1}{u} \right) \quad (15)$$

$$L_{i,j}(t) = 2\alpha |P_{i,j}(t) - X_{i,j}(t)| \quad (16)$$

式中:“ $\pm$ ”由随机数决定,当随机数大于 0.5 时,取“+”,反之取“-”;  $L_{i,j}(t)$  为粒子  $i$  第  $j$  维势阱长度;  $\alpha$  为 CE 系数,用随机数表示。

步骤 6:迭代操作。重复步骤 2—步骤 5,直至满足终止条件。

由式(15)可知,QGSA 算法搜索能力主要与势阱中心  $P_{i,j}$  和势阱长度  $L_{i,j}$  有关。 $P_{i,j}$  在整个群体中起着导向作用,决定粒子搜索方向;  $L_{i,j}$  反映了粒子搜索步长,决定粒子搜索范围。

### 2.2 改进的量子引力搜索算法

#### 2.2.1 CE 系数 $\alpha$ 的动态调整策略

在 QGSA 中,  $L_{i,j}(t) = 2\alpha |P_{i,j}(t) - X_{i,j}(t)|$ , CE 系数  $\alpha$  为调节势阱长度的关键参数。 $\alpha$  取值的不同,最直接的效果为影响势阱长度,增大或削减搜索空间,若采用随机数表示,会造成粒子收敛过程不稳定及不均匀。为克服上述不足,引入一种动态调整策略,其表达式如下所示:

$$\alpha(t) = \alpha_{\text{in}} e^{-\omega_1 \left( \frac{t}{m_{\text{maxgen}}} \right)^{\omega_2}} \quad (17)$$

式中:  $\alpha_{\text{in}}$  为初始值;  $m_{\text{maxgen}}$  为最大迭代次数;  $\omega_1, \omega_2$  为权值(文中取  $\omega_1 = 0.5, \omega_2 = 0.5$ )。

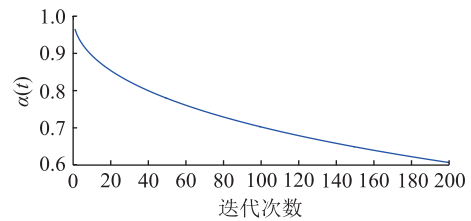


图2 收缩扩张系数控制策略

Fig.2 Contraction-expansion coefficient control strategy

如图 2 所示,  $\alpha(t)$  的动态调整策略有效避免粒子早熟收敛和陷入局部最优。迭代早期,  $\alpha$  较大有利于控制势阱长度  $L_{i,j}$  扩大粒子搜索范围,增加种群多样性;在迭代末期,  $\alpha$  较小有利于粒子精细化搜索,收敛到全局最优解。

#### 2.2.2 莱维飞行

由式(14)可以看出,势阱中心被限制在个体局部最优位置  $p_{\text{best}}$  和种群全局最优位置  $M_{\text{best}}$  构成的超矩形阵中,若此时  $M_{\text{best}}$  刚好陷入局部最优位置,则会造成算法早熟收敛。基于此,引入莱维飞行对全局最优粒子进行更新扰动,进一步提高算法搜索能力。

莱维飞行由法国数学家 Levy 提出,是一种服从莱维分布的随机游走搜索策略<sup>[28]</sup>,其位置更新公式为:

$$X_i(t+1) = X_i(t) + \alpha_0 \oplus Levy(\lambda) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

式中:  $X_i(t)$  为  $X_i$  第  $t$  代位置;  $\oplus$  为点对点乘法;  $\alpha_0$  为步长控制量。

莱维飞行的典型运动轨迹是小步长搜索和偶

尔的大步长搜索相结合的搜索模式,图3为莱维飞行与随机游走在二维空间中200步的对比轨迹。

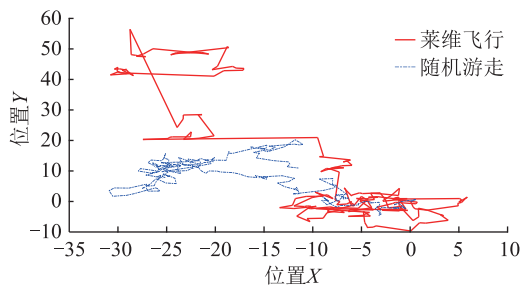


图3 莱维飞行与随机游走

Fig.3 Levy flight and random walk

利用莱维飞行独特的不均匀随机游走机制对量子势阱中心进行改进,以期对全局最优粒子进行更新扰动,在一定程度上帮助粒子跳出局部最优,进一步提升算法性能。基于该策略的改进算法中需要将原算法中的式(15)改为下式:

$$P_{i,j} = \alpha_0 (X_{i,j}(t) - x_{\text{worst}}) \oplus Levy(\lambda) \quad (19)$$

式中:  $x_{\text{worst}}$  为当代最差粒子位置。通过上述改进,陷入局部最优的粒子能够通过大小步长飞向原本小概率探索区域,增加种群多样性。

综合以上2种改进策略,LQ-GSA算法流程如图4所示。

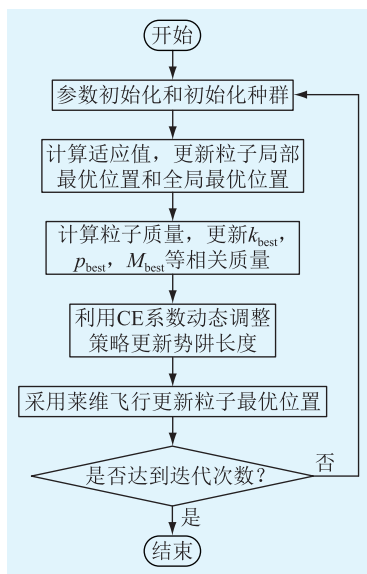


图4 LQ-GSA算法流程

Fig.4 Flow chart of LQ-GSA

### 3 算例分析

#### 3.1 算例描述

利用NASA数据库,选取某地区(经度120.86,纬度32.01)进行微网优化配置。该岛全年8760h的地面风速、辐照度及电力负荷需求如图5所示。

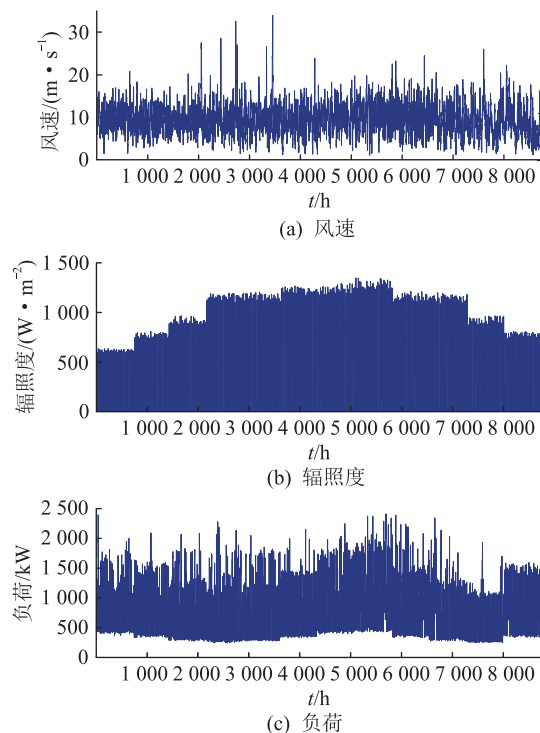


图5 风速、辐照度及负荷年数据曲线

Fig.5 Wind speed curve, solar radiation curve and load curve

设定系统优化规划使用年限为20a,各类待选电源型号及相关参数如表1所示。

表1 各类待选电源型号

Table 1 Parameters of the power source

参数	数值
额定容量/kW	100
切入风速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	3
额定风速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	13
切出风速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	25
逆变器效率/%	90
使用年限/a	20
单价/(元·台 $^{-1}$ )	800 000
工作电压/V	36
工作电流/A	8.19
额定功率/kW	1
转换效率/%	18
逆变器效率/%	97
使用年限/a	20
单价/(元·台 $^{-1}$ )	10 000
额定电压/V	2
额定容量/(A·h)	500
充放电效率/%	90
上下限/%	10~90
变流器效率/%	96
使用年限/a	10
单价/(元·台 $^{-1}$ )	1 000



### 3.2 仿真结果及分析

图 6 是 LQ-GSA 与 IGSA<sup>[7]</sup>、QGSA<sup>[14]</sup>、GSA、PSO 算法收敛曲线的对比。5 种算法的种群规模均设为 20,最大迭代次数取 200;GSA 算法中引力常数  $G_0 = 100$ ,衰减速率  $\alpha' = 20$ ;PSO 算法中  $c_1 = 2, c_2 = 2$ 。表 2 是各优化算法对应的优化结果。

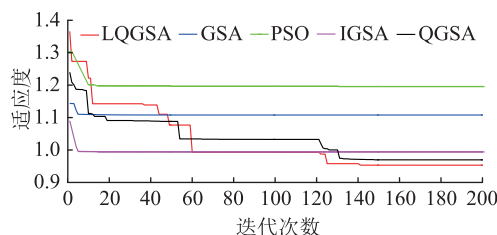


图 6 5 种算法收敛曲线对比

Fig.6 Convergence curve for 5 algorithms

表 2 5 种算法优化结果比较

Table 2 Comparison of optimization results among 5 algorithms

算法	时间/s	配置数量/台			$L_{LCOE}/$ (元·kW <sup>-1</sup> )
		风机	光伏	蓄电池	
LQ-GSA	10.30	16	4 001	4 506	0.949
IGSA	9.93	11	5 500	120	0.997
QGSA	10.03	16	4 011	5 922	0.970
GSA	9.45	11	5 593	7 630	1.038
PSO	9.81	9	7 650	8 831	1.263

对比图 6 的迭代结果可得, LQ-GSA 算法的收敛精度明显优于其他 4 种算法。IGSA、GSA 和 PSO 3 种算法在迭代初期具有一定的数据挖掘能力,但在前 20 次迭代左右粒子就陷入局部最优,且很难跳出;LQ-GSA 和 QGSA 算法收敛速度较前 3 种算法有所减慢,但其能够轻易跳出局部最优位置,在 100 次迭代后依旧能够跳出局部最优。且 LQ-GSA 算法求解精度更高,主要是由于 LQ-GSA 算法在 QGSA 算法基础上引入了莱维飞行,大步长结合小步长的搜索方式,扩大粒子搜索范围,极大地增强了粒子的全局搜索能力,使算法更易找到全局最优解,对比 QGSA 算法可见,在进行 100 次迭代后, LQ-GSA 算法的求解结果已明显优于 QGSA 算法。

对比表 2 的优化结果,在搜索时间大致相同的情况下,5 种算法给出的最优化方案各不相同,对于 LQ-GSA 算法求得配置结果的光伏与蓄电池的数量均最低。根据 5 种算法配置的风机、光伏和蓄电池数量模拟蓄电池全年荷电状态,并绘出全年荷电状态分布直方图,如图 7 所示。

由图 7 对比结果可知, LQ-GSA 算法配置结果下蓄电池  $S_{SOC}$  在 10%~20% 之间的频率为 9.074%,

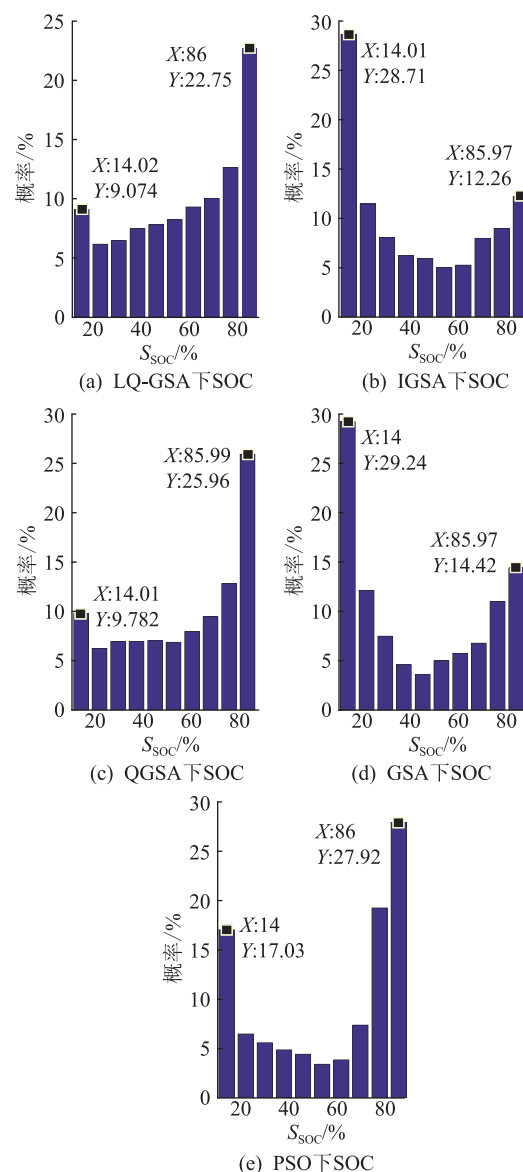


图 7 蓄电池全年荷电状态分布直方图

Fig.7 SOC occurrence frequencies during the simulated year

为所有配置结果中最低,且  $S_{SOC}$  在 80%~90% 之间的频率为 22.75%,在所有配置结果中居中,但其  $S_{SOC}$  在 20%~80% 的频率为 68.176%,为所有配置结果中最高,其次是 QGSA 算法,为 64.258%,之后是 IGSA,为 59.03%,GSA 为 53.66%,PSO 为 55.05%。由此可见,在 LQ-GSA 算法的配置结果下,蓄电池  $S_{SOC}$  基本维持在 20%~80% 之间,这样不仅能够有效的利用可再生能源的剩余发电量削峰填谷,还能够降低系统对蓄电池的容量需求,并有效的延长蓄电池的使用寿命。

由表 2 中 LQ-GSA 算法的配置结果,针对典型日负荷的风光发电曲线,及蓄电池的充放电曲线,如图 8 所示。在 24 h 内,蓄电池充放电状态交替出现,且不存在过长时间的充电或放电现象,同时,由

SOC 变化曲线可知,  $S_{SOC}$  一直维持在 0.4~0.6, 这样不仅能够保证系统供电的可靠性, 同时也能更好的消纳可再生能源, 避免可再生能源的浪费, 保证独立微网的经济可靠运行。

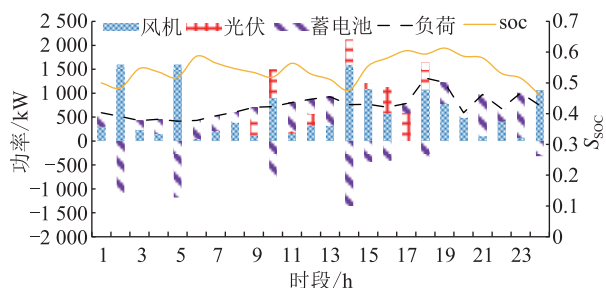


图 8 典型日负荷平衡及蓄电池荷电状态变化曲线

Fig. 8 Power load balance condition and SOC change curve

为了进一步验证所提 LQ-GSA 算法在解决独立微网优化运行问题中的优越性, 同时避免算法单次运行的偶然性给算法评价带来的不良影响, 分别对这 5 种算法在相同条件下独立运行 100 次, 其统计结果如表 3 所示, 统计结果如图 9 所示。

表 3 100 次计算统计结果

Table 3 Statistical results of 100 calculations

算法	时间/s	平均值	标准差	最劣解	最优解
LQ-GSA	563.59	0.96	0.015	1.03	0.94
IGSA	520.78	1.03	0.029	1.12	0.99
QGSA	530.69	1.01	0.047	1.14	0.95
GSA	503.75	1.05	0.032	1.18	1.00
PSO	520.34	1.07	0.051	1.19	0.96

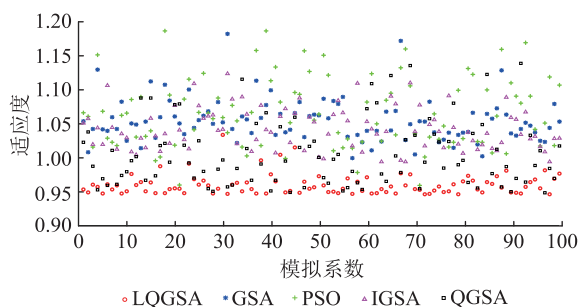


图 9 适应度统计结果

Fig.9 Fitness statistics results

对比表 3 和图 9 的优化结果可知, LQ-GSA 算法的平均值应值为  $0.96 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$ , 为所有算法中最低, 可见 LQ-GSA 算法求解精度最高, QGSA 算法次之, 可见量子策略在万有引力搜索算法中的效果明显。由图 9 可见, 在 100 次模拟过程中, LQ-GSA 算法较少次数陷入局部最优解, IGSA 与 QGSA 算法陷入局部最优解次数明显较多, QGSA 比 IGSA 较

差, 主要由于 QGSA 算法中局部最优粒子缺乏适当的加速机制, 容易陷入局部最优。由于 LQ-GSA 算法在 GSA 基础上引入改进量子策略与莱维飞行, 计算量显著增加, 因此计算时间有所增长, QGSA 与 IGSA 次之, PSO 最短。综合考虑算法收敛精度、稳定性和运行速度, LQ-GSA 算法在文中的微网优化配置模型下是一种收敛性能较理想的求解算法。

## 4 结论

针对独立型微网的优化配置问题, 以供电可靠性和可再生能源消纳为约束条件, 建立了以平准化能源成本最小为目标的优化模型, 并提出 LQ-GSA 算法进行求解, 结论如下:

(1) 通过对文中所提独立型微网容量优化配置模型实验仿真分析, 表明 LQ-GSA 算法改善了 QGSA 算法易陷入局部最优的缺陷, 在求解精度和稳定性方面, 比其他改进万有引力搜索算法与 PSO 算法均有很好的改善。

(2) 文中提出的 LQ-GSA 算法的微网容量优化配置方法能够有效利用可再生能源保证独立微网系统的经济可靠运行, 同时, 降低系统对蓄电池的容量需求, 并有效延长蓄电池的使用寿命。

## 参考文献:

- [1] ZHOU X, GUO T, MA Y. An overview on microgrid technology [C]//2015 IEEE international conference on mechatronics and automation (ICMA). IEEE, 2015: 76-81.
- [2] 田世明, 栾文鹏, 张东霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3482-3494.  
TIAN Shiming, LUAN Wenpeng, ZHANG Dongxia, et al. Technical forms and key technologies on energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14), 3482-3494.
- [3] 崔明勇, 王楚通, 王玉翠, 等. 独立模式下微网多能存储系统优化配置[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 30-38.  
CUI Mingyong, WANG Chutong, WANG Yucui, et al. Optimal configuration of multi-energy storage system in standalone microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 30-38.
- [4] 潘文霞, 李建成, 方坤豪. 考虑补贴的独立微网容量配置优化方法[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2206-2212.  
PAN Wenxia, LI Jiancheng, FANG Kunhao. Optimization method of capacity configuration of standalone microgrid considering subsidy [J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2206-2212.
- [5] 盛四清, 张晶晶, 陈玉良. 基于改进二进制蝙蝠算法的独立型微网容量优化配置[J]. 电力建设, 2017, 38(11): 121-128.  
SHENG Siqing, ZHANG Jingjing, CHEN Yuliang. Optimal sizing for stand-alone microgrid based on improved binary bat algorithm [J]. Electric Power Construction, 2017, 38(11): 121-128.

- [6] 余涛,袁简,晏阳,等. 有源配电网中储能双层精细优化配置方法[J]. 电力工程技术, 2017,36(6):111-116.  
YU Tao, YUAN Jian, YAN Yang, et al. A two-layer detailed optimization allocation method of energy storage in active distribution network [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017,36(6):111-116.
- [7] 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.  
LI Peng, XU Weina, ZHOU Zeyuan, et al. Optimal operation of microgrid based on improved gravitational search algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19):3073-3079.
- [8] 吴国庆,霍伟,茅靖峰,等. 基于改进万有引力搜索算法的住宅区微网优化[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21):1-10.  
WU Guoqing, HUO Wei, MAO Jingfeng, et al. Optimization allocation of residential districts' micro-grid via improved gravitational search algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2018,46(21):1-10.
- [9] LI P, LI R X, CAO Y, et al. Multi-objective sizing optimization for island microgrids using triangular aggregation model and levy-harmony algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, (99):1-1.
- [10] 马溪原,吴耀文,方华亮,等. 采用改进细菌觅食算法的风/光/储混合微电网电源优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25):17-25.  
MA Xiyuan, WU Yaowen, FANG Hualiang, et al. Optimal sizing of hybrid solar-wind distributed generation in an islanded microgrid using improved bacterial foraging algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25):17-25.
- [11] RAMLI M A M, BOUCHEKARA H, ALGHAMDI A S. Optimal sizing of PV/wind/diesel hybrid microgrid system using multi-objective self-adaptive differential evolution algorithm [J]. Renewable energy, 2018, 121: 400-411.
- [12] MOGHADAM M S, NEZAMABADI-POUR H, FARSANGI M M. A quantum behaved gravitational search algorithm[J]. Intelligent Information Management, 2012, 4(6): 390-395.
- [13] FAZLIANA ABDUL KADIR A, MOHAMED A, SHAREEF H, et al. An improved gravitational search algorithm for optimal placement and sizing of renewable distributed generation units in a distribution system for power quality enhancement [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2014, 6(3): 033112.
- [14] 曹茂俊,李盼池,尚福华. 量子行为引力搜索算法[J]. 控制与决策, 2016, 31(9):1678-1684.  
CAO Maojun, LI Panchi, SHANG Fuhua. A quantum-behaved gravitational search algorithm[J]. Control & Decision, 2016, 31(9):1678-1684.
- [15] MALEKI A, KHAJEH M G, AMERI M. Optimal sizing of a grid independent hybrid renewable energy system incorporating resource uncertainty, and load uncertainty [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 83: 514-524.
- [16] 茅靖峰,吴博文,吴爱华,等. 风力发电系统最大功率跟踪自适应鲁棒控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22):80-86.  
MAO Jingfeng, WU Bowen, WU Aihua, et al. Adaptive robust MPPT control for wind power generation system [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22):80-86.
- [17] 吴爱华,赵不赓,茅靖峰,等. 基于转矩观测器的垂直轴风力发电最大功率跟踪反演控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2):7-13.  
WU Aihua, ZHAO Buhui, MAO Jingfeng, et al. Back-stepping control for vertical axis wind power generation system maximum power point tracking based on torque observer[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2):7-13.
- [18] 丁明,王波,赵波,等. 独立风光柴储微网系统容量优化配置[J]. 电网技术, 2013, 37(3):575-581.  
DING Ming, WANG Bo, ZHAO Bo, et al. Configuration optimization of capacity of standalone PV-wind-diesel-battery hybrid microgrid [J]. Power System Technology, 2013, 37(3):575-581.
- [19] GEEM ZW. Size optimization for a hybrid photovoltaic-wind energy system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 42(1): 448-451.
- [20] PARK J, LIANG W, CHOI J, et al. A probabilistic reliability evaluation of a power system including solar/photovoltaic cell generator[C]//2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2009: 1-6.
- [21] 张有兵,任帅杰,杨晓东,等. 考虑价格型需求响应的独立型微电网优化配置[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7):55-62.  
ZHANG Youbing, REN Shuaijie, YANG Xiaodong, et al. Optimal configuration considering price-based demand response for stand-alone microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,37(7):55-62.
- [22] 林艺城,魏焕政,陈云龙,等. 实时电价下家庭并网风光蓄发电系统优化调度[J]. 智慧电力, 2017, 45(9):34-39.  
LIN Yicheng, WEI Huanzheng, CHEN Yunlong, et al. Optimal dispatching of wind-solar-storage system for household grid connection under real time electricity price [J]. Smart Power, 2017, 45(9):34-39.
- [23] 金艳鸣,谭雪,焦冰琪,等. 基于可计算一般均衡模型的全局能源互联网经济社会效益分析[J]. 智慧电力, 2018, 46(5):1-7.  
JIN Yanming, TAN Xue, JIAO Bingqi, et al. Study on economic and social benefits of global energy internet based on computable general equilibrium model [J]. Smart Power, 2018, 46(5):1-7.
- [24] 罗西. 我国不同地区资源条件下居住建筑分布式光伏系统成本分摊研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2017.  
LUO Xi. Cost allocation of residential distributed photovoltaic systems under the resource constraints in different regions of China [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Techn-

- ology, 2017.
- [25] 徐林, 阮新波, 张步涵, 等. 风光蓄互补发电系统容量的改进优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 88-98, 14.
- XU Lin, RUAN Xinbo, ZHANG Buhuan, et al. An improved optimal sizing method for wind-solar-battery hybrid power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 88-98, 14.
- [26] 刘艳平, 贾春娟. 基于遗传算法的独立型风光互补发电容量优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(10): 69-74.
- LIU Yanping, JIA Chunjuan. Capacity optimization of independent wind/PV hybrid power generation system based on GA [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(10): 69-74.
- [27] 李海涛, 何玉珠, 宋平. 基于量子万有引力搜索的 SVM 自驾故障诊断[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(6): 1093-1098.
- LI Haitao, HE Yuzhu, SONG Ping. SVM fault diagnosis of autopilot based on quantum inspired gravitational search algorithm [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 42(6): 1093-1098.
- [28] ZHOU Y, LING Y, LUO Q. Lévy flight trajectory-based whale optimization algorithm for engineering optimization [J]. Engineering Computations, 2018, 35(7): 2406-2428.

作者简介:



黄保乐

黄保乐(1993),男,硕士在读,研究方向为智能优化算法及其应用、微电网规划(E-mail: 996252145@qq.com);

袁晓玲(1971),女,博士,副教授,研究方向为新能源并网及其控制、泛在电力物联网与综合能源服务。

## Optimal sizing for stand-alone microgrid based on LQ-GSA algorithm

HUANG Baole, YUAN Xiaoling

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The optimal allocation of independent microgrid capacity is an important link in the planning and construction of microgrid. This paper presents a new quantum inspired gravitational search algorithm based on levy flight for independent microgrid systems including wind power generation, photovoltaic power generation and battery. On the basis of ensuring the reliability of power supply and the consumption of new energy, a model for optimizing the capacity of independent microgrid was established. The global optimization ability of the quantum gravity search algorithm was enhanced by introducing the dynamic adjustment strategy of contraction and expansion coefficient and levy flight. The model proposed in this paper is used for simulation analysis, and compared with the results of other gravitation search algorithms and particle swarm optimization algorithms, the results show that the proposed algorithm has high solution accuracy and stability, and can ensure the economic and reliable operation of the independent microgrid system.

**Keywords:** stand-alone microgrid system; quantum inspired gravitational search algorithm; levyflight; contraction-expansion coefficient; optimal allocation

(编辑 钱悦)