

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210323

## 基于单环寻优策略的有源配网重构方法

于艾清, 丁丽青, 王育飞, 李豪

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

**摘要:** 配网 DG 接入导致智能优化算法在重构求解时易陷入局部收敛且寻优率较低。考虑配网拓扑特性与算法的关系, 将两者深度结合, 提出基于单环寻优策略的有源配网重构方法。首先引入莱维飞行对量子粒子群算法进行改进, 建立了莱维系数量子粒子群算法。其次提出自适应环压有序环矩阵作为算法的解空间。最后根据配网拓扑与算法全局最优解之间的对应关系提出单环寻优策略, 与算法深度结合进行求解。通过改进算法、优化解空间、配网拓扑与算法深度结合三个角度提高算法全局搜索能力和寻优效率。通过对多个电力系统进行仿真分析, 验证所提算法和策略的有效性和适用性。

**关键词:** 有源配网重构; 改进算法; 配网结构; 优化解空间; 单环寻优策略

### Active distribution network reconfiguration based on single loop optimization strategy

YU Aiqing, DING Liqing, WANG Yufei, LI Hao

(College of Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** DG access in a distribution network leads to an intelligent optimization algorithm which can easily fall into local convergence and low optimization rate in the reconstruction. Considering the relationship between the distribution network topological characteristics and the algorithm, an active distribution network reconstruction method based on single loop optimization strategy is proposed by deeply combining the two. First, Levy flight is introduced into the quantum particle swarm optimization algorithm to establish the Levy coefficient quantum particle swarm optimization (LCQPSO) algorithm. Secondly, the adaptive ordered ring matrix based on node voltage in a ring network is proposed as the solution space of the algorithm. Finally, from the corresponding relationship between the distribution network topology and the global optimal solution of the algorithm, a single loop optimization strategy is established. This is dynamically combined with the algorithm. By improving the algorithm, optimizing the solution space, and combining the distribution network topology with the algorithm depth, the global search ability and optimization efficiency of the algorithm is improved. The effectiveness and applicability of the proposed algorithm and strategy are verified by simulation analysis of several power systems.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51907116).

**Key words:** active distribution network reconfiguration; improving the algorithm; distribution network topology; optimizing the solution space; single loop optimization strategy

## 0 引言

配网重构可使配电网在最优拓扑结构下运行, 实现降低网损、提高配网运行经济性、提高供电稳定性和可靠性等目标<sup>[1]</sup>。而多样化的分布式电源

(Distributed Generation, DG)接入配网后改变了配网运行的电气特性<sup>[2-4]</sup>, 提高了配网运行复杂度和重构求解难度, 优化拓扑可提高 DG 消纳<sup>[5]</sup>。

有源配网重构的主要研究方向为优化求解方法和优化求解对象两个角度。求解方法主要有数学规划<sup>[6-8]</sup>、启发式方法<sup>[9]</sup>和智能算法<sup>[10-14]</sup>。数学规划主要是基于配网运行约束条件, 将重构问题转化为凸规划问题, 降低 DG 不确定性对配网的影响<sup>[6]</sup>, 实现配网协调、经济运行<sup>[7]</sup>, 在求解速度和准确性上

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51907116); 上海市科技创新行动计划项目资助(20DZ2205500); 上海绿色能源并网工程技术研究中心项目资助(13DZ2251900)

具有一定优势。启发式方法是基于对配网中电压和潮流的数学分析得到的求解方法<sup>[9]</sup>，潮流计算次数较少，求解速度较快，但其着重配网局部特性，依赖配电网拓扑结构，当 DG 接入导致结构复杂时较难得到最优解。应用较为广泛的是智能算法，如离散学习优化算法<sup>[10]</sup>、粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)、改进萤火虫算法<sup>[11]</sup>、细菌觅食优化算法<sup>[12]</sup>和教与学优化算法<sup>[13]</sup>等，由于是在解空间内全局、随机、盲目性搜索，无法保证全局最优，易出现早熟问题。因此有学者研究混合算法，如多个智能算法的混合以及启发式方法和智能算法的结合<sup>[14]</sup>，并取得研究成果。算法的求解空间是基于配网拓扑生成，即求解对象是配网，解的质量将直接影响算法的寻优效率，因此优化解空间是提高算法寻优率和收敛速度的方式之一，优化结果优于对算法自身的改进。文献[15-18]通过划分、压缩、分块重组及分环替代等方式缩小解空间规模，使算法在可行解范围内进行搜索，提高寻优率，但其仅从解空间分析，并未考虑 DG 对配网的影响，因此算法仍易陷入局部收敛。

以上文献研究结果说明算法性能和解空间特性均影响重构计算结果的优劣，但均未考虑有源配网结构特性与算法之间的关系。由于算法得到的全局最优解与配网结构之间具有对应关系，此时可利用拓扑结构的特性对算法寻优过程进行指导。基于此，本文首先对量子粒子群算法(Quantum Particle Swarm Optimization, QPSO)进行改进，建立了莱维系数量子粒子群算法(L Levy Coefficient Quantum Particle Swarm Optimization, LCQPSO)，使粒子增加了莱维突跳特性；其次提出自适应环压有序环矩阵作为算法的解空间；最后根据配网拓扑与算法全局最优解之间的对应关系提出单环寻优策略(Single Loop Optimization, SLO)，与算法动态融合实现局部搜索与全局寻优相互配合。通过改进算法、优化解空间、配网拓扑与算法深度结合三个角度共同提高算法全局搜索能力和寻优效率。

## 1 配电网重构模型

以系统网损最小为目标函数，为

$$\min P_{\text{loss}} = \sum_{l \in D_l} \frac{P_l^2 + Q_l^2}{U_l^2} R_l \quad (1)$$

式中： $l$ 为节点  $k$  和节点  $k'$  之间的支路； $D_l$ 为配电网内连通网络的支路集合； $P_l$ 和  $Q_l$ 分别表示支路  $l$  末端的有功功率和无功功率； $R_l$ 为支路  $l$  的电阻；

$U_l$ 为支路  $l$  末端节点的电压幅值。

电网运行约束条件包括潮流约束、配网辐射结构约束、节点电压约束和支路容量约束，如式(2)~式(5)。

1) 功率平衡约束

$$\begin{cases} P_k + P_{\text{DG}k} = P_{Lk} + U_k \sum_{k'=1}^{N_l} U_{k'} (G_l \cos \delta_l + B_l \sin \delta_l) \\ Q_k + Q_{\text{DG}k} = Q_{Lk} + U_k \sum_{k'=1}^{N_l} U_{k'} (G_l \sin \delta_l - B_l \cos \delta_l) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $P_{\text{DG}k}$ 和  $Q_{\text{DG}k}$ 分别为接在节点  $k$  的 DG 所发出的有功功率和无功功率； $P_{Lk}$ 和  $Q_{Lk}$ 为节点  $k$  的有功和无功功率； $U_k$ 和  $U_{k'}$ 分别为节点  $k$  和节点  $k'$  的电压； $G_l$ 、 $B_l$ 和  $\delta_l$ 分别为节点  $k$  和节点  $k'$  之间的电导、电纳和相角差； $N_l$ 为与节点  $k$  相联的支路数。

2) 配网辐射约束

$$g \in G \quad (3)$$

式中： $g$ 为当前配电网运行结构； $G$ 为配电网所有辐射状结构的集合。

3) 节点电压约束

$$U_k^{\min} \leq U_k \leq U_k^{\max} \quad (4)$$

式中， $U_k^{\max}$ 和  $U_k^{\min}$ 分别为节点  $k$  电压波动的上限和下限。

4) 支路容量约束

$$(P_{l,t})^2 + (Q_{l,t})^2 \leq (S_{l,t}^{\max})^2 \quad (5)$$

式中， $S_{l,t}^{\max}$ 为支路  $l$  在  $t$  时传输容量的上限。

## 2 莱维系数量子粒子群算法

QPSO 算法是对粒子群算法进行改进，提高了全局搜索能力和粒子协同搜索能力<sup>[19]</sup>。公式为

$$\begin{cases} p_m = \varphi \cdot P_{\text{best}m} + (1 - \varphi) \cdot G_{\text{best}} \\ \bar{p}_{\text{best}} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M P_{\text{best}m} \\ x(t) = p_m \pm \beta \cdot \ln(1/\mu) \cdot |\bar{p}_{\text{best}} - x(t-1)| \end{cases} \quad (6)$$

式中： $\varphi$ 为 0 到 1 之间的随机数； $P_{\text{best}m}$ 和  $G_{\text{best}}$ 为粒子  $m$  的局部和全局最优位置； $\bar{p}_{\text{best}}$ 为所有粒子的  $P_{\text{best}m}$  的平均值； $M$ 为粒子数； $x(t)$ 为粒子更新后的位置； $\beta$ 为控制算法收敛速度的收缩-扩张因子，需手动调节； $\mu$ 为 0 到 1 之间的随机数，当  $\mu < 0.5$  时，取正，反之取负。

QPSO 算法的全局搜索能力较强，在寻优中后期算法收敛速度较慢且易陷入局部收敛，因此引入

莱维飞行对 QPSO 算法进行改进以提高收敛速度并改善早熟现象。莱维飞行是一种符合莱维分布的随机步长。步长  $s$  计算公式为

$$s = \frac{\mu}{|v|^{1/\beta_L}} \quad (7)$$

式中:  $\mu \sim N(0, \sigma_\mu^2)$  和  $v \sim N(0, \sigma_v^2)$  均为  $\Gamma$  函数;  $\beta_L$  通常取常数 1.5。

参数的方差公式为

$$\sigma_\mu = \left\{ \frac{\Gamma(1 + \beta_L) \cdot \sin(\pi\beta_L/2)}{\Gamma[(1 + \beta_L)/2] \cdot \beta_L \times 2^{(\beta_L-1)/2}} \right\}^{1/\beta_L}, \quad \sigma_v = 1 \quad (8)$$

式(6)中的随机系数项  $\beta \cdot \ln(1/\mu)$  可促使算法跳出局部收敛, 将其定义为 QPSO 突跳系数, 将式(7)定义为莱维系数, 两者随机选取 100 次数值并取绝对值后进行对比, 结果如图 1 所示。

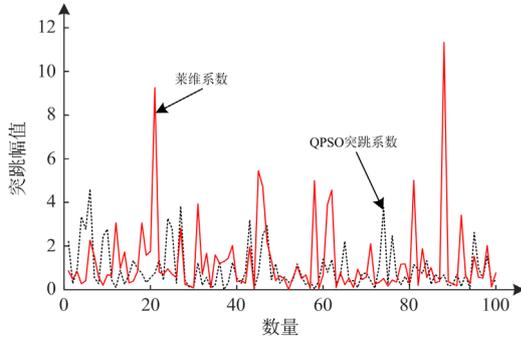


图 1 突跳能力对比

Fig. 1 Comparison of jumping ability

由图 1 看出, 莱维系数的突跳幅值明显高于 QPSO 突跳系数, 对促进算法跳出局部收敛更有效, 因此用莱维系数替代 QPSO 突跳系数, 可得到具有莱维系数的 QPSO 算法, 为

$$\begin{cases} p_m = \varphi \cdot P_{\text{best } m} + (1 - \varphi) \cdot G_{\text{best}} \\ \bar{p}_{\text{best}} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M P_{\text{best } m} \\ x(t) = p_m \pm \omega \cdot s \otimes [\bar{p}_{\text{best}} - x(t-1)] \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\omega$  为步长控制系数;  $\otimes$  为点对点乘法。

步长控制系数  $\omega$  采用式(10)进行更新。

$$\omega = \frac{(t_{\text{max}} - t) \cdot (\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}})}{t_{\text{max}}} + \omega_{\text{min}} \quad (10)$$

式中:  $\omega_{\text{max}}$  和  $\omega_{\text{min}}$  分别为  $\omega$  的最大值和最小值, 分

$$\mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 18 & 19 & 20 & 33 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 34 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 18 & 19 & 20 & 21 & 35 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 25 & 26 & 27 & 28 & 29 & 30 & 31 & 32 & 36 \\ 3 & 4 & 5 & 22 & 23 & 24 & 25 & 26 & 27 & 28 & 37 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

别取 0.5 和 0.2;  $t$  为当前迭代次数;  $t_{\text{max}}$  为最大迭代次数。

### 3 自适应环压有序环矩阵与环路编码

提出自适应环压有序环矩阵作为算法的解空间, 基于环路对开关进行编码。

#### 3.1 自适应环压有序环矩阵

##### 3.1.1 基本环

在辐射电网中, 闭合一条联络开关, 网络中出现一条环路, 由环内一条联络开关和所有分段开关组成的回路称为基本环, 基本环的数量与环网数相等。以图 2 所示的 IEEE33 节点系统为例, 开关编号为括号内序号, 配网中含有 5 个联络开关, 因此可形成 5 个环网, 如图 2 中所示 5 个基本环。

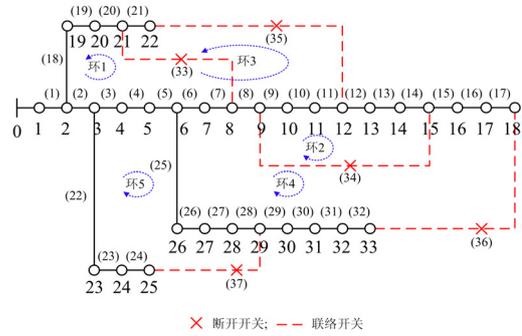


图 2 IEEE33 节点配网

Fig. 2 IEEE33 node distribution network

##### 3.1.2 基本环矩阵

由所有基本环构成的矩阵定义为基本环矩阵  $\mathbf{M}_0$ , 因此  $\mathbf{M}_0$  中每一行均表示一个基本环, 行数为环网数。由图 2 得到的  $\mathbf{M}_0$ <sup>[20]</sup> 为式(11)。

##### 3.1.3 有序环矩阵

由  $\mathbf{M}_0$  看出, 每个基本环内非零开关一般是按编号从小到大排列, 并未考虑配网结构的特点, 此矩阵作为算法的解空间会使算法搜索效率低且易早熟。文献[14]建立有序环矩阵, 方法为: 在每个基本环内, 将功率流入节点相邻的一条支路放在基本环的第一位, 另一边相邻的支路放在末位, 不计 0 元素, 其余开关根据连接关系依次排序, 将排序后的基本环定义为有序基本环, 由所有有序基本环构成有序环矩阵  $\mathbf{M}_s$ , 为式(12)。

$$M_s = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 33 & 20 & 19 & 18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 34 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 35 & 21 & 20 & 19 & 18 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 36 & 32 & 31 & 30 & 29 & 28 & 27 \\ 3 & 4 & 5 & 25 & 26 & 27 & 28 & 37 & 24 & 23 & 22 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

有序环矩阵  $M_s$  可提高算法寻优效率, 但也存在早熟现象, 这是由于  $M_s$  虽然考虑了配网结构的特点, 但并未考虑配网结构与算法间的关系。

### 3.1.4 自适应环压有序环矩阵的建立

图 2 中环 1 和环 3 之间存在公共开关 2 至开关 7 和开关 18 至开关 20, 环 2 和环 4 之间存在公共开关 9 至开关 14, 因此通过删除环 3 和环 4 中的公共开关简化有序环矩阵。其次, 单环内使网损最小时断开的支路一般在环内最低电压节点附近<sup>[9]</sup>。基于

$$M_v = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 33 & 20 & 19 & 18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 34 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 21 & 35 & 11 & 10 & 9 & 8 & 33 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & 7 & 8 & 34 & 15 & 16 & 17 & 36 & 32 & 31 & 30 & 29 & 28 & 27 & 26 & 25 & 0 & 0 \\ 3 & 4 & 5 & 25 & 26 & 27 & 28 & 37 & 24 & 23 & 22 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

当负荷变化或 DG 使最高电压节点发生变化,  $M_v$  随之变化, 因此  $M_v$  为自适应环压有序环矩阵。

### 3.2 环路编码

对  $M_v$  中每一环的开关进行环内编码, 设环网数为  $N_{loop}$ , 环路编号为  $n_{loop} = [1, 2, \dots, N_{loop}]$ , 环内支路数为  $N_{loop,l}$ , 则环内编码为  $[1, 2, \dots, N_{loop,l}]$ 。由式(13)得到的环内编码信息如表 1 所示。

表 1 环内支路编码信息

Table 1 Coding information of branch in loop network

环内有序支路	环内编号
2,3,4,5,6,7,33,20,19,18	1-10
9,10,11,12,13,14,34	1-7
21,35,11,10,9,8,33	1-7
6,7,8,34,15,16,17,36,32,31,30,29,28,27,26,25	1-16
3,4,5,25,26,27,28,37,24,23,22	1-11

## 4 单环寻优策略

基于配网拓扑与算法间的关系提出单环寻优策略, 并与算法深度结合。

### 4.1 配网拓扑与算法间的关系

智能算法在重构计算迭代过程中得到的全局最优解  $p_g$  和配网拓扑结构是一一对应关系;  $p_g$  一般都是可行解, 即其对应的配网结构均是辐射状;  $p_g$  具有随机性, 因此对应的配网拓扑结构也具有随机性。基于这些特点建立递进有序环矩阵。

此, 本文依据环网内节点电压对简化后的有序环矩阵中每个有序基本环内的开关进行重新排序。首先闭合所有联络开关, 通过潮流计算得到各个环网内最高电压节点为  $\{2,9,21,6,3\}$ , 将最高电压节点两边邻接的开关其中一个放在有序基本环的第一位, 另一边相邻的开关放在末位, 不计 0 元素, 其余开关根据连接关系依次排序, 将排序后的有序基本环定义为环压有序基本环, 由所有环压有序基本环构成环压有序环矩阵  $M_v$ , 为

### 4.2 递进有序环矩阵

算法每次得到的  $p_g$  均可得到对应有序环矩阵,  $p_g$  的维度与矩阵内环网数相等, 而每个环网中的支路数量、编号和连接关系均受其他断开开关的影响, 可以理解为此环网是在其余断开开关状态不变的情况下得到的, 定义为递进性。为区别于 3.1.3 节中的有序环矩阵  $M_s$ , 将由  $p_g$  得到的有序环矩阵定义为递进有序环矩阵  $H_p$ 。

设图 2 所示配网断开支路为  $[33,34,35,36,37]$ , 由此辐射结构得到的  $H_p$  和  $M_s$  相同, 即  $H_p=M_s$ , 为式(12)。若某一时刻  $p_g$  为  $[7,14,9,31,37]$ , 此时对应配网结构如图 3 所示。

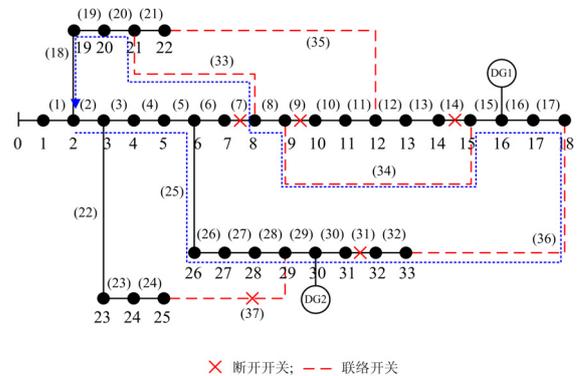


图 3 IEEE33 配网某一拓扑结构

Fig. 3 A topology of IEEE33 distribution network



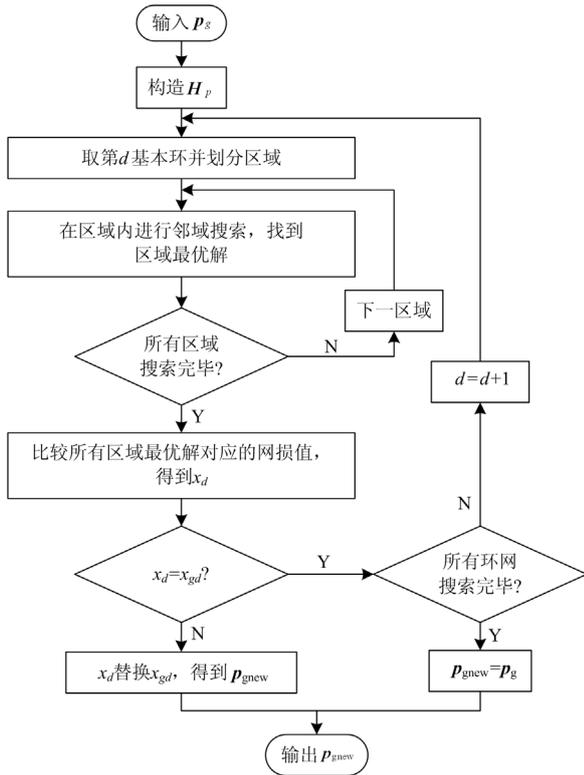


图 5 SLO 策略流程图

Fig. 5 Flow chart of SLO strategy

行 SLO 策略，即重复步骤(2)至步骤(4)。当算法达到最大迭代次数时停止并输出结果。

$M_0$ 、 $M_s$ 、 $M_V$  和  $H_p$  的区别为： $M_0$ 、 $M_s$  和  $M_V$  均可作为算法的解空间且固定不变，而  $H_p$  应用于所提的单环寻优策略中且随着  $p_g$  的变化而变化。

## 5 算例仿真

### 5.1 经典配网中算法性能分析

采用 IEEE33 节点、PG&E69 节点和 119 节点电力系统<sup>[23]</sup>验证 LCQPSO 算法、 $M_V$  和 SLO 策略的性能和适用性，每种情况均重复运行 100 次。

#### 5.1.1 自适应环压有序环矩阵性能分析

分别将  $M_0$ 、 $M$  和  $M_V$  作为算法的解空间，用 PSO、QPSO 和 LCQPSO 算法对 IEEE33 系统求解，种群数量和最大迭代次数均为 30，结果如表 2 所示，其中平均迭代次数为算法找到全局最优解的所有运算次数中的平均迭代次数；为衡量算法收敛性能，定义局部收敛程度：若算法连续 3 次及以上迭代得到的全局最优值未改变则认为算法陷入局部收敛，其中 3 次至 5 次迭代为轻度局部收敛，6 次至 10 次迭代为中度局部收敛，10 次以上为重度局部收敛。

由表 2 看出，解空间由  $M_0$ 、 $M_s$  到  $M_V$  变化过

表 2 结果对比

Table 2 Comparison of results

算法	解空间 矩阵	寻优 率/%	平均迭代 次数	平均收敛 时间/s	局部收敛程度/次		
					轻度	中度	重度
PSO	$M_0$	16	17.19	6.88	96	38	83
	$M_s$	83	18.11	10.17	172	61	16
	$M_V$	92	18.53	9.35	156	67	16
QPSO	$M_0$	80	17.13	11.12	121	45	23
	$M_s$	95	16.62	10.34	123	32	15
	$M_V$	100	15.18	9.63	94	39	10
LCQPSO	$M_0$	87	13.24	8.46	103	34	12
	$M_s$	98	12.52	7.98	92	23	5
	$M_V$	100	11.98	7.44	76	25	0

程中，三种算法的寻优率均明显提高，可见优化解空间可在一定程度上提升算法的寻优效率，PSO 算法的平均迭代次数和平均收敛时间均是增加的，这是由寻优率的大幅提高引起的，而局部收敛程度中，重度收敛次数减少，轻度收敛次数增加，说明收敛程度由重度向轻度偏移，表明算法跳出局部收敛的能力提高。QPSO 算法和 LCQPSO 算法的平均迭代次数和三种不同程度的局部收敛总体均是下降的，而 LCQPSO 算法的平均收敛时间有所下降，也反映出算法寻优效率和性能的提升。在同一解空间的三种算法中，LCQPSO 算法性能均是最优的，表明算法全局搜索能力较高。

#### 5.1.2 莱维系数量子粒子群算法性能分析

设定不同种群数量后再次进行计算，解空间均采用  $M_V$ ，结果如表 3 所示。

表 3 不同种群数量的运算结果

Table 3 Calculation results of different population numbers

种群数量	寻优率/%			平均迭代次数		
	PSO	QPSO	LCQPSO	PSO	QPSO	LCQPSO
10	37	65	85	23.49	22.34	20.19
20	75	94	100	20.63	18.32	14.91
30	92	100	100	18.53	15.18	11.98
40	99	100	100	16.66	13.81	10.30
50	100	100	100	13.84	11.49	9.21

由表 3 看出，随着种群数量增加，PSO 算法的寻优率均逐渐增加，平均迭代次数均逐渐降低；QPSO 算法的寻优率和平均迭代次数均优于 PSO 算法，且当种群数量为 30 时，寻优率达到 100%；而 LCQPSO 算法在种群数量为 10 时寻优率达到 85%，随着种群数量增加，寻优率保持 100%，平均迭代次数少，表明算法寻优性能高效稳定，体现出改进策略的有效性。莱维系数的引入提高了粒子突跳能

力, 减少了粒子群聚集现象, 从而增强算法的全局搜索能力。其次, 种群数量较少时, 算法的寻优率都相对较高, 也反映出  $M_V$  作为解空间有利于提高算法寻优效率。

### 5.1.3 单环寻优策略性能分析

将 SLO 策略分别与 PSO、QPSO 和 LCQPSO 算法结合后对 IEEE33 节点系统和 PG&E69 节点电力系统进行仿真验证, 均采用  $M_V$  作为算法的解空间, 种群数量从 10 到 50 变化, 结果如表 4 所示。

表 4 SLO 策略性能对比

Table 4 Performance comparison of SLO strategy

电力系统	种群数量	寻优率/%			平均迭代次数		
		PSO+	QPSO+	LCQPSO+	PSO+	QPSO+	LCQPSO+
		SLO	SLO	SLO	SLO	SLO	SLO
33 节点	10	100	100	100	11.75	12.42	11.08
	20	100	100	100	10.84	10.62	9.71
	30	100	100	100	9.92	8.72	8.50
	40	100	100	100	9.09	7.94	7.83
	50	100	100	100	7.96	7.25	7.04
69 节点	10	100	100	100	14.11	13.54	11.23
	20	100	100	100	12.07	11.63	10.82
	30	100	100	100	10.66	10.58	9.91
	40	100	100	100	9.72	9.53	9.19
	50	100	100	100	9.53	9.47	9.13

由表 4 看出, 两个电力系统中, 三种算法分别与 SLO 策略结合后, 寻优率均达到 100%, 相比于表 3 中未结合 SLO 策略的情况, 平均迭代次数均大幅下降, 主要是因为 SLO 策略是基于配网结构和环网特性建立的, 可在算法生成的局部最优解基础上准确得到更优解, 指导粒子群向更优解靠近, 促使算法跳出局部收敛。

对于 IEEE33 节点系统, 经多次实验, 设置所述算法最大迭代次数为 15 次, 种群数为 10, 依然可达到寻优效果, 将结果与文献[14-17]进行对比, 结果如表 5 所示。

表 5 IEEE33 节点系统结果比较

Table 5 Comparison of results between different methods in IEEE 33-node system

结果	文献[14]	文献[15]	文献[16]	文献[17]	本文
开关组合			7,14,9,32,37		
网损/kW	139.55	139.13	139.13	139.55	139.55
寻优率/%	96.67	96	95	91	100
平均收敛时间/s	1.374	—	6.8	3.6	3.25

由表 5 看出, 最优解和公认最优解相同, 网损不同是由于采用不同的潮流计算方法。本文方法调用 SLO 策略, 可保证算法在较少种群数和较少迭代次数下的寻优率达到 100%。

采用 119 节点测试系统求解, 计算结果如表 6 所示。重构后断开开关为 {23-24, 26-27, 35-36, 41-42, 44-45, 53-54, 51-65, 61-62, 74-75, 77-78, 86-113, 89-110, 95-100, 101-102, 114-115}。

表 6 119 节点系统优化结果

Table 6 Optimization results of 119-node system

对比项	PSO	QPSO	LCQPSO	LCQPSO+SLO	
寻优率/%	23.33	60	72	83	
网损/ kW	最差值	895.13	882.28	882.28	879.82
	最优值	869.73	869.73	869.73	869.73
	平均值	876.01	873.54	872.33	871.08
最低电压/p.u.	0.932 3	0.932 3	0.932 3	0.932 3	
平均降损率/%	32.52	32.71	32.82	32.9	

由表 6 看出, 重构后系统网损降低至 869.73 kW, 最低电压提升到 0.932 3, 电能质量改善明显。相比于 PSO 和 QPSO 算法, LCQPSO 算法寻优率明显提高, 而结合 SLO 策略后, 寻优率进一步提高到 83%, 说明所提算法和策略依然适用较大规模系统。

选取文献[15-16]中的方法与 SLO 策略结合, 对 IEEE33 节点系统进行重构, 验证 SLO 策略与其他方法结合后的效果, 结果如表 7 所示。

表 7 优化结果

Table 7 Optimization results

内容	平均迭代次数	寻优率/%	平均收敛时间/s	SLO 策略平均调用次数
文献[15]	2.53	96	—	—
SLO+文献[15]	2.2	100	2.77	0.1
文献[16]	7.2	95	6.8	—
SLO+文献[16]	5.3	100	6.92	1.32

由表 7 看出, SLO 策略与两个文献的方法结合后, 平均迭代次数均有不同程度下降, 寻优率均提升到了 100%, 说明所提策略的搜索方法具有针对性, 可在局部最优解的基础上搜索到更优解, 其次 SLO 策略独立于算法, 与算法之间仅通过局部最优解进行信息传递, 因此可与多种算法结合。从平均收敛时间看, SLO 策略不会显著增加算法运行时间。文献[15]中算法在很少次迭代后找到最优解, 因此多数时候达不到调用 SLO 策略的条件。

## 5.2 实际配网中算法性能分析

采用实际电力系统 Taipower84(TP84)再次进行仿真验证, 该配电网有 2 个供电电源, 包含 11 条馈线和 13 条联络开关, 总有功负荷为 28.35 MW, 总无功负荷为 20.7 Mvar, 系统结构及详细参数可见文献[24-25]。种群数量和最大迭代次数均为 50, 每种情况算法均重复运行 100 次, 统计结果如表 8 所示。

表 8 TP84 配网优化结果

Table 8 Optimization results of TP84 distribution network

对比项	PSO	QPSO	LCQPSO	LCQPSO+SLO
寻优率/%	33	48	65	100
网损/ kW	最差值	567.74	474.58	472.63
	最优值	469.88	469.88	469.88
	平均值	481.97	470.27	470.07
平均降损率/%	9.41	11.61	11.65	11.68
局部收敛程度/次	轻度	337	383	429
	中度	96	132	138
	重度	64	41	28
平均迭代次数	39.7	43.73	43.85	29.55

由表 8 看出,在多电源实际配网的重构求解中,本文算法的寻优率增加,说明改进方法合理有效。本文算法与所提策略结合后,寻优率达到 100%,三种局部收敛程度和平均迭代次数均极大降低,反映出 SLO 策略的高效性以及多电源系统中具有很好的适用性。

从以上结果来看,SLO 策略对寻优率的提升效果与所结合的算法性能和求解的配网规模有关,寻优性能好的算法结合所提策略后可进一步提高寻优率并降低平均迭代次数,而配网拓扑结构越复杂,所提策略的提升效果有所下降,但依然可进一步提高寻优率。其次,可仅用 SLO 策略进行重构计算,但会陷入局部收敛,是因为 SLO 策略是局部寻优策略,需与智能算法结合,实现全局搜索与局部寻优的实时结合。

### 5.3 有源配网中算法性能分析

以 IEEE33 节点初始系统为基础设置以下情景,进一步验证所提方法的性能和适用性,均采用  $M_V$  作为算法的解空间,本文方法为 LCQPSO 算法和 SLO 策略结合。各情景内容如表 9 所示,优化结果如表 10 所示。其中 DG1-DG3 分别是在节点 10、16、30 加入功率因数均为 0.9,容量分别为 50 kW、100 kW 和 50 kW 的分布式电源。

由表 10 看出,不同情景下重构结果不同,所提算法均可求得最优解,实现降低网损和提高节点电

表 9 各情景内容

Table 9 Content of each situation

情景	内容
情景 0	初始系统
情景 1	初始系统中加入 DG1-DG3
情景 2	初始系统中所有负荷增加 10%
情景 3	初始系统中所有负荷增加 10%,且加入 DG1—DG3
情景 4	节点 11—20 负荷增加 10%,节点 21—30 负荷减少 10%
情景 5	情景 4,且加入 DG1—DG3

表 10 不同情景下的优化结果

Table 10 Optimization results under each situation

情景	最优开关组合	网损/kW		最低电压/ p.u.	最低电 压节点
		重构前	重构后		
情景 0	7,14,9,32,37	202.68	139.55	0.937 8	32
情景 1	7,14,9,32,37	171.02	122.44	0.940 3	32
情景 2	7,14,9,32,37	249.18	170.55	0.931 2	32
情景 3	7,14,9,32,28	213.18	151.31	0.933 7	32
情景 4	7,14,9,32,28	195.22	130.25	0.944 7	33
情景 5	7,14,9,32,28	163.25	113.33	0.947 2	32

压的目标,说明所提方法求解具有可行性。其次可以看出,加入 DG 可改善电力系统运行经济性和稳定性。

除情景 0,其他每种情景中算法均重复运行 100 次,结果如表 11 所示。

表 11 不同情景下的算法寻优性能

Table 11 Algorithm optimization performance in each situation

情景	寻优率/%			平均迭代次数		
	PSO	QPSO	LCQPSO+SLO	PSO	QPSO	LCQPSO+SLO
情景 1	91	90	100	11.86	11.98	10.05
情景 2	88	96	100	12.64	12.98	7.41
情景 3	84	94	100	12.31	11.41	9.75
情景 4	83	92	100	11.70	11.82	9.48
情景 5	88	93	100	11.32	10.83	8.40

由表 11 看出,由于均采用  $M_V$  作为算法的解空间,每种情景下 PSO 和 QPSO 算法的寻优率都较高,反映出优化解空间可提高算法的寻优效率,而本文方法的寻优率均达到 100%,说明其在复杂有源配网中也具有很高的寻优性能;其次本文方法可有效降低平均迭代次数,加快收敛速度。

各种情景下算法的局部收敛程度如表 12 所示。

表 12 不同情景下算法的局部收敛程度

Table 12 Degree of local convergence of the algorithm in each situation

情景	算法	局部收敛程度/次		
		轻度	中度	重度
情景 1	PSO	90	24	16
	QPSO	87	17	21
	LCQPSO+SLO	0	0	0
情景 2	PSO	84	27	22
	QPSO	93	29	12
	LCQPSO+SLO	0	0	0
情景 3	PSO	84	28	22
	QPSO	80	31	9
	LCQPSO+SLO	0	0	0
情景 4	PSO	76	24	23
	QPSO	68	30	14
	LCQPSO+SLO	0	0	0
情景 5	PSO	82	28	16
	QPSO	61	25	13
	LCQPSO+SLO	0	0	0

由表 12 看出, 每种情景下, 本文方法均最优, 反映出所提算法和策略的结合在有源配网重构计算中的适用性和高效性。

## 6 结论

本文从改进算法、优化解空间、配网拓扑与算法深度结合三个角度共同提高重构计算寻优效率。得到如下结论:

1) 所提算法引入了莱维强凸跳特性, 增强了全算法的全局搜索能力和跳出局部收敛的能力, 具有有效性。

2) 所提自适应环压有序环矩阵优化了算法解空间, 提高了种群质量, 加快了算法收敛速度, 进一步提高了寻优效率。

3) 所提单环寻优策略可与多种算法实时结合, 实现全局搜索与局部寻优相互配合, 有效改善算法早熟现象, 在多电源实际配网和有源配网中也具有很好的适用性。

后续可进一步验证所提方法在动态或多目标重构中的应用。

## 参考文献

- [1] 李超, 苗世洪, 盛万兴, 等. 考虑动态网络重构的主动配电网优化运行策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(18): 3909-3919.  
LI Chao, MIAO Shihong, SHENG Wanxing, et al. Optimization operation strategy of active distribution network considering dynamic network reconfiguration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18): 3909-3919.
- [2] 郭清元, 莫超, 吴杰康, 等. 分布式电源接入的配电系统多类型无功源出力优化方法[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 211-219.  
GUO Qingyuan, MO Chao, WU Jiekang, et al. Multi-type reactive power output optimization method of distribution system with distributed generations[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 211-219.
- [3] ZHANG Delong, LI Jianlin, HUI Dong. Coordinated control for voltage regulation of distribution network voltage regulation by distributed energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 35-42.
- [4] LI Ruisheng, WONG Peter, WANG Kun, et al. Power quality enhancement and engineering application with high permeability distributed photovoltaic access to low-voltage distribution networks in Australia[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(3): 1-7.
- [5] 黄河, 朱磊, 高松, 等. 提升分布式电源消纳的配网快速遍历重构方法[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 166-172.  
HUANG He, ZHU Lei, GAO Song, et al. Reconfiguration method of distribution system for increasing the penetration of distributed generation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 166-172.
- [6] TAMI Y, SEBAA K, LAHDEB M, et al. Mixed-integer quadratic constrained programming versus quadratic programming methods for distribution network reconfiguration[C] // 2019 International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE), November 19-21, 2019, Algiers, Algeria: 1-5.
- [7] 陈永进. 基于混合整数凸规划的有源配电网重构与无功电压协调优化[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(6): 21-29.  
CHEN Yongjin. A coordinated optimization for active distribution network reconfiguration and volt/var optimization based on mixed integer convex programming[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(6): 21-29.
- [8] 邵华, 贺春光, 安佳坤, 等. 基于线性约束的有源配电网规划研究[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5): 66-74.  
SHAO Hua, HE Chunguang, AN Jiakun, et al. Active distribution network planning model based on linearized constraints[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 66-74.
- [9] 董家读, 黄庆, 黄彦全, 等. 辐射型配电网重构的功率矩法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 22-25.  
DONG Jiadu, HUANG Qing, HUANG Yanquan, et al. The power moment method for radial distribution network reconfiguration[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 22-25.
- [10] 田书欣, 刘浪, 魏书荣, 等. 基于改进灰狼优化算法的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 1-11.  
TIAN Shuxin, LIU Lang, WEI Shurong, et al. Dynamic reconfiguration of a distribution network based on an improved grey Wolf optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 1-11.
- [11] 徐小琴, 王博, 赵红生, 等. 基于布谷鸟搜索和模拟退火算法的两电压等级配网重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 84-91.  
XU Xiaoqin, WANG Bo, ZHAO Hongsheng, et al. Reconfiguration of two-voltage distribution network based on cuckoo search and simulated annealing algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 84-91.
- [12] NAVEEN S, KUMAR K S, RAJALAKSHMI K. Distribution system reconfiguration for loss minimization

- using modified bacterial foraging optimization algorithm[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2015, 69: 90-97.
- [13] 潘本仁, 王和春, 张妍, 等. 含分布式电源的主动配电网重构策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 102-107.  
PAN Benren, WANG Hechun, ZHANG Yan, et al. Study on an active distribution network reconstruction strategy with distributed power supply[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 102-107.
- [14] 荣秀婷, 王承民, 叶斌, 等. 基于方向矩阵的 PSO 算法在配网重构中的应用[J]. 电测与仪表, 2019, 56(9): 63-68.  
RONG Xiuting, WANG Chengmin, YE Bin, et al. Application of PSO algorithm based on direction matrix in distribution network reconfiguration[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(9): 63-68.
- [15] 薛毓强, 吴小雁, 魏文新. 基于环路组搜索方式及分环替代策略相结合的配电网重构[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 263-269.  
XUE Yuqiang, WU Xiaoyan, WEI Wenxin. Distribution network reconfiguration with BPSO based on combination of loop group search and individual loop replacement[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 263-269.
- [16] 陈鑫, 周步祥, 袁岳, 等. 基于环路矩阵分块重组策略的配电网重构[J]. 电测与仪表, 2020, 57(6): 30-37.  
CHEN Xin, ZHOU Buxiang, YUAN Yue, et al. Reconfiguration of distribution network based on loop matrix block-recombination strategy[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(6): 30-37.
- [17] 肖轩怡, 汪泓, 陈春, 等. 基于自适应负荷调整网络矩阵的配电网重构[J]. 电工技术学报, 2018, 33(10): 2217-2226.  
XIAO Xuanyi, WANG Feng, CHEN Chun, et al. A network reconfiguration method based on adaptive load regulation matrix[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(10): 2217-2226.
- [18] SILVA L I, BELATI E A, GEREZ C, et al. Reduced search space combined with particle swarm optimization for distribution system reconfiguration[J]. Electrical Engineering, 2020: 1-13.
- [19] 李星辰, 袁旭峰, 李沛然, 等. 基于改进 QPSO 算法的主动配电网削峰填谷策略研究[J/OL]. 电测与仪表: 1-7[2021-02-20].  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200601.1034.012.html>.  
LI Xingchen, YUAN Xufeng, LI Peiran, et al. Research on peak load shifting in active distribution network based on improved QPSD algorithm[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-7[2021-02-20].  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200601.1034.012.html>.
- [20] 陈春, 汪泓, 刘蓓, 等. 基于基本环矩阵与改进和声搜索算法的配电网重构[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 55-60.  
CHEN Chun, WANG Feng, LIU Bei, et al. Network reconfiguration based on basic ring matrix and improved harmony search algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 55-60.
- [21] 邢晓敏, 张萌, 商国敬, 等. 分布式发电系统接入对配电网电压分布的影响分析[J]. 东北电力大学学报, 2018, 38(2): 9-14.  
XING Xiaomin, ZHANG Meng, SHANG Guojing, et al. Analysing the influence of distributed generation system on the voltage of distribution network[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2018, 38(2): 9-14.
- [22] 许鸣吉, 沈磊, 李胜, 等. 计及综合因素的光伏接入配电网优选研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 46-52.  
XU Mingji, SHEN Lei, LI Sheng, et al. Optimization of photovoltaic access distribution network considering comprehensive factors[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 46-52.
- [23] ZHANG D, FU Z, ZHANG L. An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems[J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77(5): 685-694.
- [24] 张逸. 主动配电网多目标网络重构研究[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(9): 29-35.  
ZHANG Yi. Active distribution network multi-objective reconfiguration research[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(9): 29-35.
- [25] SU C T, CHANG C F, CHIOU J P. Distribution network reconfiguration for loss reduction by ant colony search algorithm[J]. Electric Power Systems Research, 2005, 75(2): 190-199.

收稿日期: 2021-03-26; 修回日期: 2021-06-18

作者简介:

于艾清(1981—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为新型电力系统规划与调度、智能优化算法; E-mail: yuaiqing@shiep.edu.cn

丁丽青(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网故障抢修与恢复、智能优化算法; Email: dlqcrystal@qq.com

王育飞(1974—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电动汽车有序充电、电力储能应用技术和电能质量分析与控制。E-mail: wangyufei@shiep.edu.cn

(编辑 葛艳娜)