



基于改进灰狼算法的含分布式电源配电网重构研究

王鲁明 程静 王维庆

Research on Distribution Network Reconfiguration with Distributed Generation Based on Improved Grey Wolf Optimizer

WANG Luming, CHENG Jing, WANG Weiqing

引用本文:

王鲁明, 程静, 王维庆. 基于改进灰狼算法的含分布式电源配电网重构研究[J]. *现代电力*, 2022, 39(1): 56–63. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0040

WANG Luming, CHENG Jing, WANG Weiqing. Research on Distribution Network Reconfiguration with Distributed Generation Based on Improved Grey Wolf Optimizer[J]. *Modern Electric Power*, 2022, 39(1): 56–63. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0040

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0040>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑时序特性的配电网分布式电源优化配置

Optimal Allocation of Distributed Generators in Distribution Network Based on Time–sequence Characteristics

现代电力. 2019, 36(2): 8–16 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I2/8>

含可再生分布式电源参与调控的配电网动态分区实时无功优化方法

Dynamic Partitioning Real–Time Reactive Power Optimization Method for Distribution Network with Renewable Distributed Generators Participating in Regulation

现代电力. 2020, 37(1): 42–50 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0072>

基于快速搜索与发现密度峰值聚类算法的含有分布式光伏的配电网电压分区协调控制

Voltage Partition Coordinated Control of Distribution Network With Distributed Photovoltaic Based on CFSFDP Algorithm

现代电力. 2020, 37(1): 35–41 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0263>

分布式电源接入配电系统优化规划方案

Planning Scheme Optimization for Distributed Generation Accessed in Distribution System

现代电力. 2019, 36(6): 82–87 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I6/82>

低压配电网分布式光伏接纳能力分析

Analysis of Distributed Photovoltaic Acceptance Capacity in Low Voltage Distribution Network

现代电力. 2021, 38(4): 392–401 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0402>

考虑换流器功率传输裕度的直流配电网优化重构研究

Research on Optimal Reconfiguration of DC Distribution Network Considering Converter Power Transmission Margin

现代电力. 2021, 38(5): 561–571 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0025>

基于改进灰狼算法的含分布式电源配电网重构研究

王鲁明¹, 程静^{1,2}, 王维庆^{1,2}

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830047; 2. 可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830047)

Research on Distribution Network Reconfiguration with Distributed Generation Based on Improved Grey Wolf Optimizer

WANG Luming¹, CHENG Jing^{1,2}, WANG Weiqing^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China;
2. Renewable Energy Grid Connection and Control Technology Ministry of Education Engineering Center, Urumqi 830047, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

摘要: 使用基本环矩阵编码的智能优化算法在处理配电网重构问题中, 通常使用无序的解空间, 解空间中局部峰值较多, 使得智能优化算法难以发挥自身优势, 耗时严重且难以寻找到最优解。针对以上问题, 提出一种有序环网编码方式, 并基于改进灰狼算法求解含分布式电源 (distributed generation, DG) 配电网的重构方法。首先, 将基本环矩阵的元素按支路顺序排列, 再利用启发式规则初步寻找较优解, 并将其与初始狼群中的 Alpha 狼比较, 取其较优解作为新的 Alpha 狼; 然后, 引入 Gamma 狼, 用于环绕 Alpha 狼寻优, 使狼群保证种群多样性的同时, 提高其局部搜索能力; 最后, 使用改进灰狼算法求解修改后 IEEE 33 配电网和 Taipower 84 配电系统, 有效地降低系统网损并且提高了系统内的最低电压。经验证, 该方法有效可行、算法简单、快速性高, 得到的结果更优。

关键词: 配电网重构; 灰狼算法; 有序环网; 分布式电源 (DG)

Abstract: During the process of distribution network reconfiguration by intelligent optimization algorithm using basic ring matrix coding the disordered solution space is usually utilized, however there are many local peaks in the solution space so that it makes the intelligent optimization algorithm hard to full play

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目 (2018D01C046); 新疆可再生能源发电与并网技术自治区重点实验室开放课题 (2020D04048)

Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region(2018D01C046); Open Project of Xinjiang Uygur Autonomous Region Key Laboratory of Xinjiang Renewable Energy Power Generation and Grid Connection Technology(2020D04048)

its own advantages, besides it consumes too much time and it is difficult to search out the optimal solution. In allusion to above-mentioned defects, an ordered ring network coding scheme was proposed and the improved gray wolf algorithm was used to search out the method to reconfigure distribution network containing distributed generation (DG). Firstly, the elements of the basic ring matrix were arranged according to the order of branches, and then the heuristic rules were used to preliminary find the better solution and this better solution was compared with the alpha wolf in the initial wolf pack, and the better solution was taken as the new alpha wolf. Secondly, the gamma wolf was led in to surround the alpha wolf for optimization to ensure the population diversity of the wolf pack meanwhile to improve its local searching ability. Finally, the improved grey wolf algorithm was used to conduct the simulation in the modified IEEE 33-bus distribution network and the Taipower84 distribution system. Simulation results show that using the proposed reconfiguration method the network loss is effectively reduced and the lowest voltage in the system is improved, thus, the proposed reconfiguration method is effective and feasible, the algorithm is simple and fast, and the obtained results are better.

Keywords: distribution network reconfiguration; gray wolf algorithm; ordered ring network; distributed generation(DG)

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0040

0 引言

配电网重构是一个非线性的整数规划问题, 属于典型的多项式复杂程度的非确定性问题 (non-deterministic polynomial, NP)。配电网重构是通过切换联络开关和分段开关的状态以此改变网络拓

扑结构^[1]，从而达到负荷平衡、消除过载、提高电压质量和降低网络损耗的目的，在此过程中，要尽可能快地找到全局最优解。通常，配电网重构一般分为传统的数学优化方法、启发式方法以及智能优化方法。

传统数学方法先建立数学模型，然后通过算法求解并重构^[2]，这种方法相对比较成熟。随着近年来配电网规模的逐渐扩大，其约束条件不断激增，使得传统数学优化方法计算时间长，且存在严重的“维数灾”，难以处理复杂大规模的配电网重构问题^[3]。

启发式方法通过简单的分析，得出较为直观的规则对配电网重构进行求解。配电网重构中常用的启发式算法主要有支路交换法^[4-5]和最优流模式法^[6]等，虽然此类方法求解速度快，但存在易陷入局部最优的缺陷。

智能优化算法基于概率进行随机搜索，广泛地应用在配电网重构等优化领域中。然而此类算法在进行求解时具有一定的盲目性，因此需要多次的迭代，搜索效率较低下，求解时间较长。在配电网重构中常用的智能优化算法有遗传算法^[7]、粒子群算法^[8]、和声算法^[9]、布谷鸟算法^[10]以及入侵杂草算法^[11]等。

智能优化方法寻优效果与其编码方式密切相关，因此在对智能优化方法改进的同时，还需要对其编码方式进行研究。文献^[9]提出基本环(basic ring, BR)矩阵编码方式，并使用改进和声算法对其进行求解；文献^[12]在文献^[9]的基础上，提出了基于自适应负荷调整网络矩阵——基本环矩阵的编码方式，并采用改进烟花算法对网络重构模型进行求解。二者均对编码方式进行改进，并取得了一定效果。

本文在文献^[9]的基础上，使用有序环网矩阵的编码方式，将多峰值函数的峰值降低，并将启发式规则应用到改进灰狼算法(improved grey wolf optimizer, IGWO)中，改进了基本灰狼算法收敛速度较慢，以及深度挖掘能力不足的缺点，同时保留了灰狼算法的全局搜索能力，有效地提高求解效率，降低了迭代次数。

1 配电网重构模型

本文使用配电网有功功率损耗最小作为目标函数^[9]：

$$\min f(x) = \sum_{i \in T} r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \quad (1)$$

式中： i 表示支路的编号； T 则为该配电网中闭合支路的集合； r_i 为第 i 条支路的电阻； U_i 为第 i 条支路末端节点的电压有效值； P_i 和 Q_i 分别为第 i 条支路末端流过的有功和无功功率。

约束条件如下。

1) 节点电压约束：

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad (2)$$

2) 支路容量约束：

$$S_i \leq S_i^{\max} \quad (3)$$

3) 连通辐射状结构约束：

$$g \in G \quad (4)$$

式中： U_i 、 U_i^{\min} 、 U_i^{\max} 分别为第 i 支路末端节点实际电压及其电压的上下限； S_i 、 S_i^{\max} 分别为第 i 支路实际流过的功率及其允许流过的最大功率； g 为配电网重构后的网络拓扑结构； G 为连通辐射状拓扑结构的集合。

分布式电源(distributed generation, DG)的接入改变了配电网的潮流特性，对配电网的有功功率损耗以及各节点的电压产生了一定的影响，因此在配电网重构中不得不考虑DG的影响。文献^[13]指出，在进行潮流计算时可以将不同类型的DG转化为PQ节点进行计算，并且在实际配电网中DG都配有无功补偿设备以保证其恒功率因数输出，因此本文将DG等效为恒功率输出的PQ节点进行处理。

2 有序环网矩阵编码

智能优化算法在寻优过程中，均是以当前最优个体为基础产生新的个体，进而搜索到更优质个体。然而在求解多峰值函数问题时，由于峰值(或谷值)较多。寻优时，有可能搜寻到一个峰值(或谷值)，并以此为基础产生新解，或影响其他个体的寻优，进而使得算法陷入局部最优，需要寻找到优于该峰值(或谷值)的解，才可以跳出局部最优。然而在单峰值函数中，则不存在这种陷入局部最优的状况。且多峰值函数的峰值越多，则智能优化算法对其寻优就越容易陷入局部最优。

因此，智能优化算法在处理多峰值问题时，若可以对其解空间进行重新排序，使其变为单峰值或减少其峰值时，则可以大大降低搜索难度，

既可以提升解的质量,又可以降低迭代次数。

2.1 构造有序环网矩阵

将文献 [9] 中的基本环矩阵重新排序,按其支路连接顺序进行排序,则会产生有序基本环矩阵。由于基本环矩阵中会产生大量不满足拓扑约束的解,可以使用文献 [12] 的自适应负荷调整网络矩阵方法,在不改变其支路顺序的情况下对其进行去除重复支路,即得到有序环网矩阵。

以如图 1 所示的 IEEE 33 配电网为例,构造其有序环网解空间 (solution place, SP) 矩阵为

$$S_{P33} = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 33 & 20 & 19 & 18 \\ 34 & 14 & 13 & 12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 21 & 35 & 11 & 10 & 9 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 15 & 16 & 17 & 36 & 32 & 31 & 30 & 29 & 0 & 0 \\ 25 & 26 & 27 & 28 & 37 & 24 & 23 & 22 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

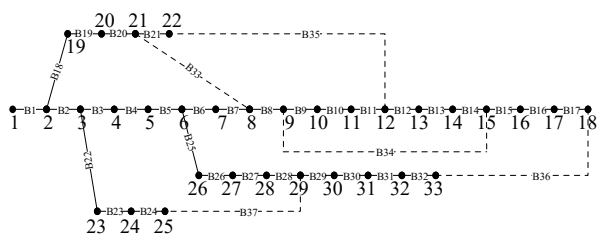


图 1 IEEE 33 节点配电网

Fig. 1 IEEE 33-bus distribution system

2.2 有序环网矩阵编码的优越性

为更加直观地显示有序环网矩阵编码的优越性,将有序环网矩阵和自适应负荷调整网络矩阵进行对比。将 IEEE 33 配电网进行修改,联络开关仅保留 {B35, B36}, 并删除节点 {23, 24, 25} 及其相应支路,并重新对支路和节点进行编号,形成了 30 节点配电网,如图 2 所示。

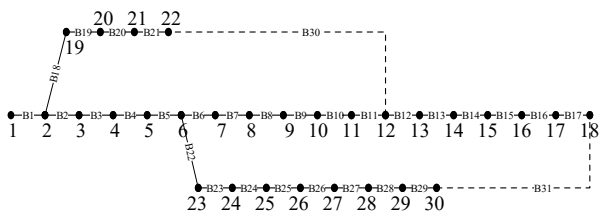


图 2 30 节点配电网

Fig. 2 Distribution network with 30-bus

30 节点配电网的自适应负荷调整网络矩阵 (adaptive load adjustment network matrix, AR) 为

$$S_{P30}' = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \\ 11 & 18 & 19 & 20 & 21 & 30 \\ 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 22 & 23 & 24 \\ 25 & 26 & 27 & 28 & 29 & 31 \end{bmatrix} \quad (6)$$

有序环网矩阵的解空间为:

$$S_{P30} = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \\ 11 & 30 & 21 & 20 & 19 & 18 \\ 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 31 & 29 & 28 \\ 27 & 26 & 25 & 24 & 23 & 22 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 S_{P30}' 和 S_{P30} 为两种编码方式的解空间,通过对比发现,有序环网的解空间不变,表明有序环网编码可以保证全局最优在解空间中。

使用枚举法计算出所有重构方案的系统有功网损以及电压最低点。如图 3—6 所示, X 轴和 Y 轴分别为支路在解空间中的行序号。图 3 和图 4 描绘了在不同解空间中网损的分布,在最低点处有网损最低值。图 3 中仅有一个极小值点,而图 4 中则存在多个极小值点。图 5 和图 6 描绘了在不同解空间中最低电压的趋势,在最高点处有最低电压的最高值。图 5 中仅有一个极大值点,而图 6 中则存在多个极大值点。这表明有序环网可以使解空间变得更加平缓,减少解空间中峰值和谷值,结合 2.1 节所述,有序环网可以有效地提升解空间的质量,并降低迭代次数。

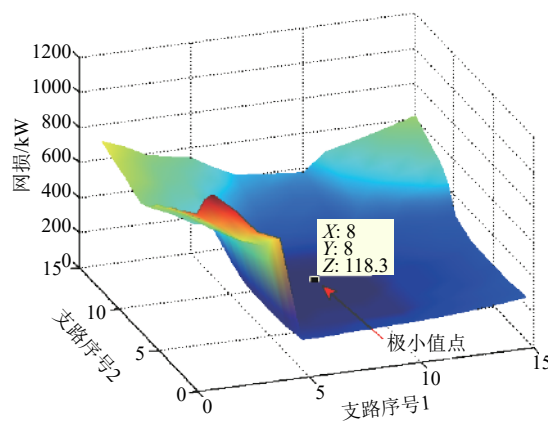


图 3 有序环网网损

Fig. 3 Loss of ordered ring network

2.3 DG 对有序环网的影响

DG 的接入不仅影响了主动配电网各项指标,同时对配电网重构解空间也产生了影响。在简化后的 30 节点配电网中并入 DG: 在 18 节点并入一个有功功率为 500kW, 功率因数为 0.85 的 DG。

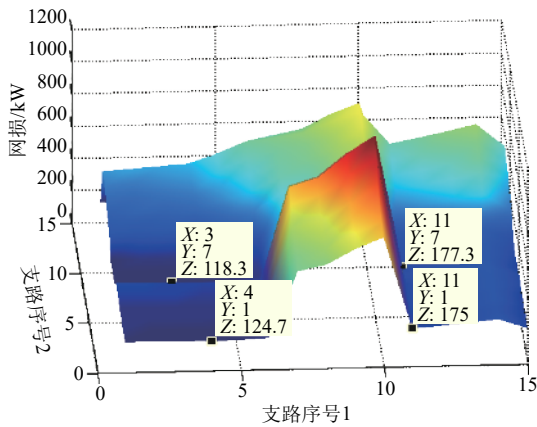


图 4 自适应负荷调整网络矩阵网损

Fig. 4 Loss of adaptive load regulation matrix network

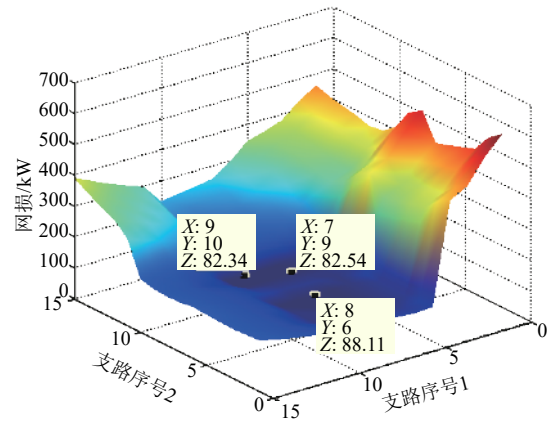


图 7 DG 接入后的解空间

Fig. 7 Solution space after DG is connected

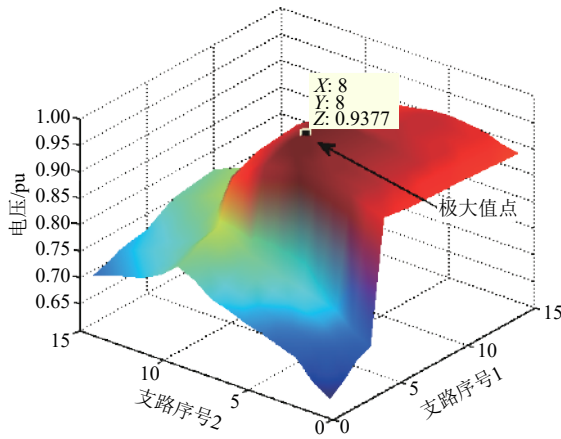


图 5 有序环网最低电压

Fig. 5 The lowest voltage of ordered ring network

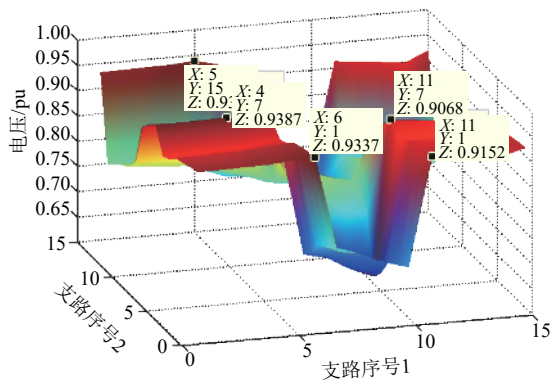


图 6 自适应负荷调整网络最低电压

Fig. 6 The lowest voltage of adaptive load regulation network

含 DG 的 30 节点配电网的网损分布如图 7 所示。由图 7 可以看出由于 DG 的加入使得极值点变多，但是并未改变总体趋势，且极值点距离较近。因此，DG 对智能优化算法的寻优影响不大。

3 改进灰狼算法

3.1 灰狼算法

灰狼优化算法 (grey wolf optimizer, GWO) 是澳大利亚格里菲斯大学学者 Mirjalili 等人于 2014 年提出的一种群智能优化算法 [14]。GWO 算法的灵感来源于灰狼种群的种群等级制度和狩猎行为。在解决优化问题时，将灰狼群体分为 4 个层次： α 、 β 、 δ 、 ω 。其中头狼 α 狼位于种群中的领导者，为当前最优解； β 狼主要负责协助 α 狼进行决策，为当前次优解； δ 狼负责侦查、放哨、看护等事务，为当前第三优解； ω 狼则为其他备选狼，受 α 、 β 、 δ 灰狼的共同指导。4 组狼模拟灰狼群体狩猎包围猎物、追捕猎物和攻击猎物行为。该算法具有较强的收敛性能、参数少、易实现等特点，近年来受到了学者的广泛关注，已被成功地应用到了车间调度、参数优化、图像分类等领域中。

3.2 启发式规则

文献 [15] 通过对支路交换法的公式分析可以得出结论：网损增加量较小的开关往往存在于与环网电压最低的节点距离最近的 2 个开关中。进一步地，配电网重构断开开关的最优组合往往在各环网电压最低节点附近。因此，可以使用各环网电压最低节点附近的支路组合为一个重构方案，本文将所有的支路闭合，求得含环网的配电网电压最低点附近的支路，将其作为灰狼算法的一个参考条件。

3.3 改进 Alpha 狼

Alpha 狼是狼群的领导者，位于金字塔第一层，在寻优过程中，起着至关重要的作用。将启

发式规则引入初始 Alpha 狼, 以获得更快的寻优效率。

以启发式规则对初代 Alpha 狼进行修正, 从初始种群和启发式规则产生的较优解中挑选最优个体作为 Alpha 狼:

$$X_{\alpha} = \begin{cases} X_{\alpha}^1, f(X_{\alpha}^1) < f(X_h) \\ X_h, f(X_{\alpha}^1) \geq f(X_h) \end{cases} \quad (8)$$

式中: X_{α} 为修正后的初代 Alpha 狼; X_{α}^1 为初始种群中的最优个体; X_h 为通过启发式规则产生的个体。

3.4 引入 Gamma 狼

由 3.2 节分析可知, 配电网重构的全局最优解往往在各环网电压最低点附近, 则需要对各环网电压最低点进行深度挖掘。因此在保障 GWO 算法的全局搜索能力的同时, 应尽可能地提高局部搜索能力, 本文将 Gamma 狼引入灰狼算法, 对 Alpha 狼附近空间进行搜索, Gamma 狼只受 Alpha 狼的控制:

$$X_{\gamma}^i = X_{\alpha}^i \pm \text{ceil}(abU^i + \varepsilon) \quad (9)$$

$$a = \text{rand}(0, 1) \quad (10)$$

$$b = 1 - \frac{i_{\text{ter}} - 1}{i_{\text{termax}}} \quad (11)$$

式中: X_{γ}^i 为第 i 个 Gamma 狼的第 i 个维度; X_{α}^i 为 Alpha 狼的第 i 个维度; $\text{ceil}()$ 为对括号内做向上取整运算; ε 为机械极小值, 即大于 0 的一个极小数; a 为 (0,1) 区间的随机数; i_{ter} 为当前迭代次数; i_{termax} 为算法最大迭代次数; b 随着迭代次数由 1 减小逐渐接近于 0; U^i 为在第 i 个维度下的上限值。

公式 (11) 表明, 每个 Gamma 狼在 Alpha 狼的基础上只改变一个维度值, 其他维度保持不变。且随着迭代次数的增加, 变化的幅度逐渐降低为 1。

4 算例分析

本文采用 IEEE 33 配电网和 Taipower 84 配电系统对所提方法进行验证, 并将本文所提解空间矩阵 S_p 与文献 [12] 中解空间矩阵 BR 进行对比。

4.1 算例 1

算例 1 使用如图 1 所示的 IEEE 33 配电网进行仿真验证, 该配电网中具体参数见文献 [5]。经多次实验, 设置 BR 和 GWO 最大迭代次数为 100 次, BR 和 IGWO 最大迭代次数为 50 次, SP 和 GWO 最大迭代次数为 20 次, SP 和 IGWO 最

大迭代次数为 10 次。

启发式规则产生的较优解为 {B7, B14, B 9, B32, B28}, 全局最优解为 {B7, B14, B9, B37, B32}, 此时最低电压的标幺值为 0.943 1。

进行配电网重构前后的电压对比如图 8 所示, 由图 8 可以看出, 重构后的节点电压总体高于重构前, 该配电网的各节点电压得到显著改善。

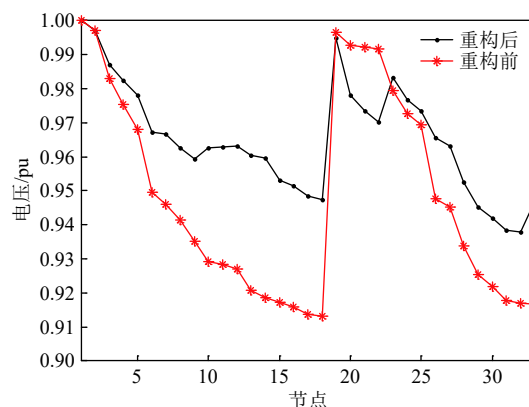


图 8 重构前后电压对比

Fig. 8 Contrast of voltage curve before and after reconfiguration

将仿真结果与基本环矩阵编码方式 BR 和自适应负荷调整网络矩阵编码方式 AR 进行对比。所有算法均进行 200 次重复实验, 仿真结果比较如表 1 所示。

如表 1 所示, 所有方法均找到最优解 {B7, B14, B9, B37, B32}。在 200 次重复实验中, 本文所述方法均搜索到全局最优解, 全局寻优率达到了 100%, 相对于文献 [9] 全局寻优率为 33% 和文献 [12] 全局寻优率为 91%, 本文方法的全局寻优率明显提升, 表明本文算法具有较高的稳定性。而使用了本文所述编码方式的 GWO 全局寻优率为 87%, 虽然其迭代次数为 IGWO 的 2 倍, 仍低于本文算法的寻优率, 表明对基本灰狼算法的改进可以有效地提高寻优率, 并可以减少迭代次数, 进而减少寻优时间。在寻优时间上, 本文所述算法由于使用了启发式规则极大地减少了迭代次数, 相对于文献 [9] 和文献 [12] 的重构时间均有所降低, 这得益于较快的搜索效率以及较少的迭代次数, 因此本文所述算法可以有效地缩短重构时间。当使用基本环矩阵编码方式与 GWO 和 IGWO 组合进行寻优时, 寻优效果远远低于使用有序环网编码方式的情况, 主要表现为迭代次数、全局寻优率以及平均重构时间上, 表明使用有序环网编

表 1 算法性能对比(算例 1)
Table 1 Comparison of algorithm performance (example 1)

方法	网损/kW			全局寻优率/%	平均时间/s
	最低	最高	平均		
BR和改进和声算法(improved harmony search, IHS)	139.55	144.71	141.48	33	6.1
AR和改进烟花算法(improved firework algorithm, IFWA)	139.55	139.98	139.59	91	3.6
BR和GWO	139.55	143.65	140.95	41	16.3
BR和IGWO	139.55	145.71	142.34	38	12.6
SP和GWO	139.55	146.88	139.79	87	3.3
SP和IGWO(本文方法)	139.55	139.55	139.55	100	2.7

码方式可以有效地提高寻优效率。

将 200 次重复实验的迭代曲线取均值，即得到均值收敛曲线，如图 9 所示，经过 7 次迭代，均值收敛曲线达到最优值，表明此时 200 次重复试验均搜索到最优值，这说明在 200 次重复实验中，最慢的一次搜索到最优值仅需 7 次迭代。同时，从曲线起始位置看出该算法的初始值就已经在非常接近最优解，这主要得益于启发式规则产生的较优解。

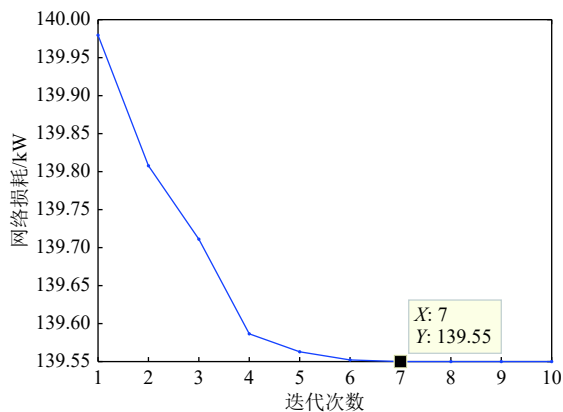


图 9 均值收敛曲线
Fig. 9 Mean convergent curve

将该配电系统加入 DG^[16]，再次进行仿真，DG 相关参数如表 2 所示。

接入 DG 后，得到较优解为 {B6, B14, B10, B32, B28}，分别使用 IGWO 和 GWO 进行 200 次重复实验，仿真结果如表 3 所示，全局寻优率为 200 次重复实验中，找到全局最优解的次数 200。

由表 3 可以看出，在加入 DG 后，本文所述算法仍能较快地搜索出全局最优解，并且仍然可以保持 100% 的全局寻优率，表明本文所述算法在求解含 DG 的配电网重构的稳定性。

将上述结果与文献 [16] 微分进化算法 (differential

表 2 DG 接入位置及容量

Table 2 Connected locations and capacities of DGs

DG 编号	接入节点	容量/kW	功率因数
1	7	100	0.80
2	9	50	0.90
3	22	50	0.85
4	25	250	0.90

表 3 算法结果对比

Table 3 Comparison of results by different algorithms

方法	最低网损/kW	最高网损/kW	迭代次数/kW	全局寻优率/%	平均重构时间/s
GWO	108.58	111.34	108.74	90	3.3
IGWO	108.58	108.58	108.58	100	2.8

表 4 算法性能对比

Table 4 Comparison of different algorithm performances

比较项	网损/kW	最低电压/pu	最多迭代次数	平均迭代次数
DE	115.04	0.948 2	—	—
IDE	108.58	0.948 5	5	5.00
GWO	108.58	0.9485	20	6.55
IGWO	108.58	0.948 5	4	2.80

evolution, DE) 和文献 [17] 改进差分进化算法 (improved differential evolution algorithm, IDE) 对比，仿真结果比较如表 4 所示。

由表 4 可见，在迭代次数上，IGWO 可以在 4 次以内就找到全局最优解，略低于文献 [16] 的迭代次数，GWO 最多迭代次数为 20 次，表明在 20 次重复实验中，存在未找到最优解的情况，表明本文算法改进的有效性。通过对比表 1 和表 4 可以看出，加入 DG 后，配电网的节点电压有所提高，同时可以有效地降低网络损耗。

4.2 算例 2

算例 2 使用实际配电网 Taipower 84 进行仿真分析，该系统为一个大型的实际配电网，详细参

数见文献[18]。

原始配电网 Taipower 84 的断开开关为 {B84 B85 B86 B87 B88 B89 B90 B91 B92 B93 B94 B95 B96}，其网损为 531.99kW，最低电压为 0.919 3 pu。最优的重构方案为断开开关 {B55 B7 B86 B72 B13 B89 B90 B83 B92 B39 B34 B42 B62}，

此时网损为 469.88 kW，最低电压为 0.928 5 pu。

使用启发式规则产生的较优解为 {B84 B7 B86 B72 B13 B89 B90 B83 B92 B39 B33 B42 B63}，设置本文所述算法最大迭代次数为 10 次，分别与文献 [18] 和文献 [19] 中所述算法对比，每种算法进行 200 次重复实验得到结果如表 5 所示。

表 5 算法性能对比 (算例 2)
Table 5 Comparison of different algorithm performances (example 2)

比较项	网络损耗/kW			最优率	平均降损率/%	平均运行时间/s
	最优	最差	平均值			
模拟退火算法(simulated annealing, SA)	469.88	498.22	489.82	—	7.93	257.40
遗传算法(genetic algorithm, GA)	469.88	489.25	479.73	—	9.82	303.40
蚁群搜索算法(ant colony search algorithm, ACSA)	469.88	482.95	471.41	—	11.39	241.50
改进化学反应算法(improved chemical reaction optimization, ICRO)	469.88	474.14	470.41	88	11.58	—
IGWO	469.88	469.88	469.88	100	11.67	21.78

由表 5 可以看出本文算法在 200 次重复实验中均找到了全局最优解，最优率达到 100%，使其平均降损率达到最大值为 11.67%。同时本文算法在平均运行时间上与其他算法相比，缩短了一个数量级，仅需 21.78s，再次验证本文算法具有收敛速度快、不易陷入局部最优的优点。综上，本文算法的求解性能不受配电网规模的影响，表明本文算法具有广泛适用的特点。

5 结论

1) 有序环网可以大大减少配电网重构解空间的峰值，进而提高算法寻优效率。

2) 启发式规则可以迅速寻找到较优解，大大缩短寻优所用迭代次数。

3) 本文算法寻优的最优率较高，且具有收敛速度快，迭代次数少以及广泛适用等特点。

参考文献

- [1] 林昶咏, 吴桂联, 张林焱, 等. 分布式电源接入配电系统优化规划方案[J]. 现代电力, 2019, 36(6): 82-87.
LIN Changyong, WU Guilian, ZHANG Linyao, *et al.* Planning scheme optimization for distributed generation accessed in distribution system[J]. Modern Electric Power, 2019, 36(6): 82-87.
- [2] 杨壮. 含分布式电源的配电网重构研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
- [3] 朱吉然, 冷华, 唐海国, 等. 智能配电网网络重构算法综述

[J]. 湖南电力, 2015, 35(6): 1-5.

ZHU Jiran, LENG Hua, TANG Haiguo, *et al.* Summary on the network reconfiguration algorithms for smart distribution grids[J]. Hunan Electric Power, 2015, 35(6): 1-5 (in Chinese).

- [4] ABDOLMAJID D, YASHAR F K, HOSSEIN S. Modified branch exchange reconfiguration of active distributed network for simultaneous loss reduction and power quality improvement[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2019, 29(10): e12065.1-e12065.17.
- [5] 荣德生, 胡举爽, 韩淑敏. 基于支路交换和声搜索算法的配网重构[J]. 电源学报, 2018, 16(2): 159-164.
RONG Desheng, HU Jushuang, HAN Shumin. Distribution network reconfiguration based on branch exchange harmony search algorithm[J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(2): 159-164 (in Chinese).
- [6] 张熙, 程小华, 曾君, 等. 基于动态规划与最优流模式的微网孤岛重构[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4608-4616.
ZHANG Xi, CHENG Xiaohua, ZENG Jun, *et al.* Microgrid island reconfiguration based on dynamic programming method and optimal flow pattern[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4608-4616 (in Chinese).
- [7] 孟明, 魏怡, 朱国林, 等. 基于智能软开关的交直流主动配电网优化控制策略研究[J]. 现代电力, 2019, 36(2): 1-7.
MENG Ming, WEI Yi, ZHU Guolin, *et al.* Research on optimal control strategy of AC/DC active distribution networks based on soft open point[J]. Modern Electric Power, 2019, 36(2): 1-7 (in Chinese).
- [8] 徐渊. 改进粒子群算法在含分布式电源配电网优化重构中的应用[J]. 电测与仪表, 2021, 58(3): 98-104.

- XU Yuan. Application of improved particle swarm optimization in distribution network reconfiguration with distributed generation[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2021, 58(3): 98–104.
- [9] 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(in Chinese).
- [10] 高纯, 于艾清, 丁雨. 基于改进布谷鸟算法的三相不平衡有源配电网重构[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2020, 32(9): 143–150.
GAO Chun, YU Aiqing, DING Yu. Reconfiguration of three-phase unbalanced active distribution network based on improved cuckoo search algorithm[J]. *Proceedings of the CSU-EPSS*, 2020, 32(9): 143–150(in Chinese).
- [11] 范宏, 刘自超, 郭翔. 基于差分进化入侵杂草算法的含分布式电源配电网重构[J]. *可再生能源*, 2019, 37(4): 545–551.
FAN Hong, LIU Zichao, GUO Xiang. Distribution network reconfiguration with distributed generation based on differential evolution invasive weed optimization algorithm[J]. *Renewable Energy Resources*, 2019, 37(4): 545–551(in Chinese).
- [12] 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(in Chinese).
- [13] 李新, 彭怡, 赵晶晶, 等. 分布式电源并网的潮流计算[J]. *电力系统保护与控制*, 2009, 37(17): 78–87.
LI Xin, PENG Yi, ZHAO Jingjing, *et al.* Power flow calculation of distribution network with distributed generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2009, 37(17): 78–87(in Chinese).
- [14] 顾清华, 李学现, 卢才武, 等. 求解高维复杂函数的遗传-灰狼混合算法[J]. *控制与决策*, 2020, 35(5): 1191–1198.
GU Qinghua, LI Xuexian, LU Caiwu, *et al.* Hybrid genetic grey wolf algorithm for high dimensional complex function optimization[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(5): 1191–1198(in Chinese).
- [15] 韩学军, 陈鹏, 国新风, 等. 基于潮流计算的配电网重构方法[J]. *电网技术*, 2007, 31(17): 60–63.
HAN Xuejun, CHEN Peng, GUO Xinfeng, *et al.* A power flow based reconfiguration method of distribution networks[J]. *Power System Technology*, 2007, 31(17): 60–63(in Chinese).
- [16] 曹文辉, 彭春华, 郭剑峰, 等. 基于全有效解整数微分进化算法的含分布式发电配电网重构[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(11): 105–110.
CAO Wenhui, PENG Chunhua, GUO Jianfeng, *et al.* Reconfiguration of distribution network with DGs based on the efficient solution and the integer coded differential evolution algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(11): 105–110(in Chinese).
- [17] 周淦, 张冠军, 李剑, 等. 基于化整为零策略和改进二进制差分进化算法的配电网重构[J]. *电网技术*, 2012, 36(3): 197–203.
ZHOU Quan, ZHANG Guanjun, LI Jian, *et al.* Distribution network reconfiguration based on strategy of breaking up the whole into parts and improved binary differential evolution algorithm[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(3): 197–203(in Chinese).
- [18] 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.
- [19] 王淳, 高元海. 采用最优模糊C均值聚类和改进化学反应算法的配电网动态重构[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(10): 1682–1691.
WANG Chun, GAO Yuanhai. Dynamic reconfiguration of distribution network based on optimal fuzzy c-means clustering and improved chemical reaction optimization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(10): 1682–1691(in Chinese).

收稿日期: 2021-02-20

作者简介:

王鲁明(1997), 男, 硕士, 研究方向为电力系统自动化, E-mail: 749875755@qq.com;

程静(1980), 女, 博士, 副教授, 通信作者, 研究方向为新能源发电与并网控制技术, E-mail: 157511515@qq.com;

王维庆(1959), 男, 硕士, 教授, 研究方向为可再生能源发电与继电保护, E-mail: 3064486275@qq.com。