

改进量子粒子群算法在配电网故障恢复中的应用

何雨轩¹, 范馨月¹, 张恒荣²

¹贵州大学数学与统计学院数学系, 贵州 贵阳

²贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2023年3月8日; 录用日期: 2023年4月21日; 发布日期: 2023年4月28日

摘要

配电网故障通常会导致大规模、长时间的停电, 为了缩短停电时间, 降低停电对社会带来的损失, 本文选取了网损大小和电压偏移作为目标函数, 建立了配电网故障恢复模型。针对粒子群算法精度不够高的问题, 本文使用了量子粒子群算法, 并对量子粒子群算法做了两点改进, 分别是十进制编码策略和配电网分层策略。最后使用IEEE33节点系统进行案例验证, 验证了改进量子粒子群算法在配电网恢复重构中的适用性和有效性。

关键词

配电网故障恢复, 量子粒子群算法, 十进制编码, 配电网分层

Application of Improved Quantum Particle Swarm Algorithm in Fault Recovery of Distribution Networks

Yuxuan He¹, Xinyue Fan¹, Hengrong Zhang²

¹Faculty of Mathematics, School of Mathematics and Statistics, Guizhou University, Guiyang Guizhou

²Electric Power Research Institute, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang Guizhou

Received: Mar. 8th, 2023; accepted: Apr. 21st, 2023; published: Apr. 28th, 2023

Abstract

Distribution network faults usually lead to large-scale and long-term power outages. In order to shorten the power outage time and reduce the losses caused by power outages to the society, this paper selects the network loss and voltage offset as the objective function, and establishes a dis-

tribution network fault recovery model. Aiming at the problem that the precision of the particle swarm algorithm is not high enough, this paper uses the quantum particle swarm algorithm, and makes two improvements in the quantum particle swarm algorithm, namely the decimal coding strategy and the distribution network layering strategy. Finally, the IEEE33 node system is used for case verification, and the applicability and effectiveness of the improved quantum particle swarm algorithm in distribution network restoration and reconstruction are verified.

Keywords

Distribution Network Fault Recovery, Quantum Particle Swarm Algorithm, Decimal Coding, Distribution Network Layering

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

配电网是指从输电网或地区发电厂接受电能，通过配电设施就地分配或按电压逐级分配给各类用户的电力网。是由架空线路、电缆、杆塔、配电变压器、隔离开关、无功补偿器及一些附属设施等组成的，在电力网中起重要分配电能作用的网络。配电网直接面向用户，是保证供电质量、提高电网运行效率、创新用户服务的关键环节。在我国，由于历史的原因，配电网投资相对不足，自动化程度比较低，在供电质量方面与国际先进水平还有一定的差距。目前电力用户遭受的停电时间，95%以上是由于配电系统原因造成的(扣除发电不足的原因)；配电网是造成电能质量恶化的主要因素；电力系统的损耗有近一半产生在配电网；分布式电源(DG)接入对电网的影响主要是对配电网的影响；与用户互动、进行需求侧管理的着眼点也在配电网。因此，加强对于配电网的研究，提高配电网的供电质量，是实现人民安居乐业、经济发展、生活富裕的重要保证。本文将针对配电网的故障自愈构建有效的数学模型进行量化分析。

配电网的自愈算法大体可分为3类：数学规划法、人工智能算法和启发式搜索算法。景皓等[1]基于主从博弈理论建立了主动配电网故障恢复模型，并设置多种情形的故障恢复场景验证了所建立模型的有效性。陈春等[2]提出一种基于网络拓扑有向遍历的配电网故障恢复方法，该方法较主流故障恢复算法耗时更少且开关动作次数更少。刘刚等[3]基于对光伏发电系统及风力发电系统的有功出力进行合理建模，建立以故障失电负荷恢复量最大为目标函数，最终建立含DG的故障恢复优化模型。汤旻安等[4]针对含分布式电源的配电网故障恢复问题，提出了基于启发式规则与AHP-CRITIC算法的配电网故障恢复策略。马天祥等[5]针对含分布式风力和光伏发电并网的主动配电网故障恢复问题，采用不确定二层规划理论建立计及新能源出力不确定性的主动配电网故障恢复模型。刘继栋等[6]提出了基于十进制编码的差分进化算法，解决了二进制编码产生大量不可行解的问题。黄焯麒等[7]对于多目标的故障恢复，提出了基于二次插值粒子群算法的双阶段策略。本文提出了基于十进制编码的分层量子粒子群算法，改进的粒子群算法比起普通的智能算法能够更准确地收敛到全局最优解，能够有效降低配电网的网损。

2. 配电网故障恢复模型

2.1. 目标函数

配电网故障恢复的目标函数选取一般有网损大小、负荷均衡、电压偏移、电压可靠性和开关动作次

数等, 本文选取网损大小、电压偏移两方面建立配电网的故障恢复目标函数, 目标函数如式(1)所示:

$$\min f = \omega_1 (P_{BL} - \sum P_i) + \omega_2 \left(\sum_{i=1}^m \left| \frac{U_j - U_{jN}}{U_{jN}} \right| \right) \quad (1)$$

其中: $P_{BL} - \sum_{i \in \gamma} P_i$ 为总损失负荷, $\sum_{i=1}^m \left| \frac{U_j - U_{jN}}{U_{jN}} \right|$ 为电压偏移量; ω_i 为可以人为设定的权重系数, 优先等级根据电网的实际供电目标恢复等级来确定。 m 为网络节点数, U_j 为节点 j 的实际电压, U_{jN} 为节点 j 的额定电压; P_{BL} 为总失电区负荷量; P_i 则表示第 i 个负荷的负荷量。

2.2. 约束条件

本文所采用的智能配电网故障恢复除了需要满足已经设定的恢复目标外, 还需满足一定的约束条件, 其中包括:

1) 电压约束:

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

其中 U_i 为第 i 个节点的电压, $U_{i_{\max}}$ 为第 i 个节点电压的最大有效值, $U_{i_{\min}}$ 为第 i 个节点的最小有效值。

2) 潮流计算方程约束:

$$\begin{cases} P_i = P_{Li} + U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = Q_{Li} + U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (3)$$

其中 P_i 和 Q_i 分别为系统和 DG 共同输入节点 i 的有功功率和无功功率; P_{Li} 和 Q_{Li} 分别为节点 i 处负荷的有功功率和无功功率; U_i 和 U_j 分别为节点 i 、 j 的电压值; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点 i 和节点 j 之间的电导与电纳; θ_{ij} 为节点 i 与 j 的相角差。

3) 支路电流约束:

$$I_i < I_i^{\max} \quad (4)$$

其中 I_i^{\max} 为支路 i 允许流过的最大电流。

2.3. 改进的量子粒子群算法

2.3.1. 算法原理

传统的粒子群算法[8]虽然速度快, 鲁棒性高, 但精度较低, 且容易局部收敛。于是孙俊等人提出量子粒子群算法(Quantum Particle Swarm Optimization, QPSO) [9] [10], 用于解决传统粒子群算法的缺陷。

量子粒子群算法的更新公式为:

$$m_{best}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i(t) = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{i1}(t), \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{i2}(t), \dots, \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{iD}(t) \right] \quad (5)$$

$$P_{id}(t) = \psi P_{id}(t) + (1 - \psi) P_{gd}(t) \quad (6)$$

$$X_{id}(t+1) = P_{id}(t) \pm \beta |m_{best}(t) - X_{id}(t)| \ln \left(\frac{1}{u} \right) \quad (7)$$

式中, m_{best} 表示解空间中粒子最优位置的平均值, P_i 为粒子 i 的最优位置, P_g 为群体最优粒子位置, D

为维数, d 为第 d 维分量, X_i 为第 i 个粒子位置参数。 β 表示收缩扩张系数, 一般按下式取值:

$$\beta(t) = 1 - 0.5 \times \frac{t}{max} \tag{8}$$

t 为当前迭代次数, max 为最大迭代次数。

2.3.2. 算法改进

1) 十进制编码改进策略

普通的 QPSO 采用二进制编码, 分别用 0、1 来表示开关的断开和闭合, 但开关一旦较多, 算法中粒子的搜索空间必将倍数增长, 最终导致整体算法迭代时间变长, 也可能会产生大量的不可行解。于是本文采用十进制编码方式, 可以有效的缓解维数灾难。因此需对式(7)作出如下改进:

$$X_{id}(t+1) = round \left(p_{id}(t) \pm \beta |m_{best}(t) - X_{id}(t)| \ln \frac{1}{u} \right) \tag{9}$$

$$round(\cdot) = [\cdot] + 1 \tag{10}$$

此外, 这样编码会导致粒子各维的上下限不同, 但粒子更新不能越界。为此对粒子进行约束:

$$\begin{cases} \text{if } (x_{c.g} > U_{b.g}), x_{c.g} = randint(1, 1, [L_{b.g}, U_{b.g}]) \\ \text{if } (x_{c.g} < L_{b.g}), x_{c.g} = randint(1, 1, [L_{b.g}, U_{b.g}]) \end{cases} \tag{11}$$

$$randint(\cdot) = x, x \in [L_{b.g}, U_{b.g}] \cap Z \tag{12}$$

式(11)中, $x_{c.g}$ 表示粒子 c 的第 g 维分量; $U_{b.g}$ 和 $L_{b.g}$ 分别表示粒子第 g 维的上下限。

2) 配电网分层改进策略

配电网大部分为辐射型, 结构为拓扑结构。在配电网重构的过程中, 每一次迭代都会生成不同的拓扑结构, 如果是较大的配电网, 节点数量也会增多, 这种时候如果采用单一的前推后代, 迭代时间将会以几何倍数增加, 而对于配电网重构这种现实问题, 多一秒都会造成巨大的损失, 于是, 将配电网拓扑结构分层分区, 就能够有效的减短算法迭代的时间。所以在拓扑图中, 可以将相互连接的节点进行分层, 层与层之间的连接以及原有线路状态就能更好在较为复杂且含有多个电源点的配电网系统中进行层次化潮流计算, 这样不仅增加了计算速度而且也不会因为结构混乱使得潮流计算结果不准确[11], 比如对图 1 配电网系统网络进行分层:

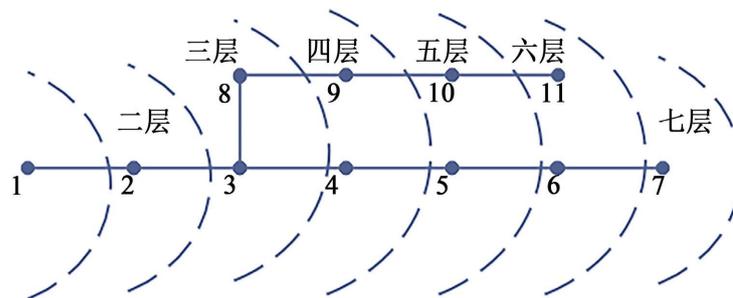


Figure 1. Distribution network topology layered diagram
图 1. 配电网拓扑分层图

2.3.3. 算法流程

QPSO 的算法流程图如图 2 所示:

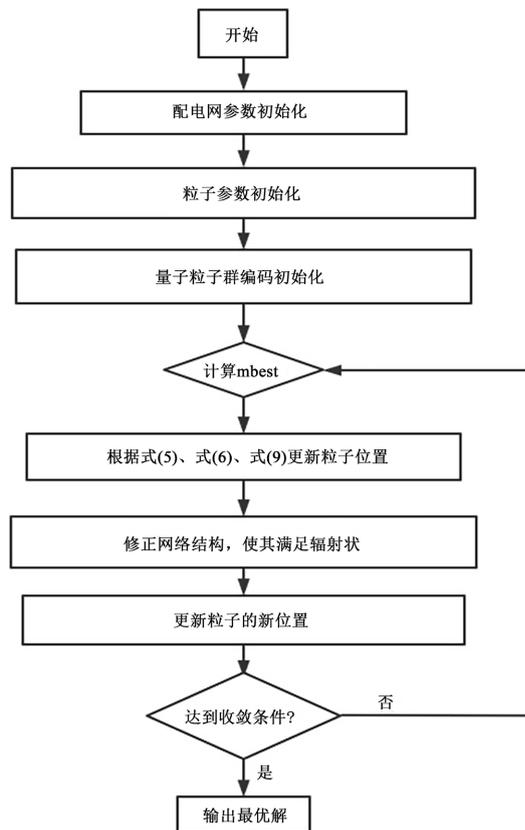


Figure 2. QPSO algorithm flow chart
图 2. QPSO 算法流程图

3. 算例分析

3.1. 节点编码以及参数设置

本文选取经典的 IEEE33 节点系统作为本文的算例系统，具体如图 3 所示：

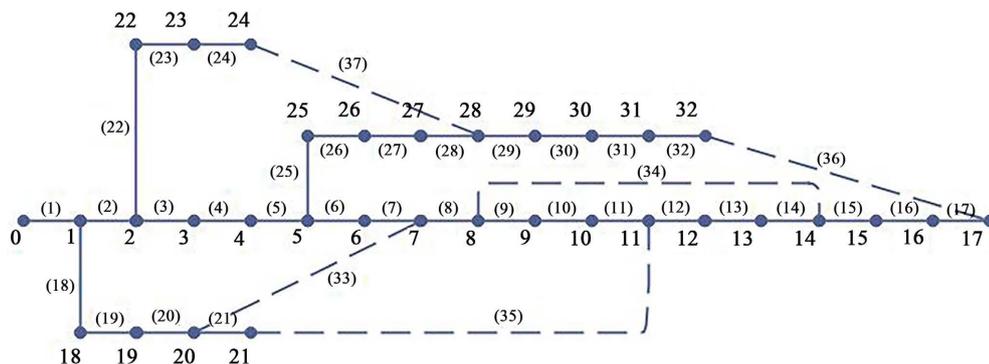


Figure 3. IEEE33 node system diagram
图 3. IEEE33 节点系统图

IEEE33 节点系统包含有 33 个节点，其中实线表示的为分段支路，共 32 条，装有分段开关；虚线表示的为联络支路，共 5 条，装有联络开关。该节点算例系统的基准功率为 10 MVA，网络首端的基准电

压为 12.66 kV，有功负荷为 3715 kW，无功负荷为 2300 kW。

对 IEEE33 节点系统进行编码，具体编码结果如表 1：

Table 1. Node coding map

表 1. 节点编码图

环网	实际开关号	环内编号
L1	7, 6, 5, 4, 3, 2, 20, 19, 18, 33	1~10
L2	14, 13, 12, 11, 10, 9, 34	1~7
L3	11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 21, 20, 19, 18, 35	1~15
L4	17, 16, 15, 14, 13, 12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 36	1~21
L5	24, 23, 22, 28, 27, 26, 25, 5, 4, 3, 37	1~11

在采用改进的量子粒子群算法进行网络恢复重构时，算法的具体参数设置为：种群规模 m 设置为 50，迭代次数设为 100，收敛精度为 10^{-6} ，维数 d 设为 5。

3.2. 单电源仿真模拟

假设支路 7 发生故障，此时使用改进的量子粒子群算法对配电网进行修复，修复结果如表 2 所示：

Table 2. Comparison table of single power supply failures before and after recovery

表 2. 单电源故障恢复前后对比表

	断开支路编号	网损/kW	最低节点电压/p.u
故障前	33, 34, 35, 36, 37	202.6471	0.9133
恢复重构后	7, 14, 9, 32, 37	132.6779	0.943

电网故障恢复后拓扑图如图 4 所示：

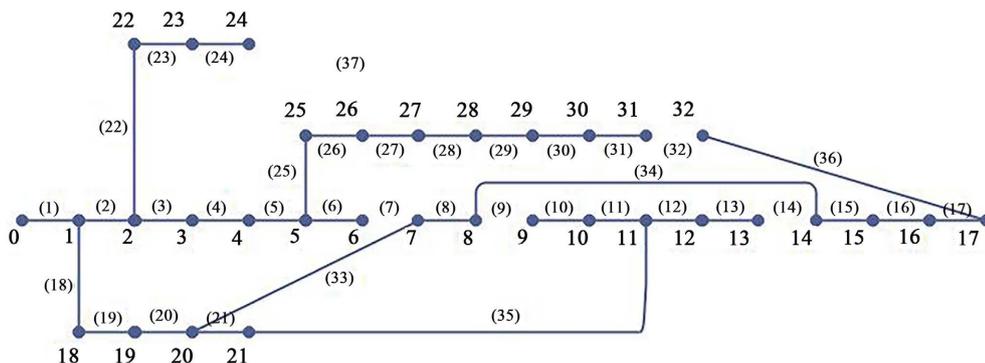


Figure 4. Topology diagram after failure recovery

图 4. 故障恢复后拓扑图

故障前以及故障恢复后的节点电压图如图 5 所示：

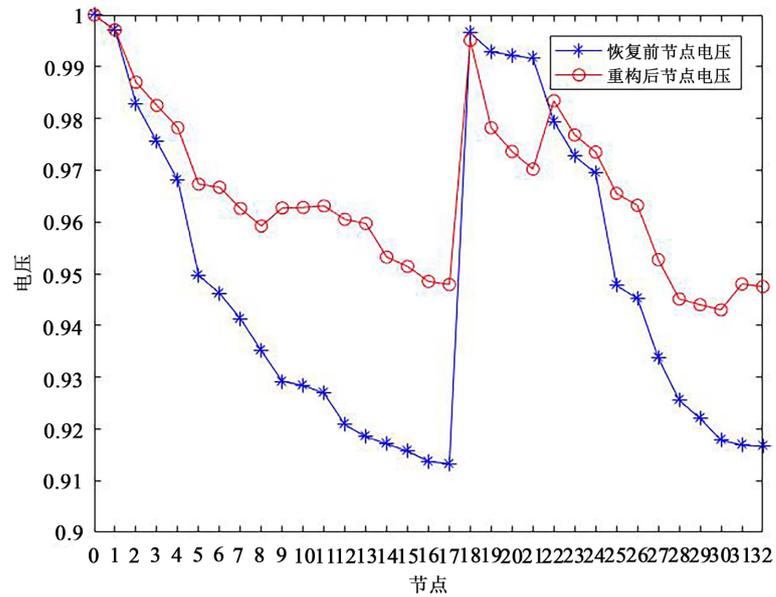


Figure 5. Comparison of node voltages before and after fault recovery in a single power supply system

图 5. 单电源系统故障恢复前后节点电压对比图

3.3. 分布式电源仿真模拟

分别在 IEEE33 节点算例系统的 14 节点、17 节点、32 节点处接入分布式电源，接入分布式电源后的算例系统如图 6 所示。

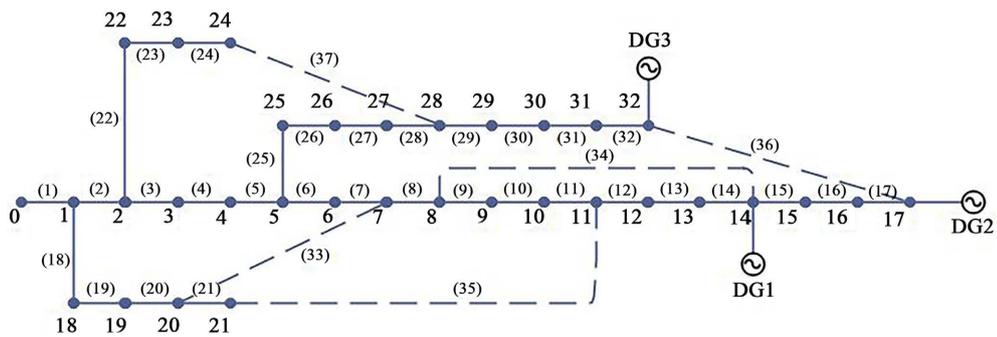


Figure 6. IEEE33 node graph for adding distributed power

图 6. 加入分布式电源的 IEEE33 节点图

接入分布式电源的容量如表 3 所示：

Table 3. Distributed power parameters

表 3. 分布式电源参数

DG1	14	200	120
DG2	17	160	80
DG3	32	250	160

设支路 7 发生故障。此时使用改进的量子粒子群算法对配电网进行修复，修复结果如表 4 所示：

Table 4. Comparison table of multiple power supply failures before and after recovery
表 4. 多电源故障恢复前后对比表

	断开支路编号	网损/kW	最低节点电压/p.u
故障前	33, 34, 35, 36, 37	136.2549	0.9133
恢复重构后	7, 14, 9, 32, 37	86.2575	0.9576

电网故障恢复后拓扑图如图 7 所示:

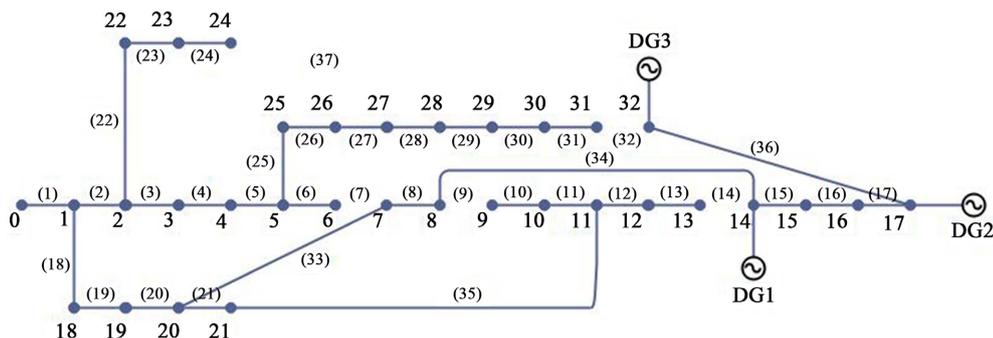


Figure 7. Repaired IEEE33 topology
图 7. 修复后的 IEEE33 拓扑图

故障前以及故障恢复后的节点电压图如图 8 所示:

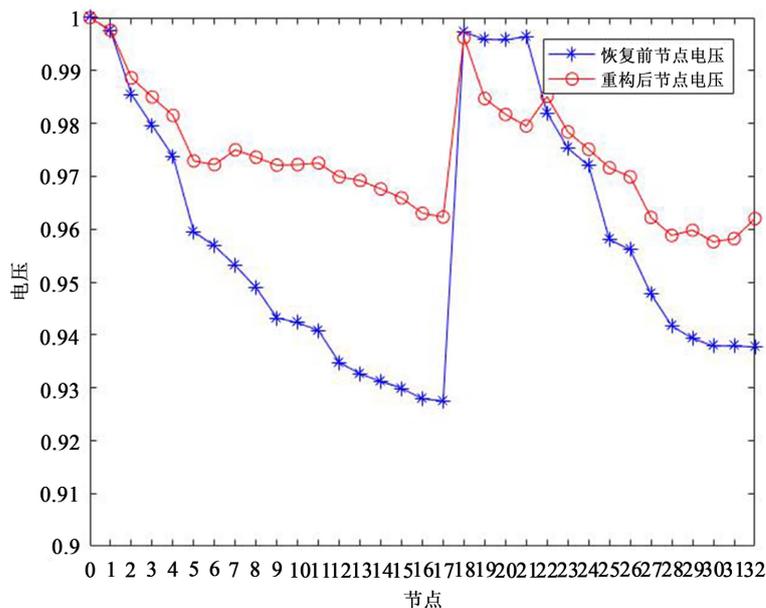


Figure 8. Comparison of node voltages before and after fault recovery in a multi power supply system
图 8. 多电源系统故障恢复前后节点电压对比图

4. 结论

本文在粒子群算法的基础上进行改进，分别是使用十进制编码和配电网分层策略，以网损大小、电

压偏移建立目标函数,在配电网发生故障后,对配电网网络进行故障恢复重构。以多电源仿真结果为例,故障前的网络损耗为 136.2549 kW,最低节点电压为 0.9133;故障恢复后,系统的最小网络损耗为 86.2575 kW,最低节点电压为 0.9576。通过跟 PSO 以及 QPSO 的算法对比可以得出,本文提出的改进算法进行配电网故障恢复,不仅能降低网络损耗,还提高了配电网各点的电压,为进一步研究配电网的故障恢复重构提供了样例。

参考文献

- [1] 景皓,李璠,卢志刚,马天祥,段昕,齐锦涛,贾静然.基于主从博弈理论的含分布式发电的主动配电网故障恢复方法[J].智慧电力,2021,49(5):77-84.
- [2] 陈春,吴宜桐,李锰,曹一家,李勇.基于网络拓扑有向遍历的配电网故障快速恢复方法[J].电力系统自动化,2021,45(7):44-52.
- [3] 刘刚,陈莎,仝进,李惠章,凌万水,吉小鹏.含分布式电源接入的配电网故障恢复方法[J].电测与仪表,2020,57(18):50-56.
- [4] 汤旻安,张凯越,许希元.基于启发式规则与 AHP-CRITIC 算法的配电网故障恢复策略[J].电力系统保护与控制,2020,48(14):1-9.
- [5] 马天祥,程肖,贾伯岩,刘振,段昕,贾静然.基于不确定二层规划模型的主动配电网故障恢复方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(6):48-57.
- [6] 刘继栋,王锡淮,肖健梅.基于十进制编码的差分进化算法在配电网重构中的应用[J].电力自动化设备,2012,32(5):94-97+107.
- [7] 黄焯麒,叶蓓,潘景志,何其淼,陆凯焯,黄骏,马恒瑞.基于二次插值粒子群算法的配电网多目标双阶段故障恢复策略[J].电网与清洁能源,2019,35(9):69-75.
- [8] 黄平.粒子群算法改进及其在电力系统的应用[D]:[博士学位论文].广州:华南理工大学,2012.
- [9] Liu, H.Y., Xu, S.H. and Liang, X.Z. (2008) A Modified Quantum-Behaved Particle Swarm Optimization for Constrained Optimization. 2008 *International Symposium on Intelligent Information Technology Application Workshops*, 531-534.
- [10] Liu, R., Zhang, L.P. and Du, B. (2017) A Novel Endmember Extraction Method for Hyperspectral Imagery Based on Quantum-Behaved Particle Swarm Optimization. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **10**, 1610-1631. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2640274>
- [11] 谢梦琼.基于优化量子粒子群算法的配电网重构[D]:[硕士学位论文].株洲:湖南工业大学,2018.