

基于改进烟花算法的矿用配电网重构

徐嘉斌¹, 张鑫², 张玉振³, 张晶⁴

- (1. 山东科技大学 电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 扬州大学 水利与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225127; 3. 国网山东省电力公司 东营市供电公司, 山东 东营 257000; 4. 国网江苏省电力有限公司 仪征市供电公司, 江苏 仪征 211400)

摘要:针对启发式方法和智能优化方法在求解配电网重构问题时存在难以获得全局最优解、效率较低的问题,以及矿用配电网重构快速性、稳定性的要求,提出了一种改进烟花算法用于求解矿用配电网重构。以配电网的网络损耗最小为目标函数,通过引入自适应系数对爆炸算子和终止策略进行改进,以减少迭代次数,提高算法的搜索效率;同时结合最优烟花微调策略,避免最优烟花爆炸产生大量相同火花,有效提高火花的多样性。实验结果表明,改进烟花算法具有较高的稳定性和可重复性、较快的搜索速度及良好的全局搜索能力,利用该算法对配电网重构问题进行求解后,网络损耗明显降低。

关键词:矿用配电网;配电网重构;烟花算法;自适应系数;爆炸算子

中图分类号:TD611 文献标志码:A

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.tp.20180822.1339.002.html>

Mine-used distribution network reconfiguration based on improved fireworks algorithm

XU Jiabin¹, ZHANG Xin², ZHANG Yuzhen³, ZHANG Jing⁴

- (1. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. School of Hydraulic Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 3. Dongying Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Dongying 257000, China; 4. Yizheng Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Yizheng 211400, China)

Abstract: For problems of difficulty in obtaining global optimal solution and low efficiency when heuristic method and intelligent optimization method were used to solve problem of distribution network reconfiguration, and requirements of rapidity and stability of mine-used distribution network reconfiguration, an improved fireworks algorithm was proposed to solve mine-used distribution network reconfiguration. Taking the minimum distribution network loss as objective function, explosion operator and termination strategy are improved by introducing self-adaptive coefficient, so as to reduce iterations and improve search efficiency. Combing with the optimal fireworks fine-tuning strategy, a large number of identical sparks can be avoid during the optimal fireworks explosion, which effectively improves sparks diversity. The experimental results show that the improved fireworks algorithm has higher stability and repeatability, faster search speed and good global search ability, and network loss is obviously reduced by use of the algorithm to solve problem of distribution network reconfiguration.

收稿日期:2018-03-15;修回日期:2018-08-11;责任编辑:盛男。

基金项目:山东省高等学校科技计划项目(J17KA074);山东科技大学科技创新项目(SDKDYC170232)。

作者简介:徐嘉斌(1992-),男,山东临沂人,硕士研究生,研究方向为电力系统及其自动化,E-mail:724323141@qq.com。

引用格式:徐嘉斌,张鑫,张玉振,等.基于改进烟花算法的矿用配电网重构[J].工矿自动化,2018,44(9):32-36.

XU Jiabin, ZHANG Xin, ZHANG Yuzhen, et al. Mine-used distribution network reconfiguration based on improved fireworks algorithm[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(9): 32-36.

Key words: mine-used distribution network; distribution network reconfiguration; fireworks algorithm; self-adaptive coefficient; explosion operator

0 引言

配电网重构是重要的配电网优化手段之一,通过改变开关组合来提高配电网的运营能力。由于配电网的开关数目较多,可形成的开关组合呈几何倍数增长,配电网重构的本质是一个非线性组合优化问题^[1]。

求解配电网重构的方法主要分为启发式方法和智能优化方法。文献[2-3]使用启发式方法对配电网重构进行求解,根据启发式规则可快速对配电网进行优化,但结果易受配电网初始状态或重构过程的影响,无法保证寻找到最优的重构方案。因此,众多学者采用智能优化方法求解配电网重构。文献[4]将配电网的网络损耗和最低节点电压作为适应度函数,将配电网重构描述为混合整数规划问题,并采用遗传算法(Genetic Algorithm,GA)对其进行求解;文献[5-6]利用和声搜索算法(Harmony Search Algorithm,HSA)对配电网重构进行求解,具有编程简单、可调参数少、容易实现的特点。但以上智能优化方法求解配电网重构时均存在收敛速度慢、效率较低的问题。

烟花算法(Fireworks Algorithm,FWA)由 Tan Y 和 Zhu Y 在 2010 年提出^[7],并受到广泛关注^[8]。文献[9]将 FWA 应用于配电网重构求解,并以网络损耗和电压偏差最小为目标函数。文献[10]考虑各类用户负荷日需求模式,以经济效益最大化为目标函数,构建了配电网动态重构和各类分布式电源快速调控策略模型,最后使用 FWA 求解所提出的模型,可高效、快速地获得最优解。

在矿用配电网中,负载集中且大功率设备频繁启停,对供电可靠性要求较高,因此矿用配电网重构既要保证快速性,又要保证稳定性。本文在前人研究基础上,提出了一种改进烟花算法(Improved Fireworks Algorithm,IFWA)应用于矿用配电网重构。该算法利用自适应系数对爆炸算子及终止策略进行改进,并引入最优烟花微调策略,可有效减少迭代次数,提高搜索效率,稳定获得全局最优解。

1 矿用配电网重构数学模型

将配电网的网络损耗最小作为配电网重构的优化目标^[11]:

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

式中: f 为配电网的网络损耗; r_i 为支路 i ($i=1, 2, \dots, T$)的电阻, T 为配电网支路总数; P_i, Q_i 分别为支路 i 末端有功功率和无功功率; U_i 为支路 i 末端节点电压。

节点电压约束条件:

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

式中 $U_{i,\min}, U_{i,\max}$ 分别为支路 i 末端节点电压最小值、最大值。

支路潮流约束条件:

$$S_i \leq S_{i,\max} \quad (3)$$

式中: S_i 为流过支路 i 的实际功率; $S_{i,\max}$ 为允许流过支路 i 的最大功率。

配电网辐射状结构约束条件:

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

式中: g 为配电网重构后的网络拓扑结构; G 为连通的辐射状拓扑结构的集合。

2 IFWA

2.1 自适应系数

在 IFWA 的每次迭代中,适应度最低的烟花为最优烟花,剩余烟花则为非最优烟花。定义经过 k 次迭代后最优烟花的适应度为最优适应度 $y(k)$,由于本文以配电网的网络损耗最小为目标函数,所以 $y(k)$ 为单调不减函数,即

$$y(k-1) \geq y(k) \quad k \geq 2, k \in \mathbf{Z} \quad (5)$$

定义自适应系数为

$$V = \begin{cases} 0 & k = 1 \text{ 或 } y(k-1) > y(k) \\ V+1 & y(k-1) = y(k) \end{cases} \quad (6)$$

式(6)描述:算法第1次迭代或相邻2次迭代的最优适应度不相等时,将 V 置0;相邻2次迭代的最优适应度相等时,令 $V=V+1$ 。因此 V 可用来表示在当前迭代次数下最优烟花的存活代数。

2.2 改进爆炸算子

爆炸算子(即烟花爆炸产生新火花的操作)是 FWA 的重要组成部分,主要包括爆炸半径、爆炸强度^[7]。当爆炸半径较小时,烟花具有较大的爆炸强度;当爆炸半径较大时,烟花具有较小的爆炸强度。爆炸半径改变时,爆炸强度会相应发生改变,从而改变爆炸算子^[12]。因此,本文主要针对爆炸半径进行合理改进。

首先使用自适应系数 V 对每次迭代中的最优烟花和非最优烟花的爆炸半径进行改进:

$$\begin{cases} A'_{\text{opt}} = A_{\text{opt}} \frac{M}{M+V} \\ A'_{\text{other}} = A_{\text{other}} \frac{M+V}{M} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $A_{\text{opt}}, A'_{\text{opt}}$ 分别为改进前后的最优烟花爆炸半径; $A_{\text{other}}, A'_{\text{other}}$ 分别为改进前后的非最优烟花爆炸半径; M 为常数。

式(7)描述:在当前迭代次数下,最优烟花已连续存活 V 代,此时应降低最优烟花爆炸半径,提高最优烟花的局部搜索能力,以期获得在最优烟花附近的最优解;同时增大非最优烟花爆炸半径,提高非最优烟花的全局搜索能力,以期寻找到更好的解,跳出局部最优解。

但当爆炸半径降低到一个很小的值时,取整后的解与原始解相同,即进行了无效变异^[13]。为避免该情况发生,对通过式(7)改进后的爆炸半径进行调整,将爆炸半径设定为不小于1的整数。

$$A'' = \begin{cases} \text{round}(A') & A' \geq 0.5 \\ 1 & A' < 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

式中: A', A'' 分别为取整前后的所有烟花爆炸半径; $\text{round}()$ 为四舍五入取整函数。

2.3 终止策略

在 FWA 中,终止策略可描述为达到最大迭代次数时,则终止算法运行,在最大迭代次数下产生的最优烟花即为搜索到的最优解。然而可能会出现经过较少迭代次数就搜索到最优解的情况,此时算法仍继续运行直至达到最大迭代次数,由此产生大量不必要的迭代,不能根据算法搜索的实际情况进行求解。因此,本文利用自适应系数 V ,在原有终止策略上进行改进:

$$V \geq C \text{ 或 } k \geq k_{\text{max}} \quad (9)$$

式中: C 为终止常数; k_{max} 为最大迭代次数。

IFWA 经过 k 次迭代后,若出现 $V=C$,则表示当前最优烟花已连续存活 C 代,即经过连续 C 次迭代均未找到适应度低于 $y(k)$ 的烟花,当 C 足够大时,可认为经过 k 次迭代后的最优烟花为全局最优解。

当 C 取值较小时,IFWA 可能会陷入局部最优,难以寻找到全局最优解;当 C 取值较大时,IFWA 需要经过较多次数的迭代才能终止算法,难以满足求解矿用配电网重构问题的快速性要求。因此,通过合理设置 C ,并利用 $k \geq k_{\text{max}}$ 限制算法迭代

次数。

2.4 最优烟花微调策略

提高 FWA 的局部搜索能力主要依赖于降低爆炸半径和提高爆炸强度,但具有较大的盲目性,且爆炸产生的火花取整后可能会出现大量相同的火花。因此提出最优烟花微调策略,即以当前最优烟花为基础,对该烟花的每个维度进行1次爆炸操作,并且保持其他维度不变,即

$$R_j = R_{\text{opt}} + \text{round}(D_j) \quad (10)$$

$$D_j = (2b - 1) \frac{N_j}{3} \quad (11)$$

式中: R_j 为当前最优烟花的第 j ($j=1, 2, \dots, n$) 个维度微调后产生的火花, n 为烟花的维度; R_{opt} 为当前最优烟花; D_j 为第 j 个维度微调的幅度; b 为 0 到 1 之间的随机数; N_j 为第 j 个维度可行域的长度。

利用最优烟花微调策略可在最优烟花附近产生大量不同的火花,提高火花的多样性。该策略处理较优异的烟花时产生的效果较显著,而在算法初期效果较差^[14],因此可在 $V > V_r$ (V_r 为常数, $V_r < C$) 时启动该策略。

2.5 IFWA 流程

IFWA 流程如图 1 所示。

3 实验分析

经多次实验,设置 IFWA 参数: $C=10, V_r=3, k_{\text{max}}=50$,其他基本参数见文献[9]。

使用 IEEE33 节点系统进行仿真。该系统含有 37 条支路,其中 5 条为联络支路,形成 5 个基本环网,即在 IFWA 中有 5 个维度。网络首端基准电压为 12.66 kV,三相功率基准值为 10 MVA,总有功负荷为 3 715 kW,总无功负荷为 2 300 kvar,详细参数见文献[15]。

利用 IFWA 对 IEEE33 节点系统进行配电网重构求解,配电网重构前后的节点电压分布如图 2 所示,可看出重构后节点电压得到显著提高。

为验证 IFWA 的性能,与 GA, HSA, FWA 进行对比,每种算法分别进行 200 次重复实验,结果见表 1。

从表 1 可看出,采用 IFWA 和 GA 均搜索到全局最优解,即 {B7, B14, B9, B37, B32}, 此时网络损耗最小,为 139.55 kW;在 IFWA 求解的配电网重构方案下,网络损耗最大值和标准差均小于其他算法,同时网络损耗平均值较其他算法更接近网络损耗最小值,表明 IFWA 具有显著的稳定性;IFWA

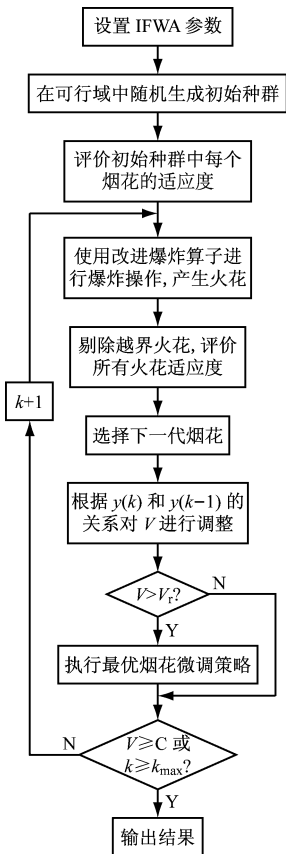


图1 IFWA流程

Fig. 1 Flow of IFWA

表1 基于不同算法的配电网重构结果对比

Table 1 Comparison of distribution network reconfiguration results based on different algorithms

对比项	重构前	重构后			
		GA	HSA	FWA	IFWA
断开开关	B33, B34, B35,	B7, B14, B9,	B7, B14, B10,	B7, B14, B9,	B7, B14, B9,
	B36, B37	B37, B32	B37, B32	B32, B28	B37, B32
网络损耗最小值/kW	202.67	139.55	145.11	139.98	139.55
网络损耗最大值/kW	202.67	202.67	195.10	155.75	141.88
网络损耗平均值/kW	202.67	166.20	152.33	145.63	139.56
网络损耗标准差/kW	202.67	14.53	11.28	5.49	0.29
求得全局最优解次数	—	102	125	134	196
平均运行时间/s	—	19.10	7.20	6.40	2.73

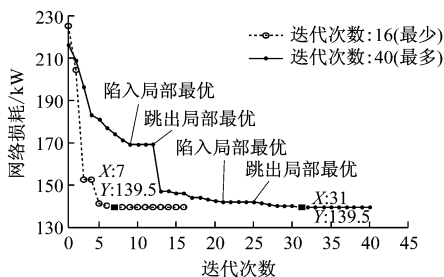


图3 收敛曲线

Fig. 3 Convergence curve

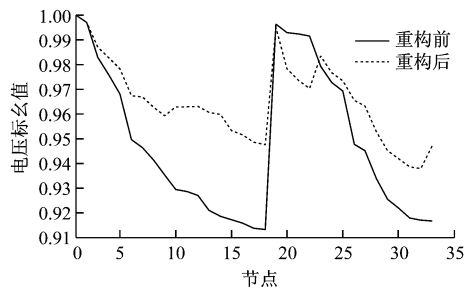


图2 配电网重构前后的节点电压分布

Fig. 2 Node voltage distribution before and after distribution network reconfiguration

求得全局最优解次数明显多于其他算法,表明IFWA具有较好的可重复性;IFWA平均运行时间远低于其他算法,表明IFWA具有较快的搜索速度。

为更加直观地反映IFWA性能的优越性,取200次重复实验中迭代次数最少和最多的2次实验,收敛曲线如图3所示。可看出IFWA最快可在第7次迭代达到全局最优,在第16次迭代后算法终止,节省了大量时间;在迭代次数最多的收敛曲线中,IFWA分别在第9次和第21次迭代陷入局部最优,并分别在第12次和第25次迭代跳出局部最优,表明IFWA具有良好的全局搜索能力。

4 结语

应用于矿用配电网重构的IFWA,以配电网的网络损耗最小为目标函数,通过引入自适应系数对爆炸算子和终止策略进行改进,提高了算法的搜索能力和搜索速度;同时结合最优烟花微调策略,避免产生大量相同火花,提高了火花多样性。实验结果表明,IFWA在求解配电网重构问题时,可快速搜索

出全局最优解,且不易陷入局部最优,减少了迭代次数,降低了网络损耗,具有较高的稳定性和可重复性。

参考文献(References):

- [1] 郭松梅. 煤矿电能质量综合治理研究[J]. 工矿自动化, 2016, 42(9): 60-64.
GUO Songmei. Research on power quality comprehensive treatment for coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(9): 60-64.
- [2] CIVANLAR S, GRAINGER J J, YIN H, et al. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(3): 1217-1223.
- [3] GOSWAMI S K, BASU S K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3): 1484-1491.
- [4] NARA K, SHIOSE A, KITAGAWA M, et al. Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum reconfiguration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(3): 1044-1051.
- [5] RAO R S, NARASIMHAM S V L, RAMALINGA R M, et al. Optimal network reconfiguration of large-scale distribution system using harmony search algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1080-1088.
- [6] 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.
- [7] TAN Y, ZHU Y. Fireworks algorithm for optimization[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2010, 6145: 355-364.
- [8] 谭莹, 郑少秋. 烟花算法研究进展[J]. 智能系统学报, 2014, 9(5): 515-528.
TAN Ying, ZHENG Shaoqi. Recent advances in fireworks algorithm [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2014, 9(5): 515-528.
- [9] IMRAN A M, KOWSALYA M. A new power system reconfiguration scheme for power loss minimization and voltage profile enhancement using fireworks algorithm [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2014, 62: 312-322.
- [10] 周慧芝, 唐飞, 刘涤尘, 等. 考虑负荷时变性的主动配电网动态重构和 DG 动态调控策略[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2423-2430.
ZHOU Huizhi, TANG Fei, LIU Dichen, et al. Active distribution network dynamic reconfiguration and DG dynamic control strategy considering time-variant load [J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2423-2430.
- [11] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2014: 248-252.
- [12] 徐嘉斌, 吉兴全, 公茂法. 计及分布式电源输出特性的有源配电网重构方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(13): 53-59.
XU Jiabin, JI Xingquan, GONG Maofa. Active distribution network reconfiguration method considering the output characteristics of distributed generation [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(13): 53-59.
- [13] 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.
- [14] 杜振鑫. 基于种群进化速度的动态烟花算法[J]. 微电子学与计算机, 2016, 33(10): 24-27.
DU Zhenxin. Dynamic fireworks algorithm based on population evolution velocity[J]. Microelectronics & Computer, 2016, 33(10): 24-27.
- [15] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.