

基于改进二进制粒子群算法的配电网多目标重构

张珂,石俊,王磊

(国网四川省电力公司技能培训中心,四川成都 611133)

摘要: 配电网重构作为配电自动化系统的一个重要组成部分,能够有效提高配电网运行的经济性和可靠性。提出以网络有功网损和网络电压偏移构建配电网重构的多目标数学模型,根据系统初始状态将各指标归一化处理,利用权重系数法将多目标重构问题转化为单目标问题。为克服二进制粒子群算法容易陷入局部最优而难以跳出的问题,将非线性动态调整的惯性权重系数引入到粒子速度更新公式之中,以提高二进制粒子群算法的全局搜索效率和收敛速度。算例结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 配电网;多目标重构;非线性惯性权重;改进二进制粒子群

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)05-0001-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.05.001

Multi-objective Reconfiguration of Distribution Network Based on Improved Binary Particle Swarm Algorithm

Zhang Ke, Shi Jun, Wang Lei

(State Grid Sichuan Technical Training Center, Chengdu 611133, Sichuan, China)

Abstract: As an important part of distribution automation system, distribution network reconfiguration can effectively improve the economical efficiency and reliability of the operation of distribution network. The multi-objective mathematical model of distribution network reconfiguration is constructed by network active power loss and network voltage offset. The indicators are normalized according to the initial state of the system, and the multi-objective reconfiguration problem is converted into a single-objective problem by weight coefficient method. In order to overcome the problem that the binary particle swarm algorithm (BPSO) is easy to fall into local optimum and difficult to jump out, the inertial weight coefficient of nonlinear dynamic adjustment is introduced into the particle velocity update formula to improve the global search efficiency and convergence speed of binary particle swarm algorithm. Results of calculation example show that the proposed method is effective.

Key words: distribution network; multi-objective reconfiguration; nonlinear inertia weight; improved binary particle swarm

0 引言

配电网作为电力系统中直接与需求侧连接的关键部分,其作用是向用户提供安全、经济及可靠的电能供应,因此,配电网的安全高效运行至关重要。在满足各种约束条件的情况下,配电网重构能够寻找到实现配电网安全高效运行的最优拓扑结构,是配电自动化技术研究的主要内容之一,也是智能电网的重要功能之一^[1-2]。

现阶段已有不少对配电网重构的研究,从目标函数的构造上来说,既有单目标重构,也有多目标重构;从优化算法上来说,目前各种人工智能算法在配

电网重构中得到了广泛的应用。各种不同的重构优化方法各有侧重,也各有优缺点。文献[3]以系统有功网损、线路功率传输裕度以及节点电压偏移构建重构优化的多目标函数,通过隶属度函数和欧式距离算法将多目标优化问题转化为单目标问题,采用改进的二进制粒子群算法迭代寻优。文献[4]研究了利用改进和声搜索算法对含有分布式发电(distributed generation, DG)的配电网多目标重构问题,但只是将 DG 作为“负”的负荷进行潮流计算, DG 模型较简单。文献[5]提出一种离散学习优化算法,对含有 DG 的配电网进行以有功网损最小为目标的单目标重构研究,算法较复杂不易实现。文献[6]提出了一种基于无重访机制的 NSGA-II 算

法,用于求解使配电网有功网损降低和供电可靠性提高的多目标重构问题,该算法能够有效避免重复计算,提高求解效率。

这里提出以网络有功网损和网络电压偏移两个指标来构建多目标配电网重构的目标函数,借助网络初始状态将量纲不同的指标进行归一化处理。考虑对网络重构效果的侧重性,利用权重系数法将多目标函数转化为单目标函数,调度人员可根据需要调整各指标的权重系数。运用改进二进制粒子群算法求解所建立的多目标配电网重构数学模型,得到满足各种约束条件的配电网安全经济运行的最优拓扑结构。

1 数学模型

1.1 多目标函数

网络有功网损的高低能够反应配电网经济运行状况的优劣,网络电压偏移是反应配电网电能质量的一项重要技术指标,下面利用以上两个指标构建多目标函数。

1) 网络有功网损

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^n k_i I_i^2 R_i \quad (1)$$

式中: P_{loss} 为网络的有功网损; n 为网络中的总支路数; k_i 为开关 i 的状态 $k=1$ 为开关闭合 $k=0$ 为开关断开; I_i 为流过支路 i 的电流; R_i 为支路 i 的电阻。

2) 网络电压偏移

$$U_{\text{bias}} = \sum_{l=1}^m \left| \frac{U_{lN} - U_l}{U_{lN}} \right| \quad (2)$$

式中: U_{bias} 为网络的电压偏移; m 为网络中的节点总数; U_l 为节点 l 处的实际电压; U_{lN} 为节点 l 处的额定电压,一般取 $U_{lN} = 1$ 。

3) 构建多目标函数

首先,利用配电网初始拓扑结构所对应的系统指标将上述两个指标进行归一化处理,以解决数量级、量纲等不同的问题。再通过加权求和的方式将多目标函数转化为单一目标函数,可表示为

$$\min F = \omega_1 \cdot \frac{P_{\text{loss}}}{P_{\text{loss0}}} + \omega_2 \cdot \frac{U_{\text{bias}}}{U_{\text{bias0}}} \quad (3)$$

式中: F 为目标函数; P_{loss0} 为配电网初始状态下的有功网损; U_{bias0} 为配电网初始状态下的电压偏移; ω_1 、 ω_2 分别为网络有功网损和网络电压偏移的权重系数,满足 $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 。

1.2 约束条件

1) 网络潮流约束

$$\begin{cases} P_l = P_{dl} + U_l \sum_{j=1}^m U_j (G_{lj} \cos \delta_{lj} + B_{lj} \sin \delta_{lj}) \\ Q_l = Q_{dl} + U_l \sum_{j=1}^m U_j (G_{lj} \sin \delta_{lj} - B_{lj} \cos \delta_{lj}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_l 、 Q_l 分别为节点 l 处注入的有功功率和无功功率; P_{dl} 、 Q_{dl} 分别为节点 l 处负荷的有功功率和无功功率; G_{lj} 、 B_{lj} 、 δ_{lj} 分别为节点 l 、 j 之间的电导、电纳和相角差; m 为网络中的节点总数; U_l 、 U_j 分别为节点 l 、 j 处的电压幅值。

2) 支路功率约束

$$S_i \leq S_{i\text{max}} \quad (5)$$

式中: S_i 为支路 i 中流过的功率; $S_{i\text{max}}$ 为支路 i 中允许流过的最大功率。

3) 节点电压约束

$$U_{l\text{min}} \leq U_l \leq U_{l\text{max}} \quad (6)$$

式中: U_l 、 $U_{l\text{max}}$ 、 $U_{l\text{min}}$ 分别为节点 l 处的实际电压及其上、下限。

4) 网络拓扑约束

重构过程中配电网的拓扑结构必须是连通的且呈辐射状,不存在环路及孤岛。

2 重构算法设计

2.1 改进的二进制粒子群算法

标准的粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 是由 Kennedy 等人受到鸟类在搜寻食物的过程中出现的迁徙和群集行为的启发而提出的^[7-8]。后来,他们为了解决离散空间域的优化问题,于1977年提出了二进制粒子群算法 (binary particle swarm optimization, BPSO)。

在 BPSO 中,每个粒子根据式(7)更新自己速度:

$$V_{id}^{t+1} = \omega \times V_{id}^t + c_1 \times r_1 \times (X_{id}^t - p_{best}^t) + c_2 \times r_2 \times (X_{d-gbest}^t - X_{id}^t) \quad (7)$$

式中: V_{id}^t 、 X_{id}^t 分别为粒子 i 在第 t 次迭代时的第 d 维个体的速度和位置; ω 为惯性权重系数; c_1 、 c_2 表示加速系数; r_1 、 r_2 为 0 至 1 之间的随机数; $X_{id}^t - p_{best}^t$ 为粒子 i 在第 t 次迭代时第 d 维个体最优的位置; $X_{d-gbest}^t$ 为整个粒子群在第 t 次迭代时第 d 维全局最优的位置。

BPSO 中,每个粒子位置 X_{id}^t 的取值仅为 0 或者 1,粒子的速度越大则表示位置值为 1 的概率越大。

粒子位置更新公式为

$$X_{id}^{t+1} = \begin{cases} 1 & r < S(V_{id}^t) \\ 0 & r \geq S(V_{id}^t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: r 为 0 至 1 之间服从均匀分布的随机数; $S(x)$ 为 Sigmoid 函数:

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (9)$$

由于配电网重构属于一种规模较大的混合整数非线性规划问题, BPSO 在解空间搜索过程中非常容易陷入局部最优域而无法跳出, 导致搜索结果收敛于局部最优而不是全局最优。为了克服此不足, 利用改进的二进制粒子群算法^[9]对所建的配电网重构数学模型进行求解。为合理平衡 BPSO 全局和局部搜索能力, 对式(7)中的惯性权重系数 ω 进行改进, 改进之后的惯性权重系数不再是一常数, 而是能够随着搜索的进行不断地非线性递减, 这样有助于算法跳出局部最优。改进惯性权重系数公式为

$$\omega(t) = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \times e^{(1 - \frac{t}{t_{\max}})} \quad (10)$$

式中: ω_{\max} 、 ω_{\min} 分别为惯性权重系数的最大、最小取值, 其取值范围通常为 0.4 ~ 0.95; t 、 t_{\max} 分别为当前迭代次数和最大迭代次数。

改进之后, 在迭代初期 ω 较大, 算法具有较强的全局搜索能力, 能够让粒子尽可能快地搜索整个解空间, 找到全局最优解所在的邻域。当迭代进行到中期 ω 逐渐地非线性减小, 粒子搜索范围也以全局最优解邻域为中心逐渐缩小。到了迭代后期, 基于指数函数非线性变化的特点 ω 会加速减小, 算法的局部搜索能力得到增强, 粒子就能够在全局最优解邻域搜索到全局最优解。引入非线性调整惯性权重系数的 BPSO 的全局搜索效率和收敛速度均得到提高, 称为非线性调整惯性权重二进制粒子群算法 (ULWBPSO), 流程如图 1 所示。

2.2 其他说明

1) 编码原则

通常, 配电网都是闭环设计而开环运行的, 可以说一个联络开关决定一条环路, 因此采用了基于环路的编码原则。

在使用的 ULWBPSO 中, 每个粒子的维度即为配电网中联络开关的个数, 每一维的数字即为需要断开的开关编号; 与电源直接相连的开关和不在任何环路上的开关由于必须闭合不参与编码; 为保证配电网呈辐射状运行, 每个环路只能断开一个开关,

且每个环路断开的开关编号必须互不相同且不在同一支路上^[10]。

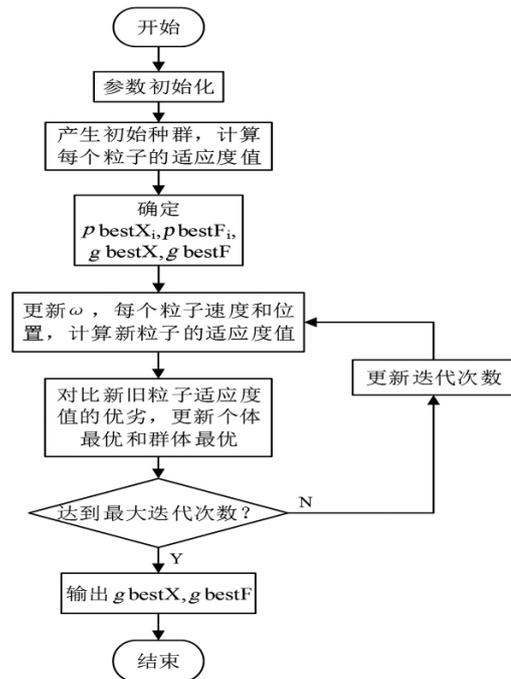


图 1 ULWBPSO 流程

2) 无效解的处理

基于环路的编码原则产生的粒子并不全是有效解。部分粒子所对应的配电网拓扑结构可能呈辐射状, 但是却不满足连通性的要求, 会出现孤岛存在的情况。因此需要对初始粒子和迭代更新后的粒子进行有效性检验: 首先, 每个粒子所对应的配电网拓扑结构必须呈辐射状; 然后根据图论并结合树状结构特点, 对每个粒子所对应的配电网拓扑结构连通性进行判断^[11]。这样的处理可以避免无效解的产生, 提高算法搜索效率。

3 算例分析

所用的重构算例来自文献[12], 为 IEEE 33 节点配电网系统, 系统额定电压为 12.66 kV, 共有 33 个节点和 37 条支路, 含有 5 个联络开关, 编号分别为(33, 34, 35, 36, 37), 系统总负荷为(3715 + j2300) kVA, 单线图如图 2 所示。ULWBPSO 的参数设置为: 粒子群规模 sizepop = 40, 最大迭代次数 $t_{\max} = 50$, 惯性权重系数 $\omega_{\max} = 0.95$ 、 $\omega_{\min} = 0.4$, 加速系数 $c_1 = c_2 = 1.4962$ 。指标权重系数 $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$ (有功网损和电压偏移指标同等重要)。以式(3)为目标函数, 采用 ULWBPSO 寻优, 仿真结果如表 1 所示。

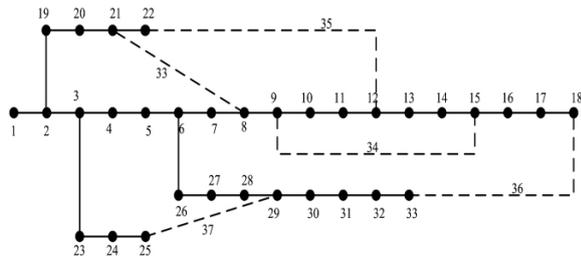


图 2 IEEE 33 节点系统

表 1 重构结果

项目	打开开关	有功网损 /kW	电压偏移 / (p. u.)	最低节点电压 / (p. u.)
重构前	33 34 35 36 37	202.676 2	1.701 3	0.913 1
方案 1	7 9 14 28 32	139.976 7	1.077 3	0.941 3
方案 2	7 9 14 28 36	141.916 3	1.062 6	0.937 8

由表 1 可知,网络重构之后,系统的有功网损和电压偏移均得到了有效降低,且最低节点电压也得到了明显提高。

方案 1 将有功网损降低到 139.976 7 kW,降低率为 30.94%。将电压偏移降低到 1.077 3 p. u.,降低率为 36.68%,将最低节点电压提高到 0.941 3 p. u.,提高率为 3.09%。

方案 2 将有功网损降低到 141.916 3 kW,降低率为 29.98%。将电压偏移降低到 1.062 6 p. u.,降低率为 37.54%,将最低节点电压提高到 0.937 8 p. u.,提高率为 2.71%。

方案 1 对有功网损的改善略优于方案 2,而方案 2 对电压偏移的改善略优于方案 1,但差距不明显。综合考虑两个方案的最低节点电压,认为方案 1 为最佳重构方案。重构前、方案 1、方案 2 的系统节点电压如图 3 所示。

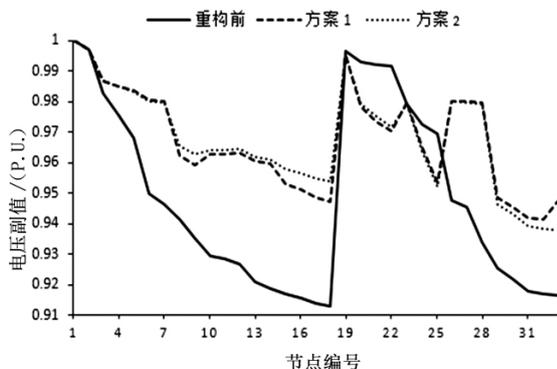


图 3 节点电压水平

为了验证改进二进制粒子群算法(ULWBPSO)的性能,分别使用 ULWBPSO 与 BPSO 对 IEEE 33 节点系统进行重构仿真。分别记录两种算法获得 50

次全局最优解的迭代次数,如图 4 所示。

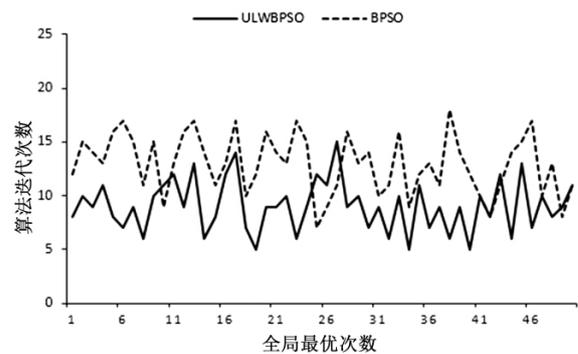


图 4 迭代次数对比

从图 4 中可以看出,ULWBPSO 获得全局最优解所需的迭代次数明显低于 BPSO。ULWBPSO、BPSO 获得全局最优解的平均迭代次数分别为 9.06 次、12.96 次,表明通过引入非线性动态调整的惯性权重系数,算法的全局搜索效率和收敛速度得到一定提高。将所提算法与其他文献算法进行比较,结果如表 2 所示,表明所得算法具有一定优势。

表 2 算法比较

项目	文献[13]	文献[14]	所提算法
最小迭代次数	19	7	5

4 结 语

提出以配电网有功网损和网络电压偏移构成多目标函数,并根据网络初始状态对多目标归一化处理并加权求和,将其转化为单目标函数。将非线性动态调整的惯性权重系数引入二进制粒子群算法,提高其全局搜索效率和收敛速度。仿真结果表明,所提出的方法能够对配电网进行有效重构,降低系统有功网损和电压偏移,提高配电网运行的经济性和可靠性,易于实际应用来提高配电网自动化水平。

参考文献

- [1] Chen S, Hu W, Chen Z. Comprehensive Cost Minimization in Distribution Networks Using Segmented-time Feeder Reconfiguration and Reactive Power Control of Distributed Generators [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 983-993.
- [2] Srinivasa Rao R, Narasimham S V L, Ramalinga Raju 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.

(下转第 9 页)

参考文献

[1] 荆浩. 大数据时代商业模式创新研究[J]. 科技进步与对策, 2014, 31(7): 15-19.

[2] 宋亚奇, 周国亮, 朱永利. 智能电网大数据处理技术现状与挑战[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 927-935.

[3] 崔海福, 何贞铭, 王宁. 大数据在石油行业中的应用[J]. 石油化工自动化, 2016, 52(2): 43-45.

[4] 彭英, 万剑华, 吴楠. 一种基于云计算的分布式油田物探数据存储与服务平台[J]. 计算机研究与发展, 2011(1): 224-228.

[5] 刘科研, 盛万兴, 张东霞, 等. 智能配电网大数据应用需求和场景分析研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 287-293.

[6] 赵腾, 张焰, 张东霞. 智能配电网大数据应用技术与前景分析[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3305-3312.

[7] 梁建宾, 黄绍辉. 大数据下的智能配网的发展研究[J]. 信息化建设, 2016(11): 98-98.

[8] 肖祥. 探析智能配电网大数据应用技术与前景[J]. 电脑编程技巧与维护, 2016(12): 59-60.

[9] 张沛, 吴潇雨, 和敬涵. 大数据技术在主动配电网中的应用综述[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 52-59.

[10] 王璟, 杨德昌, 李锰, 等. 配电网大数据技术分析与典型应用案例[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3114-3121.

[11] 张东霞, 王继业, 刘科研, 等. 大数据技术在配用电系统的应用[J]. 供用电, 2015, 32(8): 6-11.

[12] 苗新, 张东霞, 孙德栋. 在配电网中应用大数据的机遇与挑战[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3122-

(上接第4页)

[3] 赵嘉玉, 韩肖清, 梁琛, 等. 隶属函数与欧氏距离相结合的配电网优化重构[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3624-3631.

[4] 李亚男, 张靠社, 张刚, 等. 基于改进和声搜索算法的配电网多目标综合优化[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(6): 82-86.

[5] 范心明, 陈锦荣, 吴树鸿, 等. 离散学习优化算法在含分布式电源的配网重构中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 156-163.

[6] 程虹, 高元海, 王淳, 等. 基于无重访 NSGA-II 算法的配电网多目标重构[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 10-16.

[7] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization [C]. IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 1995: 1942-1948.

[8] Eberhart R, Kennedy J. A New Optimizer Using Particle Swarm Theory [C]. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, 1995: 39-43.

3127.

[13] 于永军, 祁晓笑, 南东亮, 等. 大数据在配电网低电压评估中的应用[J]. 电气技术, 2015, 16(10): 92-94.

[14] 李占英, 李玉栋, 刘丰年. 配电网低电压评估中大数据的应用探究[J]. 山东工业技术, 2017(12): 209-209.

[15] 陆巍. 基于大数据的配电网线损分析[J]. 电子技术与软件工程, 2017(14): 186-188.

[16] 徐祥征, 王师奇, 吴百洪. 基于大数据分析的配电网主动检修业务应用研究与实现[J]. 科技通报, 2017, 33(6): 105-108.

[17] 李蓉, 张亮, 冯国礼. 基于大数据分析的配电网停电数据管理平台[J]. 宁夏电力, 2017(2): 62-65.

作者简介:

谭文(1989), 工程师, 从事营销业务质量监督、客户优质服务等电力营销服务管控相关工作;

杨雪梅(1987), 工程师, 从事电网运行方式安排、保护定值计算等电力系统调度相关工作;

叶敏(1976), 助理工程师, 从事客户故障报修、非抢工单接派等 95598 客户服务业务管理工作;

李智(1987), 博士、高级工程师, 从事电压无功优化控制、电力系统二次设备检修、配电网建设及运行管控相关工作;

唐朝(1984), 工程师, 从事配电网运检分析管理、配电网自动化管理等工作;

张禹(1985), 工程师, 从事配电网运维检修管理工作;

曾娜(1987), 工程师, 从事配电网生产技改大修项目管理;

李卓雯(1986), 硕士、工程师, 从事配电网运检计划管理工作。

(收稿日期: 2018-06-13)

[9] 韩小雷. 粒子群——模拟退火融合算法及其在函数优化中的应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.

[10] 麻秀范, 丁宁, 李龙. 配电网重构中网络辐射形与连通性的判断[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 289-293.

[11] 孙惠娟, 彭春华, 袁义生. 综合开关次数分析的配电网多目标动态重构[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9): 41-46.

[12] Zhu Jizhong, Xiong Xiaofu, Hwang D, et al. A Comprehensive Method for Reconfiguration of Electrical Distribution Network [C] // Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting 2007, Tampa, FL, USA: 1-7.

[13] 周涑, 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.

[14] 王淳, 易水平, 刘建国. 配电网重构的食物链生态进化算法[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2858-2864.

作者简介:

张珂(1990), 硕士研究生, 主要从事配电网自动化方向的研究。

(收稿日期: 2018-05-25)