

基于支路交换—粒子群算法的配电网故障恢复

俞隽亚¹, 王增平¹, 孙洁², 杨国生³

(1. 新能源电力系统国家重点实验室, 华北电力大学, 北京 102206; 2. 烟台供电公司, 山东 烟台 264000;
3. 中国电力科学研究院继电保护研究所, 北京 100192)

摘要: 针对基本粒子群算法容易“早熟”的问题, 将模拟退火的思想融入惯性权重的动态调整中, 使得惯性权重随着迭代次数的增加逐渐减小, 防止算法陷入局部最优。同时, 采用种群适应度方差判断粒子的相似性, 判断出算法“早熟”, 则对粒子进行自适应变异, 即控制变异数目先大后小, 并随机选取粒子重新生成位移。为了提高粒子群算法的搜索速度, 将粒子群算法与支路交换法相结合, 粒子的位移仅为连接非故障失电区和正常区域的联络开关, 对于形成环网的方案, 采用支路交换法确定要打开的分段开关。既保证了配电网辐射状运行的要求, 又可以使形成的网络网损较低, 大大提高了算法的效率。算例表明, 基于支路交换—粒子群算法的配电网故障恢复可以实现非故障失电区的快速恢复供电。

关键词: 配电网; 故障恢复; 粒子群算法; 自适应变异; 支路交换法

Service restoration of distribution network based on the branch exchange-particle swarm algorithm

YU Jun-ya¹, WANG Zeng-ping¹, SUN Jie², YANG Guo-sheng³

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Yantai Power Supply Company, Yantai 264000, China;
3. Relay Protection Institute, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: To solve the premature issue of particle swarm optimization (PSO), this paper introduces the idea of simulated annealing into the dynamic inertia weight adjustment to make the inertia weight decrease with the increase in the number of iterations and avoid the algorithm falling into local optimization. And it uses population fitness variance to judge the particles' similarity in order to mutate the particle adaptively, i.e. control the mutation number “big then small” and select particles randomly and rebuild displacement. In order to improve the search speed of PSO algorithm, the PSO algorithm and branch exchange algorithm are combined, in which the particle displacement is just the contact switch connecting non-fault power-losing area and normal area, as for the scheme of forming looped network, the branch exchange algorithm is used to determine the section switch to open. The combination of PSO and branch exchange could ensure the radial operation requirements of distribution grid, and make the network formed by a lower net loss. The example shows that the distribution network fault recovery based on branch exchange-PSO can quickly restore power supply of power failure area.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (No. 2012AA050208).

Key words: distribution network; service restoration; particle swarm optimization; adaptive mutation; branch-exchange algorithm

中图分类号: TM76; TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)13-0095-05

0 引言

当配电网发生故障后, 对故障进行定位隔离^[1-2]并采取有效的故障恢复策略快速恢复非故障失电区域的供电, 减小停电带来的损失, 是馈线自动化研究的重要内容。配电网常用的故障恢复算法有很多^[3-6], 如传统优化算法、启发式算法、人工智能算法等。

对于故障恢复问题, 启发式算法具有实时性, 可以大大缩小搜索范围, 提高搜索速度, 在允许的时间内得到有效解, 但系统的初始状态对搜索结果影响很大, 难以得到最优解; 人工智能算法以其独特的智能特性得到了广泛的应用, 但其搜索空间大, 计算效率低, 在其应用时, 需要对其改进或者结合其他算法加以提高。本文综合考虑启发式算法与人工智能算法的优点, 将支路交换法与粒子群算法相结合, 首先从惯性权重的选取以及相似粒子变异两

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2012AA050208)

方面对粒子群算法进行改进,以克服其容易陷入局部最优的缺陷,然后采用支路交换法减少粒子群算法的搜索空间,既保证了算法可以得到全局最优解,又大大提高了搜索效率。因此,提出启发式粒子群故障恢复算法。

1 故障恢复的数学模型

1.1 故障恢复的目标函数

配电网故障恢复是一个多目标优化问题,本文涉及的优化目标主要有:失电负荷恢复量 L_{out} 、负荷转移量 L_t 、分段开关操作代价 C_{op} 、网损 S 。由于各指标的度量标准和取值范围相差较大,采用文献[7]的方法对上述各指标进行模糊处理,并建立综合目标函数如式(1)。

$$\min F = \omega_1 \mu(L_{out}) + \omega_2 \mu(L_t) + \omega_3 \mu(C_{op}) + \omega_4 \mu(S) \quad (1)$$

式中: $\omega_1 \sim \omega_4$ 为各指标权重,根据实际运行需求,确定各权重的大小,并满足 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 = 1$; $\mu(L_{out})$ 、 $\mu(L_t)$ 、 $\mu(C_{op})$ 、 $\mu(S)$ 为对各指标模糊处理之后的隶属度。

1.2 故障恢复的约束条件

在对衡量故障恢复方案的优劣时,首先要满足约束条件,在此基础上选择目标函数最优的方案。故障恢复的目标函数有

(1) 辐射状运行的网络约束

$$g_k \in G_k \quad (2)$$

式中: g_k 为当前的网络结构; G_k 为所有允许的辐射状网络结构。

(2) 节点电压约束

$$\dot{U}_i = [\dot{U}_{i,\min}, \dot{U}_{i,\max}] \quad (3)$$

式中: \dot{U}_i 为节点 i 的电压区间矢量; $\dot{U}_{i,\min}$ 、 $\dot{U}_{i,\max}$ 分别为其上、下限。

(3) 线路容量约束

$$\dot{S}_k = [0, \dot{S}_{k,\max}] \quad (4)$$

式中: \dot{S}_k 为支路 k 的容量区间; $\dot{S}_{k,\max}$ 为其上限。

2 粒子群算法及其改进

粒子群算法是由 Kennedy 和 Eberhart 在 1995 年提出的一种群体智能优化算法,其运行机理是模拟生物群体的社会行为,源于鸟类捕食行为的研究,将鸟群中每一只鸟看作一个粒子,每个粒子的位移一个解,每个粒子在搜索域内都基于一定的速度和当前的位移去寻找食物,每次迭代的速度由它个体的飞行经验和群体的飞行经验来做出相应调整。在

故障恢复中,采用的是二进制粒子群算法,粒子位移的每一维分量被限制为 0 或 1,对应配电网开关的开、合两种状态,粒子的维数 D 等于开关数,目标函数值即算法的适应度。其更新规则如式(5)~式(7)。

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1 r_1^k (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2^k (p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (5)$$

$$x_{id}^{k+1} = \begin{cases} 1, & rand < S(v_{id}^k) \\ 0, & rand \geq S(v_{id}^k) \end{cases} \quad (6)$$

$$S(v_{id}^k) = \frac{1}{1 + \exp(-v_{id}^k)} \quad (7)$$

式中: w 为惯性权重,可以调整算法的局部和全局搜索的能力; c_1 、 c_2 为学习因子,一般取 $c_1 = c_2 = 2$; r_1 、 r_2 为[0,1]之间的随机数; k 为迭代次数; $rand$ 为[0, 1]之间均匀分布的随机数; $d = 1, 2, \dots, D$ 。

基本粒子群算法容易陷入“早熟”,本文从惯性权重的动态调整和相似粒子的判断及变异对粒子群算法进行改进。

2.1 惯性权重的动态调整

将模拟退火的思想融入惯性权重的动态调整中,算法的目标函数相当于模拟退火机制中的能量函数,定义第 k 次迭代时的模拟退火温度为

$$T_k = f_{avg}^k / f_{best}^k - 1 \quad (8)$$

式中, f_{avg}^k 和 f_{best}^k 分别为第 k 次迭代所有粒子的平均适应度和最小适应度。

按照式(9)定义惯性权重^[8]。

$$w = \begin{cases} \alpha_1 + 2.0, & p \geq rand \\ \alpha_2 + r/2, & p < rand \end{cases} \quad (9)$$

$$p = \begin{cases} 1, & \min_{1 \leq i \leq N} f_i^{k-1} \leq \min_{1 \leq i \leq N} f_i^k \\ \exp\left(-\frac{\min_{1 \leq i \leq N} f_i^{k-1} - \min_{1 \leq i \leq N} f_i^k}{T_k}\right), & \min_{1 \leq i \leq N} f_i^{k-1} > \min_{1 \leq i \leq N} f_i^k \end{cases} \quad (10)$$

式中: α_1 、 α_2 为[0,1]之间的常数且 $\alpha_1 > \alpha_2$; N 为种群规模; f_i^{k-1} 和 f_i^k 为第 $k-1$ 和第 k 次迭代粒子 i 的适应度。

较大的惯性权重值有利于算法跳出局部极值,而较小的 w 值有利于算法收敛,采用基于模拟退火的方法能很好地控制 w 先大后小的取值,并且 w 的整个取值过程是随机的,克服了基本 PSO 算法线性减小 w 值极易收敛到局部极值的缺陷。

2.2 相似粒子的判断及变异

(1) 相似粒子的判定

粒子的相似性可以通过种群适应度方差加以判断。

$$\delta^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{f_i^k - f_{\text{avg}}^k}{f} \right)^2 \quad (11)$$

其中, f 为归一化定标因子, 用来限制 δ^2 的大小, f 根据式(12)取值。

$$f = \begin{cases} \max \{ |f_i^k - f_{\text{avg}}^k| \}, \max \{ |f_i^k - f_{\text{avg}}^k| \} > 1 \\ 1, \max \{ |f_i^k - f_{\text{avg}}^k| \} \leq 1 \end{cases} \quad (12)$$

适应度方差 δ^2 反映了群体的收敛程度, 在搜索初期, 各粒子适应度相差较大, δ^2 较大, 随着迭代次数的增加, 粒子个体适应度越来越接近, δ^2 逐渐变小, 当 $\delta^2 < \delta_0$ (预先设定的阈值) 时, 认为算法可能陷入局部最优, 这时需要对粒子进行变异。

(2) 自适应变异

变异是对粒子的位移重新初始化, 当用 δ^2 判断算法陷入早熟收敛时, 随机抽取部分粒子进行变异, 以保证使种群具有多样性。较大的变异数目能提高种群的多样性, 使算法很快地跳出局部最优, 在搜索初期有利于全局寻优; 但在算法后期, 过大的变异数目容易使粒子错过全局最优, 算法不易达到收敛。因此, 需要采用式(13)自适应确定变异数目, 使整个算法阶段变异过程中粒子变异数目先大后小。

$$n = \beta_1 \cdot N + (\beta_2 \cdot N - \beta_1 \cdot N) \cdot \left(\frac{K - k}{K} \right) \quad (13)$$

式中: n 为变异数目; N 为种群规模; β_1 、 β_2 为最小、最大变异系数, 可自行设定; K 、 k 分别为最大迭代次数和当前迭代次数。

3 支路交换算法

支路交换法可以快速确定降低配电网线损的配电网结构, 并且通过启发式规则减少需要考虑的开关组合。在应用时, 首先计算配电网的初始潮流和网损, 将负荷表示为恒定电流, 合上一个联络开关, 在配电网中形成一个环网, 选择环网中使网损降低最多的一个分段开关将其打开使其恢复为辐射网。

支路交换前后网损变化可用式(14)估算。

$$\Delta P = 2 \times \left| \sum_{i \in D} I_i \right| \operatorname{Re} \left[(\dot{U}_m - \dot{U}_n)^* \right] + R_{\text{loop}} \left(\left| \sum_{i \in D} I_i \right| \right)^2 \quad (14)$$

式中: ΔP 为重构前后网损的变化量; D 为被转移

区域的节点集合; m 为与联络开关相连的从电源点开始的电压降落较小的节点; n 为与联络开关相连的从电源点开始的电压降落较大的节点; I_i 为节点 i 的负荷电流; R_{loop} 为合上联络开关后形成的环网的串联电阻之和; \dot{U}_m 和 \dot{U}_n 分别为节点 m 和 n 从根节点开始的电压降。

对式(14)进行简化可得到式(15)所示公式。

$$\Delta P = 2 \times \left| \sum_{i \in D} I_i \right| (U_m - U_n) + R_{\text{loop}} \left(\left| \sum_{i \in D} I_i \right| \right)^2 \quad (15)$$

由式(15)可得到理想转移负荷为

$$I_{\text{opt}} = \frac{U_m - U_n}{R_{\text{loop}}} \quad (16)$$

对于某一次拓扑调整, 合上联络开关后, 选择

$\left| \sum_{i \in D} I_i \right|$ 最接近 I_{opt} 的分段开关断开。

为提高搜索速度, 减小搜索规模, 本文中粒子位移的每一位对应与非故障失电区相连的联络开关, 当有两个以上联络开关为闭合状态时, 说明存在环网, 此时, 搜索出环网中分段开关, 采用支路交换法确定要打开的分段开关。

4 基于支路交换-粒子群算法的故障恢复

综上, 本文提出的支路交换-粒子群算法的故障恢复具体步骤如下:

(1) 搜索与失电区相连的联络开关, 确定粒子长度, 并初始化种群规模 m , 学习因子 c_1 、 c_2 , 惯性因子 w 等。

(2) 随机生成 m 个粒子的初始速度和位移。

(3) 以故障前的负荷为非故障失电区的负荷, 对存在两个联络开关状态为 1 的粒子采用支路交换法确定要打开的分段开关, 以保证配电网呈辐射状运行。

(4) 计算各粒子的适应度。对于每个粒子, 将其适应度与其个体极值做比较, 若比个体极值优秀则将其更新为个体极值, 否则不更新。将当前所有粒子的个体极值与群体极值做比较, 若个体极值比群体极值优秀则更新为群体极值, 否则不更新, 第一次迭代中将各粒子的初始值作为个体极值, 任一粒子作为群体极值。

(5) 判断是否满足收敛条件, 若满足, 停止迭代, 转至步骤(8), 否则, 进行步骤(6)。

(6) 计算种群适应度方差 δ^2 , 判断算法是否陷入局部收敛, 若 $\delta^2 < \delta_0$ 则自适应随机选取粒子进行变异, 转至步骤(3), 否则, 进行步骤(7)。

(7) 按照式(5)~式(7)更新粒子速度与位移, 转至步骤(3)。

(8) 判断是否存在过载线路, 若存在, 则按供电优先级^[9]对过载负荷进行切除, 直至过载消除并输出当前解为最优解; 若不存在, 则输出当前解为最优解。

5 算例分析

本文采用的测试系统如图 1 所示, 为某县城关一个电压等级为 10 kV 的较为复杂的配电网结构。系统中有 43 个馈线分段、15 条馈线、5 条变电站母线、29 个分段开关、16 个联络开关。各电源点和线路开关的电气极限均为 400 A, 系统总负荷为 3.072 kA。图中实心圆代表合闸、空心圆代表分闸, 括号内为对应馈线段供出的负荷。

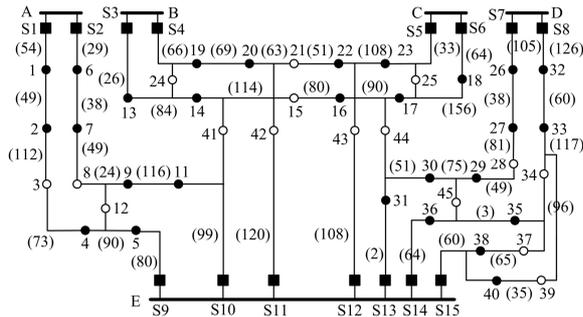


图 1 某 10 kV 复杂配电网

Fig. 1 Some 10 kV complex distribution network

假设母线 E 发生故障, 断路器 S9、S10、S11、S12、S13、S14、S15 断开以隔离母线 E, 由剩余 8 条馈线将尽可能多的失电负荷恢复供电。

由图 1 可见, 连接非故障失电区与正常区域的联络开关有 16 个, 因此粒子长度为 16, 粒子的每一维分别对应 16 个联络开关支路。种群规模取为 30, 最大迭代次数取为 60。采用本文提出的算法得出的故障恢复方案为闭合联络开关 3、8、15、28、34、42、43、44、45, 断开分段开关 5、16、30、35、36, 恢复断电负荷 906 A。

为了验证本文故障恢复算法的有效性, 分别对以下四种情况进行运算: (1) 未经改进的基本二进制粒子群算法, 即惯性权重取固定值、不考虑粒子相似性及变异且不与支路交换法结合; (2) 仅动态调整惯性权重, 但不考虑粒子相似性并且不与支路交换法结合; (3) 动态调整惯性权重并考虑粒子相似性, 但不与支路交换法结合; (4) 本文提出的完整改进算法, 即对二进制粒子群算法的惯性权重动

态调整, 考虑粒子的相似性及变异, 并且与支路交换法相结合。对四种情况的运算结果对比见表 1。

表 1 四种情况计算结果对比

Table 1 Comparison for the calculation results of 4 cases

| | 恢复方案 | 适应度 | 收敛情况 |
|-------|-------------------------------------------------------|-------|----------------|
| 情况(1) | 未得出 | 无 | 未收敛 |
| 情况(2) | 闭合 3、8、12、15、28、34、42、43、44、45, 打开 4、5、11、16、30、35、36 | 0.632 | 47 次迭代 达到收敛 |
| 情况(3) | 闭合 3、8、15、28、34、42、43、44、45, 打开 5、16、30、35、36 | 0.787 | 35 次迭代 达到收敛 |
| 情况(4) | 与情况(3)相同 | 0.787 | 19 次迭代 达到收敛 |

由表 1 可看出, 未经改进的基本粒子群算法在 100 次迭代内未达到收敛; 而情况(2)虽然达到收敛, 但与情况(3)和情况(4)的结果对比可见, 算法陷入“早熟”; 情况(3)和情况(4)都得出了最佳恢复方案, 而与支路交换法相结合的粒子群算法可以在几次迭代中迅速收敛, 计算效率大大提高, 验证了本文提出的故障恢复算法的高效性。

6 结语

本文提出了一种基于支路交换-粒子群的配电网故障恢复算法。首先, 针对粒子群算法容易“早熟”的问题, 对基本粒子群算法加以改进, 基于模拟退火思想动态调整惯性权重, 并且采用种群适应度方差判断粒子是否相似, 通过自适应变异, 减少相似粒子, 使算法跳出局部最优; 然后, 将粒子群算法与支路交换法相结合, 将粒子位移限定为联络开关, 并通过支路交换法确定要打开的分段开关, 大大减少了搜索规模, 使算法在很短时间内得到最优解; 最后通过实际算例验证了本文提出的故障恢复方案的有效性及其快速性。

参考文献

[1] 翁蓝天, 刘开培, 刘晓莉, 等. 复杂配电网故障定位的链表法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 190-196.
WENG Lan-tian, LIU Kai-pei, LIU Xiao-li, et al. Chain table algorithm for fault location of complicated distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 190-196.

[2] 刘蓓, 汪枫, 陈春, 等. 和声算法在含 DG 配电网故障定位中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 280-284.
LIU Bei, WANG Feng, CHEN Chun, et al. Harmony

- search algorithm for solving fault location in distribution networks with DG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 280-284.
- [3] 丁施尹, 刘明波, 谢敏, 等. 应用多代理技术求解高压配电网故障恢复问题[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 54-61.
DING Shi-yin, LIU Ming-bo, XIE Min, et al. A multi-agent approach to fault restoration in high voltage distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 54-61.
- [4] 杨丽君, 刘建超, 卢志刚, 等. 基于多 Agent 演化算法的多目标配电网故障恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 54-58.
YANG Li-jun, LIU Jian-chao, LU Zhi-gang, et al. Fault restoration of multi-objective distribution system based on multi-Agent evolutionary algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 54-58.
- [5] 张智慧, 郇能灵. 含分布式电源的配电网故障智能恢复方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 79-85.
ZHANG Zhi-hui, TAI Neng-ling. Intelligent approach for service restoration of distribution system with distributed generations[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(14): 79-85.
- [6] 张浩, 和敬涵, 薄志谦, 等. 基于动态规划算法的故障恢复重构[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 162-167.
ZHANG Hao, HE Jing-han, BO Zhi-qian, et al. Service restoration based on dynamic programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 162-167.
- [7] 孙雅明, 杜红卫. 可靠性知识与最优评估配电网故障恢复—(二)最优评估[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(13): 36-39.
SUN Ya-ming, DU Hong-wei. Fault service restoration for distribution networks based on the combination of reliable knowledge and optimum evaluated model — part two optimum evaluated model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(13): 36-39.
- [8] 贾松卫, 高岳林. 融合模拟退火和混沌的混合粒子群算法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(7): 52-55.
JIA Song-wei, GAO Yue-lin. Hybrid partical swarm optimization algorithm merging simulated annealing and chaos[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(7): 52-55.
- [9] 康巍晶, 刘伟, 李海城. 配电网恢复控制的研究[J]. 继电器, 2005, 33(21): 41-44.
KANG Wei-jing, LIU Wei, LI Hai-cheng. The research of restorative control in distribution network[J]. Relay, 2005, 33(21): 41-44.

收稿日期: 2013-06-24; 修回日期: 2014-03-18

作者简介:

俞隽亚(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: alpsfreaky@126.com

王增平(1964-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统保护与控制;

孙洁(1989-), 女, 硕士, 主要研究方向为电力系统继电保护。