

基于免疫原理的蚁群算法在配电网恢复中的应用

邰嘉嘉, 黄少先

(华南理工大学, 广东 广州 510640)

摘要: 对配电网的故障恢复问题进行了描述, 提出了结合实际的配电网故障恢复目标函数, 并将蚁群优化算法引入其中, 用来解决这个复杂的、多目标、多约束的组合优化问题。针对蚁群算法存在的易陷入局部最优和收敛难的问题, 引入免疫机制, 通过基于抗体浓度的选择机制和多样性策略来提高蚁群的全局搜索能力和停滞现象, 并通过配电网恢复的具体实例验证该算法的快速有效性。

关键词: 配电网; 故障恢复; 蚁群算法; 免疫原理

Ant colony algorithm based on immune principle for the fault restoration of distribution network

HUAN Jia-jia, HUANG Shao-xian

(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: This paper describes the problem of distribution network fault restoration, and advances the object functions according to the actual power network. It introduces the ant colony algorithm into the fault restoration to the combinational optimization problem, which is complex, multi-objective and multi-constraint. The immune principle is introduced to ant algorithm in this paper, which overcomes stagnation phenomena in ant algorithm and improves the capability of search by using the selection strategy based on density of antibody. It is proved a fast and effective algorithm according to a practical example.

Key words: distribution network; fault restoration; ant colony algorithm; immune principle

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)17-0028-04

0 引言

随着电网建设的升级和加强, 电网结构趋于成熟稳定, 但也愈加庞大复杂。配电网不可避免受到故障影响而导致停电, 严重危害社会经济的持续发展。因此, 配电网的故障恢复问题的研究正成为完善电网建设的一项重要课题。故障恢复是一个非线性、多约束的组合优化问题, 算法的快速性是其实用性的关键。有不少文献提出了多种求解方法, 归纳起来可以分为下面 3 类: ①启发式方法, 例如禁忌搜索、并行模拟退火算法和遗传算法等^[1]; ②数学优化方法, 如分支定界法^[2]和混合整数优化法^[3]等; ③人工智能法, 如专家系统、模糊集法和人工神经网络法^[4-6]等。随着配网自动化技术的不断发展, 处理配电网故障的时间越来越短, 这就对故障恢复算法提出了实时的要求, 启发式方法能较快的给出新的构建方案, 而且结果容易为调度员所接受^[7]。所以, 在配电网故障恢复问题中, 采用启发式算法具有一定的优势。

蚁群算法是一种求解组合优化问题的新型通用

的仿生启发式优化方法, 目前在电力系统的很多组合优化问题研究上都取得了比较理想的效果, 如无功优化^[8]、经济负荷分配^[9]、网架优化^[10]等方面。本文将蚁群算法应用于配电网的故障恢复, 充分利用其搜索能力强, 易于发现较好解, 对于目标函数没有可微甚至连续的要求的优点, 针对其收敛慢, 容易出现停滞而无法搜索到全局最优解的缺陷, 引入免疫机制进行改进。

1 配电网的故障恢复问题

配电网故障恢复是在隔离故障设备后, 根据当前网络拓扑及潮流分布, 在满足相关约束的条件下, 寻找优化指标综合性能最优的非故障失电区恢复方案, 通过一系列开关操作, 对配电网进行重构的过程。因而, 恢复供电的主要目标是寻找正确有效的停电恢复策略, 其最终得到的解是一系列开关动作组合。

1.1 配电网故障恢复的特点

当配电网元件发生故障且故障元件已被隔离时, 配电网被划分为 3 个区域: 故障区域、正常供

电区域和非故障停电区域。由于故障区域已被隔离, 正常供电区域与电源相连, 因而恢复供电过程仅针对非故障停电区域。由于配电网呈辐射状结构, 使得故障恢复对象仅为配电网的局部区域, 且该区域与其它馈线没有连接。同时, 由于负荷点沿着馈线的沿线分布, 负荷点数目多且分布分散, 一旦出现故障, 失去的将是成片的负荷。

此外, 配电网开关数目多, 运行方式复杂, 发生故障后可供选择的供电恢复路径多而且不确定。为了满足电网在故障后仍能安全、可靠、经济地运行, 故障恢复不仅是搜索供电的路径, 恢复尽可能多的失电负荷, 更要在这些供电候选路径中选择最佳的恢复方案。在制定恢复方案时, 必须针对配电网的特点, 采用合理的方法进行处理。

1.2 配电网故障恢复的目标函数

随着人们对配电网的重视程度的加强和配电网结构的不断改善, 以及配电网自动化水平的不断提高, 对配电网的故障恢复的要求不仅是尽可能多地恢复对失电负荷的供电, 还应考虑电网故障恢复后电网运行的经济性和可靠性。因而配电网故障的优化恢复供电是一考虑约束情况下的多目标的组合优化问题。本文采用的目标函数如下:

(1) 尽可能使供电恢复后配电网网损最小

随着配电网的发展, 配电线路的改造, 使人们在故障恢复时提出了供电质量和经济运行的要求, 因此在配电网故障恢复的过程中必须考虑使重构后网损最小。

$$F_l = \min \sum l_k r_k \frac{P_k^2 + Q_k^2}{V_k^2} \quad (1)$$

其中: l_k 为开关 k 的状态变量; r_k 为支路 k 的电阻; P_k 和 Q_k 为支路 k 流过的有功功率和无功功率; V_k 为支路 k 末端的节点电压; n 为配电网中支路的条数。

(2) 尽可能减少恢复计划中开关操作次数

开关设备的总操作次数有限, 为延长开关的使用寿命, 操作次数越少越好; 另外配电网中很多开关要操作员手动完成, 在拥挤的都市和交通不便的乡村需要很长时间来完成一次操作。所以在故障恢复中都会要求尽可能少的开关操作次数。

$$F_k = \min \left(\sum_{i=1}^n (1 - y_i) + \sum_{j=1}^n z_j \right) \quad (2)$$

其中: y_i 和 z_j 分别表示分段开关和联络开关在重构后的状态, 闭合时为1, 断开时为0; m 和 n 分别

为配电网中分段开关和联络开关的数目。

2 基于免疫原理的蚁群算法

2.1 抗体浓度的定义

基于免疫原理的蚁群算法是通过引入抗体浓度来实现的^[11]。定义抗体浓度为: $q(t) = \lambda(t) / N$, 其中 $\lambda(t)$ 为 t 时刻的平均节点分支数, N 为节点数, 且 $\lambda(t) \in [2, N]$, 则 $q(t) \in [2/N, 1]$ 。

2.2 选择策略

对于点 i 的蚂蚁, 在选择下一个点 j 之前随机生成 q , q 为上的一致分布的随机数, 如果 $q \leq q(t)$, 则从所有可行的城市中找出 $\tau(i, u) \cdot \eta^\beta(i, u)$ 最大的城市, 为下一个要选择的的城市, 这是一种确定选择策略, 选择公式为:

$$j = \begin{cases} \arg \max_{u \in allowed_k} [\tau(i, u) \cdot \eta^\beta(i, u)], & \text{if } q \leq q(t) \\ S, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

其中: $allowed_k = \{1, 2, \dots, n\} - tabu_k$ 表示下一步允许选择的的城市, $tabu_k$ 记录了当前蚂蚁所走过的路径。 $\tau(i, u)$ 为城市 i 与城市 u 之间信息素量, $\eta(i, u)$ 为启发因子, 表示从城市 i 转移到城市 u 的期望程度, $\eta(i, u) = 1/d_{iu}$, d_{iu} 表示路径 i, u 之间的距离; β 表示启发因子的相对重要程度。

如果 $q > q(t)$, 则蚂蚁 k 随机选择下一个城市, 选择公式为:

$$p_k(i, j) = \begin{cases} \frac{[\tau(i, j)] [\eta(i, j)]^\beta}{\sum_{u \in allowed_k} [\tau(i, u)] [\eta(i, u)]^\beta}, & \text{if } j \in allowed_k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

2.3 信息素的局部更新

在一次搜索中, 当蚂蚁从城市 i 转移到城市 j 之后, 路径 i, j 上的信息素进行如下更新:

$$\tau_{ij} = (1 - \zeta) \tau_{ij} + \zeta \tau_0, \quad \zeta \in (0, 1) \quad (5)$$

其中: $\tau_0 = (nL)^{-1} L^*$ 为常数, L^* 为问题最优解的估计值, $\zeta \in (0, 1)$ 为可调参数。

2.4 信息素的全局更新

经过一定的时刻, 蚁群完成了一次循环, 这时, 对于当前最优方案路径上的信息素进行如下更新:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \tau_{ij}(t) + \rho \Delta \tau_{ij}^{gb}(t) \quad (6)$$

其中: ρ 表示信息素的蒸发系数, $\rho \in (0, 1)$; $\Delta \tau_{ij}$ 表示本次循环路径上信息的增量, $\Delta \tau_{ij} = 1/L^{sb}$, L^{sb} 表示本次循环中最优路径的长度。

2.5 实现步骤

- (1) 定义一组人工蚂蚁, 共 m 只, 在初始时刻, 所有 m 只蚂蚁都集中在起点处。
- (2) 初始化各条线路上的信息素浓度, 赋予每条边上相等的信息素浓度 $\tau_{ij}(0) = C$ (C 为常数)。
- (3) 计算每只蚂蚁转移到下一个节点的概率。
- (4) 每只蚂蚁完成一次转移之后, 对信息素进行局部更新; 每只蚂蚁完成一次搜索之后, 计算其目标函数。
- (5) 所有蚂蚁完成一次搜索之后, 对最优路径上的信息素进行全局更新。
- (6) 重复 2~5 步, 直到迭代满足条件。

基于免疫原理的蚁群优化算法流程图如图 1 所示。

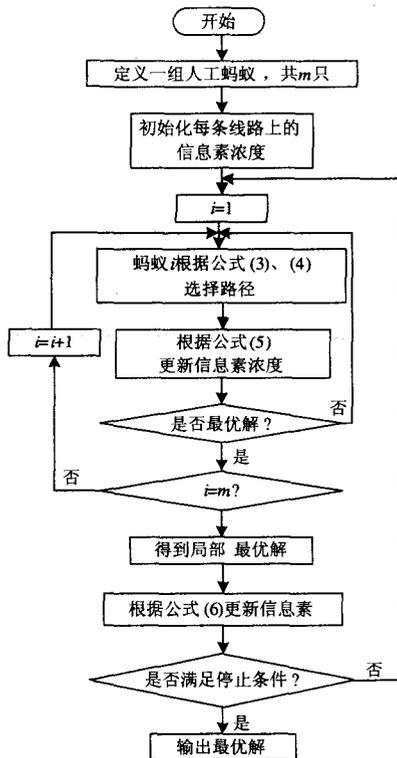


图 1 基于免疫原理的蚁群算法的流程图
Fig.1 Sketch map of ant colony algorithm based on immune principle

3 配电网故障恢复实例

为了验证本算法的有效性, 下面通过一个简单的配电网进行验证。以图 2 所示的配电网为例。此电网总共有 6 条馈线组成, 包含 6 个联络开关, 24 个分段开关, 28 个负荷点。

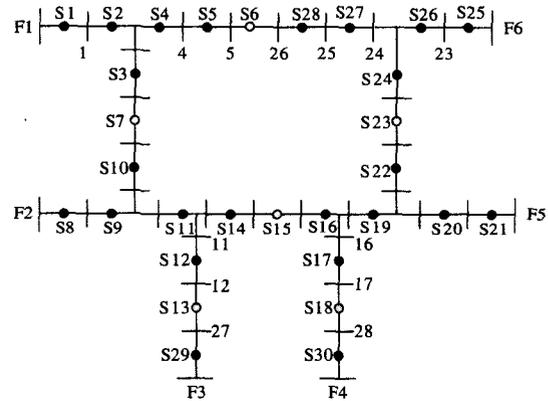


图 2 示例配电网接线图

Fig.2 The sampled distribution networks

(1) 简单故障情况

开关 S8 和 S9 之间的馈线段发生故障, 开断开关 S8 和 S9 隔离故障源, 开关 S9 下游的馈线为失电区域, 失电区域的总失电负荷为 2.48 MW。首先搜索该失电区域的可能的供电恢复路径, 总共有 F1、F3 和 F5 三条。它们的裕度 $F5 > F1 > F3$, 尝试用一条可能的供电恢复路径对失电区域无法实现对失电区域的完全供电, 尝试用两条可能的供电恢复路径对失电区域进行供电, 首先用 F1 和 F5 进行潮流校验, 满足要求, 选择其它两种相同开关操作数的方案, 最后得到三种供电恢复方案, 如表 1 所示。

表 1 故障恢复候选方案

Tab.1 Candidate scheme of fault restoration

方案	开关操作	附加网损/kW
1	开 S11 合 S7、S15	118.69
2	开 S11 合 S7、S13	120.02
3	开 S14 合 S13、S15	160.88

由于三个方案的开关操作数相同 选择其中附加网损最小的方案, 即方案 1 为最优的恢复方案。

(2) 开关拒动

表 2 考虑开关拒动的故障恢复候选方案

Tab.2 Candidate schemes considered on switch's failure of fault restoration

方案	开关操作	附加网损/kW
1	开 S10 合 S7、S15	121.11
2	开 S10 合 S7、S13	154.25
3	开 S14 合 S13、S15	160.88

考虑例一中的情况, 开关 S8 和 S9 之间的馈线段发生故障。故障恢复程序产生的恢复方案如表 2 所示。(1) 中采用方案 1 作为最优恢复方案, 如果开关 S11 发生拒动, 由于开关 S11 是第一个发生拒

动的分段开关, 程序对三个方案进行局部校正, 得出如表 2 所示的三个方案。选择方案 1 作为新的最优恢复方案。

4 结论

本文将基于免疫原理的蚁群算法应用于配电网的故障恢复中, 以附加网损最小和开关操作次数最少为目标函数, 建立了相应的求解算法, 并通过算例验证结果表明, 基于免疫原理的蚁群算法应用于组合优化问题, 可以以更大的概率和更快的速度得到全局最优解; 由于抗体的多样性使系统有较强的自我调节能力, 从而使算法的搜索空间尽可能大; 算法对目标函数没有特定要求, 因而适用范围较广。

参考文献

- [1] Toune S, Fudo H, Genji T, et al. Comparative Study of Modern Heuristic Algorithms to Service Restoration in Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(1):173-181.
- [2] Nahman J, Strbac G. A New Algorithm for Service Restoration in Large-scale Urban Distribution System[J]. Electric Power System Research, 1994, 29:181-192.
- [3] Ciric R M, Popovic D S. Multi-objective Distribution Network Restoration Using Heuristic Approach and Mix Integer Programming Method[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2000, 22:497-505.
- [4] 葛朝强, 唐国庆, 王磊. 综合职能式的故障恢复专家系统[J]. 电力系统自动化, 2000, 25:17-21.
GE Zhao-qiang, TANG Guo-qing, WANG Lei. Integrated Intelligent Service Restoration System for Distribution Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 25:17-21.
- [5] Hsiao Ying-Tung, Chien Ching-Yang. Enhancement of Restoration Service in Distribution Systems Using a Combination Fuzzy-GA Method[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(4):1394-1400.
- [6] Hsu Y Y, Huang H M. Distribution System Service Restoration Using the Artificial Neural Network Approach and Pattern Recognition Method[M]. IEE Proc Gener, Transm and Distrib, 1995, 142(3):251-256.
- [7] 张雅, 杨丽徙, 刘冬, 等. 基于蚁群算法的配电网故障后恢复重构[J]. 电气应用, 2007, 26(9):41-44.
ZHANG Ya, YANG Li-xi, LIU Dong, et al. Ant Colony Algorithm for Service Reconfiguration in Distribution Restoration Networks[J]. Electro Technical Application, 2007, 6(9): 41-44.
- [8] 郭恒, 罗可, 唐贤璞. 基于蚂蚁算法的配电网无功优化[J]. 电力电容器, 2005, (4):21-24.
GUO Heng, LUO Ke, TANG Xian-ying. Improved ant Colony Algorithm for Distribution Reactive Power Optimization[J]. Power Capacitors, 2005, (4) :21-24.
- [9] 赵强, 敬东, 李正. 蚁群算法在配电网规划中的应用[J]. 电力自动化设备, 2003, 23 (2): 52-54.
ZHAO Qiang, JING Dong, LI Zheng. Application of Ant Colony Algorithm for Distribution System Planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(2): 52-54.
- [10] Song Y h. Combined Beat and Power Economic Dispatch by Improved ant Colony Search Algorithm[J]. Journal of Electrical Engineering, 2004, 55:57-63.
- [11] 胡小兵, 胡小平, 黄席樾, 等. 基于免疫原理的蚁群系统及其应用[J]. 数学的实践与认识, 2006, 36(6):146-153.
HU Xiao-bing, HU Xiao-ping, HUANG Xi-yue, et al. Ant Colony System Based on Immune Principle with Application[J]. Mathematics Practice and Theory, 2006, 36(6): 146-153.

收稿日期: 2008-04-13

作者简介:

郁嘉嘉 (1983-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统保护、控制与自动化; E-mail: huan.jiajia@mail.scut.edu.cn

黄少先 (1954-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为自动化仪表及计算机检测控制等。

(上接第 15 页 continued from page 15)

参考文献

- [1] 吕润餘. 电力系统高次谐波[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [2] 林海雪. 电力系统的三相不平衡[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [3] 中国国家标准 GB/T 14549-93: 中华人民共和国国家标准——电能质量 公用电网谐波[M]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [4] 中国国家标准 GB/T 15543-1995: 中华人民共和国国家标准——电能质量 三相电压允许不平衡度[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.

收稿日期: 2007-11-26; 修回日期: 2008-02-27

作者简介:

张晓薇 (1981-), 硕士研究生, 主要从事电力电子技术、SVC 系统设计等研究; E-mail: xw-xiaow@yahoo.com.cn

李振国 (1946-), 男, 副教授, 主要从事电力电子技术及系统的智能控制等研究。