

基于改进蚁群算法的电网故障恢复决策系统研究

电网故障恢复过程中, 恢复路径的选择是一个典型的多目标、多约束的离散组合优化问题。蚁群优化算法是一种模拟生物世界中蚂蚁觅食行为的新型仿生类算法, 为求解复杂组合优化问题提供了一种新思路, 具有较强的发现最优解的能力, 但也存在容易出现停滞现象、局部最优以及收敛速度慢等缺点。针对其缺点提出一种改进蚁群算法, 在循环过程中只修改适应值最高的个体所走路径的信息素, 提高了收敛速度; 此外还在选择策略等方面进行了改进。最后通过算例分析验证了该算法的可行性、有效性和快速性。

李 晨/国家电网公司 陈宇星 殷自力 黄 睿/国网福建省电力有限公司
林 洁/国网福建信通公司

0 引言

电网故障恢复过程需要考虑大量的离散控制方法及制约因素, 因此它是一个多目标、多约束的离散组合优化问题。蚁群优化算法 (Ant Colony Optimization Algorithm, ACOA) 是一种新型仿生类算法。它具有搜索智能化、呈正反馈、分布式计算以及与其他算法结合更容易等特点, 已经被成功应用于许多组合优化中^[1-2]。由于电力系统存在大量复杂有约束的组合优化问题, 许多学者已经成功地将ACOA应用于电力系统无功优化^[3-4]、配电网网架优化^[5-6]、经济负荷分配^[7-8]和发电机组优化组合^[9-10]等领域。

上述许多问题均存在维数灾、局部最优、容易出现停滞现象、收敛速度慢以及不易处理约束条件等一系列缺点, 随着电力系统规模的持续增大, 用于待选的方案将会显著增多, 因此会出现组合爆炸等现象, 有的现象还属于典型的

非凸多峰问题, 一般除了全局最优解外, 也还存在一些局部最优解, 若运用传统的优化方法来解决这类问题, 将不能得到满意的结果, 特别在较大规模系统时更是如此。

本文采用一种新的改进蚁群算法 (Improved Ant Colony Algorithm, IACA), 即对基本蚁群算法进行了改进, 并将其应用于电网最优恢复路径的选择问题中。算例表明, 改进蚁群算法可以避免基本蚁群算法易陷于局部最优解、停滞现象以及收敛速度慢等缺点, 快速有效地搜索到最优恢复路径, 为电网恢复路径的确定提供了一种新思路 and 有效方法。

1 基本蚁群算法

蚁群优化算法是一种新型仿生类算法, 蚂蚁在寻找食物回到巢穴的过程中, 通过一种叫“信息素”的物质与其他蚂蚁进行信息传递。蚂蚁在搜寻食物源时, 会在走过的路径上释放信息素, 每个蚂蚁自己都能感知这种信息素并以此来指引自己的运动方向, 通常情况下蚂蚁选择路径时是选择信息素强度较大的方向。由于通过较短路径往返于食物和巢穴之间的蚂蚁能以更短的时间经过该路径上的点, 这些点上信息素的强度随着蚂蚁经过它的次数增加而更强, 这样就逐渐会有更多的蚂蚁选择这条路径。因此, 由大量蚂蚁组成的蚁群的集体行为便出现这样一种信息正反馈现象: 如果某条路径越短, 则蚂蚁选择该



李 晨/高级工程师

关键词/Keywords

改进蚁群算法 ·
故障恢复 ·
决策系统 ·

路径的机会越多。蚂蚁个体之间通过这样的信息交流方式达到搜索食物的目的。

为介绍方便,以求解平面上 n 个城市的旅行商问题(TSP)解释基本蚁群算法。 n 个城市的TSP问题即在不重复拜访 n 个城市后回到原来出发的城市时所经过路径之和的最小值问题。

本文令 m 为蚂蚁的数量, d_{ij} ($i, j=1, 2, \dots, n$)表示城市 i 和城市 j 之间的距离, τ_{ij} 表示位于路径 ij 上信息量,路径 ij 的期望程度为 $\eta_{ij}=1/d_{ij}$ 。初始条件,各条路径上的信息量相等,设 $\tau_{ij}=C$ (C 为非零常数),蚂蚁 k ($k=1, 2, \dots, m$)从城市 i 向城市 j 转移的概率 p_{ij}^k 计算如下

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij})^\alpha (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{s \in \text{allowed}_k} (\tau_{is})^\alpha (\eta_{is})^\beta} & j \in \text{allowed}_k \\ 0 & j \notin \text{allowed}_k \end{cases} \quad (1)$$

式中, α 、 β 分别为 τ 、 η 的权重因子;蚂蚁在运动过程中用禁忌表 tabu_k 来记录蚂蚁 k 已经走过的城市,而且随着进化过程不断动态调整; $\text{allowed}_k = \{N - \text{tabu}_k\}$ 为蚂蚁 k 下一步允许选择的城市,其中 N 为所有城市的集合。

随着时间推移,信息素不断蒸发减少,设 $1-\rho$ 为每次循环完成残留信息素的蒸发度。则蚂蚁每走完一步或完成一次循环后,都要对路径 ij 上的信息素进行调整,即

$$\tau_{ij}(t+n) = \rho \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij} \quad (2)$$

$$\Delta \tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k \quad (3)$$

式中, $\Delta \tau_{ij}$ 为本次循环留在路径 ij 上的总信息量,有三种计算方法,即

1)

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} Q/L_k & \text{蚂蚁}k\text{在本次循环经过}ij \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (4)$$

2)

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} Q/d_{ij} & \text{蚂蚁}k\text{在本次循环经过}ij \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (5)$$

3)

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} Q & \text{蚂蚁}k\text{在本次循环经过}ij \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (6)$$

式中, L_k 为蚂蚁 k 所经过路径的长度; Q 为常数。

这三种计算方法的不同之处在于,后两种利用的是局部信息,而前者利用的是整体信息。前者性能较好,通常采用它作为基本模型。

2 对蚁群算法的改进

由对基本蚁群算法的分析可知:蚁群算法从根本上来讲是启发式与正反馈原理相结合而成的一种进化算法。进化算法的关键问题就是要平衡“探索”和“开拓”的问题。一方面要使算法的搜索空间尽可能大,以便寻找到可能存在最优解的空间;另一方面又要充分利用群内当前的有效信息,将搜索的重点固定在可能具有较高适应值的区间内,从而缩小搜索空间,以使算法在可以接受的时间内迅速收敛得到全局最优解。

在基本蚁群算法构造解的过程中,采用随机选择策略,以扩大搜索空间,但进化速度较慢;利用正反馈原理旨在强化性能较好的解,但容易出现停滞现象。针对以上特点,本文从三个方面对蚁群算法进行了改进,提出了改进蚁群算法(IACA)。

1) 首先,额外加强最优解所包含的边的信息素,使这些边更容易被后来的蚂蚁选中。为此,对式(3)进行改进。基本蚂蚁算法中, $\Delta \tau_{ij}$ 为该次循环每一个经过路径 ij 的蚂蚁留在该路径的信息量的总和。由于蚂蚁在前进过程中走的路径不同,不论路线好坏,如果让每一个经过该路径的蚂蚁都留下信息素,则使得信息素的增加针对性不强。为了将搜索空间的侧重点放在具有较高适应值的个体所在区间内,应加快收敛速度,强化性能较好的解,本文取 $\Delta \tau_{ij}$ 为该次循环过程中适应值最高的个体在路径 ij 留下的信息素,而非所有个体在路径 ij 留下的信息素之和。

2) 其次,为防止过早收敛于次优解,在选择策略方面进行改进。参考自适应思想采用确定性选择和随机选择相结合的选择策略,并且在搜索过程中动态地调整确定性选择的概率。当进化到一定代数后,进化方向已经基本确定,这时对路径上的信息量作动态调整,缩小最好和最差路

径上信息量的差距，并且适当加大随机选择的概率，有利于较完全地搜索解空间，避免搜索过程中过早出现停滞现象。

3) 最后，将信息素的值限定在 $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ 区间，避免了信息素无限累加和信息素为零的情况。

3 IACA在电网故障恢复决策系统中的应用

将IACA应用于电网故障恢复决策系统中，并将每一条停电母线和可恢复源（即可提供恢复功率的电源点）作为城市让蚂蚁进行搜索，输电线路即是蚂蚁可选的路径，搜索的最终目标是在满足约束条件情况下以尽量小的操作代价恢复停电区内尽可能多的负荷。由于电网结构是固定的，蚂蚁的搜索路径仅限于在网络原有的边（即输电线路）上。

(1) 电网故障恢复模型的目标函数

1) 目标函数是使未得到恢复的停电负荷最小，即

$$f(x) = \min \left\{ \sum_{i \in R} y_i L_i \right\} \quad (7)$$

式中， L_i 为母线 i 所带的负荷； y_i 为 L_i 的决策变量，当 L_i 得到恢复时， $y_i = 0$ ，否则 $y_i = 1$ ； R 为停电母线的集合。

2) 目标函数使开关操作次数最小化，即

$$\min \sum_{k \in R} x_k \quad (8)$$

式中， x_k 为母线 k 的开关状态，当母线 k 的开关状态改变时， $x_k = 1$ ，否则， $x_k = 0$ 。

(2) 蚂蚁 k 从城市 i 转移到 j 的选择策略

1) 选择策略1。

$$j = \max \{p_{ij}^k\} \quad (9)$$

式中， $j \in \text{allowed}$ ； p_{ij}^k 为蚂蚁 k 从城市 i 转移到城市 j 的概率，计算公式参见式（1）。

2) 选择策略2。

在城市 i 的蚂蚁 k 转移到城市 j 的规则为

$$j = \begin{cases} \max_{s \in \text{allowed}_k} \{(\tau_{is})^\alpha (\eta_{is})^\beta\} & q \leq q_0 \\ \text{依概率 } p_{ij}^k \text{ 选择 } j & q > q_0 \end{cases} \quad (10)$$

式中， q 为 $(0,1)$ 中均匀分布的随机数变量；参数 $q_0 \in (0,1)$ ，不断调整 q_0 的值，可以进一步决定是得到搜索的最优解还是继续探索新的解空间。

(3) 信息素更新

$$\tau_{ij} = \rho \tau_{ij} + \Delta \tau_{ij} \quad (11)$$

式中， $\Delta \tau_{ij}$ 为当前优化策略下，适应值最高的个体在路径 ij 留下的信息素，计算公式为

$$\Delta \tau_{ij} = Q / ff(L) \quad (12)$$

式中， Q 为常数； $ff(L)$ 为路径 ij 恢复负荷的权重，它与路径 ij 能恢复的负荷大小 L 有关， $ff(L)$ 与 L 成反比。

4 基于IACA的电网故障恢复决策过程

基于IACA的电网故障恢复决策过程分为以下4个步骤进行：①读入故障恢复相关节点和支路数据；②信息素初始化；③蚁群搜索；④输出最终结果。

其中，第③步蚁群搜索过程是程序的核心部分，如图1所示，具体步骤如下：

1) 令搜索次数 $\text{Cyc} = 1$ 。

2) 判断是否满足停止搜索条件。当搜索达到一定次数或结果趋于一致时，满足停止搜索条件，退出该过程，并输出搜索结果；否则继续下

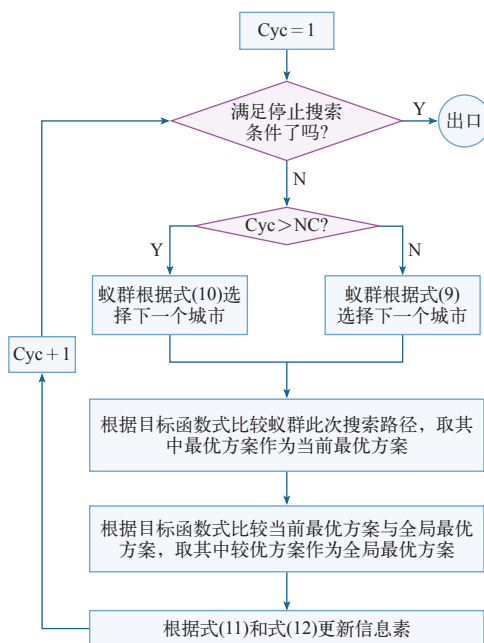


图1 蚁群搜索流程

一步。

3) 判断Cyc是否大于某特定值NC。是则跳到第4)步, 否则跳到第5)步。

4) 蚁群根据选择策略2选择转移城市, 跳到第6)步。

5) 蚁群根据选择策略1选择转移城市, 跳到第6)步。

6) 根据目标函数式(7)和式(8)比较蚁群此次搜索路径, 选择当前最优方案。

7) 根据目标函数式比较当前最优方案与全局最优方案, 取两者中较优方案为全局最优方案。

8) 根据式(11)和式(12)更新信息素。

9) 令 $Cyc = Cyc + 1$, 并返回第2)步。

5 算例分析

本文以某地区电网为例, 计算电网局部区域发生故障时通过蚁群算法得出的恢复路径。故障前网络结构如图2所示, 该系统环网设计, 开环运行。共有3个220 kV变电站, 10个110 kV变电站, 4个电厂。

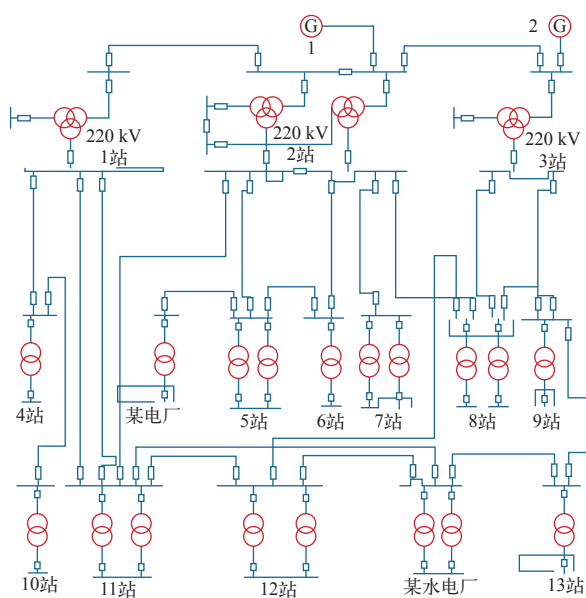


图2 某站故障前网络结构

假设某220 kV 3站发生故障, 图3为故障发生后网络结构。其中, 停电区各变电站所带负荷如下: 3站(中压侧)0.22, 8站0.41, 9站0.2, 13站0.11。与停电区相连的3条输电线路可提供的恢复

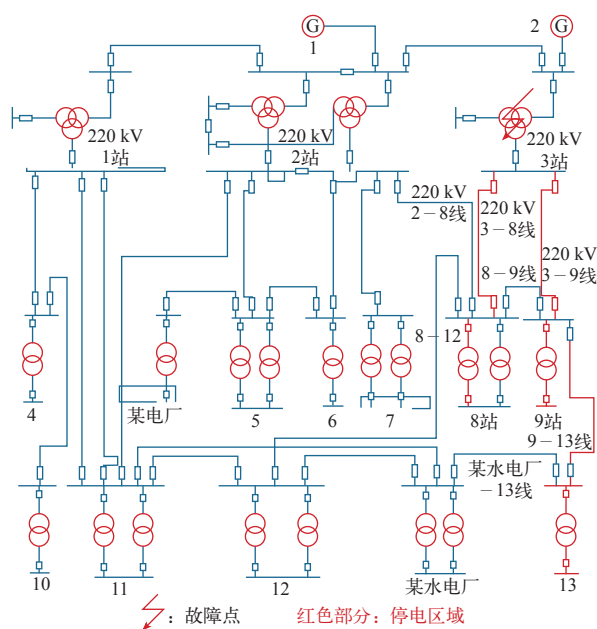


图3 某站故障后网络结构

功率: 220 kV 2-8线1.03, 8-12线0.21, 某水电站-13线0.21。

IACA中参数设置如下: τ 、 η 的权重因子 $\alpha = 1$ 、 $\beta = 0.5$; 残余信息素单位时间内蒸发度 $\rho = 0.1$; 常数 $Q = 0.1$ 。恢复所有负荷要求3次开关操作(开: 1次, 合: 2次)。图4为故障恢复后网络结构。

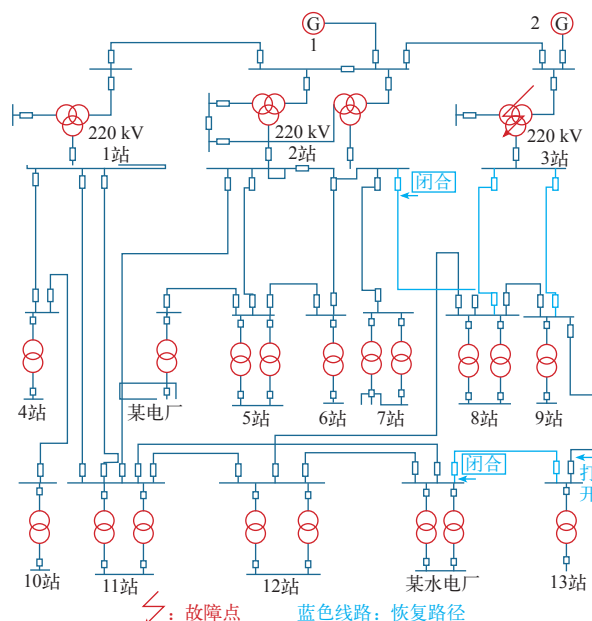


图4 某站故障恢复之后网络结构

6 结束语

本文针对蚁群算法的缺点进行了改进，并将改进的蚁群算法应用到电网故障恢复决策系统中，改进的蚁群算法可以有效地克服基本蚁群算法中容易出现的停滞现象和收敛速度慢的问题，使算法更好地选择最优解。通过实际算例分析，证明了该方法的有效性和快速性。

参考文献

- [1] Bauer A, Bullnheimer B, Hartl R F, et al. An ant colony optimization approach for the single machine total tardiness problem [C]. Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation, 1999: 1445-1450.
- [2] 吴华锋, 陈信强, 毛奇凤, 等. 基于自然选择策略的蚁群算法求解 TSP 问题 [J]. 通信学报, 2013 (4): 165-170.
- [3] 林昭华, 侯云鹤, 熊信良, 等. 广义蚁群算法用于电力系统无功优化 [J]. 华北电力大学学报,

2003 (2): 6-9.

- [4] 梁英, 关洪浩. 改进蚁群算法和生成树相结合的中压配电网架规划 [J]. 农业工程学报, 2013, 29 (增刊1): 143-148.
- [5] 叶治格. 基于多Agent理论的配电网动态恢复研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.
- [6] 柯亨通. 基于最大最小蚁群算法的配电网优化重构研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [7] 梁英, 关洪浩. 改进蚁群算法和生成树相结合的中压配电网架规划 [J]. 农业工程学报, 2013, 29 (增刊1): 143-148.
- [8] 周韧. 基于蚁群算法的配电网定位与恢复 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2011.
- [9] 祝洪博, 姜瀚书, 张富刚. 基于融合遗传原理的蚁群算法在配电网故障恢复中的应用 [J]. 东北电力大学学报, 2010, 30 (2).
- [10] 周坤. 改进的蚁群算法在城市配电网故障恢复中的应用研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2015.

(收稿日期: 2016-06-07) **EA**

(上接第61页)

- 器油纸绝缘局部放电识别中的应用 [J]. 高电压技术, 2012, 38 (3): 553-559.
- [2] 周正. 高压电气设备局部放电的危害及预防 [J]. 品牌与标准化, 2010 (14): 45-46.
- [3] 齐波, 李成榕, 骆立实, 等. GIS中局部放电与气体分解产物关系的试验 [J]. 高电压技术, 2010, 36 (4): 957-963.
- [4] 尚海昆. 电力变压器局部放电信号的特征提取与模式识别方法研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2014.
- [5] 王瑜, 苑津莎, 靳松. 基于灰度矩特征的局部放电模式识别 [J]. 电测仪表, 2013, 50 (10): 6-9.
- [6] 姚军, 蒋晓瑜, 黄应清. 目标识别中Hu矩、Zernike矩和小波矩的比较 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2006, 20 (3): 34-37.

- [7] 廖瑞金, 杨丽君, 孙才新, 等. 基于局部放电主成分因子向量的油纸绝缘老化状态统计分析 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (14): 114-119.
- [8] 周松林, 茆美琴, 苏建徽. 基于主成分分析与人工神经网络的风电功率预测 [J]. 电网技术, 2011, 35 (9): 128-132.
- [9] 孙晓丽. 基于小波矩特征的小波神经网络目标识别研究 [D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [10] 陈伟根, 凌云, 甘德刚, 等. 基于聚类-小波神经网络的油纸绝缘气隙放电发展阶段识别方法 [J]. 电网技术, 2012, 36 (7): 126-132.
- [11] 王骏, 王士同, 邓赵红. 聚类分析研究中的若干问题 [J]. 控制与决策, 2012, 27 (3): 321-328.
- [12] 简金宝, 王媛媛, 曾祥君, 等. 基于系统聚类分析的馈线接地保护 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (5): 111-115.

(收稿日期: 2015-10-21) **EA**