

基于蚁群优化算法的配电网重构

配电网重构是一个非线性、离散的组合优化问题。提出一种基于超立方体 (Hyper-Cube, HC) 框架的蚁群优化算法, 并以网络损耗最小为目标对配电网进行重构。HC 框架通过信息更新规则的变化限制了信息值的改变, 避免了求解过程中搜索容易陷入局部最优的缺点, 提高了算法的鲁棒性。最后对69节点的配电网进行算例分析, 验证了算法的有效性。配电网重构提高了配电网的经济性、可靠性和电能质量。

殷自力/国网福建省电力有限公司 李慧聪/国网山东省电力公司调度控制中心 李吉昌/积成电子股份有限公司



殷自力/高级工程师

配电网中, 每条馈线均有不同类型的负荷, 如商业类、民用类和工业类。由于不同类型负荷的日负荷曲线不同, 因此每条馈线的负荷峰值出现时间也不同。若配电网过负荷, 首先会触发保护装置, 这可能导致连接分支断开, 并可能造成电压崩溃, 从而导致电力系统的经济损失。据估计, 线路损耗约为总发电量的5%~13%^[1-2]。因此每一种可以降低配电网损耗的方法都值得研究。

配电网重构可以改变配电网中馈线开关的状态^[3], 能在约束条件下最大化地降低线损。由于开关有许多候选切换组合, 每个开关的状态是离散的, 所以网络重构可视为一个离散、非线性以及约束组合优化的问题^[4-6]。

减少功率损耗的重构方法有三类: 传统数学算法、启发式算法和人工智能算法^[7]。传统数学算法随着维数的增加, 将面临“组合爆炸”的问题。启发式算法主要有最优流模式法和开关支路法, 每次优化都只搜索整个解空间的一部分子空间, 不能确保全局最优^[8-10]。人工智

能算法包含遗传算法、模拟退火算法和蚁群优化算法等。遗传算法通常具有早熟收敛和收敛性能差等缺点; 模拟退火算法全局搜索能力差, 容易受参数的影响; 蚁群算法不依赖于所求问题的数学表达式描述, 具有较强的鲁棒性^[11-12]。

考虑配电网的可靠性和经济性, 本文提出结合HC框架的蚁群优化算法 (HC-ACO), 通过HC框架应用状态转移规则来修改启发式规则^[13]。本文分析了配电网重构前和重构后的网络结构, 解决了配电网线损过大的问题, 运用蚁群优化算法寻找到网络线损最小时的最优路径^[14-15]。

配电网重构的数学模型

配电网重构可以看作是非线性优化问题, 重构后能改善系统的经济性和安全性, 并提高电能质量。本文以系统有功网损最小为目标进行重构, 其目标函数表示为

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

式中, L 为总支路数; k_i 为支路 i 的开关状态, “0”为开关断开状态, “1”为开关闭合状态; R_i 为第 i 条支路的电阻; P_i 、 Q_i 分别为第 i 条支路的有功和无功功率; U_i 为第 i 条支路末端的电压。

另外, 还需满足一组约束条件

$$S_i \leq S_{i\max} \quad i=1, \dots, L \quad (2)$$

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad (3)$$

$$I_i \leq I_{i\max} \quad (4)$$

式中, U_i 、 $U_{i\max}$ 和 $U_{i\min}$ 分别为节点电压和节点电压的最大值、最小值; I_i 和 $I_{i\max}$ 分

关键词/Keywords

蚁群优化 ·
降低损耗 ·
配电网重构 ·

别为支路*i*的电流值和电流最大值；*L*为总支路数。

重构后网络需为辐射状，即无“回路”和“孤岛”。

蚁群优化

蚁群优化算法主要受启发于蚁群搜索食物的过程。蚂蚁个体之间虽然不能通过语言交流，但它们可以通过一种叫信息素的物质进行信息传递。蚂蚁发现食物后，在往返于巢穴和食物源的过程中会释放信息素。信息素会引导其他蚂蚁寻找食物，如果其他蚂蚁找到了这样的路径，他们不再随机地行走，而是沿着此路径向前移动，如此反复，直至找到食物源。然而，随着时间的推移，信息素开始蒸发，对其他蚂蚁的吸引力减小。蚂蚁沿着路径返回消耗的时间越多，信息素蒸发得越多。通过比较，路径越短，重复的速度越快，信息素覆盖速度比信息素蒸发快，因而路面上的信息素浓度仍然很高，蚂蚁沿着高浓度信息素前进的概率大。因此，蚂蚁通过信息素间接沟通，最终找到最优路径。

蚁群优化算法则是通过模拟蚂蚁觅食行为寻找解决离散化优化问题的方法。本文将蚂蚁所走过的各个位置看作配电网中的各个节点，从一个位置到下一个位置的路径看作一条支路。

蚁群优化算法主要运用三个规则，具体如下。

(1) 状态转移规则

首先，*N*只蚂蚁放置在起始状态。从起始状态到结束状态，蚂蚁通过重复应用状态转移规则建立一个完整的路径，这也被称为随机比例规则，即

$$P_N(i, j) = \frac{[\tau(i, j)]^\alpha [\eta(i, j)]^\beta}{\sum_{m \in J_{N(i)}} [\tau(i, m)]^\alpha [\eta(i, m)]^\beta} \quad (5)$$

$$\forall_j \in J_{N(i)}$$

式中， $P_N(i, j)$ 为蚂蚁*N*从节点*i*到节点*j*的概率； $\tau(i, j)$ 为边*(i, j)*上的信息密度； $\eta(i, j)$ 为边*(i, j)*的能见度，也称启发因子，表示节点*i*到节点*j*的启发程度； $J_{N(i)}$ 为蚂蚁*N*下一步允许的路径； α 为信息启发式因子； β 为能见度因子。

状态转移规则有利于蚂蚁转移到信息素值较

大、路径较短的相邻节点。

(2) 局部更新规则

在构造解决方案时，改变每只蚂蚁访问过的路径上的信息素值，目的是扰乱搜索过程。通过减少路径的吸引力探索其他解决方案，避免陷入局部最优，即

$$\tau(i, j) = (1 - \rho)\tau(i, j) + \rho\tau_0 \quad (6)$$

式中， $\tau(i, j)$ 为节点*i*到节点*j*的信息素值； τ_0 为初始信息素值； ρ 为信息素挥发系数。

(3) 全局更新规则

当*N*只蚂蚁的访问完成后，运用全局更新规则更新信息素值，信息素值最大的路径即为最优路径，即

$$\tau(i, j)' = (1 - \rho)\tau(i, j) + \rho\sigma \quad (7)$$

式中， $\tau(i, j)'$ 为边*(i, j)*更新后的信息值； σ 为启发式定义的参数，取值范围为[0 1]。

此规则的目的是使搜索更直接，提高寻找最优组合的能力。

蚁群优化算法在配电网中的应用

HC框架是针对蚁群优化算法标准最近发展起来的新框架。它是通过改变蚁群优化算法中信息素的更新规则，使信息素的变化范围在[0 1]内。配电系统表示为一个无向图 $G(B, L)$ ，*B*表示节点集合，*L*表示母线和其连接分支（开关）的集合。人工蚂蚁选择分段开关移动到相邻节点，以减少系统的有功网损。

基于HC框架的蚁群优化算法流程如图1所示，具体步骤如下。

第1步：初始化，定义编码参数。

第2步：更新信息素值。

设第*h*次迭代中的配置与上一次迭代的配置相同，即 $C_{\text{best}}^{h-1} = C_{\text{ref}}^h$ 。

*N*只蚂蚁在初始位置随机选择打开开关，然后并行发送。蚂蚁*N*在第*h*次迭代中应用状态转移规则，得到一个新的组合结果，即 C_N^h 。

当所有的蚂蚁完成路径时，每只蚂蚁按对应的组合进行以下三个步骤：

1) 检查配电网的网络结构。如果是辐射状，

则转到下一步；否则放弃该项组合。

2) 计算潮流, 检查电压和负荷约束。如果违反约束, 放弃该项组合；否则转到下一步, 如图1所示。

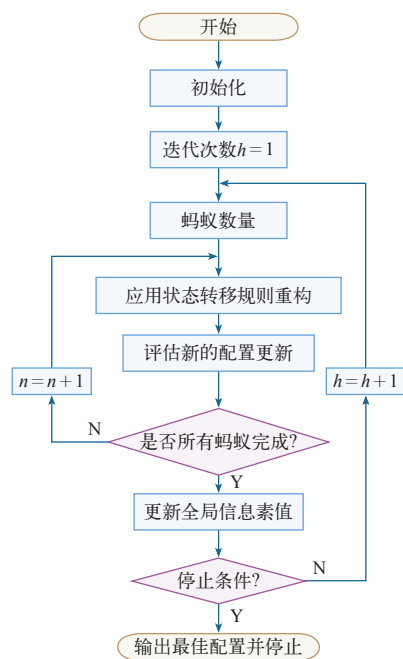


图1 适用于配电网重构的HC-ACO流程

3) 计算目标函数 $f(C_N^h)$ 。

C_{best}^h 是第 h 次迭代中的最优组合, 这个组合对应的函数即为最小目标函数(最小有功损耗)。

在第 h 次迭代中的最优组合 C_{best}^h 与当前最优组合 C_{best} 进行比较, 如果满足 $f(C_{best}^h) < f(C_{best})$, 则替换当前最优组合, 即新的最优组合 $C_{ref}^h = C_{best}^h$, 并更新信息素值。

对于所有属于最优组合的开关, 利用式(8)更新信息素值; 否则, 利用式(9)更新信息素值, 即

$$\tau^{(h)} = (1 - \rho)\tau^{(h-1)} + \rho\sigma \quad (8)$$

$$\tau^{(h)} = (1 - \rho)\tau^{(h-1)} \quad (9)$$

式中, $\tau^{(h)}$ 为 h 次迭代后新的信息素值; $\tau^{(h-1)}$ 为第 $h-1$ 次迭代后的信息素值; ρ 为信息素蒸发系数, 范围为[0 1]; σ 为一个启发式定义参数, 该参数表示为

$$\sigma = \frac{f(C_{best})}{f(C_{best}^h)} \quad (10)$$

由于 $f(C_{best}^h) > f(C_{best})$, 因此属于最优组合开关

的信息素值在[0 1]范围内, 这样的信息素更新规则与HC框架的要求完全一致。

第3步: 检查是否达到最大迭代次数($h = H_{max}$)。若是, 则终止算法; 否则返回第2步。

算例分析

本文采用的是额定电压为12.66 kV的系统, 系统总负荷为1 107.9 + j897.9 kV·A。重构前支路10~66、12~20、14~69、38~48和26~54打开。其网络结构如图2所示, 图2中实线为运行支路, 虚线为联络支路。为计算方便, 假设三相平衡和负荷恒定, 本文采用Matlab求解算法。

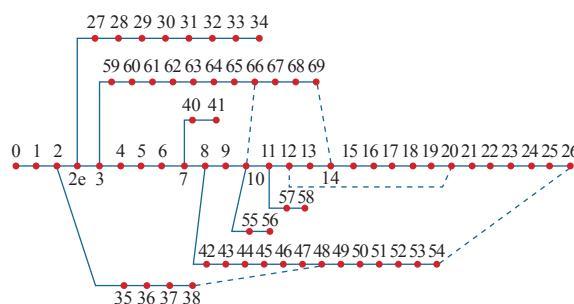


图2 69节点系统

求解过程中, 参数设置如下: 信息素初始值固定 $\tau_0 = 1$, 信息素的挥发系数 $\rho = 0.01$, 启发信息因子 $\alpha = 0.01$, 能见度因子 $\beta = 0.9$, 每次迭代中人工蚂蚁的数量 $N = 10$, 最大迭代次数 $H_{max} = 100$ 。程序运行后, 得到的重构结果如下表所示。

表 69节点系统重构结果

算法比较	网损/kW	联络开关	最低电压(pu)
重构前	20.8	10~66、12~20、14~69、 38~48、26~54	0.972
HC-ACO	9.512	10~66、12~20、13~14、 47~48、50~51	0.982 4
SA	9.4	10~66、12~20、13~14、 47~48、50~51	0.982 4
MPS	9.4	10~66、12~20、13~14、 47~48、50~51	0.982 4
MTS	9.4	10~66、12~20、13~14、 47~48、50~51	0.982 4

由上表可知, 重构后降低了系统的网损, 即由20.8 kW下降到9.512 kW; 同时也提高了最低电

压,即最低电压由0.972 (pu)上升到0.982 4 (pu)。图3显示了重构前和重构后各个节点的电压值,从图3中可以看出,原始网络各个节点电压的浮动量大,重构后的节点电压稳定性有所改善,电能质量有所提高。

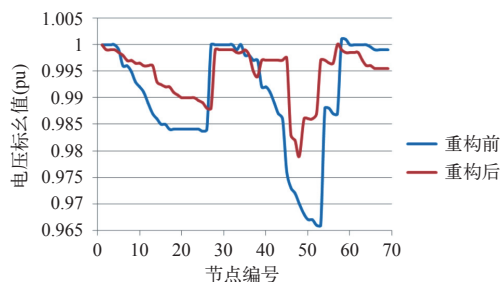


图3 69节点系统节点电压对比曲线

结束语

配电网重构是配电网降低网损、平衡负荷的主要措施。本文提出了以最小网损为目标函数,基于HC框架的蚁群优化算法的配电网重构方法。HC框架通过改变信息素更新规则,提高了蚁群算法的鲁棒性,避免陷入局部最优。通过对信息素更新环节的改进,可以在设定的迭代次数内得到更优的网络结构。ACO运用三个主要规则,使搜索更直接,搜索速度更快,提高了寻找最优方案的能力。通过对算例的分析证明了HC-ACO的可靠性和有效性。因此,本文提出的基于HC框架的蚁群优化算法具有较强的实际意义,可以应用到实际电网的规划中,提高系统的经济性和可靠性。

参考文献

- [1] 张俊潇. 含分布式电源的20 kV新型配电网规划[J]. 陕西电力, 2010, 38(5): 57-60.
- [2] 龙俸来. 浅谈配电网的降损措施[J]. 华中电力, 1999, 12(6): 46-47.
- [3] 孙鹏, 王永强, 刘鹏. 基于分布式电源和混合智能算法的配电网重构[J]. 黑龙江电力, 2013, 35(3): 215-219.
- [4] 蒋化民, 刘宝文, 孙孟波. 方正县配电网无功补

偿方案优化的探讨[J]. 黑龙江电力, 2009, 31(5): 362-364.

- [5] 王倩, 杨京燕, 孟璐. 基于改进的蚁群算法和最小生成树的配电网重构[C]. 中国智能电网学术研讨会论文集, 2011.
- [6] 赵楠, 蒋程, 詹厚剑. 基于混沌蚁群算法的配电网重构[J]. 电气开关, 2009(3): 12.
- [7] 胡从立, 陈金平, 徐敏. 基于改进蚁群算法的含分布式电源的配电网重构[J]. 南昌大学学报: 工科版, 2013(1): 16.
- [8] 使用基于中医思想的蚁群算法求解配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 13-18.
- [9] 黄健, 张尧, 李绮雯. 蚁群算法在配电网重构的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(4): 59-64.
- [10] 丛鹏伟, 唐巍, 张璐, 等. 基于机会约束规划考虑DG与负荷多状态的配电网重构[J]. 电网技术, 2013, 39(9): 2573-2579.
- [11] 李焱, 时芝勇, 海晓涛. 基于改进蚁群算法的配电网重构[J]. 陕西电力, 2010, 38(9): 22-25.
- [12] Swarnkar A, Gupta N, Niazi K R. Efficient reconfiguration of distribution systems using ant colony optimization adapted by graph theory[C]. Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE, 2011: 1-8.
- [13] Guan D, Fan A. Power distribution network reconfiguration based on fuzzy control theory and ant colony algorithm[C]. 2011 International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), 2011(3): 1230-1232.
- [14] 梁会军, 李志斌. 基于GIS的配电网实时数据监控系统的开发[J]. 华中电力, 2004, 17(3): 13-15.
- [15] 姚遥, 刘东, 廖怀庆, 等. 含储能电池的配电网降损分析[J]. 华东电力, 2010(5): 677-680.

(收稿日期: 2015-02-10) **EA**