蚁群算法在配电网故障定位中的应用及其优化

准确快速地定位故障是配电网故障隔离、供电恢复的基本前提，有重要现实意义。传统的矩阵算法，速度较快，但因不具备容错性而易误判，蚁群算法有较好的容错性，但其耗时长、易陷入局部最优等方面有待改进。深入研究了蚁群算法如何应用于配电网故障定位之中，以IEEE－33节点为算例进行仿真，结果表明无论有无故障信息的畸变，蚁群算法均可以准确判断故障位置。并针对蚁群算法的不足，进行了优化，首先提出蚂蚁鱼群混合算法，防止陷入局部最优；而后提出系统分区思想，提升算法的搜索速度和效率。

秦立军　杨万涛/华北电力大学电气与电子工程学院

秦立军/教授

关键词/Keywords
蚁群算法·
故障定位·
系统分区·
蚂蚁鱼群混合算法·

配电网故障定位中用到的矩阵算法，由于其容错性差，当上传信息畸变时经常误判，可能扩大事故。蚁群算法属于寻优方法，容错能力较好，组合优化是其最成功的领域[1]。而配电网故障定位的实质也属于组合优化问题，目标是找到与故障信息最吻合的配电网各个设备状态组合。所以，从理论上来讲，蚁群算法完全可以定位配电网故障。

应用蚁群算法定位配电网故障

1. 开关函数

FTU可检测到配电网故障，并将故障信息上传至主站。主站中的定位程序已将各种故障情况下FTU的状态值预存，比较预存状态值和上传的检测值，如一致，就判定该位置有故障。

本文确定测控点的状态值用到开关函数，如图1所示。

S为电源，1～5为测控点，S_1～S_5表示测控点的状态值，b～f为区段，C_b～C_f是区段的状态值。状态值取1表示判定区段或测控点发生故障。

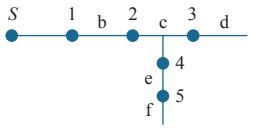

图1　简单配电网

各测控点状态值有如下关系：$S_1 = S_2 \vee C_b$，$S_2 = S_3 \vee S_4 \vee C_c$，$S_3 = C_d$，$S_4 = S_5 \vee C_e$，$S_5 = C_f$（∨表示“或”逻辑运算）。可总结出规律：末节点的状态值$S_i = C_i$，非末节点状态值为

$$S_i = C_i \vee S_1 \vee \cdots \vee S_j \vee \cdots \vee S_T, j \in T \quad (1)$$

式中，S_i为节点i的状态值；C_i为节点i后面区段状态值；T为i的子节点集合。

需要说明的是，如2个位置同时被判定为故障（如b、d），仅将最接近电源点的故障区段（b）前的状态值设为1（S_1）。状态值确定流程如图2所示[2]。

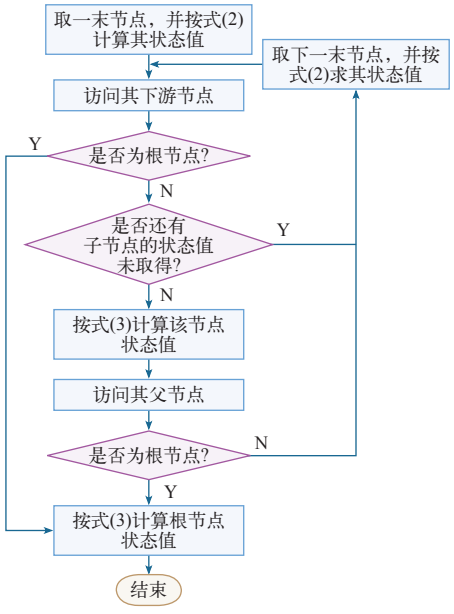

图2　状态值确定流程

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2. 评价函数

评价函数可表示实际情况和假设故障情况的偏差。其值为

$$F=\sum_{j=1}^{N}\left|S_j-S_j^*\right| \tag{2}$$

式中，N为测控点数量；S_j为实际测控点状态值；S_j^*为期望状态值。

但运用式（2）评价有出现误判的可能。如果e故障，期望的状态值$[S_1^*,S_2^*,S_3^*,S_4^*,S_5^*]=[1,1,0,1,0]$；但若判断e、c同时故障，则$[S_1^*,S_2^*,S_3^*,S_4^*,S_5^*]=[1,1,0,1,0]$，两种故障状态值完全一样，会导致误判[2]。

因而参考文献[4]建立如下评价函数

$$F=\sum_{j=1}^{N}\left|S_j-S_j^*\right|+w\sum_{j=1}^{M}\left|C_k'\right| \tag{3}$$

式中，M为区段数；C_k'为区段k的状态值；w为权重，取值0～1。

评价函数式（3）可以避免误判。c故障时，F由于有$w\sum_{j=1}^{M}\left|C_k'\right|$这一项的存在而非最小，因而不会出现误判。

3. 问题转化

将每个设备转化成有“0”或“1”中某个状态节点。蚂蚁由信息素量选择节点状态。对节点的状态组合，计算出评价函数值F。然后根据其大小，于选择的节点状态上释放一定量的信息素。F越小，越表明此状态组合可以较好解释故障信息，故蚂蚁会更多释放信息素。之后，类似地找到下个可能的解，直至找出最优解。

4. 参数设置

由“随机比例规则”，蚁群算法中蚂蚁由各路径上的信息素量驱使，选取下一步转移的方向。t时刻，蚂蚁k（$k=1,2,\cdots,m$）的转移概率$P_{ij}^k(t)$为[10]

$$P_{ij}(t)=\begin{cases}\dfrac{\tau_{ij}^{\alpha}(t)\eta_{ij}^{\beta}}{\sum\limits_{j\in\text{allowed}\,k}\tau_{ij}^{\alpha}(t)\eta_{ij}^{\beta}} & j\in\text{allowed}\,k\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{4}$$

式中，allowed k为针对蚂蚁k除去其禁忌表tabu$_k$后的节点全集；α为蚂蚁积累的信息的作用；β为蚂蚁对启发信息的看重程度；η_{ij}为启发系数，在蚁群运行中保持不变，$\eta_{ij}=1/d_{ij}$；d_{ij}为两节点i和j的间距；τ_{ij}为边(i,j)的信息素浓度，也表示蚂蚁在节点i向节点j移动的期望值。

任一蚂蚁完成一个循环或走完一步，都应更新残留信息，其计算公式为

$$\tau_{ij}(t+n)=(1-\rho)\tau_{ij}(t)+\Delta\tau_{ij}(t) \tag{5}$$

$$\Delta\tau_{ij}(t)=\sum_{k=1}^{m}\Delta\tau_{ij}^{k}(t) \tag{6}$$

式中，$1-\rho$为信息素轨迹的衰减系数；$\Delta\tau_{ij}(t)$为路径(i,j)信息素量的增量；$\Delta\tau_{ij}^{k}(t)$为蚂蚁k在路径(i,j)留下的与其表现好坏程度有关的信息素含量。路径长度和信息素量成反比。由Ant－Cycle模型[11]有

$$\Delta\tau_{ij}^{k}(t)=\begin{cases}\dfrac{Q}{L_k} & \text{如果蚂蚁}k\text{在本次循环中经过路径}(i,j)\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{7}$$

式中，L_k为本次循环蚂蚁k途径路径的总长；Q为常数，表征信息素强度。

配电网故障定位中，两节点（设备）间距与算法求解不相关，故可令$\eta_{ij}=1$、$\beta=1$，转移概率P_{ij}只和节点状态信息素量有关。为简化，取$\alpha=1$，Q为常数，ρ为0.95～1，w取0.1～0.5。

5. 可能解的产生

配电网的故障多为单点故障，且3个以上元件同时故障的概率极低[3]，因而，本文只分析3个以下位置同时节点，但所采用的方法广泛适用。

故障后，虽然不知道故障点是单个点还是多个点，但根据1个点故障概率＞2个点故障概率＞多点故障概率。因而，先假设故障为1个点，全局寻优得到最小F值及故障点。此时的F值很容易求出，不必用蚁群算法，依次求解各点故障下评价函数值。接下来，假设为2点故障和3点故障，分别用蚁群算法求最小F值及故障点。最后比较这3个评价函数值，最小F值的对应假设正确。

假设为2点故障时，采用“轮盘法”，由信息素的强度，概率地选择两个设备状态为“1”，其余设备状态均为“0”。3点故障时，同理。轮盘

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

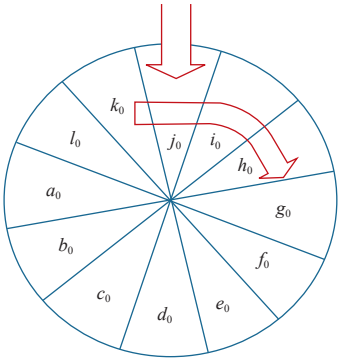

图3 轮盘法

法如图3所示。

6. 信息素的释放

求得可能解的F值，之后释放与F成反比的信息素量于对应设备的状态上。公式为

$$\Delta\tau = \frac{Q}{F} \tag{7}$$

当某设备状态“1”的信息素浓度远远超出其余设备（如10倍），确定其为故障点，否则不停止迭代。

7. 仿真验证

IEEE－33节点配电网如图4所示。假设图4的IEEE－33节点模型中节点19处及节点30处发生故障。

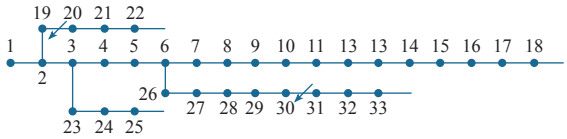

图4 IEEE－33节点配电网

（1）无故障信息畸变

此时故障信息应为：1111111000000000000100000011111000。利用蚁群算法得到的各设备状态：00000000000000000010000000000001000，同时各设备（馈线）上的信息素量中19、30节点高达688.3和895.3，远远高于其他各点，即可判断节点19和节点30之后发生故障。

（2）有故障信息畸变

假设畸变后的故障信息为：1111110000100000001000000001111000（节点11、26处发生畸变）。则可得到输出：00000000000000000100000000001000，且各设备（馈线）上的信息素结果表明19、30节点含量高达304和527，远远高于其他各点，可判断为节点19和节点30之后发生故障，结论正确。

综上，无论有无故障信息的畸变，都可准确地判断故障位置，结果理想。

蚁群算法在故障定位中的优化

综上，无论有无故障信息的畸变，都可准确地判断故障位置，结果理想。

1. 蚂蚁鱼群混合算法

蚁群算法局部寻优能力很强，但容易陷入局部最优解[6]，而鱼群算法可克服局部极值，取得全局极值，能跳出局部最优解。将两种算法的优点加以结合，可以取长补短，基于此提出人工鱼群蚁群混合算法。进而考虑两种群规模的动态变化，将鱼群的聚群行为规则和蚁群信息素作为鱼饵结合起来，更好地模拟生物进化的规律，扩大算法的搜索域[7]。

（1）人工鱼群算法

根据基本小波函数的性质，可总结出以下的一般性选择原则：由鱼的生物特性，用人工鱼来模拟鱼的觅食、聚群和追尾等行为，达到寻优目的[3]。

1）觅食。鱼随机游向食物增多的地点。

2）聚群。鱼会成群聚集以保证自身安全，遵循以下规律：①分隔。不过于拥挤临近伙伴。②内聚。努力朝着伙伴中心的方向移动。③对准。总体上与伙伴们的平均方向尽量保持相同。

3）追尾。鱼发现食物后，它的伙伴将随它很快找到食物位置。

（2）蚂蚁鱼群混合算法

蚁群算法有很强的局部寻优能力，但易陷入局部最优[6]，针对其不足，借鉴鱼群算法思想，使一只蚂蚁和一条人工鱼组成伙伴对，每对伙伴具有权利向记号牌写入状态[7]。

1）二进制。人工鱼的位置状态由开关的安放位置决定，利用编码0表示不安置，1表示安置。如10100表示仅节点1、3安放开关。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2）随机移动。可类比为随机变动某几位编码序列。如当前状态为01010，而产生随机变动的个数是1，则表示目前需变动1位，再产生1个随机数为2，则表示要变动是第2位，状态变为00010。

3）蚂蚁鱼伙伴数。蚂蚁鱼对的状态位置数相差不超过2位的所有蚂蚁鱼对个数即为邻域内的伙伴个数。

4）伙伴的中心位置。将邻域内全部伙伴们的状态位相加，若结果与伙伴数之比大于0.5，则置对伙伴的中心位置状态位1，否则为0。

5）最优状态邻居。比较所有伙伴的目标函数值，其中最小结果对应最优状态邻居。

2. 分级处理思想的应用

如果将整个配电网看成由主干与分支构成，可以将配电网的树状分支看成一独立区域，这样，配电网就转化为由主干和一些独立区域构成。如图5所示，一复杂系统转化为由4节点和4个独立区域组成的简单系统。简化模型如图6所示。

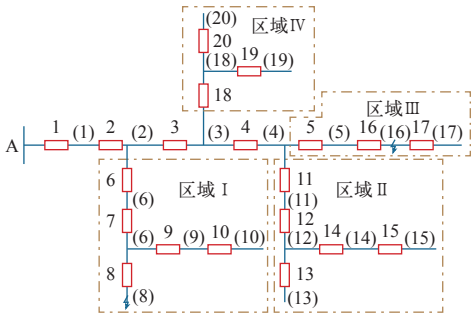

图5 单电源运行方式

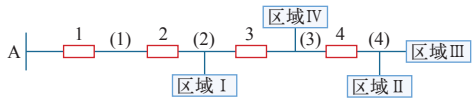

图6 单电源运行方式的简化模型

计及效率，若某独立区域内部节点数较多，可以再进一步划分为若干次级小区域，F用式（9）按级别由低到高求解[8]

$$F=\sum_{j=1}^{N}\left|S_j-S_j^*\right|+w\sum_{j=1}^{M}\left|C_k'\right|+\sum_{h=1}^{M}K(h)F_{\text{itness}}(h)+\sum_{h=1}^{M}\overline{K(h)}N_{\text{um}}(h) \quad (9)$$

式中，前2项与式（3）有相同意义；M为假定区域中有多少个被诊断为有故障；N为未参与分区的主干上的节点数；$K(i)=1$代表区域i被选为故障，$\overline{K(h)}$为$K(h)$的取反；$F_{\text{itness}}(h)$为独立区域的最佳目标函数值；$N_{\text{um}}(h)$为区域内上传的信号里有多少个元素非零。

理论上讲，图5的20节点的系统，其可行解个数为220个，分级处理后可行解个数有$2^5+2^5+2^3+2^3+2^6$个，前者约是后者的7 282倍，因此，经过分级处理后计算量呈几何级数减小，计算速度大幅度提高。

结束语

本文重点研究了蚁群算法在配电网故障中的应用，仿真证明其是切实可行的，针对其计算耗时长，容易陷入局部最优的不足，又提出了一些可行的改进思路：蚂蚁鱼群混合算法及分级处理思想，有利于避免陷入局部最优并提高搜索速度和效率。

参考文献

[1] 李士勇，陈永强，李研．蚁群算法及其应用 [M]．哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2004：2-21，38-39．

[2] 张颖，周韧，钟凯．改进蚁群算法在复杂配电网故障区段定位中的应用 [J]．电网技术，2011，35 (1)：225-226．

[3] 陈章潮．电网规划中的模糊潮流计算 [J]．电力系统自动化，2005，22 (3)：20-30．

[4] 卫志农，何桦，郑玉平．配电网故障区间的高级遗传算法 [J]．中国电机工程学报，2002，22 (4)：127-130．

[5] 鸾兆文，李欣唐．两种配电系统潮流算法的比较 [J]．山东工业大学学报，2006，28 (6)：532-536．

[6] 段大伟，周晓宇．基于混合算法的配电网故障定位 [J]．黑龙江科学，2011，2 (4)：30-31．

[7] 陈欲技，丁同奎，张剑．蚁群算法在配电网故障定位中的应用 [J]．电力系统自动化，2006，30 (5)：75-76．

（收稿日期：2015－03－20）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net