基于遗传算法的配电网故障恢复研究

配电网故障恢复是通过开关的分合状态来改变网络的拓扑结构，达到降低网络损耗、隔离故障和转移负荷等目的。首先建立了以节点电压、线路容量及网络潮流平衡等为约束条件，以网损最小为目标函数的配电网故障恢复数学模型；然后利用遗传算法对上述模型进行求解，以求得最佳网络结构和恢复的供电负荷；最后利用Matlab软件编写相应程序，并对IEEE 33节点测试系统实例进行了仿真与分析，得到了配电网故障恢复的最优方案，验证了算法的有效性。

项胤兴/国网福建省电力有限公司电力科学研究院　吴文宣　林　韩/国网福建省电力有限公司　蔡金锭/福州大学电气工程与自动化学院

项胤兴/工程师

关键词/Keywords
配电网·
故障恢复·
遗传算法·

配电网故障恢复是指在故障定位和隔离的基础上使无故障的停电区域恢复供电，其目标是在允许的操作条件和电气约束下，通过网络重构尽可能多地将停电区域的负荷转供到正常的馈线上，其最终得到的解是一系列开关组合。

配电网络故障恢复重构问题在数学上可以归结为一个带有众多约束条件的大规模非线性组合优化问题。由于作为优化变量的开关组合数量巨大，穷举搜索将面临“组合爆炸”问题，并且解空间的过于庞大导致在直接数学求解时计算量很大，而且无法保证收敛的可靠性。因此，本文采用基于遗传算法的配电网故障恢复算法，并通过IEEE 33节点的测试系统，结果表明故障恢复后系统网损明显减小，节点电压得到提高，同时验证了算法的有效性。

配电网故障恢复数学模型

1. 目标函数

我国配电网网架薄弱，网损较大，降低配电网网损一直是电力企业努力的方向，配电网络故障恢复是降低配电网络网损的有效手段，因此本文考虑采用以网损最小为目标的配电网络故障恢复模型，即

$$\min f=\sum_{i=1}^{N_b}k_iR_i\frac{P_i^2+Q_i^2}{U_i^2} \qquad (1)$$

式中，f为系统的有功损耗，可以通过潮流计算得到；k_i为开关i的状态，是0～1的离散量，“0”表示断开，“1”表示闭合；R_i为支路i的电阻；P_i、Q_i为流过支路的有功功率和无功功率；U_i为支路i末端节点的电压。

2. 约束条件

（1）潮流约束

每次改变配电网的结构后都需要重新计算潮流分布。

（2）线路容量约束

$$S_i\leqslant S_{\max} \qquad (2)$$

式中，S_i、$S_{\max}$为各线路流过功率的计算值和最大容许值。

（3）节点电压约束

$$U_{i\min}\leqslant U_i\leqslant U_{i\max} \qquad (3)$$

式中，U_i、$U_{i\max}$和$U_{i\min}$分别为节点i的电压及其上、下限值。

（4）辐射状网络约束

配电网一般为闭环设计、开环运行，这就要求重构后的配电网络呈辐射状，不能出现闭环。

遗传算法基本原理与实现

1. 遗传算法基本原理

遗传算法是基于生物进化原理，模仿生物群体中的繁殖、优胜劣汰及再繁殖这个循环过程，实现问题优化的一

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

种方法。其基本原理类似于自然进化，通过作用于染色体上的基因寻找好的染色体来求解问题。遗传算法所需要的仅是对算法所产生的每个染色体进行评价，并基于适应值来选择染色体，使适应性好的染色体有更多的繁殖机会。在遗传算法中，通过随机方式产生若干个所求解问题的数字编码（即染色体），形成初始群体；通过适应度函数给每个个体一个数值评价，淘汰低适应度的个体，选择高适应度的个体参加遗传操作，经过遗传操作后的个体集合形成下一代新的种群，对这个新种群进行下一轮进化。

2. 遗传算法的实现

（1）基本流程

遗传算法的具体解题过程主要由以下步骤组成：①进行染色体编码，随机产生初始群体；②计算群体中每个个体的适应度函数值；③按照遗传策略，运用选择、交叉和变异操作作用于群体，形成下一代群体；④判断群体性能是否满足某一指标，或者已达到预定迭代次数，不满足则返回步骤③，若满足，则将当前代中出现的最好个体指定为计算结果，算法的整个基本流程如图1所示。

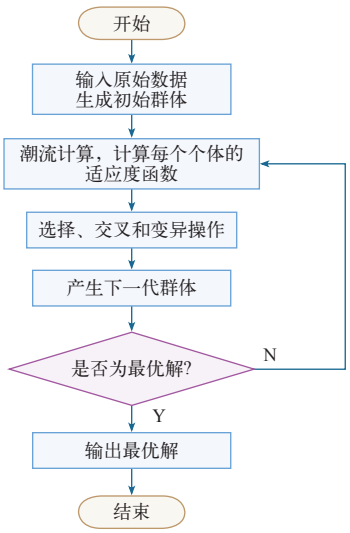

图1 遗传算法基本流程

（2）染色体编码

在一些文献中采用二进制编码，将配电网中的开关状态用“0”和“1”表示，每个开关占据染色体的一位，“0”代表分闸状态，“1”代表合闸状态，各支路状态组合在一起就形成一条染色体，染色体的长度为网络中开关的数目，这种方案简洁明了，但没有充分利用配电网的特点，在遗传算法的运行过程中会产生大量的不可行解，严重影响算法的效率。

通过研究配电网络结构的实际情况发现，在一个配电系统中，为了保证所有负荷都能得到供电，应遵循以下两条规则：①不在任何环路内的支路上的开关必须闭合；②在网架结构合理的情况下，若以网损最小为目标函数，则与电源点相连的开关一般也应闭合。因此，染色体上相应的位就可以消除，染色体长度也可以大大缩短。

（3）初始群体生成

初始群体采用随机生成矩阵，矩阵中的元素只有“0”、“1”两种状态，可以表示不同情况配电网的供电状态。为了满足在供电过程中辐射网的运行，任意两个电源之间不能连通，本文采用的方法是先将所有可能连通的双电源供电存储起来，然后对初始种群中的每条染色体进行判断，如果不满足辐射网供电，即在两个电源之间随机选择一个可操作的开关打开。

（4）适应度函数

适应度函数直接影响到遗传算法的收敛性能。一般而言，适应度函数是由目标函数变换而成的。为了能够直接将适应度函数与群体中的个体优劣度量相联系，在遗传算法中适应值规定为非负，并且在任何情况下总是希望越大越好。但是许多实际问题中，目标函数有正有负，所以有必要通过建立适应度函数与目标函数的映射关系，保证映射后的适应值是非负的，而且目标函数的优化方向对应于适应值增大方向。本文目标函数为网损最小化，适应度函数$F(x)$和目标函数$f(x)$的映射关系可表示为

$$F(x)=\begin{cases} C_{\max}-f(x) & f(x)\leqslant C_{\max} \\ 0 & f(x)>C_{\max} \end{cases} \tag{4}$$

式中，$C_{\max}$为一个输入值或理论上的最大值。

（5）基本算法操作

遗传操作一般包括选择、交叉和变异三个基

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

本操作。

选择就是从当前群体中选取适应值高的个体以生成交配池的过程。选择能提高群体的平均适应值，但它并没有产生新的个体，且群体中最好个体的适应值也不会改进。当选择操作时，对计算目标函数后的群体从大到小进行排序，将最优的保留，最差的淘汰掉。

交叉操作又称基因重组，是指将两个父个体重新组合产生两个子代个体的操作。交叉并不是每次都进行，而是按照交叉率进行。其作用在于将原有的优良基因遗传给下一代个体，并生成包含更复杂基因结构的新个体。

变异操作模拟自然界生物体进化中染色体上某位基因发生的突变现象。对经交叉后产生的新群体随机进行一点变异，即先按照变异率计算出要进行变异的个体数，然后按照随机的方式得到要变异的个体和要变异的位置，最后改变该位置的基因值。变异可以使群体进化过程中丢失的等位基因信息得以恢复，以保持群体中个体的差异性，此外还能够提高遗传算法的局部搜索效率。

算例分析

本文采用IEEE 33节点测试系统，系统网络结构如图2所示。该系统额定电压为12.66 kV，有2个变电站、5个联络开关、37条支路以及33个节点，系统总的有功、无功功率分别为3 715 kW和2 300 kvar。

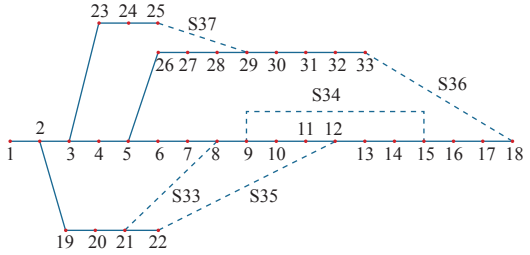

图2 IEEE 33节点配电网络结构

测试系统中，S33～S37为5个联络开关，开关S1～S2不在任何回路中，不参与编码，故染色体长度为36位。基本群体规模为50，交叉率为0.6，变异率为0.05，经Matlab7.0编制的程序运行计算后得到的优化结果如下表所示。

表 IEEE 33节点配电网故障恢复结果

	断开开关	网损/kW	节点最低电压（pu）
故障恢复前	S33、S34、S35、S36和S37	200.122	0.888
故障恢复后	S7～S8、S9～S10、S14～S15和S37	138.688	0.945

配电网故障恢复前后的节点电压比较情况如图3所示。故障恢复前系统节点最低电压为0.888（pu），故障恢复后系统节点最低电压为0.945（pu）。故障恢复后，各节点电压幅值均有了一定程度的提高，节点电压曲线更平缓，表明考虑了负荷平衡约束的以网损最小为目标函数的配电网故障恢复，使电压质量得到了明显的改善。

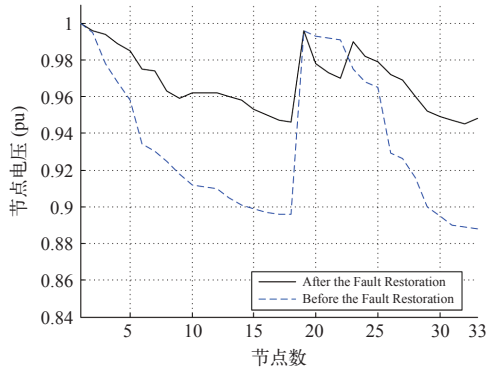

图3 故障恢复前后节点电压比较

结束语

满足供电恢复的实时性是配电网故障恢复的重要要求。如果仅采用传统的穷举法搜索将出现“组合爆炸”问题，使问题更趋复杂。本文针对这一问题，以遗传算法为基础提出了一种用于恢复配电网故障的新算法。采用以配电网网损最小为目标函数，改进了染色体编码方式。算例中对IEEE 33节点系统进行了仿真实验，实验结果表明，采用该方法能快速实现故障恢复，提高供电质量。

（收稿日期：2015－01－11）EA

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