

基于合作型协同进化遗传算法分布式发电供电恢复

万强¹ 孙昊¹ 王乾¹ 谢晓琳² 王鹏³

(1. 石家庄供电公司, 河北 石家庄 050000; 2. 石家庄深泽供电公司, 河北 石家庄 052500;
3. 石家庄灵寿供电公司, 河北 石家庄 050500)

摘要: 分布式电源的配电系统, 在发生大面积断电时, 要求最快、最多的恢复失电负荷的供电。引进了合作型协同进化遗传算法来实现分布式发电条件下的供电恢复, 建立了供电恢复问题的协同进化模型。采用随机生成树对染色体进行编码, 完全避免了不可行解。采用高频变异的方式对染色体进行变异操作。在寻优过程中子种群间相互交换信息, 使得算法尽快收敛。算例表明了协同进化遗传算法的高效性及快速性。

关键词: 配电系统; 协同进化; 遗传算法; 分布式发电; 供电恢复

Abstract: In terms of the distribution system with distributed generators, the model based on co-evolutionary genetic algorithm is proposed to solve the service restoration problem in the event of a large-scale blackout in power distribution network with distributed generation. The chromosomes are coded according to the method of the random trees to avoid lots of unfeasible solutions. The high-frequency method is introduced as the mutation operation of chromosomes. In the process of searching for the best solution, the objective is changed dynamically in order to get the best solution as quickly as possible. At last, the calculation example shows the efficiency and the quickness of the co-evolutionary genetic algorithm.

Key words: distribution system; co-evolutionary method; genetic algorithm; distributed generation; service restoration

中图分类号: TM744 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)03-0023-03

配电网一般具有闭环设计、开环运行的特点, 它在配电沿线设有分段开关, 在馈线入口处设有联络开关。由于电力需求的不断增长, 使得现代配电系统的规模也随之增大, 这必然加大了故障发生的概率。故障恢复的主要目的是在配电网发生故障后, 通过网络重构在不发生系统安全越限的条件下, 快速恢复对非故障区域失电负荷的供电^[1]。

当前, 随着能源危机与环保的意识增强以及为了解决集中式发电中存在的问题, 分布式发电 DG (distributed generation) 技术在全球快速发展。在大电网供电的基础上, 配电系统在靠近用户侧引入容量不大(一般小于 50 MW) 的分布式电源供电方式, 分布式电源的接入不改变原来配电网结构, 延缓了输、配电网升级换代所需的巨额投资。同时, 它的接入可以有效的改善大电网的供电可靠性并且可以提高供电质量^[2-3]。

解决配电网供电恢复问题, 国内外学者已提出了诸如启发式算法、禁忌算法以及以遗传算法为主的多种人工智能算法^[4-5]。其中遗传算法编码简单易行, 并且在理论上全局收敛, 从而得到了较多的应用。但是遗传算法有其本身在收敛速度上的缺陷。

分布式人工智能技术打破了传统人工智能自上而下的集中式处理方式, 并且具有良好的鲁棒性、可扩展性、灵活性、自适应性, 它的发展和应用引起了人们的重视^[6]。基于该技术, 提出了一种新的协同进化遗传算法用于实现分布式发电条件下的配电网供电恢复模型。采用随机生成树的方式产生染色体, 动态地改变子种群的进化目标, 应用高频变异方式对染色体进行变异操作, 实现算法的快速收敛。协同进化遗传算法收敛的快速性, 使它更适合在故障后尽快的给出供电恢复方案, 解决了遗传算法在恢复方案出台速度上的不足。

1 分布式发电下配电网供电恢复的数学模型

1.1 配电网拓扑结构的简化

将配电网看作是一种图, 将配电线路沿线的馈线开关当作是图的顶点, 将馈线当作是图的边, 两个开关间的负荷采用等效负荷模型^[1], 从而构成配电网的数学模型。

1.2 故障后分布式电源的运行方式

当配电网发生故障后, 为了最大限度的提高供

电可靠性, 联在馈线上的分布式电源可以打开并网开关, 以孤岛方式继续供电^[7]。然后启动恢复程序对全网进行供电的恢复。最后根据恢复结果, 分布式电源通过相应开关检同期并网, 从而减少用户的停电, 最大限度的提高配网的供电可靠性。

分布式电源的运行方式与开关类型有着很紧密的关系。如图1所示, 如果连接分布式电源的开关不具备检同期并网的功能, 如图1(a)的孤岛划分(菱形开关表示具备检同期功能, 圆形开关没有检同期并网功能), 其边界开关是普通的圆形开关, 那么故障后此分布式电源可以孤岛运行一段时间, 但当系统从右侧恢复供电的时候, 此分布式电源所带负荷由于开关不具有并网能力只能甩掉。而对于图1(b)的孤岛运行模式来说, 供电恢复的时候, 只需要检同期并网就可以了。

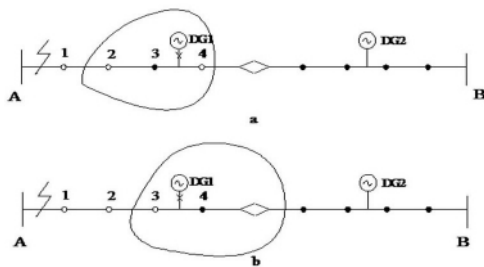


图1 两种不同的孤岛划分

1.3 供电恢复的数学模型

一般情况下, 大部分的配电网故障引起的断电除去被隔离的故障区域外, 都可以通过联络开关转移负荷全部恢复。但当配电网发生大面积断电的时候, 作为电能的提供方, 供电公司最关心的是如何最快并最多的恢复重要负荷的供电, 因而结合实际选择恢复的负荷量最多作为供电恢复问题的目标函数。

$$\max f = \sum_{i \in N} \lambda Li \quad (1)$$

式中, N 为{1, 2, 3, ...} Li 为第 i 个负荷恢复的标志位, 若第 i 个负荷恢复, Li 取 1; 反之, Li 取 0。 λ 为第 i 个负荷的优先级系数。

在配电网的供电恢复问题中, 任一候选解都要满足不等约束, 不等式约束包括电压约束、支路过载约束等, 即

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad (2)$$

$$S_i \leq S_{\max} \quad (3)$$

式中, U_{\min} 和 U_{\max} 分别为节点 i 电压下限和上限值;

S_i 和 S_{\max} 分别为第 i 条支路流过功率的计算值及其最大容许值。

2 协同进化遗传算法

2.1 合作型协同进化的构成

协同进化算法包含竞争型和合作型两种基本类型。竞争型协同进化算法采用多个种群, 种群的每个个体代表一个完整解。这些种群处于竞争关系, 但同时又存在合作行为, 种群间通过个体的迁徙达到信息的交流。基于竞争型的协同进化算法已经获得了众多应用, 大多数的基于智能体的算法(即 agent 技术) 都采用这种模式。但这种模式只是硬性的将协同进化算法应用到故障恢复问题, 不能反映配电网故障后恢复过程的特点, 而基于合作型的协同进化算法可以很好地模拟故障恢复的过程, 正因为它更侧重于过程, 它解决供电回复问题有着独特的优势。

合作型协同进化算法的基本结构如图2所示, 合作型算法与竞争型算法的本质区别在于: 合作型协同进化算法把原始问题首先分解为几个部分, 这几部分的有机组合才能组成问题的解, 单一部分只能反映局部。每个部分对应一个种群(又称子种群), 并且每一个种群用一个进化算法来独立进化, 这里和竞争型算法的区别是种群(包含子种群)中的任何一个个体都不能表示一个解, 问题的解只能由各个子种群各出一个个体组合形成。对一个待解问题, 需要由不同种群个体构成的一个共生体对应问题的一个完整解。各个种群中个体的适应度值是通过与其他群体中个体的一系列合作并根据其对目标问题解决的贡献度来确定的, 因而单个子种群某一时刻的进化目标(方向) 是由其他子种群此刻进化达到的程度所决定的, 换句话说就是单个子种群的进化目标是动态变化的^[8]。

2.2 合作型协同进化算法的流程

对某一子种群来说, 来自其他子种群的个体集中的一些“优秀个体”经过提取后作为种群间交换的信息, 然后单个子种群根据其他种群发来的信息构造完整解并执行进化操作, 最终完成进化进程。其具体的进化步骤如下所述。

(1) 根据采用的问题分解策略, 确定子种群数目 n , 初始化各个子种群 $pop_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 和其他参数。

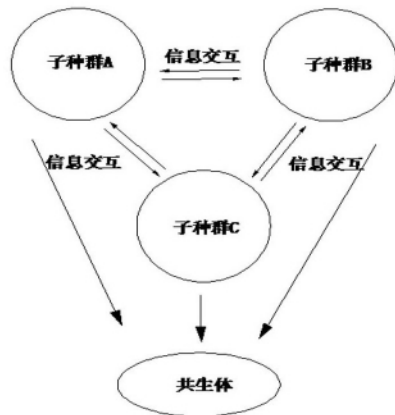


图2 合作型协同进化算法的模型

- (2) 评价各个子种群 pop_i 的个体 pop_{ij} 。
- (3) 进化子种群 pop_i 生成新一代个体。
- (4) 根据合作策略为子种群 pop_i 选择合作者并构造完整解, 计算其适应度, 若满足结束条件则转(5), 否则 $i = i + 1$, 转(3)。
- (5) 算法终止, 输出最优解。

3 供电恢复的协同进化遗传算法

3.1 供电恢复问题协同进化模型的建立

对于大面积断电的供电恢复问题, 首先将问题进行分解。供电恢复可以看成是各个能够提供电能的馈线相互合作恢复尽量多的负荷, 因而对应的子问题就是各个馈线的恢复负荷方式。将能够提供电能的馈线的恢复方式对应为子种群, 有几条可以用于恢复供电的馈线就有几个子种群。每个子种群的染色体表示为此馈线恢复供电的一种方式, 对于供电恢复问题, 每个子种群的染色体有很多种。而每个子种群所对应的进化目标则是对于其他子种群的最优染色体的一个提呈。由于现在的配电网一般采用“手拉手”的供电方式, 馈线比较多。对应的协同进化模型中的子种群就比较多, 在算法进行过程中, 各个子种群间相互交换信息, 对各自的染色体进行更新。正是由于多个子种群的存在, 使得分布式计算的优势得以充分体现, 故本算法解决供电恢复问题的速度较传统人工智能方法有了极大的提高。

3.2 染色体编码

如前所述, 单个染色体对应了某条电源馈线恢复负荷的方式。这里采用实数编码, 如图3所示, 其信息既包含负荷信息又包含顺序信息, 位串ABCDE表示此染色体对应的负荷恢复方式为此馈线依次恢

复了编号为A、B、C、D、E的负荷的供电, 这种编码方式具有直观明了的优点, 可以作为最终结果的直接输出。

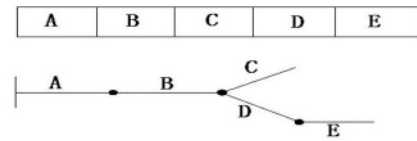


图3 染色体编码

3.3 初始种群生成

配电网闭环设计、开环运行的特点, 使得每个染色体对应的供电恢复方式都应是辐射状结构。这里采用随机生成树的方式, 每个子种群各自形成数目相等的初始种群。这里所说的“树”并不是图论中包含所有节点的树, 而只是指一棵随机生成的子树。所谓随机生成树指的是随机产生一个整数 generation 作为生成一个染色体的循环代数。定义数组 F, A , 其中 F 为染色体, A 为待添加的支路, A 中支路满足使 F 为树状结构。从馈线出发, 每代从 A 中随机添加一条支路到 F 中, 然后更新 A , 直到达到循环代数 generation。其中 generation 不能取太大, 因为馈线容量是有限的, 不能恢复无限多负荷。这样 F 中的元素就组成了一个染色体。用相同的方法生成所有初始种群^[9]。

3.4 信息集提呈

某一子种群进化过程中获得的信息是通过对其他子种群的信息提呈实现的。这里采用如下方式进行信息的提呈: 首先选择要进行信息集提呈的子种群, 然后找到除自身种群外的每个子种群中的最优个体, 最后将其他种群的这些最优个体集中作为此次信息集提呈获得的信息集。

3.5 适应度计算

对于每一个子种群中的染色体都要进行适应度的计算, 适应度的大小和信息提呈中获得的信息集 M 是直接相关的, 它取决于子种群中的染色体和这个子种群的信息集的匹配程度。染色体适应度的计算公式如式(4)。

$$F = \left(1 - \frac{2 \times rst_1 + M_1 - rst_2}{n}\right)^a \times f^b \times c \quad (4)$$

式中, 等式右第1部分描述的是染色体本身的相对优劣程度, 其中, 系数 rst_1 为由染色体 rst 引发的重复冲突。即某负荷在信息集 M 中不重复(因同

一负荷是不会恢复两次的),但由于染色体 rst 中也存在此负荷而引发的冲突。系数 M_1 指信息集 M 中遗漏的负荷数,即所有负荷的总数减去 M 中恢复的负荷数。系数 rst_2 指染色体 rst 包含的负荷总数, a 为这一部分的权重,在此取为 1;第 2 部分 f 为要优化的目标函数值,在此即公式 1 中的目标函数 b 为这部分的权重,在此取为 0.5;第 3 部分 c 为约束的越界惩罚系数,当染色体对应恢复方式的潮流满足约束时取 1,否则取 0;在此需要进行潮流计算,采用前推回代法计算潮流。对于分布式电源,等效为 PQ 节点,这就简化了包含 DG 的配电网的潮流计算。

3.6 遗传操作

遗传操作由选择、交叉和高频变异组成。

(1) 选择:对每个子种群的染色体根据与适应度成正比的方式进行选择,保留每代中的最优个体不参与选择操作。

(2) 交叉:按交叉概率 P_c 进行交叉操作,对于随机选取的两个染色体,由于实属编码不易于进行交叉,故按如下方法进行交叉操作:首先将对应的染色体转换成对开关编码的二进制形式,然后采用普通的两点交叉方式进行交叉操作,调用修复程序对可能产生的孤岛和环路进行修复,最后将新的染色体还原成实数编码形式。

(3) 高频变异:由于染色体采用随机生成树形成,并且存储在 F 数组中,故可以采用如下的变异规则:对于 F ,以概率 P_1 、 P_2 和 P_3 表示本次循环要添加 1 条支路的概率、删除 1 条支路的概率以及不做任何变化的概率,在此 P_3 的选取采用和染色体的适应度成正比的原则。 P_1 和 P_2 取相同的数值,其中 P_1 、 P_2 和 P_3 之和为 1。如果根据概率要添加支路,则从 A 数组中随机取出 1 条支路添加到 F 中;如果要删除 1 条支路,由于 F 中最后 1 条支路必定位于末端(这是由 F 中元素的添加顺序决定的),则将 F 中存储的最后 1 条支路删除即可。

4 算法的具体实现

(1) 参数设置。确定每个子种群的种群规模 N 、染色体编码长度 L 、种群进化代数 N_g 、交叉率 P_c 、变异率 P_1 、 P_2 、 P_3 。

(2) 初始化。对每个子种群随机生成数目为 N 的初始种群。

(3) 进化开始。按式(4)计算每个子种群中染色体的适应度。

(4) 信息集提呈。对每个子种群进行交换信息的提呈。

(5) 遗传操作。对每个子种群进行下述操作:首先是选择操作,按与适应度成正比的方式对子种群中的染色体进行选择,保留适应度高的个体。然后是交叉操作,对种群中所有染色体依据交叉率 P_c 进行交叉。最后是变异操作,按照设置的变异率对每个染色体进行高频变异。

(6) 终止条件判断。判断进化代数是否到达设定值 N_g 。若是,则输出各个子种群的最优染色体,这些染色体的组合即为最终的解。若没达到 N_g ,则转步骤(3)。

从算法可以看出,由于各个子种群进化目标的动态变化以及各个子种群间的合作,使得染色体比单纯的遗传算法中的染色体更容易找到最优解,因而所提算法具有很高的求解速度。

5 算例分析

用前面提出的协同进化遗传算法对文献[10]中的含有 DG 的配电系统(图 4)稍作修改进行了分析。其中带括号的数字表示的为负荷,不带括号的数字表示的是开关节点。假设现在母线 22 故障,并且其出口断路器已跳闸。其中认为 DG4 由于运行方式问题,在故障后要退出运行,断开开关 18,不参与供电恢复。其他分布式电源,在故障后若处在失电区则形成孤岛运行,之后重新并网。

由图 4 可见,母线 22 故障后,还有 0、7、41 处 3 条母线可以用来恢复供电。因而,应用协同进化遗传算法时,子种群的数目为 3。选取每个子种群的种群规模为 30,交叉率为 0.9,变异率 P_1 为 0.3, P_2 为 0.3, 则 P_3 为 0.4,适应度函数中的权重 a 和 b 分别取为 1 和 0.5。

应用协同进化算法得到的恢复方案为打开 4、11、20、24 这 4 个开关,这意味着切掉 29、30、31 这 3 个负荷,算法收敛到最优解的平均迭代次数为 11。为便于比较,采用文献[1]中的改进遗传算法对此问题同时进行了分析。对于改进遗传算法,初始种群规模也取为 30。遗传算法得到同样最优解的迭

(下转第 35 页)

- [4] 高宗和,丁恰,温柏坚,等. 利用超短期负荷预报实现 AGC 的超前控制[J]. 电力系统自动化,2000,24(11):42-45.
- [5] 李予州,吴文传,张伯明,等. 多时间尺度协调的区域控制偏差超前控制方法[J]. 电网技术,2009,33(3):15-24.
- [6] Cova B, Losignore N, Marannino P, et al. Contingency Constrained Optimal Reactive Power Flow Procedures for Voltage control in Planning and Operation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10 (2): 602 - 608.
- [7] 丁晓群,黄伟,章文俊,等. 基于电压控制区的主导节点电压校正方法[J]. 电网技术,2004,28(14):44-48.
- [8] Paul J P, Leost J Y, Tesseron J M. Survey of the Secondary Voltage Control in France: Present Realization and Investigations [J]. IEEE Transactions on Power Systems. 1987, 2(2): 505 - 512.
- [9] LEFEBVRE H. FRANGIER D. BOUSSION J Y et al. Secondary Coordinated Voltage Control System: Feedback of EDF [C]. In: Proceedings of IEEE PES 2000 Summer Meeting. Seattle (WA. US), 2000: 290 - 295.
- [10] 胡伟,梅生伟,卢强,等. 东北电网混杂自动电压控制的研究[J]. 电力系统自动化,2004,28(1):68-73.
- [11] 胡伟,卢强. 混成电力控制系统及其应用[J]. 电工技术学报,2005,20(2):11-16.
- [12] 胡伟,张雪敏,梅生伟,等. 静态混成自动电压控制的研究[J]. 控制理论与应用,2007,24(6):902-908.
- [13] 李端超,陈实,吴迪,等. 安徽电网自动电压控制(AVC)系统设计与实现[J]. 电力系统自动化,2004,28(8):20-22.
- [14] 孙宏斌,张伯明,郭庆来,等. 基于软分区的全局电压优化控制系统设计[J]. 电力系统自动化,2003,27(8):16-20.
- [15] 孙伟卿,王承民,张焰,等. 电力系统综合节能的有功与无功功率协调优化[J]. 电机与控制学,2010,14(7):41-47.
- [16] 郭庆来,孙宏斌,张伯明,等. 协调二级电压控制的研究[J]. 电力系统自动化,2005,29(23):19-24.
- [17] 景志滨. 内蒙古电网 AGC 优化控制策略及实现[D]. 北京:华北电力大学,2007.
- [18] 周双喜,朱凌志,郭锡玖,等. 电力系统电压稳定性及其控制(第一版)[M]. 北京:中国电力出版社,2004.

(收稿日期:2012-05-10)

(上接第26页)

代次数在 20 次左右。协同进化遗传算法较于常规遗传算法有了改进。

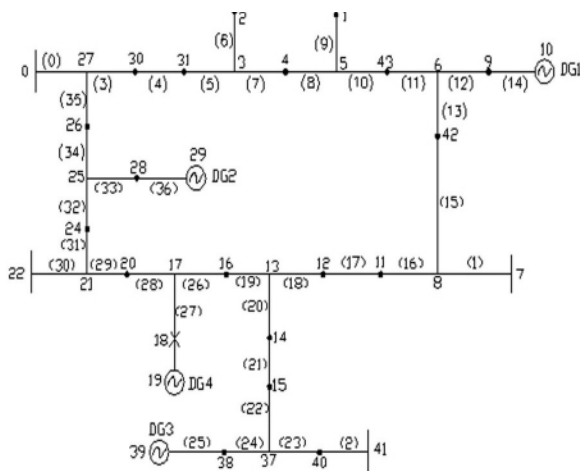


图4 包含 DG 的配电网简化模型

6 结 语

结合包含分布式电源的配电系统供电恢复的特点及研究现状,提出了一种基于协同进化遗传算法的配电网供电恢复算法。首先,建立了适合含有分布式电源的配电系统供电恢复问题分析的协同进化模型。其次,提出了随机生成树的编码方式,消除了大量不可行解,缩小了解空间。在寻优过程中动态的改变子种群的进化目标,提高了算法的收敛速度。

最后,结合实际算例进行了分析计算。结果表明,协同进化遗传算法解决供电恢复问题计算速度快,可以满足实际要求。

参 考 文 献

- [1] 刘健,毕鹏翔,董海鹏. 复杂配电网简化分析与优化[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [2] 王志群,朱守真,周双喜,等. 分布式发电对配电网电压分布的影响[J]. 电力系统自动化,2004,28(16):56-60.
- [3] 陈琳,钟金,倪以信,等. 含分布式发电的配电网无功优化[J]. 电力系统自动化,2006,30(14):20-24.
- [4] Popovic DS, Ciric R M. A Multi-objective Algorithm for Distribution Network Restoration [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(3):1134-1140.
- [5] 盛四清,梁志瑞,张文勤,等. 基于遗传算法的地区电网停电恢复[J]. 电力系统自动化,2001,25(16):53-55.
- [6] A. H. Bond, L. Gasser. Reading in Distributed Artificial Intelligence [M]. San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers, 1988.
- [7] 王成山,肖朝霞,王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化,2008,32(7):98-103.
- [8] van den Bergh F, Engelbrecht AP. A Cooperative Approach to Particle swarm Optimization [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 225 - 239.
- [9] 郭又华. 基于蚁群算法的配电网结构优化技术[D]. 成都:四川大学,2006.
- [10] 卢志刚,董玉香. 含分布式电源的配电网故障恢复策略[J]. 电力系统自动化,2007,31(1):89-92.

(收稿日期:2012-02-07)