

基于多代理的智能配电网故障恢复

董丽梅¹ 舒勤¹ 谈芳明²

(1. 四川大学电气信息学院 四川 成都 610065; 2. 国网重庆綦南供电分公司 重庆 401420)

摘要: 针对传统的配电网故障恢复方法其效率低下,对复杂智能配电网系统的适应能力差的问题,结合现有多代理技术的思想,提出了基于多代理技术并结合改进遗传算法的智能配电网故障恢复的新方案。以某地区实际配电网模型进行仿真,结果显示,将多代理技术运用到配电网故障恢复中能获得更好恢复效率,并能够尽量减少故障区域的重要负荷的失电,并对非故障区域的失电负荷进行供电,仿真实验证实了多代理技术在配电网故障恢复中的可行性和优越性。

关键词: 智能配电网; 故障恢复; 多代理; 遗传算法

Abstract: The traditional methods for fault recovery of distribution network are inefficient and they have a poor ability to adapt the complex systems. So combining with the existing multi-agent technology, a new idea for fault recovery of smart distribution network is put forward based on multi-agent technology with the improved genetic algorithm. An actual distribution network model in one district is taken for example. The simulation results show that applying the multi-agent technology to the fault recovery of distribution network can obtain a better recovery efficiency, which can reduce the loss of important load in fault section as far as possible and can supply power for the power-lost load in non-fault section. The simulation test verifies the feasibility and superiority of the multi-agent technology in the fault recovery of distribution network.

Key words: smart distribution network; fault recovery; multi-agent; genetic algorithm

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)04-0001-05

0 引言

智能配电网融合了现代通信技术、传感测量技术和 DER 并网技术等一系列先进技术,具有供电可靠的优点,因而成为了配电网的主要发展方向^[1-2]。随着配电网网络拓扑的日趋复杂化,配电网的供电恢复变得越来越困难^[4]。

对于配电网的故障恢复,国内很多学者都提出了不少方法。文献[4]提出了基于改进二进制粒子群算法的配电网故障恢复算法,通过确定的目标函数,引入层次分析法求解权重值,比传统法更符合实际,达到寻找最优解的目的。张海波等人采用有功负荷作为制定配电网故障恢复方案的依据,利用广度优先搜索算法对非故障区域失电负荷均匀恢复供电,且引入的备用容量修正系数,可自行根据过载情况修复恢复方案^[5]。过羽丰等人在遗传算法的基础上,引入自适应方法,具有很好的全局搜索能力和

搜索速度,从而达到对更多停电区域的供电^[6]。文献[7]针对分布式电源在配电网中的使用,提出了基于多代理的配电网故障恢复方法,使用了多代理技术,其中多代理系统由协调代理(SCA)、子站代理(SSA)和 FTU 代理(FTUA)组成,通过代理之间的协作,达到对配电网的故障检测、隔离和恢复的目的。多代理技术特别适用于那些根据空间、时间或功能进行分解的复杂应用问题^[8-11],这就为解决配电网的故障恢复问题提供了一个很好的指引。

配电网故障恢复是一个多目标、多约束的非线性问题^[12]。随着配电网的智能化发展,配电网的故障恢复、优化等问题也将变得越来越复杂化,这就使得配电网的故障恢复过程中面临速度缓慢、效率低下的问题^[13-15]。为了解决这些问题,提出了基于多代理技术和遗传算法的方案,在实现配电网故障恢复的同时提高了配电网故障的恢复速度。

1 配电网故障恢复模型的建立

配电网故障恢复模型的建立过程中,要首先满

基金项目: 四川省科技支撑计划项目(2012GZ0009); 四川省电力公司科技项目(12H1541)

足重要负荷的供电,然后尽可能恢复其他一般负荷^[16,17]。因此本模型建立中所使用的相关目标函数和约束条件如下。

1.1 相关目标函数

(1) 尽可能少的丢失非故障区重要负荷

$$\min f_1(X) = \sum_{i \in C} (1 - k_i) L_i \quad (1)$$

式中, C 为重要负荷节点集合; L_i 为节点 i 的负荷; k_i 为节点 i 状态, 1 为带电, 0 为失电。

(2) 尽可能少的丢失非故障区的失电负荷

$$\min f_2(X) = \sum_{i \in M} (1 - \lambda_i) R_i \quad (2)$$

式中, M 为非故障失电区域节点集合; λ_i 为节点状态, 1 为带电, 0 为失电。

(3) 网络损耗尽可能小

$$f_3(X) = \sum_{i \in N} I_i^2 R_i \quad (3)$$

式中, N 为网络支路集合; I_i, R_i 分别为支路 i 的电流和电阻。

1.2 约束条件

以上目标函数需要满足如下约束条件。

(1) 潮流约束: $f(P, Q, U) = 0$

式中, P, Q 是节点注入的有功、无功功率; U 是节点电压。

(2) 网络拓扑结构的需要满足为辐射状(不含分布式电源): $g_k \in G_k$

式中, g_k 为当前网路结构; G_k 为所有允许的辐射状网络集合。

(3) 线路容量约束

$$S_{li} < S_{li, \max} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

式中, S_{li} 和 $S_{li, \max}$ 分别为支路 i 的视在功率和最大容量。

(4) 节点电压约束

$$U_{i, \min} \leq U_i \leq U_{i, \max} \quad (i = 1, \dots, m)$$

式中, $U_{i, \min}, U_{i, \max}$ 分别代表节点电压上下限。

(5) 开关次数限制, 在故障恢复过程中, 应使开关操作的次数尽量小。

2 多代理的实现过程

单个代理需要具有自主性、交互性和通信性。单个代理在完成自己的任务时, 还要通过相关协议与周围的代理进行信息交换, 共同完成系统的总体任务。选择每一个目标函数作为一个代理, 目标函数的个数决定了代理的个数, 如目标函数 $f_1(X)$ 、

$f_2(X)$ 、 $f_3(X)$ ……分别对应各自的代理 A1、A2、A3……, 每一个代理拥有各自的进化群体, 对每一个代理采用遗传算法进行电路拓扑搜索。

为保证演化目标的一致性, 设置一个协调代理 (CAG) 作为中间代理。中间代理收集单个代理发送过来的最优解, 对最优解进行一致性处理, 筛选出满足要求的个体并作为下一代的基础, 再将解反馈到新的单个代理中作为下一代迭代计算的基础。另外, 在遗传算法的执行中, 由于具有微小差距的开关组合之间的差距比较大, 为了防止最优解的失去和寻优过程震荡过快, 则针对传统的遗传算法进行了改进, 即在每一代中保留最优的个体, 这些个体不参与交叉和变异操作。

(1) 目标函数 1 的实现

通过无圈法随机生成 10 组开关组合, 每组开关组合可以求得对应的失电区域未恢复供电的重要负荷的值, 通过比较可以得出最小值, 保留这个最小值, 同时将初始的 10 组开关组合进行交叉、变异, 同时用最小值所对应的开关组合随机替换一组, 再进行前面的操作, 如此进行下去, 迭代 10 次后得出一组最优开关状态组合发送给协调代理。

(2) 目标函数 2 的实现

目标函数 2 是尽可能恢复非故障区域失电负荷, 也采用上面的方法, 随机生成 10 组开关组合, 求得 10 组开关组合分别对应的失电区域未供电的非重要负荷的最小值, 保留 10 组开关组合中的最小值, 同时 10 组开关组合进行随机交叉互换变异, 产生新的 10 组开关组合, 用前面的最小值随机替代一

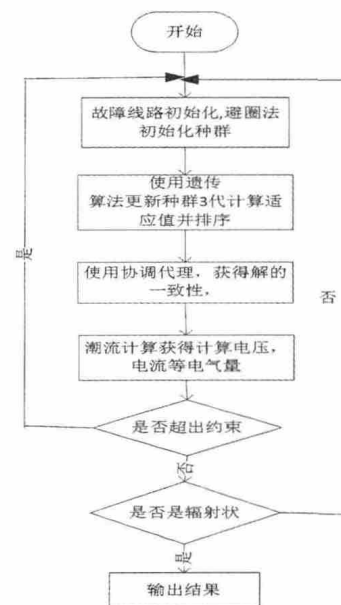


图1 基于多代理的配电网故障恢复流程图

组开关组合,再求对应的未恢复的失电区域的非重要负荷,如此循环 10 次,跳出循环,将最小值发送给协调代理。

(3) 协调代理的实现

协调代理将前两个代理返回的最优个体进行一致性处理,获得一个一致解,作为输出或是前两个代理的理解的一部分。

因此,结合多代理技术与遗传算法得到的配电网故障恢复步骤流程图如图 1。

3 基于多代理的故障恢复实例仿真

3.1 算例分析

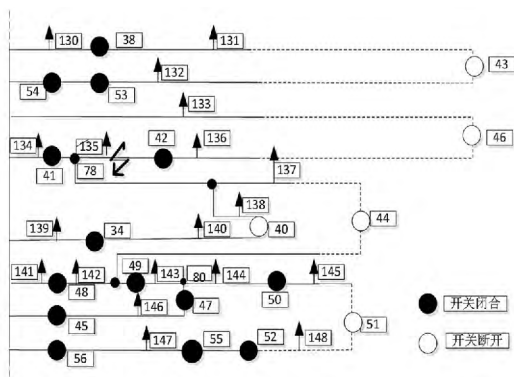


图 2 简化后的部分配电网图

采用 MATPOWER3.0^[18] 和 MATLAB7.1 对图 2 所示的配电网进行仿真。图中采用的定义及相关参数见文献 [19]。其中电源点编号是 1, 开关编号是 10~64, 变压器编号是 66~81, 负荷编号是 101~158。其中 136、137、142、149、151、152、158 为重要负荷,开关 12、13、14、15、19、20、27、28、29、31、32、33、43、46、40、47、51、58、60、64 断开,其余开关闭合,假设支路 41~42 发生故障,立即断开开关 41、42 隔离故障,则负荷 135、136、137、138 失去供电。在故障恢复过程中,优先恢复对重要负荷的供电,其次尽可能的恢复非重要负荷,最终达到对非故障失电区域所有负荷的供电。

3.2 仿真结果分析

3.2.1 算例 1

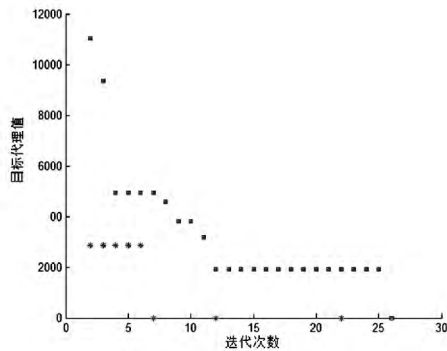
传统方法依靠单点搜索,算法容易陷入局部解,遗传算法中多个个体以种群的方式进化,能更好的获取全局解。因此程序中使用了遗传算法并改进获得更好的性能,作为前两个代理的内部实现,不同参数的收敛能力和速度是不一样的,表 1 给出了算法在不同迭代次数和变异率下的运行结果。

在程序运行过程中,当每个代理的内部迭代次数调整为 5 时,协调的次数太多,会影响速度,甚至

表 1 协调代理获得的 10 组最优开关组合

运行次数	协调次数	迭代次数	断开的开关号												变异率
1	7	15	10	14	15	18	21	23	27	28	30	31	35	39	0.01
			40	42	45	54	56	59	61	62					
2	13	15	13	14	17	20	22	27	28	29	30	31	32		0.01
			35	42	44	45	49	53	59	60					
3	3	20	14	15	17	18	23	26	27	30	31	32	33		0.01
			35	37	39	40	41	45	46	50	54	59	62		
4	15	20	13	14	17	21	25	26	27	30	31	34	35		0.01
			38	39	42	44	53	56	58						
5	6	20	14	16	17	18	20	25	30	31	34	36	37		0.01
			46	47	52	54	59	60	62	64					
6	1	20	14	15	16	17	18	20	31	35	38	42	45		0.05
			49	51	59	54	56	58	64						
7	1	20	14	17	18	22	26	27	29	30	31	33	34		0.05
			37	39	41	42	49	50	54	59	60	62	64		
8	2	10	13	14	17	21	24	26	27	31	32	34	35		0.05
			37	39	41	42	54	56	58						
9	1	10	11	15	17	18	20	22	26	27	30	31	32		0.05
			37	38	39	45	46	50	59	60					
10	2	10	11	12	16	18	22	24	25	26	27	31	33		0.05
			35	37	39	41	42	48	49	51	54	59	60		

无法达到最优解。为此需要将前两个代理的内部迭代次数调整到 10 以上,提高收敛速度。使用智能算法实现每个代理的时候,当陷入局部解而跳不出来时,需要及时检测并大步地跳出循环。其主要原因是由于程序中选择的变异率小,降低了遗传算法的全局搜索能力,无法找到最优解。为此在表 1 中当变异率设置为 0.05 时,算法的收敛速度明显高于在 0.01 的时候。



(* 为第一个代理)

图 3 目标代理的变化过程

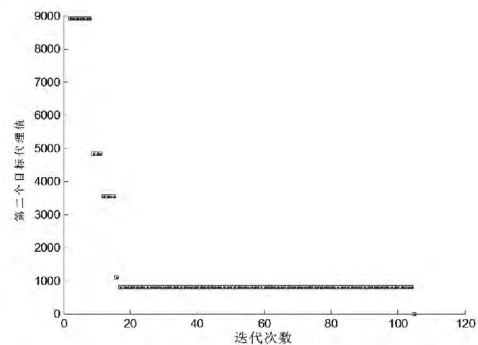
图 3 中给出了两个目标代理的变化过程,第 1 个目标在 7 代左右的时候收敛,可以得出在该时刻配电网系统对所有非故障区域失电的重要负荷已经全部供电,在对这些重要负载供电后,系统继续运行,在 26 代左右的时候,第 2 个代理收敛,最终达到对非故障区域的所有失电负载恢复供电。该实验可以达到对恢复非故障区域失电负荷供电的要求。

3.2.2 算例 2

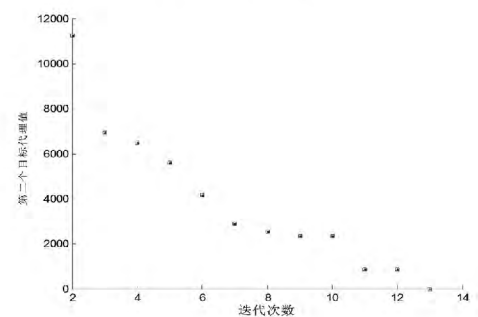
加权是处理多目标函数的主要办法,即将多目标问题,转化为单目标问题处理。这种处理办法计算时简单,但研究时不得面临权重系数的选择,而权重系数选择不同,就可能造成所求结果的差异或权重系数的人为化。而采用多代理的办法就可以有效避免上述问题的产生。同时在多个代理之间相互独立,并列运行,可以有效减少运行时间。由于大型复杂配电网中开关数众多,将遗传算法引入到代理的计算中进行全局搜索,提高了精确度,减少了故障恢复时间。

图 4 给出了使用一般的智能算法解决多目标优化问题以及使用多代理方法的仿真结果,在图 4(a)中,采用的是一般处理多目标函数的方法,通过加权的办法将两个目标函数转化为单一的目标函数,然后使用智能算法进行搜索。通过图 4(a)可以看出

函数需要在 105 代左右才收敛。图 4(b)中,基于多代理的故障恢复算法在每个代理中结合智能搜索算法,减少了搜索空间,由图 4(b)可以看出,只使用了不到传统算法的一半时间就获得了收敛,对配电网的非故障区域所有失电负荷进行了恢复供电。原因是单个代理之间的执行是相互独立的,多个代理可以在多个处理机上并发执行,能进一步减少执行时间,提高系统故障恢复速度。



(a) 基于单一目标的故障恢复方法



(b) 基于多代理的故障恢复方法

图 4 智能算法的故障恢复方法

3.2.3 算例 3

本实验使用 Matpower 计算协调代理。Matpower 潮流计算功能强大,可以计算上百个节点的潮流运算,并且稳定性较好。算例 3 中第一次将开关组合传递给线损代理后,通过线损代理进行潮流计算。

由实验结果可得,该开关组合所对应的线损为 $1.63 + j1.81$ MVA。表 2 中给出了 5 组协调代理的开关组合经过线损代理潮流计算后得到的线损值,且所有的开关组合都能实现对非故障区域的失电负荷恢复供电。

不同的开关组合状态对应不同的线损值,在所有的开关组合中应选择线损最小的那一组。线损值的大小通常用模长进行度量,即 $\sqrt{p^2 + q^2}$ 。由表 2 可看出第 4 组开关的线损值最小,即为满足需求的

表 2 线损代理进行潮流计算后获得的部分线损值

序号	协调代理获得的开关组合											线损/MVA
1	10	14	15	18	21	23	27	28	30	31	35	1.63 + j1.81
	39	40	42	45	54	56	59	61	62			
2	13	14	17	20	22	27	28	29	30	31		1.50 + j1.98
	32	35	42	44	45	49	53	59	60			
3	13	14	17	21	25	26	27	30	31	34		1.80 + j2.24
	35	38	39	42	44	53	56	58				
4	14	17	18	22	26	27	29	30	31	33	34	1.45 + j1.65
	37	39	41	42	49	50	54	59	60	62	64	
5	11	15	17	18	20	22	26	27	30	31	32	1.75 + j1.95
	37	38	39	45	46	50	59	60				

最优开关组合。在故障恢复时优先采用该开关组合,若该组合临时出现问题不能恢复供电,其余开关组合则提供了后备保障,避免了重复性工作,保证了对用户供电的可靠性。

4 总 结

通过对配电网故障恢复的多目标、非线性、多约束特点的分析,根据负荷的重要等级程度和网损值的大小,建立了多个目标函数,并通过目标函数产生多个代理,解决了配电网故障恢复问题。由于所需开关状态为离散值,因此采用了二进制遗传算法,并进行改进而提高了系统收敛速度。算例的结果分析显示基于多代理的配电网故障恢复方法可以实现对非故障区域所有失电负荷的供电,获得了比传统方法更快的恢复速度。同时多种开关组合也保证了在最优策略恢复供电失败后可以迅速选取其他供电恢复策略,避免重复性工作。

参考文献

[1] 马其燕,秦立军.智能配电网关键技术[J].现代电力,2010,27(2):39-44.
 [2] 马其燕.智能配电网运行方式优化和自愈控制研究[D].北京:华北电力大学,2010.
 [3] 马其燕,秦立军.智能配电网及其关键技术[M].北京:中国电力出版社,2010.
 [4] 卢志刚,董玉香.基于改进二进制粒子群算法的配电网故障恢复[J].电力系统自动化,2006,30(24):39-42.
 [5] 张海波,张晓云,陶文伟.基于广度优先搜索的配电网故障恢复算法[J].电网技术,2010,34(7):103-108.
 [6] 过羽丰,程思远.基于种间竞争遗传算法的配电网故障恢复[J].现代电力,2011,28(5):15-19.
 [7] 席建新,郑涛,徐庆.基于 Multi-agent 的含分布式电源配电网故障处理方法[J].现代电力,2012,29(6):

33-37.
 [8] 陈晓静,孔冰,邓亚文,等.基于 Multi-agent 技术的配电网网络重构研究[J].四川电力技术,2013,36(6):26-28.
 [9] 朱文琦,糜仲春.基于多代理的演化多目标优化算法[J].计算机仿真,2009,26(1):193-196.
 [10] 丁益民.基于多代理技术的电力战略防御系统理论研究[D].北京:华北电力大学,2003.
 [11] John A. Hossack, Judith Mendal, Stephen D. J. McArthur, and James R. McDonald. A Multi-agent Architecture for Protection Engineering Diagnostic Assistance[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2003, 18(2):639-647.
 [12] 丁银波.基于多代理技术的分布式故障诊断系统的研究[D].北京:华北电力大学,2003.
 [13] 章健,王新刚.多代理系统在微网中的应用[J].电力系统自动化,2008,32(24):80-82.
 [14] ZHANG Hai-bo, ZHANG Xiao-yun, TAO Wen-wei. A Breadth-first Search Based Service Restoration Algorithm for Distribution Network [J]. Power System Technology, 2010, 34(7):103-108.
 [15] WANG Shou-xiang, LI Xiao-jing. Multi-agent Approach for Service Restoration of Distribution System Containing Distributed Generation [J]. Automation of Electric Power System, 2007, 31(10):61-65.
 [16] 万强,孙昊,王乾,等.基于合作型协同进化遗传算法分布式发电供电恢复[J].四川电力技术,2012,35(3):23-26.
 [17] 杨丽君,刘建超,录志刚,等.基于多 Agent 演化算法的多目标配电网故障恢复[J].电力系统保护与控制,2012,40(4):54-58.
 [18] 李红连,张维理,刘录东,等.潮流计算软件 MATPOWER 及其应用[J].重庆高等专科学校学报,2009,14(4):18-20.
 [19] 武晓东.基于遗传算法的中、低压配电网优化[D].太原:太原理工大学,2007.

(收稿日期:2014-05-26)