

基于多 Agent 免疫算法的智能配电网自愈技术研究

纪秀¹, 周来², 王磊³

(1. 长春工程学院 电气与信息工程学院, 长春 130012;

2. 东北电力大学 信息工程学院, 吉林 吉林 132012; 3. 吉林圣恩伯大科技有限公司, 长春 130012)

摘要: 未来智能电网的显著特点是其良好的互动性以及完备的自愈能力, 体现了整个电网的技术水平及智能化程度, 侧面反映了国家电力系统的发展状况; 而智能配电网却是未来智能电网的核心部分, 它与用户进行直接的双向互动, 这其中涉及到大量分布式电源的接入问题, 完备的自愈能力则体现在配电网故障恢复的这一重要环节, 是一个多目标、多时段、多维度的非线性的组态优化问题, 关系到对用户的供电质量; 多 Agent 技术在计算机网络自愈方面具有得天独厚的优势, 国内外学者对此做了大量研究; 将多 Agent 免疫算法引入到智能配电网自愈系统的研究中, 作为配电网人工智能的故障恢复策略, 搭建了基于多 Agent 免疫算法的配电网自愈架构, 并通过仿真平台上的实验证明了将多 Agent 免疫算法应用到未来智能配电网自愈系统中的可行性。

关键词: 智能配电网; 多 Agent; 免疫算法; 自愈技术

Research on Self-healing Technologies of Smart Distribution Grid Based on Multi-Agent Immune Algorithm

Ji Xiu¹, Zhou Lai², Wang Lei³

(1. Institute of Electrical and Information Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China;

2. School of Information Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

3. Jilin Senbode Technology Co., Ltd., Changchun 130012, China)

Abstract: The notable features of the future smart grid is its good interactivity and extensive healing ability, reflecting the level of the technology and intelligence, the development of the national power system. The intelligent distribution network is a core part of the smart grid, it's two-way interaction with the user, which involves the access problem of a large number distributed power, the distribution network fault recovery reflects complete healing ability, is a multi-target, multi-session, multi-dimensional nonlinear optimization configuration problem, related to the quality of the user's power supply. Multi-Agent technology has unique advantages in terms of computer network self-healing, domestic and foreign scholars have done a lot of research. Introduce multi-Agent immune algorithm into Intelligent distribution network self-healing system, as the AI recovery strategy of distribution network, build self-healing technique based on multi-Agent distribution network architecture, and through the simulation experiment platform It proved that it is feasible to introduce multi-Agent immune algorithm into self-healing system of the future smart distribution grid.

Keywords: smart distribution grid; multi-agent; immune algorithm; self-healing technology

0 引言

与用户直接进行双向互动的智能配电网^[1]的供电方式呈辐射状, 各种分布式可再生能源的接入使系统中电源格局呈现多元化, 系统的任何异常运行都会对供电质量造成影响, 自愈技术犹如配电网的免疫系统, 是配电网精细化、智能化的具体体现, 在保证配电网安全、稳定运行方面具有不可忽视的作用。

1 智能配电网自愈技术研究现状

1.1 自愈评价标准

对智能配电网^[2]自愈系统进行评价是研究智能配电网自愈技术的关键。自愈成功率和自愈速率是衡量智能配电网自愈能力的两个重要标准。

1.1.1 自愈成功率

用户在一个使用期内成功完成自愈的次数与故障的恢复次数之间的比值称为自愈的成功率, 它直接涉及到供电的可靠与否, 是智能配电网^[3]在发生故障后迅速恢复正常运行方式能力的重要体现, 毋庸置疑, 自愈能力随着自愈成功率的提高而相应地得到增强。

1.1.2 自愈速率

电网中由停电时间的长短而造成的危害程度将设备分为三类负荷, 智能配电网的自愈速率的快慢直接影响到各类负荷能否正常运行。自愈速率大的电网成本必然会相应增加, 这其中涉及到技术经济方面的权衡, 要在保证各类负荷的需求及电网经济性指标的前提下, 选取相应的自愈速率。

1.2 自愈系统的核心技术

1.2.1 状态评估

当前的配电网是通过供电能力及电网架构两方面进行状态评估, 而未来的智能配电网^[4]的状态评估涉及到设备状态、运行状态、脆弱性以及风险等方面, 这是由其本身的复杂性而决定的。设备状态的好坏决定了配电网供电的可靠性及抵御风险

收稿日期: 2015-08-25; 修回日期: 2015-09-27。

基金项目: 吉林省教育厅项目(2014317); 吉林省发改委项目(20131188-31); 长春市科技局项目(2014116)。

作者简介: 纪秀(1981-), 男, 吉林磐石人, 讲师, 硕士, 主要从事智能电网技术、人工智能方向的研究。

的能力，并为将来的故障及老化的趋势提供参考依据。运行状态评估通过分析电网运行方式及运行参数来为自愈决策提供参考。脆弱性评估侧重于事故预防，由脆弱性的类型及严重程度来指定特定的保护措施，反映了应对突发事件的敏感程度以及可能带来的损失。风险评估主要描述电网布局以及气候所给设备带来的风险，因智能配电网结构复杂，故需进行风险的定量评估以及管理工作。

1.2.2 快速仿真与模拟

作为智能配电网自愈系统的核心技术，DFSM（配电网快速仿真、模拟技术）由大量对配电网进行实时监测、分析的软件构成，为分布式系统，这其中包括了潮流计算、负荷预测以及状态分析、评估等部分，支持故障隔离、无功电压调整以及多馈线网络重构等功能。

2 多 Agent 自愈技术

2.1 技术特点

多 Agent^[5]系统，很好地解决了单个代理无法完成全局目标的弊端以及任务学习、决策支持等方面的局限性，且具有与周围环境进行互动的特性，各代理分工不同，由同一语言进行通信，很好地解决了各代理间决策的冲突问题。作为一种处理分布式系统问题的新方法，多 Agent^[6]技术在诸多领域都得到了广泛的应用。多 Agent 结构如图 1 所示。

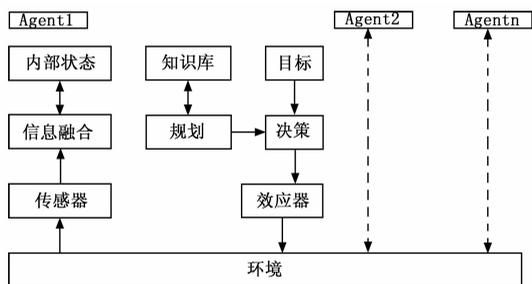


图 1 多 Agent 结构

2.2 控制流程分析

该系统包括三部分，各部分的不同响应时间级别由网络的复杂程度来决定，作为物理层的系统层主要负责搜集电网实时状态数据并发送控制命令到系统层，此外还将信息与其他代理共享，发送范例管理代理的控制信号，而范例管理代理则保存并转发控制代理的信息。快速仿真与决策支持代理将可能产生的故障进行可靠性以及后果分析，最后将异常运行状态下的数据发送到控制代理。控制代理完成电网的优化控制工作，并将最终数据发送至协调层代理，可视化代理负责提供显示平台来统一显示系统所有信息。基于多 Agent 自愈系统结构如图 2 所示。

3 基于多 Agent 免疫算法的智能配电网自愈系统搭建

用最短的时限完成判断、定位、隔离故障区^[7]并恢复送电是智能配电网实现自愈的根本目的，为此，需利用相应的数学模型及控制理论来建立电网在各种运行工况下的判别算法，并权衡电能质量、经济评价及用户服务评价等各项指标来实现配电网的优化运行以及自愈的目的。本文以故障检测、隔离及网络重构的智能配电网自愈^[8-9]关键技术为出发点来搭建基于多

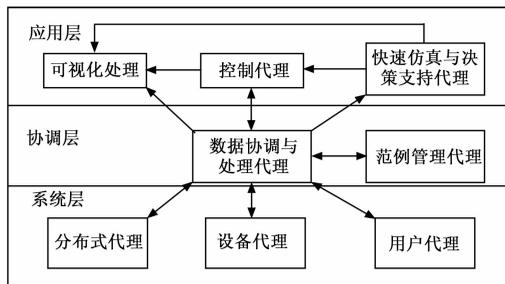


图 2 基于多 Agent 自愈系统结构

Agent 免疫算法的智能配电网自愈系统。

3.1 故障检测

故障检测部分由 Agent 模块构成，分别执行数据采集、状态检测以及推理分析功能，其结构如图 3 所示。

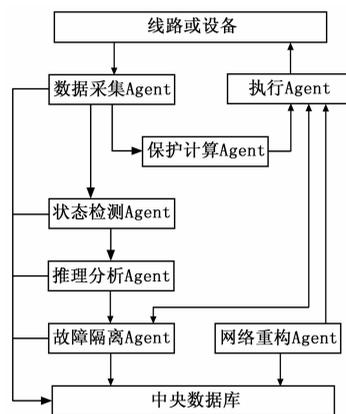


图 3 故障检测结构

数据采集接口 Agent 用于系统和外部环境的交互，利用传感器接口获取 SCADA 来传递智能配电网的状态参量。数据采集 Agent 将参数发送给状态检测 Agent，对比数据库中的状态参量数据来计算出差值，若差值在系统规定的阈值范围内则为正常状态，否则将该参量传入推理分析 Agent 模块。推理分析 Agent 模块负责实现知识表示以及拓扑分析功能，相应的知识库中存有电网全部的一次、二次设备属性及电网详细的拓扑结构，在推理分析模块中设置的故障分析模块内部含有有关故障的节点算法，利用知识库中数据将状态检测 Agent 模块发送来的数据进行计算，并采取相应的判别方法来定位故障区域。

3.2 故障隔离

此部分功能由执行 Agent 与故障隔离 Agent 共同实现，故障隔离确认由推理分析 Agent 发送来的故障信号之后便进行网络分析，得出故障线路的 Agent 编号，然后将相关信号发给执行 Agent，执行 Agent 收到指令后发送跳闸命令给本地断路器以切断故障线路，并将相关跳闸信息返回故障隔离 Agent，最终实现故障区的隔离。

3.3 网络重构

重构 Agent 的作用是用来实现网络的重构^[10]功能，网络重构 Agent 接收来自推理分析 Agent 的分析指令以及执行 Agent 的故障隔离信息，参考负荷的重要程度为负荷选择相应的线路，进而实现网络拓扑结构的调整。

3.4 多 Agent 免疫算法

为实现智能配电网的全面自愈功能, 本文提出了基于多 Agent 的免疫算法, 该算法通过随机的生成树方式来获得抗体, 并以动态的方式来改变抗原, 利用混合变异的方式来达到抗体变异的效果, 多 Agent 在计算效率方面的突出优势使算法能够快速收敛^[11]。多 Agent 免疫算法利用快速的收敛特性可使故障后自愈方案的获取时间得以保证, 这是有别于其他算法的重要特性。多 Agent 免疫算法流程如图 4 所示。

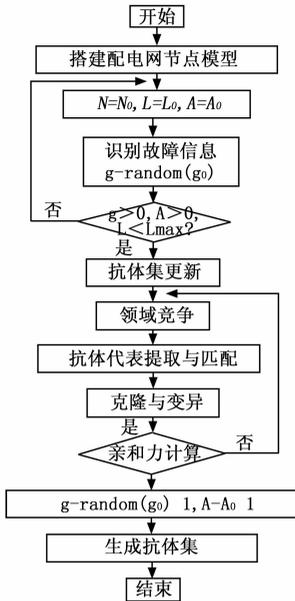


图 4 多 Agent 免疫算法流程

参数配置 将多 Agent 系统种群的数量设定为 N , 抗体的编码长度设定为 L , 种群的进化代数设定为 N_g , 克隆选取抗体的数量设定为 N_s , 增值的倍数设定为 N_b , 免疫^[12]的补给数量为 N_r 。

1) 种群初始化: 各抗体自愈方式都为辐射状, 这是由智能配电网闭环设计及开环运行的特性所决定的, 采取随机生成树方式, 各 Agent 产生相同数量的种群, 随机生成树即随机生成一整数 g , 从馈线开始, 从 A 中添加一支路到 F , 更新 A 到循环代数 g 为止, 因馈线容量的限制所以 g 取值要适当。

2) 亲和度的计算: 抗体以及抗原亲和度计算公式:

$$M = \left[1 - \frac{2 \times Ab1 + Ag1 - Ab2}{n} \right]^a \times f^b \times c$$

等式右边的第一部分衡量抗体自身优良特性, 抗体造成的重复性冲突用 $Ab1$ 来表示, $Ag1$ 代表抗原 Ag 中漏掉的负荷数量, 即负荷总数减去 Ag 中已恢复的负荷数。 $Ab2$ 代表抗体 Ab 含有的负荷总数, a 代表此部分的权重值, 本文将其取 1, 将要优化的目标函数用 f 来表示, 即负荷恢复百分比, b 为此部分的权重值, 本文将其取 0.5, 将越界处置系数用 c 来表示, 对应于抗体恢复方式的潮流在约束范围内时取 1, 否则取 0。

3) 亲和度成熟: 在此过程中, 将聚类竞争的机制引入到免疫算法^[13]中, 以此来避免当算法未成熟时收敛的情况发生。用计算出的坐标长度来决定抗体的相似度, 即在完成抗原识别后还需求出所产生抗体间的长度来使抗体聚类得以实现。抗体 U, V 之间长度计算公式:

$$dis_{UV} = \sqrt{\sum_{i=1}^L (au_i - av_i)^2}$$

抗体经过聚类后还需通过竞争与克隆算法来使优良抗体的比例增加:

$$N_i(k) = \text{round} \left[N \times \frac{F(A_i(k))}{\sum_{j=1}^T F(A_j(k))} \right]$$

由于引入了聚类及竞争克隆的机制, 使 Agent 在计算抗体的匹配度时, 利用构造的部分优良抗体集, 增强了抗体群的优势及多样性, 进而化解了多 Agent 免疫算法在广度、深度间的矛盾, 使算法求解问题的效率得以提高。

与基因重组的优势理论相类似, 本文采取具有良好的部分搜索性能的高斯变异算子以及具有良好的整体收敛特性的柯西变异算子, 使多 Agent 免疫算法得以在很小的范围里发生变异的几率较大, 同时也可使算法不会陷入局部的极值点。

高斯变异公式:

$$u_i = u_i + \left\{ \delta_i \times \exp\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \times N(0,1) + \frac{1}{\sqrt{2}} \times N_i(0,1)\right) \right\} \times N_i(0,1)$$

$N_i(0,1)$ 表示对步长 δ_i 重新生成的正态分布。

柯西变异公式:

$$u_i = u_i + \left\{ \delta_i \times \exp\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \times \eta(0,1) + \frac{1}{\sqrt{2}} \times \eta_i(0,1)\right) \right\} \times \eta_i(0,1)$$

式中, $\eta(0,1)$ 表示以 0 为中心值 1 为比例系数的柯西分布。

4) 免疫更替: 同生物学免疫系统中推陈出新的细胞代谢一样, 为保持 Agent 中抗体适应性, Agent 利用随机方式生成的新抗体^[14]来更替亲和度较差的旧抗体。

3.5 基于多 Agent 免疫算法的智能配电网自愈系统

基于多 Agent 免疫算法的智能配电网自愈系统由规则层、过程层以及物理层构成, 系统如图 5 所示。

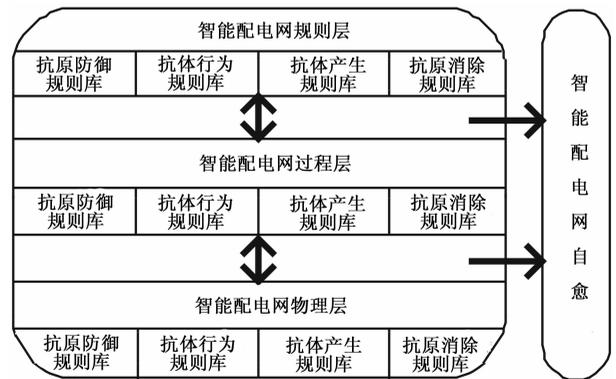


图 5 基于多 Agent 免疫算法的智能配电网自愈系统

自愈过程的实质是智能配电网经过不断的识别、响应、改变来清除各种故障及扰动的过程, 当抗原足够小时就说明系统已经自愈成功, 智能配电网^[15]便进入了安全运行阶段。

4 实验验证及需注意的问题

4.1 实验验证

搭建包括分布式电源及微网系统在内的智能配电网模型, 设置常见的故障类型, 通过本文所搭建的多 Agent 自愈系统来进行自愈实验。智能配电网模型如图 6 所示。

实验中假设网络容量无限大, 仅考虑故障造成微网外部负荷断电这一常见类型, Bus 代表母线, S 代表分布式电源, L

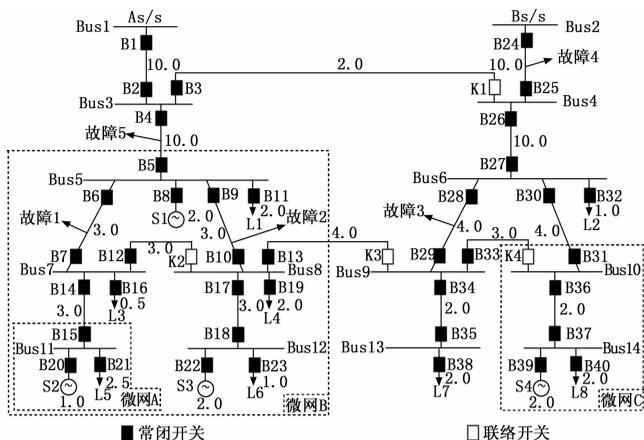


图 6 智能配电网模型

代表负荷，B、K 分别代表常闭与常开开关。当 Agent 检测到失电母线返回的信号后，发出自愈命令到其他相关的 Agent，这其中还包括向故障母线 Agent 询问故障的切除情况以及向就近的微网或分布式 Agent 发出功率请求，微网或分布式电源可在最佳并网点接入，恢复送电。

当故障 3 发生后，母线 Bus9、13 及负荷 L7 失电，此时 Agent 实现自愈有两种方案，一种是闭合 K3 并将 L7 接入微网 B，另一种是闭合 K4 并将 L7 接入微网 C，因 B9、B10 间仅有 3.0 个单位容量的馈线造成过载的原因，故只能闭合 K4，且 CAG 需向 MGAGC 发出断开 Bus10 的命令来满足辐射状拓扑结构。MGAGC 在断开 Bus10 时会因断开 B36 还是 B37 时出现一次以抗体形式进行的竞争，由聚类法则知断开 B36 抗体距 Bus10 较近，故断开 B36 并将此抗体呈至 CAG，至此，闭合 K4 及断开 B36 的自愈方案已存于 CAG 的优良抗体集中，当 3 再次发生故障时，CAG 便直接发出闭合 K4 及断开 B36 的命令。自愈后部分网络如图 7 所示。

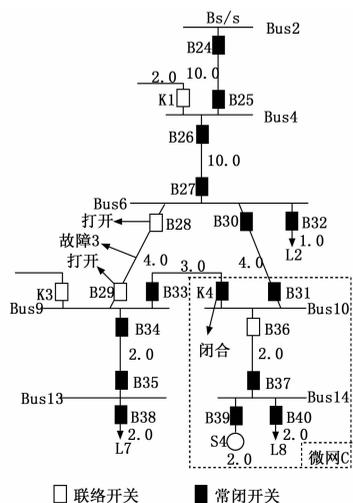


图 7 自愈后网络

4.2 需注意的问题

由实验结果可知，3 发生故障后，B36 断开，K4 闭合，负荷全部恢复送电，系统自愈成功。需要注意的是，许多文献规定自愈时间^[16]需在 3 s 内，但这与整个配电网所有设备协同运作的智能化程度有关，随着国内外对智能配电网自愈技术研

究的不断推进，自愈时限必将会逐步缩短，以求实现配电网不断智能化。另外，本文仅考虑了常见的区外故障时系统^[17]自愈情况，对于区内及区内、外这两种情况下的故障，有文献表明，对于前者多 Agent 免疫算法具有同样很好的自愈效果，但对于后者却效果欠佳，这两种极少发生的故障情况，暂不作本文讨论内容。

5 结语

自愈系统在智能配电网的安全、稳定运行中有着不可估量的作用，在故障发生前通过对电网运行数据的实时获取、分析，进行故障诊断，未雨绸缪，当故障发生后能迅速隔离故障，恢复送电，保证了配电网的运行效率及电能质量。实验证明，本文所提出的基于多 Agent 免疫算法的智能配电网自愈技术，通过随机生成树来变异抗体，动态识别抗原，将计算任务分布到网络中的各 Agent 节点上，充分利用分布式人工智能技术在计算效率上的优势，可以达到算法快速收敛的目的，并且弥补了配电网含有分布式电源情况下自愈能力差的技术缺陷，必将在未来智能配电网的自愈系统中得到广泛应用。

参考文献:

[1] 徐炳垠, 李天友. 智能配电网概述 [J]. 供用电, 2009, 26 (6): 81-84.

[2] 李天友, 徐炳垠. 智能配电网自愈功能与评价指标 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (22): 105-108.

[3] 王成刚, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (2): 10-14.

[4] 徐炳垠, 李天友. 智能配电网与配电自动化 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (17): 38-41.

[5] 余兆荣. 智能配电网技术丛书—配电自动化 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 83-104.

[6] 贾冬黎, 孟晓丽. 智能配电网自愈控制技术体系框架研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 27 (2): 14-18.

[7] 祖友华. 分布式电源并网及其对电网的影响 [D]. 北京: 华北电力大学, 2009.

[8] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (2): 10-14.

[9] 李晓静. 含分布式电源的配电网供电恢复的多 Agent 方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007.

[10] 魏巍, 李兴源, 廖萍. 含分布式电源的电力系统多代理故障恢复新方法 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (3): 89-93.

[11] 杨旭升, 盛万兴, 王孙安. 多 Agent 电网运行决策支持系统体系结构研究 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (3): 89-93.

[12] 钱海. 基于人工免疫的多 Agent 系统及其应用研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.

[13] 尹项根, 汪旻, 张哲. 适应智能电网的有限广域继电保护分区与跳闸策略 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (7): 1-7.

[14] 林霞, 陆于平, 王联合. 分布式发电条件下的多电源故障区域定位新方法 [J]. 电工技术学报, 2008, 23 (11): 139-145, 165.

[15] 熊小伏, 陈星田, 夏莹. 面向智能电网的继电保护系统重构 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (17): 33-37.

[16] 刘莉, 陈雪峰. 智能配电网故障恢复的现状与展望 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (13): 148-154.

[17] 陈海焱, 陈金富. 含分布式电源的配电网潮流计算 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (1): 35-40.