

基于网损最小的配电网多代理复电系统设计

李红伟, 孔 冰, 李 超

(西南石油大学 电气信息学院, 四川 成都 610500)

摘要: 基于多代理技术和 JADE 开发平台, 以配电网重构后的网损最小为目标, 设计了配电网的多代理复电系统。简要叙述了代理及多代理的特征; 重点分析了多代理复电系统的主要复电过程, 包含确定复电总代理、确定停电区域、制定优化复电方案、方案执行; 详细阐述了各代理在复电过程中的作用和行为, 以及采用改进最优流模式法进行重构复电方案的制定过程。各代理可以按照预定步骤逐步实现为停电区域恢复供电。以该复电系统对 33 母线系统部分区域发生故障后的网络进行了优化复电重构, 验证了该多代理复电系统的可行性。

关键词: 配电; 复电系统; 网络重构; 多代理系统; 改进最优流模式法; 优化

中图分类号: TM 762

文献标识码: B

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.04.026

0 引言

配电网不可避免地会发生各种类型的故障, 如果故障后不能及时地恢复供电, 严重情况下可能会造成巨大的经济损失和严重的社会影响。随着我国配电网结构及其运行方式变得越来越复杂, 如何快速而可靠地实现复电重构, 是当前研究的一个热点^[1-4]。电力系统的复电重构, 即故障情况下的自恢复, 是通过改变馈线开关的状态, 将馈线区域的部分或全部停电负载转移到临近负载较低的馈线。在该问题的求解过程中, 需要考虑如扩大复电区域、减少开关操作、最大限度地减少复电时间、保持系统的辐射状架构等诸多因素, 最终所得到的解是一系列开关操作。现阶段, 对该问题的研究方法大致有数学优化方法、启发式搜索方法、人工智能方法以及多代理技术等^[5-12]。

文献[9]根据配电网的分层结构特点, 建立了三层多代理故障恢复模型, 采用分阶段故障恢复, 优先考虑用最近的电源恢复最多的停电负荷, 从而减小故障影响范围。文献[10]设计的环网的多代理系统(MAS)中, 没有设置中央控制代理, 各代理仅与其邻居代理通信, 减少了信息交互的负担。文献[11]提出了一种基于多代理技术的黑启动恢复方法, 使得电网或系统在出现故障后, 能不依靠其他网络实现整个系统的电力恢复。文献[12]针对船舶电力系统, 讨论并提出了用以实现电力系统重构的多代理系统, 能在保障高优先级负荷供电的前提下, 尽可能地恢复整个系统的供电, 为配电系统的供电恢复提供了一个思路。

MAS 应用于配电网复电有其独特的优势, 相关的研究都还有待深化。本文基于多代理技术和 JADE 开发平台, 以配电网重构后的网损最小为目标, 设计了配电网的多代理复电系统, 分析了该系统完成配电网故障重构的原理及过程; 以 33 母线系统为对象, 通过模拟部分区域故障检验了该多代理复电系统的运行情况, 验证了其可行性。

1 MAS

1.1 MAS 特点

代理是运行于动态环境中的实体, 它具有智能性及自主性, 能够根据所获得的信息实现对问题的规划和求解。MAS 是由多个代理所组成的整体系统, 其通过各代理的自主性动作或代理之间的相互合作完成对问题的求解^[13-14]。MAS 中的各代理依然具有独立性和自治性, 其目标和行为不受其他代理干扰, 并通过竞争或协商等手段协调解决目标和行为之间的矛盾和冲突^[15]。

MAS 具有分布式结构, 系统中的各个代理可以协同工作。将 MAS 应用到配电网重构中, 能够减轻当前集中控制系统的计算负担, 也能够使得故障的处理更加灵活。

1.2 MAS 功能

根据 MAS 的特点, 基于 JADE 开发平台来设计配电网多代理复电系统。JADE 包括一个代理赖以生存的运行环境、开发代理应用的类库及用来调试和配置的一套图形化工具, 为分布式多代理的应用提供了基础设施和最基本的服务。利用 JADE 平台所提供的各种工具, 可控制各代理的工作状态, 对代理实现多种操作, 并实时监测各代理的交互状况等。本文所设计的多代理复电系统以分散的方式运行于 JADE 平台上, 其总目标是: 当实际的配电系统发生故障并导致部分区域停电时, 该多代理复电系统能够快速制定出优化的复电重构方案, 并据此方案

收稿日期: 2013-05-29; 修回日期: 2014-02-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51101107); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013CB228203)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51101107) and the National Key Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB228203)

控制相应的开关动作,实现复电。

该多代理复电系统含多个母线代理(BusAgent)和 1 个辅助代理(AssistantAgent),各代理根据各自的运行规则执行相应的功能。辅助代理仅是一个软件实体,在实际的配电网络中没有实物与之对应,其主要任务和功能是获取实际配电系统的参数,为其他母线代理提供诸如支线号、功率损耗等各种查询服务。多代理复电系统中的各母线代理与实际配电网络的各母线节点一一对应,其主要目标是在配电网络出现故障时,根据复电优化算法,制定一个网损最小的复电重构方案;代理通过彼此之间的交互和协商,根据最优方案操作相应的开关动作,从而为停电区域恢复供电。

该复电系统中的任何一个母线代理都可以调用复电优化算法,从而制定出最优的复电重构方案。但是每次故障时,仅有一个代理调用复电优化算法,具体由哪条母线的代理执行该动作,主要是取决于实际网络的故障范围。一旦发生了故障,处于故障区域的母线代理中就会自动产生一个复电总代理,由该代理制定复电方案并主导复电过程。所以,该复电系统能够很灵活地处理配电网络可能出现的多种故障情况。

2 MAS 复电分析

当配电系统发生故障并导致部分区域停电时,各代理根据复电总目标,通过彼此间的协作,共同制定复电方案。整个复电流程大致可以分为确定复电总代理、确定停电区域、制定优化复电方案、方案执行 4 个部分。图 1 为配电系统发生故障时复电的流程图。

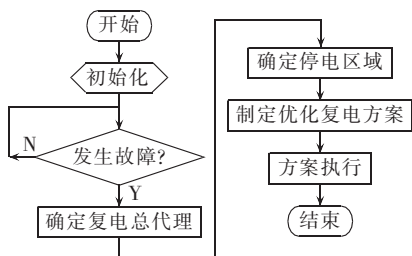


图 1 多代理复电流程图

Fig.1 Flowchart of multi-agent power restoration

具体分析如下。

a. 程序初始化。程序启动时,多代理复电系统自动进行初始化。辅助代理自动获取配电网络参数,准备向母线代理提供查询服务;各母线代理向辅助代理请求查询服务,获得其邻居母线代理(处于其前面和后面的母线代理)的信息。

b. 确定复电总代理。系统发生故障后,需要确定一个复电总代理,由它主导复电过程。一旦检测到停电,各母线代理就会询问其邻居代理是否停

电。邻居代理接收到询问消息后,会反馈自身母线上的故障标志的值(“假”表示未停电,“真”表示已停电)。各母线代理即根据其邻居代理的故障标志的值判定自身是否是复电总代理;若其前面的母线代理回复“假”,而其后面的母线代理回复“真”,则可以确定当前母线代理是复电总代理;否则不是复电总代理。

c. 确定停电区域。确定了复电总代理后,该代理需要确定停电区域,从而准备复电操作,具体实现过程如图 2 所示。若 A 为复电总代理,A 会向其后面的已经停电的邻居代理 B 发送一条包含复电总代理信息的通知。B 接收到该通知后,向 A 回复一条包含自身故障状况的信息,表示其已经获得了复电总代理的信息。该信息主要包括两部分内容:故障母线的编号,用于帮助复电总代理确定停电区域;母线发生故障的时间,便于生成故障记录。然后,B 会向其后面的已经停电的邻居代理 C 转发它接收到的通知。C 接收到 B 的通知后,向 A 回复一条包含自身故障状况的信息,表示其已经获得了复电总代理的信息。然后,母线代理 C 及其后面的停电的母线代理会将该通知转发下去,直到停电区域内的所有母线代理都已经获得了复电总代理的信息。复电总代理 A 根据其接收到的来自于各停电母线代理的回复信息确定停电区域。

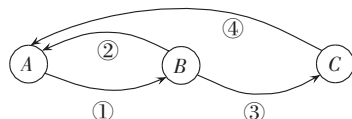


图 2 确定停电区域示意图

Fig.2 Schematic diagram of blackout area determination

d. 制定优化复电方案。在复电总代理确定了停电区域的范围之后,调用复电优化算法,本系统采用改进的最优流模式法来确定网损最小的优化复电方案。

e. 方案执行。复电总代理根据制定的复电重构方案,分别向特定的母线代理发送命令,要求其操作相应支线上的开关,从而更改配电网络结构,以最优的方式为停电区域恢复电力供应。

从执行时间而言,一般要求从故障发生到制定出复电重构方案的时间为数秒到数十秒,在本文的 MAS 中,各代理之间进行一次信息交互的时间约为几微秒,复电总代理调用复电优化算法制定复电方案的时间一般为数十到数百微秒(跟硬件有关),能满足实际系统要求。

3 优化复电方案

3.1 改进的最优流模式算法

最优流模式法^[6]最早由 Darish Shirmohammadi

等人提出,其基本思想是:首先闭合配电网中所有的联络开关形成一个弱环网,然后将网络负荷利用各节点的电压转换为节点电流注入,通过潮流计算得到该弱网环的潮流分布,称之为最优流模式,即将各个支路的阻抗仅以电阻表示,在满足 KCL 和 KVL 的条件下计算得到环网支路的电流分布,此时环网网损最小,最后打开最优流模式中流过电流最小的支路上的开关把环网变为辐射网。

本文采用了文献[17]的改进最优流模式算法实现网络重构分析,该算法在文献[16]提出的最优流模式法上做了以下改进。

a. 以启发式规则确定联络开关的闭合顺序。每次闭合一个联络开关形成只含一个环网的网络,然后打开环网上的一个开关使网络恢复为辐射网。启发式规则认为联络开关两端电压降越大,闭合该开关后所引起的网损减少量越大。在确定联络开关电压降后,就可以忽略一些电压降太小的联络开关,这样减少了不必要的开关操作。

b. 打开环网支路上开关的判据。首先计算打开环网上各个支路开关后所引起的网损变化,然后选择

打开造成网损增量最小且满足电流约束的支路开关。

通过如上改进,减少了不必要的开关操作,极大地降低了计算量。与此同时,将网损变化量作为开关操作的判据,为开关动作提供了理论基础,保证了结果的最优性。重构方案的具体执行过程见图 3。

3.2 网损计算

最优流模式实现了配电网网损最小的电流分布,但是为了保证配电网的辐射状运行,就必须打开环网的一条支路上的开关 L ,这样就必然会造成网损的变化 ΔP_{loss} 。开关 L 必须满足开关打开后造成的网损增加量最小,这样打开 L 后的配电网的网损才能更接近最优流模式。基于支路交换算法的配电网的重构中,当联络开关 L 与环网支路 k 上的开关发生支路交换后,负荷将发生转移,在此过程中,一般可以认为最佳负荷转移量与电压无关^[18-19],因此在计算开关 L 打开前后的网损变化量的过程中可以忽略节点电压变化的影响,即近似认为辐射支路的网损不变,只需要计算环网的网损影响,从而降低了计算量。

设环网支路 k 上的首端功率为 $P_k + jQ_k$,电阻为

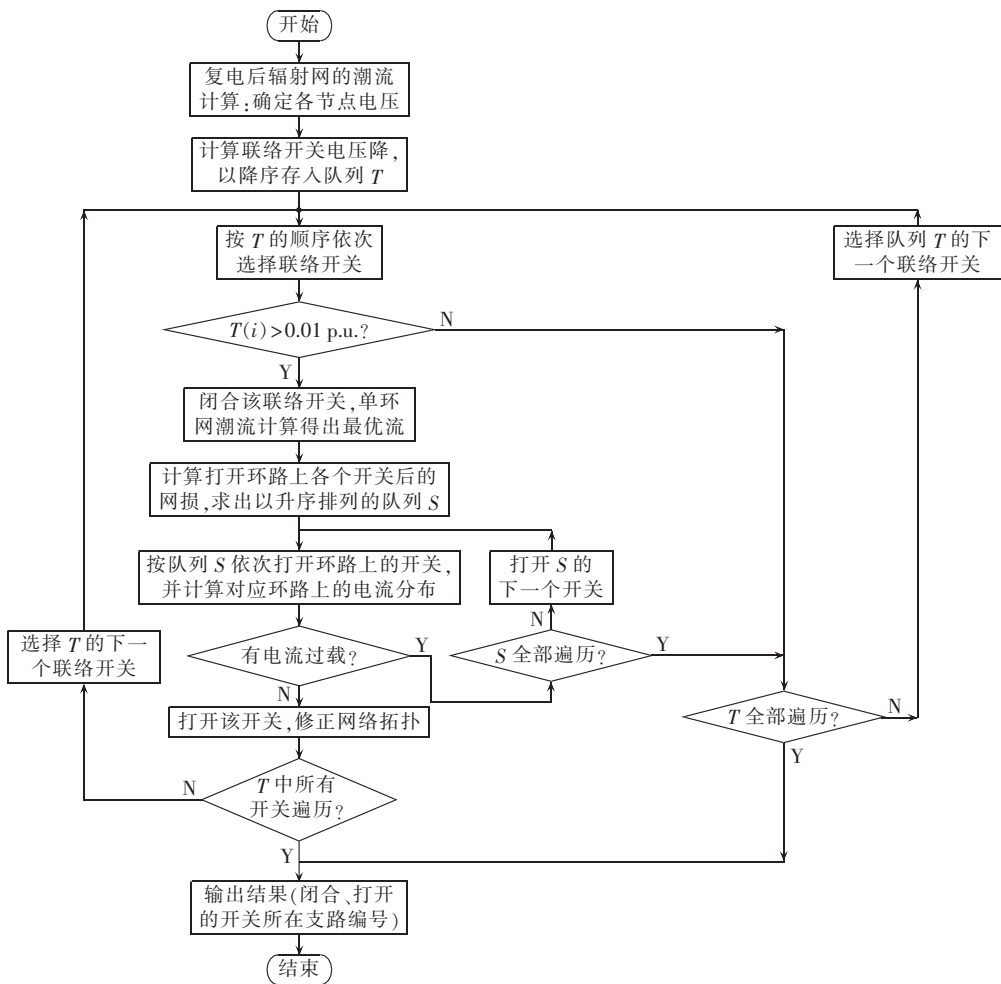


图 3 重构方案流程图
Fig.3 Flowchart of reconstruction scheme

R_k , 则环网支路上的网损为:

$$P_{loss} = \sum_{k \in b_{loop}} (P_k^2 + Q_k^2) R_k / U_k^2 \tag{1}$$

其中, b_{loop} 为环网上所有支路的集合; U_k 为环网支路 k 首端节点的电压幅值。

打开开关 L 后环网支路的功率变为:

$$P'_k = P_k - P_L \quad k \in b_{loop} \tag{2}$$

$$Q'_k = Q_k - Q_L \quad k \in b_{loop} \tag{3}$$

其中, P_L 、 Q_L 分别为开关 L 所在支路的有功、无功功率。

环网支路的网损变为:

$$P_{loss}^L = \sum_{k \in b_{loop}} R_k [(P'_k)^2 + (Q'_k)^2] / U_k^2 \tag{4}$$

则有:

$$\Delta P_{loss}^L = P_{loss}^L - P_{loss} = -2 \left[P_L \sum_{k \in b_{loop}} (R_k P_k / U_k^2) + Q_L \sum_{k \in b_{loop}} (R_k Q_k / U_k^2) \right] + (P_L^2 + Q_L^2) \sum_{k \in b_{loop}} R_k U_k \tag{5}$$

其中, P_{loss}^L 为开关 L 打开后的网损; ΔP_{loss}^L 为开关 L 打开后的环网网损变化量。

在本文的重构方案中, 采用了一种基于节点注入功率的潮流计算方法计算潮流, 这种基于回路分析法实现的潮流算法为实数运算, 具有计算速度快、收敛性好等优点^[20]。该潮流计算方法可直接计算出各支路的功率分布、功率损耗, 应用于上述重构复电算法时, 不需要专门计算各支路功率, 可大幅降低计算量, 提高计算速度。

4 仿真案例

将本文设计的多代理复电系统应用于求解 33 母线系统的故障复电问题, 通过设定故障点以验证该系统的有效性。图 4 为 33 母线测试系统, 该系统中共有 33 条母线 ($B_0 - B_{32}$)、32 条支线 (1—32)、5 条联络线 (33—37)。在图 4 所示的配电网络的每条母线上都设置一个母线代理, 设该系统中各支线和联络线上都有开关, 且这些开关的动作由相应支线和联络线的首端母线代理控制。当系统发生故障后, 即是通过各母线代理之间的协调与合作, 控制各支线和联络线上的开关动作, 共同为停电区域恢复供电。

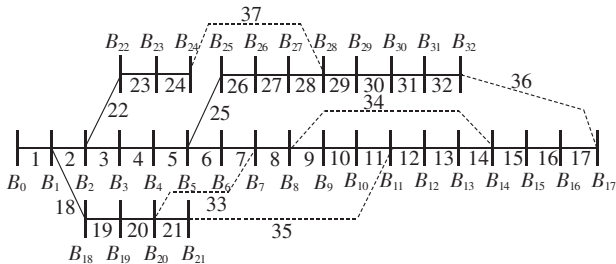


图 4 33 母线测试系统

Fig.4 33-bus test system

4.1 重构复电方案

本文仅介绍模拟图 4 中 33 母线系统支线 11 发生故障时的复电重构情况。当支线 11 发生故障后, 支线 11 上的开关将断开, 这将导致支线 12—17 停

电, 从而母线 $B_{11} - B_{17}$ 停电。母线代理 BusAgent11—BusAgent17 一旦检测到该故障, 就会启动复电程序, 试图为这些停电的区域恢复供电。本文模拟母线 $B_{11} - B_{17}$ 停电的方法, 是通过在 JADE 平台上新建一个虚拟代理, 由该虚拟代理向 MAS 中的母线代理 BusAgent11—BusAgent17 各发送一条故障信息, 母线代理 BusAgent11—BusAgent17 接收到故障信息后, 则判定相应母线发生故障, 并将其故障标志的值设为“真”。

当母线 $B_{11} - B_{17}$ 停电后, 首先会在母线代理 BusAgent11—BusAgent17 中产生一个复电总代理 BusAgent11。复电总代理确定停电区域之后, 根据优化复电方案, 可以分别得到需要断开和闭合的开关所在的位置 (即线路编号), 如表 1 所示。在向辅助代理请求查询服务后, 复电总代理会分别得到操作以上开关动作的母线代理信息。最后, 复电总代理会分别向这些母线代理发送 REQUEST 信息, 要求其操作相应的支路开关。

表 1 优化复电方案
Tab.1 Optimal power restoration scheme

开关操作	开关位置	母线代理
打开	7, 14, 32, 28	BusAgent6, BusAgent13, BusAgent31, BusAgent27
		BusAgent7, BusAgent11, BusAgent17, BusAgent24,
闭合	33, 35, 36, 37, 34, 12, 13, 15, 16, 17	BusAgent8, BusAgent11, BusAgent12, BusAgent14, BusAgent15, BusAgent16

复电总代理得到表 1 的开关操作方案后, 根据该方案指导各母线代理控制各开关动作, 从而为停电的区域恢复供电。根据最优复电方案, 网络重构后的结构见图 5。与未优化的复电方案相比, 利用本文的复电方案进行复电重构后的网损大幅减小, 见表 2。

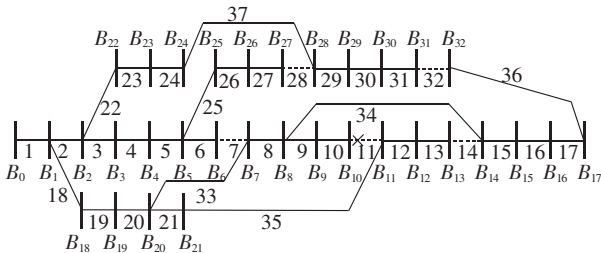


图 5 最优复电结构图

Fig.5 Structure of optimal power restoration

表 2 网损比较

Tab.2 Comparison of grid loss

方案	网损 / kW
方案①: 闭合联络开关 34	197.76
方案②: 闭合联络开关 35	157.06
方案③: 闭合联络开关 36	237.33
方案④: 优化重构复电方案	142.01

4.2 应用 MAS 的复电过程

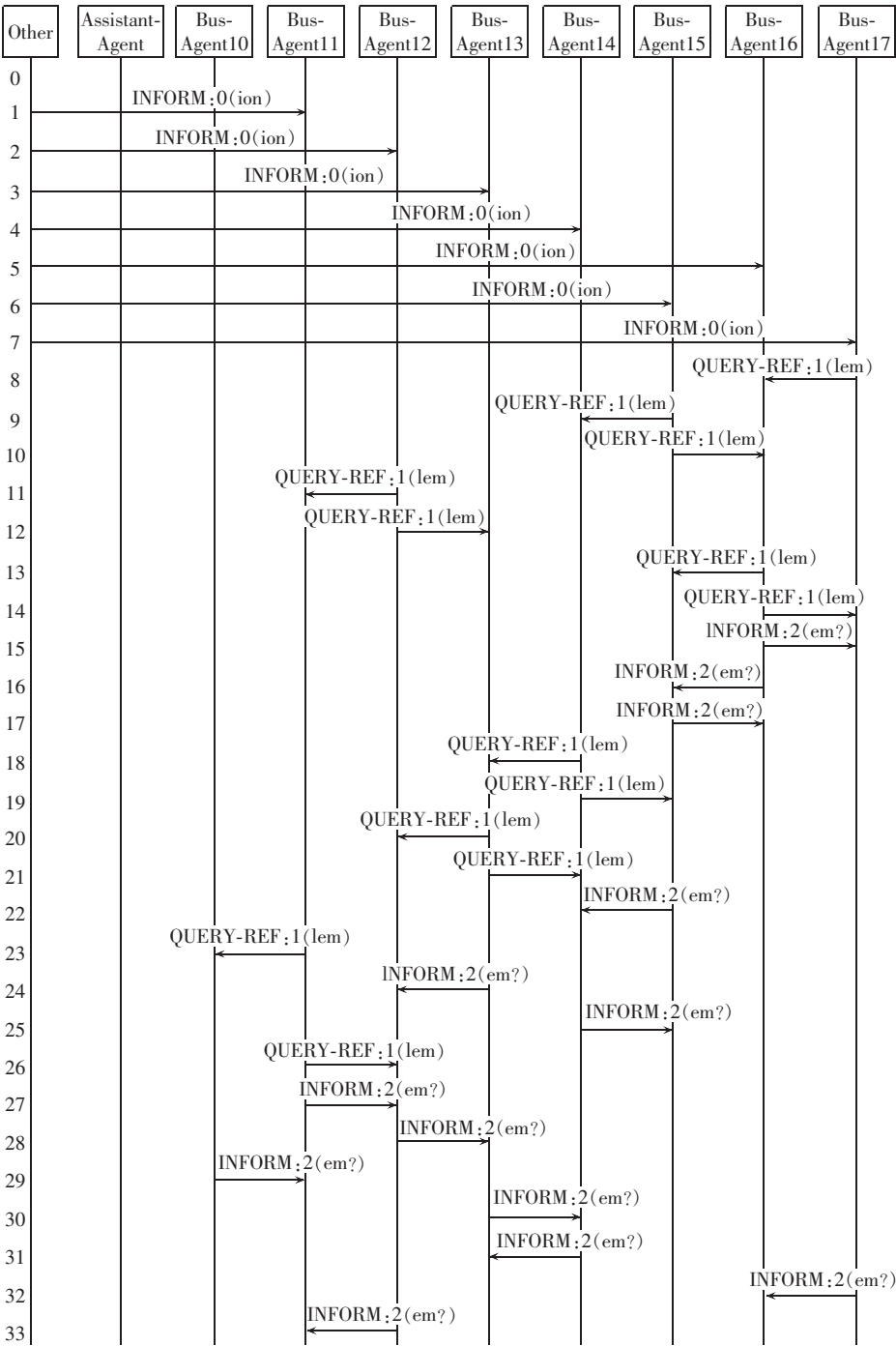
图 6 由 JADE 平台中的 SnifferAgent 监测得到,

表示的是复电重构过程中各代理之间的交互情况。图中每一列代表一个代理;每条带箭头的直线表示一次代理之间的通信,表示信息由发送者指向接收者。为更加清晰地展示结果,图中未列出全部的代理,只列出母线代理 BusAgent10—BusAgent17 以及辅助代理 (AssistantAgent) 的信息交互情况。在图 6(a)、6(b)中,第 2 列到第 10 列分别代表辅助代理、母线代理 BusAgent10—BusAgent17,图中各交互信息所表示的具体含义如下。

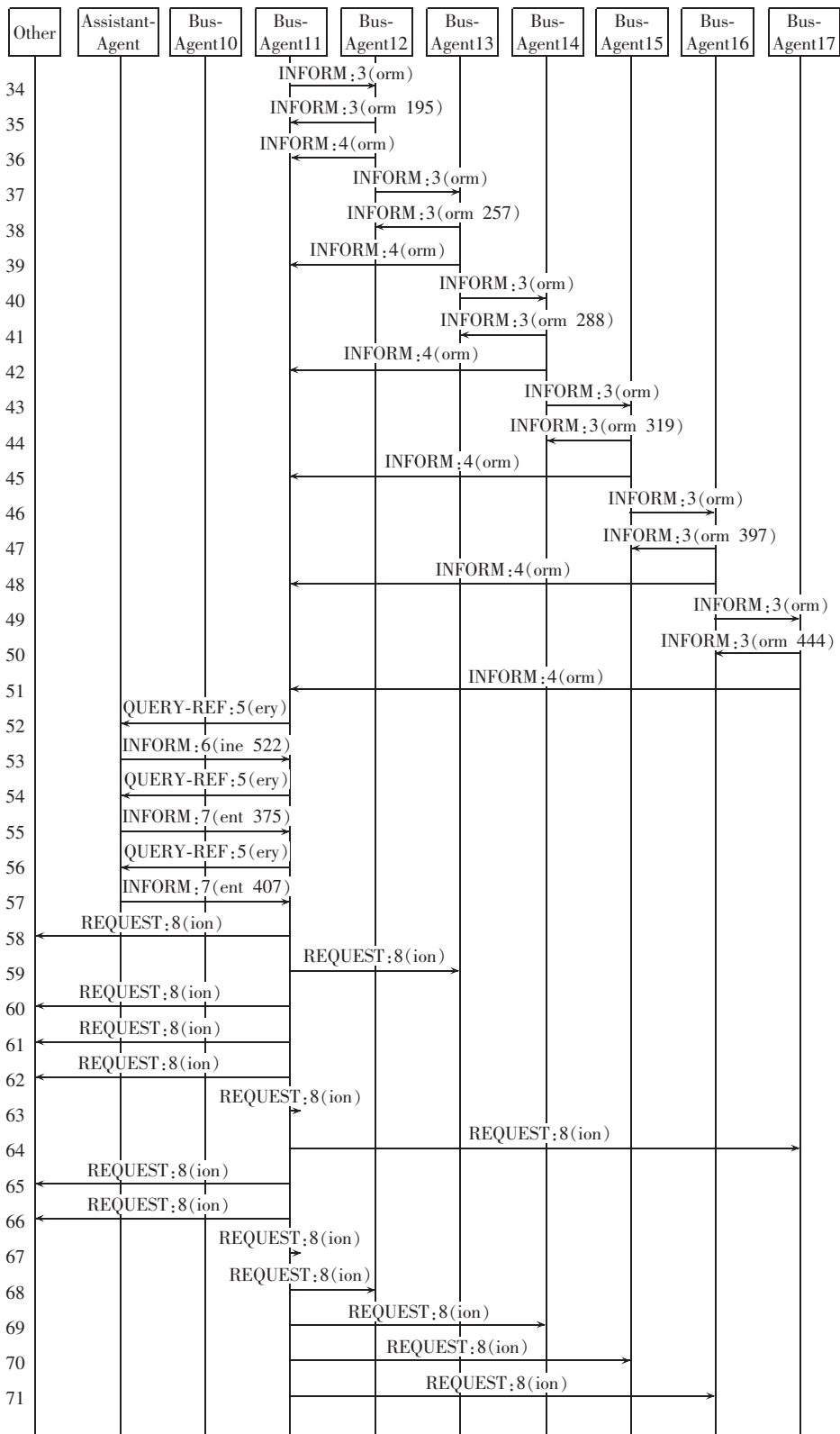
a. 1—7 行。母线代理 BusAgent11—BusAgent17 接收到来自于虚拟代理的 INFORM 类型的故障信

息,模拟母线 B_{11} — B_{17} 停电。
b. 8—33 行。各停电的母线代理分别向其邻居代理发送类型为 QUERY-REF 的信息,询问其是否停电;邻居代理接收到询问后,回复的类型为 INFORM 的信息。各母线代理据此判定自身是否成为复电总代理。

c. 34—36 行。BusAgent11 成为复电总代理,它向 BusAgent12 发送一条包含复电总代理信息的 INFORM 类型的通知;BusAgent12 接收到该通知后,回复一条 INFORM 类型的信息表示确认;BusAgent12 向复电总代理发送一条 INFORM 类型的信息,报告



(a) 各代理交互顺序(1)



(b) 各代理交互顺序(2)

图 6 各代理的交互顺序图

Fig.6 Schematic diagram of agent interaction sequence

其故障情况。

d. 37—39 行。BusAgent12 将接收到的通知以 INFORM 信息的形式转发给 BusAgent13;BusAgent13 接收到通知后回复 INFORM 类型的确认信息;

BusAgent13 向复电总代理发送 INFORM 类型的信息,报告其故障状态。

e. 40—51 行。各代理转发通知、向复电总代理报告其故障状态。

f. 52、53 行。复电总代理(BusAgent11)向辅助代理发送 QUERY-REF 信息,请求查询所有处于停电区域中的支线;辅助代理查询完毕后,将结果以 INFORM 信息的形式反馈给 BusAgent11。

g. 54、55 行。复电总代理根据优化重构算法得到最优复电方案后,向辅助代理请求查询操作相应支线开关断开的母线代理的信息;辅助代理完成查询后,将结果反馈给复电总代理。

h. 56、57 行。复电总代理向辅助代理请求查询操作相应支线开关闭合的母线代理的信息;辅助代理完成查询后,将结果反馈给复电总代理。

i. 58—71 行。复电总代理向相应的母线代理发送 REQUEST 信息,要求其断开或者闭合相应的支路开关。其中,第 63、67 行分别表示复电总代理(BusAgent11)闭合支线 35 和 12 上的开关。

5 结论

本文基于多代理技术,利用 JADE 开发平台,设计了一个配电网多代理复电系统;通过模拟 33 母线系统部分区域故障,验证了该多代理复电系统的可行性和有效性。该多代理复电系统中的各代理分布于配电网各母线节点上,当配电网故障时,停电区域中会确定一个复电总代理。该复电总代理根据复电优化算法得到一个最优的复电方案并指导方案的实施。与传统集中式复电重构系统相比,该多代理复电系统的分布式结构能减轻系统的信息交互负担、简化系统结构、增强系统鲁棒性,为配电网的复电重构提供了一种新的途径。多代理系统采用分布式结构,可扩展性强;系统中各代理分布于配电网中,通过彼此间的协调动作共同实现复电重构,避免了对某个或某些代理的完全依赖,使得故障的处理更加灵活。将多代理技术应用于配电网复电重构,在提高配电网的供电可靠性、提升配电网的整体自动化水平、促进智能配电网的建设等方面都具有相当重要的现实意义和十分广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 王平,余昆,李振坤,等.采用多代理技术提高高压配电网的供电可靠性[J].中国电机工程学报,2009,29(增刊):50-53.
WANG Ping,YU Kun,LI Zhenkun,et al. The use of multi-agent technology to improve the reliability of high voltage distribution network power supply[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(Supplement):50-53.
- [2] 鲁顺,高立群,王珂,等.莫斯科大停电分析及启示[J].继电器,2006,34(16):27-31.
LU Shun,GAO Liqun,WANG Ke,et al. The Moscow blackout analysis and revelation[J]. Relay,2006,34(16):27-31.
- [3] 郑兰,别朝红,王秀丽.一种快速启发性配电网故障恢复算法[J].电力自动化设备,2004,24(2):16-19.
ZHENG Lan,BIE Zhaohong,WANG Xiuli. A fast heuristic service restoration method for distribution network[J]. Electric Power

- Automation Equipment,2004,24(2):16-19.
- [4] 方兴,郭志忠,蔡中勤.基于时间周期的配电网动态重构[J].电力自动化设备,2003,23(12):32-34.
FANG Xing,GUO Zhizhong,CAI Zhongqin. Distribution network dynamic reconfiguration based on time-interval[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(12):32-34.
- [5] 冯树海.配电系统网络重构方法研究[J].电力自动化设备,2002,22(5):13-15.
FENG Shuhai. Study on feeder reconfiguration methods in distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment,2002,22(5):13-15.
- [6] 李飞,邱正美,马丽,等.配电网重构算法综述[J].电网与清洁能源,2011,27(12):76-79.
LI Fei,QIU Zhengmei,MA Li,et al. Overview on algorithms of distribution network reconfiguration[J]. Power System and Clean Energy,2011,27(12):76-79.
- [7] 欧帝宏,陈皓勇,荆朝霞.基于协同进化算法的配电网重构方案[J].电力自动化设备,2012,32(7):108-113.
OU Dihong,CHEN Haoyong,JING Zhaoxia. Distribution network reconfiguration based on co-evolution algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):108-113.
- [8] 吴登国,李晓明.基于极限学习机的配电网重构[J].电力自动化设备,2013,33(2):47-52.
WU Dengguo,LI Xiaoming. Distribution grid reconfiguration based on extreme learning machine[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(2):47-52.
- [9] 丁施尹,刘明波,谢敏,等.应用多代理技术求解高压配电网故障恢复问题[J].电力系统保护与控制,2012,40(9):54-60.
DING Shiyin,LIU Mingbo,XIE Min,et al. A multi-agent approach to fault restoration in high voltage distribution networks[J]. Power System Protection and Control,2012,40(9):54-60.
- [10] HUANG Kai,SRIVASTAVA S K,CARTES D A,et al. Intelligent Agents applied to reconfiguration of mesh structured power systems[C]//International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems,2007. ISAPT 2007. Toki Messe,Niigata, Japan:[s.n.],2007:1-7.
- [11] 魏巍,李兴源,廖萍,等.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.
WEI Wei,LI Xingyuan,LIAO Ping,et al. A new multi-agent fault restoration method for power system with distribution generations[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(3):89-93.
- [12] 黎恒恒,孙海顺,文劲宇,等.用于舰船电力系统重构的多代理系统设计[J].中国电机工程学报,2011,31(10):81-87.
LI Hengxuan,SUN Haishun,WEN Jinyu,et al. Design of a multi-agent system for shipboard power system reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(10):81-87.
- [13] 孔冰,赵泽茂,李红伟.基于多代理技术的配电网复电技术[J].电气应用,2013,32(7):28-31.
KONG Bing,ZHAO Zemaoli,LI Hongwei. Distribution system service restoration based on multi-agent technology[J]. Electrotechnical Application,2013,32(7):28-31.
- [14] 李振坤,陈星莺,赵波,等.配电网动态重构的多代理协调优化方法[J].中国电机工程学报,2008,28(34):72-79.
LI Zhenkun,CHEN Xingying,ZHAO Bo,et al. Dynamic reconfiguration of the distribution network based on multi-agent systems[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(34):72-79.
- [15] 于卫红.基于 JADE 平台的多 Agent 系统开发技术[M].北京:国防工业出版社,2011:36-72.
- [16] DARIUSH S,HONG H W. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line loss reduction[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1989,14(2):1492-1498.

(下转第 167 页 continued on page 167)

大学,2005.

HE Zhiqiang. Parameters tuning of PID controller and its application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.

[20] 潘立登,潘仰东. 先进控制系统应用与维护[M]. 北京:中国电力出版社,2010:263-265.

[21] SZECHTMAN M, WESS T, THIO C V. A benchmark model for HVDC system studies[C]//International Conference on AC and DC Power Transmission. London, England: [s.n.], 1991:375-378.

[22] 黄忠霖. 控制系统 MATLAB 计算及仿真[M]. 北京:国防工业出版社,2004:223-224.

作者简介:



曾 果

布式发电等研究工作。

曾 果(1987-),男,四川南充人,硕士研究生,主要研究方向为高压直流输电及电力系统稳定性控制(E-mail:garfield1236@163.com);

李兴源(1945-),男,四川宜宾人,教授,博士研究生导师,IEEE 高级会员,长期从事

高压直流输电、电力系统稳定性与控制、分

Design of IMC-PID controller based on internal model control theory for HVDC control system

ZENG Guo¹, LI Xingyuan¹, DUAN Yi²

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Leshan Power Supply Bureau, Sichuan Electric Power Company, Leshan 614000, China)

Abstract: The superiority of IMC (Internal Model Control) is analyzed and the transfer function of HVDC control system is deduced. An IMC-PID controller based on IMC theory is designed for HVDC control system. Its performance is evaluated by ISE (Integral of Square values of Errors) and its robustness is deduced by M values, both of which are applied in the parameter setting for IMC-PID controller. The benchmark model is built with MATLAB for digital simulation and the simulative results illustrate that the system has excellent dynamic performance and keeps stable when system parameters change within a certain range, which proves the feasibility and effectiveness of the proposed design method.

Key words: HVDC power transmission; internal model control; IMC-PID; computer simulation; controller; setting

(上接第 161 页 continued from page 161)

[17] 邓佑满,张伯明,相年德. 配电网重构的改进最优流模式算法[J]. 电网技术,1995,19(7):47-50.

DENG Youman, ZHANG Boming, XIANG Niande. An improved optimal flow pattern algorithm for distribution network reconfiguration[J]. Power System Technology, 1995, 19(7):47-50.

[18] 张栋,张刘春,傅正财. 配电网重构的快速支路交换算法[J]. 电网技术,2005,29(5):82-85.

ZHANG Dong, ZHANG Liuchun, FU Zhengcai. A fast branch exchange algorithm for distribution network reconfiguration[J]. Power System Technology, 2005, 29(5):82-85.

[19] 王守相,王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京:高等教育出版社,2005:150-153.

[20] LI Hongwei, ZHANG Anan, SHEN Xia, et al. A load flow method for weakly meshed distribution networks using powers as flow variables[J]. International Journal of Electrical Power & Energy

Systems, 2014, 58:291-299.

作者简介:



李红伟

licboy@126.com)。

李红伟(1977-),男,河南安阳人,副教授,博士,主要研究方向为配电网分析与优化、分布式发电等(E-mail:lhwwmail@126.com);

孔 冰(1989-),男,四川自贡人,硕士研究生,主要研究方向为智能体及多代理系统(E-mail:kongbsc@163.com);

李 超(1989-),男,四川峨眉山人,硕士研究生,主要研究方向为配电系统自动化(E-mail:

Design of multi-agent distribution network restoration system based on minimum grid loss

LI Hongwei, KONG Bing, LI Chao

(School of Electrical Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Based on multi-agent technology and JADE development platform, a multi-agent restoration system of distribution network is designed, which takes the minimum power loss after network reconstruction as its objective. The characteristics of agent and multi-agent are presented and the main restoration processes are analyzed, including leader agent selection, blackout area determination, optimal restoration scheme determination and scheme implementation. The role and behavior of each agent during restoration and the development of restoration scheme based on the improved optimal flow pattern algorithm are introduced. The agents restore the power supply for blackout areas gradually according to the developed restoration scheme. The restoration system is applied to optimally reconstruct a 33-bus system with faults in a few regions, verifying the feasibility of the designed multi-agent restoration system.

Key words: electric power distribution; restoration system; network reconfiguration; multi-agent systems; improved optimal flow pattern algorithm; optimization