

DOI: 10.7667/PSPC150711

基于 MAS 的配电网复电系统设计

高大棚¹, 叶兴旺², 兰启奎³

(1. 四川石油管理局川南矿区, 四川 泸州 646001; 2. 西南油气田公司重庆气矿, 重庆 401220;
3. 西南油气田公司蜀南气矿, 四川 自贡 643000)

摘要: 针对配电网负荷失电后的复电问题, 基于多代理技术和 JADE 开发平台, 设计了一个配电网主动复电系统, 其中主要包含代表实际配电网支线的支线代理和代表配电网负荷的负荷代理。当配电网支线上发生故障时, 失电的负荷代理向其所在的支线代理发送故障报告, 请求为其恢复供电。故障支线的代理通过与网络中其他支线的协调, 通过负荷开关将失电负荷转供到邻近正常支线上, 从而恢复故障负荷的供电。在 Matlab/Simulink 仿真环境下搭建了一个简单配电网模型, 将所设计的多代理系统用于解决该配电网的负荷复电问题, 验证了该多代理系统的可行性和有效性。

关键词: 多代理系统; 系统设计; 配电网; 复电重构; 负荷转供

Design of active power restoration system for distribution network based on MAS

GAO Dapeng¹, YE Xingwang², LAN Qikui³

(1. Southern Sichuan District of Sichuan Petroleum Administration, Luzhou 646001, China; 2. Chongqing Gas District of PetroChina Southwest Oil and Gasfield Company, Chongqing 401220, China; 3. Southern Sichuan Gas District of PetroChina Southwest Oil and Gasfield Company, Zigong 643000, China)

Abstract: Aiming at the power restoration problem after the black out of distribution network, an active restoration system of distribution network is proposed based on multi-agent technology and JADE platform. There are two kinds of agent in the proposed system, i.e., the FeederAgent which represents the actual feeder in the distribution network, and the LoadAgent which stands for the actual load. When failure occurs on the feeder, the blackout loads send failure reports to the corresponding FeederAgent, requesting for restoring the power supply. Through coordination with other FeederAgents in the distribution network, the FeederAgent with faults transfers the blackout loads to the adjacent normal feeders, and then restores the power supply of those loads. The proposed multi-agent system is utilized to solve the power restoration problem of a simple distribution network model built under the Matlab/Simulink environment, and its feasibility and effectiveness is verified.

Key words: multi-agent system; system design; distribution network; power restoration; load transfer

0 引言

配电网是连接发输电系统和用户的桥梁, 担负着直接向用户供应和分配电能的任务^[1], 其可靠性的高低直接影响着社会和用户的经济效益^[2-3], 因此配电网发生故障后, 应采取及时有效的故障恢复措施以减少停电损失^[4]。当前配电网的研究和发展方向主要包括配电网的安全稳定运行、分布式电源的利用、用电效率和电能质量的提高等^[5], 而建设高可靠性、经济性、实用性、自愈性的智能配电网

统则是电力系统的重大科技创新和自动化技术发展的必然趋势^[6]。

随着配电网的结构和运行方式日益复杂^[7], 对配电网可靠性水平提出了更高的要求^[8]。如何保证用户的不间断供电, 如何尽快缩短用户停电时间, 如何实现配电网故障后的自愈恢复供电等问题, 都需要进一步的研究^[9]。文献[10]提出了一种以动态规划算法为基础的配网复电重构方案, 该方案将配电网的故障重构过程转化为一个多阶段决策过程; 文献[11]提出了一种针对含分布式电源的复杂配电网

故障恢复方案，能在确定各孤岛系统的最佳供电范围后，根据启发式规则对剩余失电网络进行复电和优化；文献[12]将满足初始化约束条件的所有备选重构支路作为网络重构可选方案的集合，根据联络开关两端的电压差大小将该集合分为两个子集，对这两个子集进行不同的操作以实现重构。而近年来，随着多代理技术(Multi-Agent System, MAS)在电力系统中的应用越来越广泛^[13-14]，其在提高配电网供电可靠性方面也有着十分重要的作用。文献[15]提出了高压配电网的多代理控制结构，研究了高压配电网自愈恢复供电策略，利用多代理技术对高压配电网进行分布式控制，提高了配电网的供电可靠性。为了在配电网发生故障时能快速切除故障并恢复供电，文献[16]提出了一种基于多代理技术的分布式电网自愈控制模型，设计了含有馈线代理和负荷开关代理的多代理系统，并给出了配电网的处理算法，实现了电网的自愈多代理控制。文献[17]建立了配电网无功优化的多智能体免疫模型，提出了一种新的多智能体免疫算法，用于求解配电网中存在分布式发电时的无功优化问题。文献[18]针对电网信息分散且关联的特点，提出了 MAS 结合黑板模型的全景电网拓扑分析方法。

为了保证配电网负荷的不间断供电和实现配电网系统的故障自愈恢复，本文基于多代理技术，利用 JADE 开发平台，设计了一个配电网主动复电系统，简述了该系统的工作原理及实现自愈恢复的过程，利用该系统对在 Matlab/Simulink 仿真环境下搭建的一个简单配电网进行了仿真验证，表明了该系统的可行性和有效性。

1 MAS 技术简介

1.1 代理及多代理简介

分布式人工智能是人工智能研究的一个重要分支，而代理 (Agent) 及多代理系统 (Multi-Agent System, MAS) 是当前分布式人工智能研究的重要方面，为大规模、分布式和具有适应性的复杂软件的实现提供了一种全新的途径^[19]。MAS 技术自 20 世纪 80 年代初提出，到 90 年代后期开始得到越来越多的重视，是近年来新兴的计算机工程技术之一^[20]。目前代理的定义还没有一个公认的标准，但一般认为，代理是处于一定环境下的实体，能独立自主地通过传感器感知环境参数，根据获得的参数及与其他代理的通信交互结果灵活地制定满足设计目标的控制策略，并通过效应器作用于周围环境^[21-22]。多代理系统是由多个代理组成的一种松散的协同工作系统，具有良好的灵活性和精干性，其

中的代理成员之间相互协调、相互服务^[23]，能使逻辑上和物理上分散的系统并行、协调地实现问题的求解，往往用于解决单个代理无法处理的问题。由于多代理系统主要研究一组自治代理在分布式开放动态环境下的交互过程，因此其设计不但涉及设计单个代理时遇到的体系结构、开发手段等问题，更重要的是要处理好各个代理之间的组织策略、信息交互、合作方式、竞争手段等^[24-25]。由于多代理系统是设计和实现复杂软件系统和控制系统的新途径，其适用条件与电力系统的特征几乎完全吻合，能解决电力系统面临的分布式控制、分布式计算、分布式数据传输等问题，因而受到了众多学者的关注^[24-26]。

目前，多代理系统的开发工具和平台有很多，如 JAFMAS、Agent Builder、Zeus、JATLite、JADE 等，这些平台的出现大大缩短了 MAS 的开发周期，减小了 MAS 开发的难度。JADE(Java Agent DEvelopment Framework)平台是一个完全由 Java 语言编写的多 Agent 开发框架，遵循 FIPA 规范，可有效地与其他 Java 开发平台和技术集成，极大简化了开发多 Agent 系统的各个环节。本文采用 JADE 平台进行 MAS 的开发。

1.2 MAS 主动复电系统框架

本文基于 JADE 平台开发的配电网主动复电 MAS 系统中，当配电系统发生故障并导致部分负荷停电时，该多代理系统能够指导停电的负荷快速寻找网络中的其他供电途径，以恢复供电。图 1 所示为本文设计的 MAS 复电系统结构图，该系统具有两层结构，其上层结构主要包含为支线代理 (FeederAgent, FA)，下层结构中则主要为负荷代理 (LoadAgent, LA)，各代理根据自身的运行规则执行相应功能，通过协商与合作共同恢复停电负荷的供电。FA 代表网络中的各支线，其主要任务是管理其

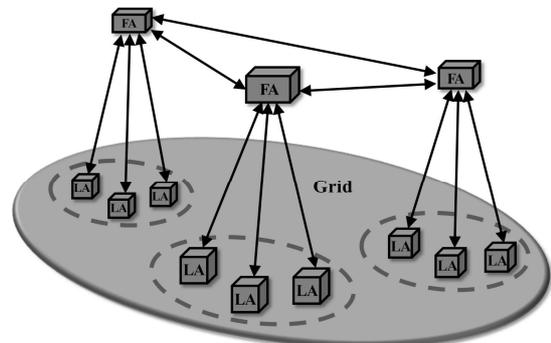


图 1 多代理系统层次结构图

Fig. 1 Hierarchical structure of the proposed MAS

该支线上的负荷, 当网络发生故障时导致负荷失电时, FA 通过与网络中其他 FA 的协商, 最终完成停电负荷的转供复电。各 LA 与配电网中各负荷节点相对应, 其主要任务是实时监测负荷数据, 当网络发生故障导致其对应的负荷停电时, 及时向其所在支线的 FA 报告故障情况并请求其为停电负荷恢复供电。

2 MAS 主动复电流程

本文设计的 MAS 复电系统可为配电系统中失电的负荷寻找另外的供电途径, 从而为其恢复供电。当配电网中发生故障时, 将导致部分负荷失电, 与失电负荷相对应的 LA 则会立即将故障情况上报给与之对应的 FA, 请求该 FA 为停电的负荷恢复供电。FA 接收到 LA 的请求后, 将会启动相应进程以试图恢复停电负荷的供电, 其实质是通过网络中分布的联络开关将停电负荷转供到相邻的支线上。

从操作角度来说, FA 利用的联络开关主要有三类: A 类, B 类和 C 类。A 类联络开关处于从相同变电站的相同变压器获得电力供应的支线之间, B 类联络开关处于从相同变电站的不同变压器获得电力供应的支线之间, C 类联络开关处于从不同变电站获得电力供应的支线之间。本文设定 FA 对以上三类联络开关的选择优先级如下: 首先选择并闭合 A 类联络开关, 直到失电负荷全部恢复供电; 否则再选择并闭合 B 类联络开关, 直到失电负荷全部恢复供电; 否则再选择并闭合 C 类联络开关, 直到失电负荷全部恢复供电。

本文 MAS 复电系统中, 故障支线对应的 FA 主导复电的过程如图 2 所示, 具体分析如下。

1) 注册黄页服务

注册黄页服务, 即是各代理在一个公共平台上发布其可以提供的相应服务的过程。而当代理不再提供相应服务时, 则需注销其黄页服务。当某个代理需要某种类型的服务时, 可以在该公共平台上搜索该类型的服务, 这可大大减少代理之间解决问题的时间。当程序开始运行时, 假设整个系统运行正常, 则具有富余功率的各支线代理都会在黄页上注册其功率服务, 表示其可以为部分停电的负荷提供电力。

2) 接收 LA 的故障报告

MAS 中的各 LA 都会不间断地监测负荷的运行状态, 当负荷电压为零时, 即判定负荷已经失电, 并立即向其对应的 FA 报告故障情况, 请求为失电负荷恢复供电。FA 接收到故障报告后, 分别统计各停电负荷需要的功率大小。

3) 搜索黄页服务

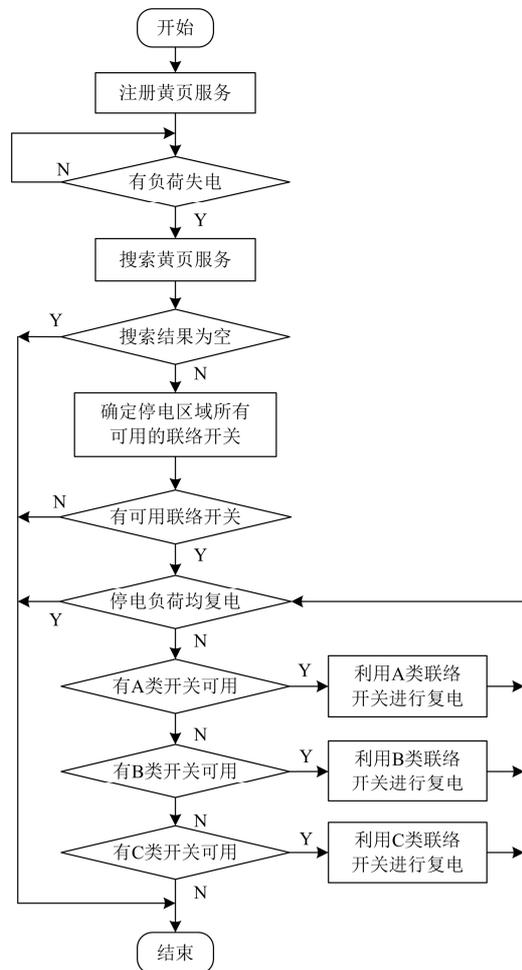


图 2 MAS 复电流程

Fig. 2 Restoration procedure of the MAS

接收到 LA 的故障报告后, FA 启动复电进程, 尝试为失电负荷复电。首先, LA 会搜索黄页上已经注册了功率服务的 FA。如果搜索结果为空, 则表示网络中没有 FA 可以提供富余电力, 为失电负荷恢复供电的尝试失败。如果搜索结果不为空, 则表示至少有一个 FA 注册了功率服务, 可以尝试将失电的负荷转供到这些 FA 对应的支线上。

4) 确定可用的联络开关

确定了网络中有支线可以提供富余功率后, FA 将找出其对应支线上连接着故障区域与非故障区域的联络开关类型及数量。由于联络开关连接着的正常支线可能无法提供富余功率(即没有注册功率服务), 因此 FA 将以第 3) 步中获取的结果为基础对找到的联络开关进行筛选: 若该联络开关连接着的正常支线未注册功率服务, 表示该联络开关不可用, 将该联络开关去除; 若该联络开关连接着的正常支线已注册功率服务, 表示该联络开关可用, 保留该

联络开关。若最终没有可用的联络开关，则为失电负荷恢复供电的尝试失败；否则 FA 将尝试利用这些开关恢复失电负荷的供电。

5) 利用可用联络开关进行复电

确定有可用联络开关后,FA 将依次选择并闭合 A 类、B 类及 C 类联络开关,直到所有失电负荷全部恢复供电或没有可用的联络开关。首先,FA 选取某类联络开关中的一个,向该开关连接着的正常支线的 FA 发出供电请求信息(CFP)。该正常支线的代理接收到信息后,根据自身情况决定是否同意故障 FA 的请求:若同意则回复一条建议信息(Propose),并告知其可以提供的最大富余功率;否则回复拒绝信息(REFUSE),表示其无法为其提供功率。FA 根据各正常运行支线可提供的最大富余功率值以及各失电负荷所需的功率大小确定负荷的复电过程。

3 系统模型

3.1 简单配电网模型

为了验证本文所设计的多代理复电系统的有效性,将其应用到如图 3 所示的简单配电网模型中。

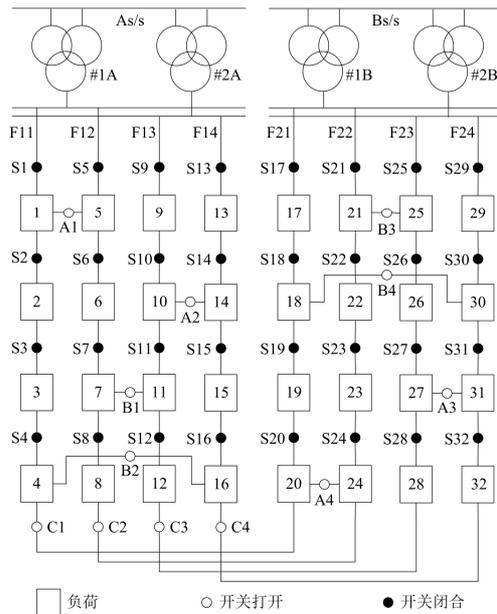


图 3 简单配电网模型

Fig. 3 A simple distribution network model

如图 3 所示,该模型包含两个变电站(As/s 和 Bs/s),每个变电站分别有两台变压器(#1A 和#2A, #1B 和#2B);整个模型中有 8 条支线(F11, F12, F13, F14, F21, F22, F23, F24),设每条支线允许通过的最大有功为 2 000 W,分别为每条支线设置一个

支线代理(FA11, FA12, FA13, FA14, FA21, FA22, FA23, FA24);其中共有 44 个开关,包括 32 个分段开关(S1~S32)、4 个 A 类联络开关(A1~A4)、4 个 B 类联络开关(B1~B4)和 4 个 C 类联络开关(C1~C4);系统中共有 32 个负荷(L1~L32),分别为每个负荷都设置一个负荷代理(LA1~LA32),各负荷的有功功率大小如表 1 所示,则各支线可以提供的富余功率分别为 700 W、770 W、550 W、400 W、580 W、380 W、460 W、400 W。

表 1 系统各负荷的有功大小

Table 1 Power of each load in the system

负荷	1	2	3	4	5	6	7	8
P/W	300	400	250	350	380	320	280	250
负荷	9	10	11	12	13	14	15	16
P/W	400	300	300	450	420	340	400	440
负荷	17	18	19	20	21	22	23	24
P/W	240	370	380	430	480	340	350	450
负荷	25	26	27	28	29	30	31	32
P/W	320	380	400	440	340	360	420	480

3.2 Simulink 模型及数据接口简介

为便于分析和观察本文所提方法的效果,在 Matlab/Simulink 环境中搭建了图 3 所示的配电网模型。在搭建的 Simulink 模型中,用“Series RLC Load”表示网络中各负荷,将各负荷的额定电压设为相等;用“Ideal Switch”表示网络中的开关,可通过信号控制其通断;分别用可控电流源作为各支路的电源,通过改变各电流源的输出可调节各支路上流过的有功功率。

本文搭建的 Simulink 模型表示实际的配电网,而设计的 MAS 复电系统是运行于 JADE 环境中的上层决策控制系统。为了将 Simulink 模型的实时运行数据上传到 MAS 中,也为了将 MAS 分析计算后的信号反馈到 Simulink 模型中,需要在 Simulink 和 JADE 之间建立数据接口。图 4 为本文所使用的数据接口,可实现 Simulink 和 JADE 环境中数据的双向传输。S-Function 和多代理协调器用于建立 Simulink 与 JADE 的交互通道,负责将自身数据传递给对方并接收来自对方的数据。多代理数据处理器则根据各 FA 和 LA 所需处理数据的不同,将多代理协调器获得的数据分发给各 FA 和 LA。各 FA 和 LA 将获得的实时数据经过处理后依次反馈给多代理数据处理器、多代理协调器、S-Function,最终用于控制 Simulink 模型中的开关动作或修改模型中电源的参数。

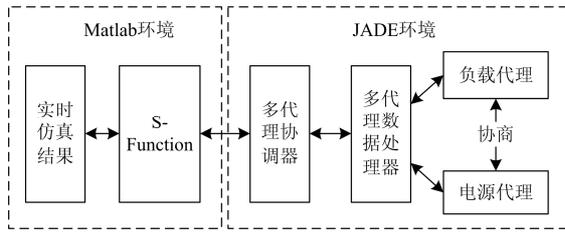


图 4 数据接口示意图

Fig. 4 Data interface diagram

4 案例分析

在仿真过程中, 本文做出如下设定: 各分段开关由与之编号相同的后端 LA 操作, 各联络开关可由其两端的 LA 操作; 只要某条支线可以提供富余功率, 其对应的 FA 将同意故障 FA 提出的供电请求。在验证 MAS 复电系统的有效性的过程中, 本文做了多次故障模拟, 但由于篇幅有限, 仅分析其中两种典型案例。

4.1 发生单一故障

假设配电网中在支线 F12 上发生了如图 5 所示的单一故障, 则整条支线上的负荷均失电, MAS 复电系统中相应 FA 及 LA 的复电过程详细分析如下。

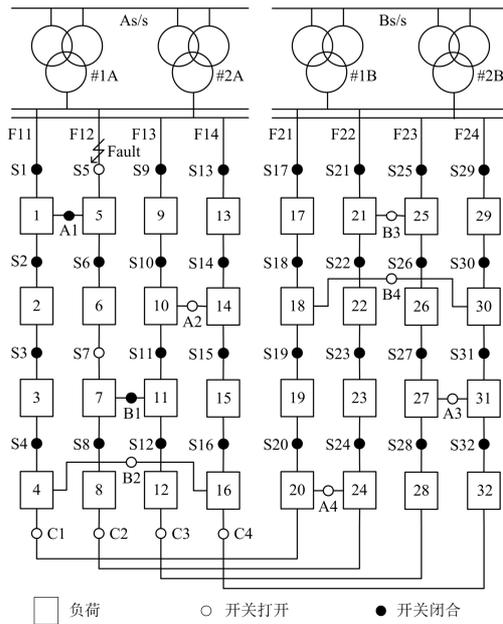


图 5 系统单一故障复电后的网络结构

Fig. 5 Network structure after single fault restoration

支线 F12 发生故障后, 负荷 L5、L6、L7、L8 均失电, 其对应的负荷代理 LA5、LA6、LA7、LA8 在断开相应分段开关 S5、S6、S7、S8 后, 分别向支线代理 FA12 上报故障情况, 将其故障前的负荷

水平(分别为 380 W、320 W、280 W 和 250 W)告知 FA12 并请求 FA12 恢复这些负荷的供电。FA12 接收到故障报告后, 判定线路上发生故障, 立即注销其功率服务并启动复电程序。

首先, FA12 搜索黄页上注册了功率服务的 FA。由于此时系统中的其他支线均运行正常且都可以提供富余功率, FA12 经过搜索可得到除自身以外的其他支线代理均注册了功率服务。

然后, FA12 将统计连接着停电区域的所有可用联络开关的类型和数量。由于连接着停电区域的所有联络开关包括 1 个 A 类联络开关 A1、1 个 B 类联络开关 B1 以及 1 个 C 类联络开关 C2, 且这些联络开关连接着的正常支线都注册了功率服务, 可通过这些联络开关将失电的负荷转供到正常支线上, 因此以上 3 个联络开关均可用。

接下来, FA12 将按照前文所述的联络开关操作优先级, 依次尝试利用 A1、B1 以及 C2 为失电负荷恢复供电。

由于联络开关 A1 连接着支线 F11 和 F12, FA12 将首先向 FA11 发出供电请求(CFP)。FA11 接收到 CFP 信息后, 计算出 F11 当前可提供的富余功率为 700 W, 因此 FA11 将向 FA12 回复同意信息(AGREE), 告知其最大可用的功率为 700 W。FA12 接收到 FA11 的同意信息后, 将根据 FA11 可提供的最大功率和各失电负荷的功率确定相应开关的状态。由于 L5 需要的功率为 380 W, 小于 FA11 可提供的 700 W, 因此 FA12 将命令 LA5 闭合 A1, 尝试恢复 L5 的供电。当 LA5 完成开关操作后, F11 可提供的最大功率就变为了 320 W。由于 L6 需要的功率为 320 W, 等于此时 F11 可提供的最大功率, 因此 FA12 将命令 LA6 闭合 S6, 尝试恢复 L6 的供电。LA6 完成开关操作后, F11 的负荷已达到上限, 已不能提供富余的功率, 因此 FA11 将注销其功率服务。通过以上过程, FA12 完成了 L5 和 L6 的复电, 但此时仍有 L7 和 L8 未复电, 并且没有了可用的 A 类联络开关, 因此 FA12 将尝试通过联络开关 B1 为其余负荷恢复供电。

由于 B1 连接着 F12 和 F13, FA12 向 FA13 发出供电请求。完成相应计算后, FA13 回复同意请求的信息, 并告知 FA12 当前可提供的最大功率为 550 W。由于 L7 需要的功率为 280 W, 小于 550 W, FA12 将命令 LA7 闭合 B1, 以尝试恢复 L7 的供电。LA7 完成开关操作后, F13 当前可提供的富余功率就变为了 270 W。由于 L8 需要的功率为 250 W, 小

于 270 W，FA12 将命令 LA8 闭合 S8，以尝试恢复 L8 的供电。当 LA8 完成开关操作后，F13 当前可提供的富余功率变为了 20 W。

通过以上过程，F12 上所有失电的负荷就全部恢复了供电，复电后的网络结构如图 5 所示。图 6 是在复电过程中观测到的 L5~L8 的有功曲线，由图 6 可见，各负荷的复电顺序依次是 L5、L6、L7、L8，与上述分析结果一致。

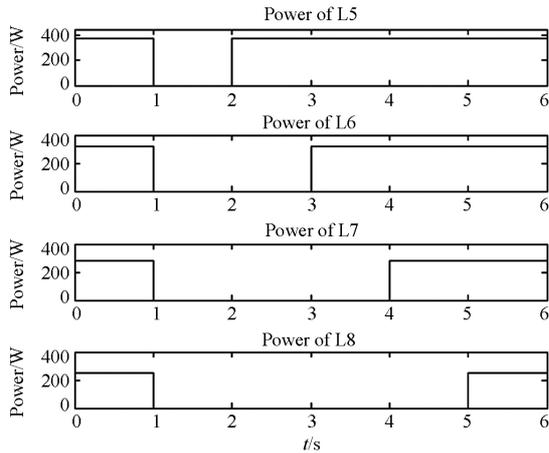


图 6 L5~L8 的有功曲线

Fig. 6 Active power curves from L5 to L8

4.2 发生多处故障

假设配电网中在支线 F11 和 F23 上同时发生了故障，如图 7 所示，则 FA11 和 FA23 将分别针对各自支线上负载的停电情况，同时进行复电。

1) FA11 的复电过程

在 F11 上发生的故障将导致 L1、L2、L3、L4 失电，失电的负荷代理将打开开关 S1、S2、S3、S4，为随后的复电做准备。经过相应查询和判断，FA11 确定了可用的联络开关包括 A1、B2、C1。由于 F12 可提供的富余功率为 770 W，大于 L1 和 L2 需求的 700 W，因此 FA11 会依次命令 L1 和 L2 分别闭合 A1 和 S2，从而恢复 L1 和 L2 的供电。此时，F12 可提供的富余功率仅为 70 W，小于 L3 需求的 250 W，不能满足 L3 的功率需求，因此 FA11 将尝试通过 B2 恢复 L3 和 L4 的供电。由于 F14 当前可提供的富余功率为 400 W，大于 L4 所需的 350 W，FA11 将命令 L4 闭合 B2，从而恢复 L4 的供电。此后，F14 可提供的功率仅为 50 W，不能满足 L3 需求的 250 W，FA11 将尝试通过 C1 恢复 L3 的供电。由于 F21 当前可提供的富余功率为 580 W，可满足 L3 的需求，FA11 会命令 LA4 依次闭合 C1 和 S4，

最终恢复 L3 的供电。通过以上过程，FA11 恢复了其支线上所有失电负荷的供电。

2) FA23 的复电过程

在 F23 上发生的故障会导致 L27 和 L28 失电，S27 和 S28 也会被打开以准备复电。此时，FA23 可用的联络开关仅有 A3 和 C3。由于 F24 可提供 400 W 功率，仅能恢复 L27 的供电，因此 L27 闭合 A3 完成复电后，FA23 将尝试通过 C3 恢复 L28 的供电。由于 F13 当前可提供的富余功率为 550 W，大于 L28 需求的 440 W，因此 FA23 将命令 L28 闭合 C3，从而恢复 L28 的供电。通过以上过程，FA23 恢复了其支线上失电负荷的供电。

FA11 和 FA23 的复电过程同时进行，最终复电后的网络结构如图 7 所示。

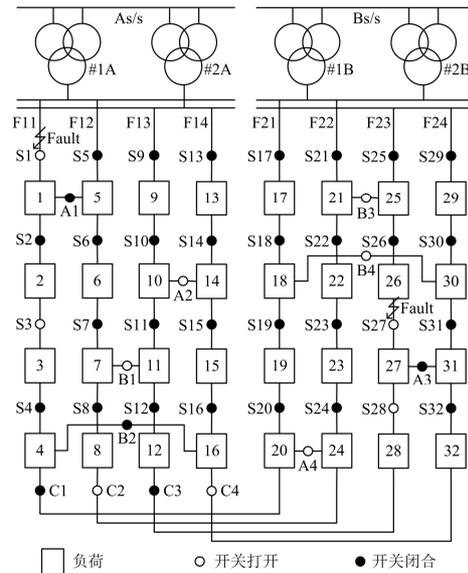


图 7 多故障复电后的网络结构

Fig. 7 System structure after multi-fault restoration

5 结论

多代理技术是集分布性、智能性、主动性等特点的新技术，其在电力系统中的应用越来越广泛。本文基于多代理技术，利用 JADE 开发平台，设计了一个基于 MAS 的配电网主动复电系统，阐述了该 MAS 指导复电的原理和过程。在 Matlab/Simulink 仿真环境下搭建了一个简单的配电网模型，将本文所设计的 MAS 用于解决负荷的复电问题，详细分析了 MAS 复电的过程及结果，证明了本文所设计的 MAS 在指导复电时的可行性和有效性。尽管 MAS 在电力系统中的研究和应用所涉及的方面越来越广泛，但大都还未形成针对具体实例和领域的标准模型和规范，而且多代理技术还处于实验研究

阶段, 因此 MAS 在电力系统中的广泛使用还需要很长的时间。但基于 MAS 的技术优势, 其在提高供电可靠性、优化电力系统效能、加快主动配电网规划以及促进智能电网建设等方面必将发挥十分重大的作用。

参考文献

- [1] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 面向最大供电能力提升的配电网主动重构策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 137-147.
JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. An active reconfiguration strategy for distribution network based on maximum power supply capability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 137-147.
- [2] 张逸, 林焱, 吴丹岳. 电能质量监测系统研究现状及发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 138-144.
ZHANG Yi, LIN Yan, WU Danyue. Current status and development trend of power quality monitoring system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 138-144.
- [3] 管霖, 冯垚, 刘莎, 等. 大规模配电网可靠性指标的近似估测算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 92-98.
GUAN Lin, FENG Yao, LIU Sha, et al. Approximate evaluation algorithm for reliability indices of cosmically distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 92-98.
- [4] 孙洁, 王增平, 王英男, 等. 含分布式电源的复杂配电网故障恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 56-62.
SUN Jie, WANG Zengping, WANG Yingnan, et al. Service restoration of complex distribution system with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 56-62.
- [5] 胡雯, 孙云莲, 张巍. 基于改进的自适应遗传算法的智能配电网重构研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 85-90.
HU Wen, SUN Yunlian, ZHANG Wei. Reconfiguration of smart distribution using improved adaptive genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 85-90.
- [6] 李勋, 龚庆武, 胡元潮, 等. 智能配电网体系探讨[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(8): 108-111, 126.
LI Xun, GONG Qingwu, HU Yuanhao, et al. Discussion of smart distribution grid system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(8): 108-111, 126.
- [7] 胡文平, 于腾凯, 巫伟南. 一种基于云预测模型的电网综合风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 35-41.
HU Wenping, YU Teng kai, WU Weinan. A comprehensive power grid risk assessment method based on cloud prediction model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 35-41.
- [8] 孟艳清, 赵宏伟, 邹育霖. 基于 ARM 的开关柜智能监控装置研究[J]. 高压电器, 2014, 50(3): 29-35.
MENG Yanqing, ZHAO Hongwei, ZOU Yulin. Research of the smart monitoring control device for switchboard based on ARM[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(3): 29-35.
- [9] 麻秀范, 丁宁, 李龙. 配电网重构中网络辐射形与连通性的判断[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 289-293.
MA Xiufan, DING Ning, LI Long. Judging radial and connectivity of network in distribution networks reconfiguration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 289-293.
- [10] 张浩, 和敬涵, 薄志谦, 等. 基于动态规划算法的故障恢复重构[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 162-167.
ZHANG Hao, HE Jinghan, BO Zhiqian. Service restoration based on dynamic programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 162-167.
- [11] 孙洁, 王增平, 王英男, 等. 含分布式电源的复杂配电网故障恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 56-62.
SUN Jie, WANG Zengping, WANG Yingnan, et al. Service restoration of complex distribution system with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 56-62.
- [12] 刘文军. 考虑约束条件预处理的配电网重构技术[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(7): 64-67.
LIU Wenjun. Distribution network reconfiguration based on preprocessing of constraint conditions[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(7): 64-67.
- [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, 55.
KONG Bing, ZHAO Zema, LI Hongwei, et al. Technology of power distribution network restoration based on multi-agent system[J]. Electrotechnical Application, 2013, 32(7): 28-31, 55.
- [14] 余文辉, 王少荣, 柳斐, 等. 基于在线自组织同步 MAS 的电网广域保护系统[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 69-75.
YU Wenhui, WANG Shaorong, LIU Fei, et al. A wide-area protection system based on synchronized MAS self-organizing online for power grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 69-75.

- [15] 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 1): 50-54.
WANG Ping, YU Kun, LI Zhenkun, et al. Application of multi-agent technology to enhance power supply reliability of high voltage distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(S1): 50-54.
- [16] 刘新东, 李伟华, 朱勇, 等. 基于多代理技术的分布式电网自愈控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 116-120.
LIU Xindong, LI Weihua, ZHU Yong, et al. Research on self-healing control of distributed networks based on multi-agent technology[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 116-120.
- [17] 张丽, 徐玉琴, 王增平, 等. 包含分布式电源的配电网无功优化[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 168-174.
ZHANG Li, XU Yuqin, WANG Zengping, et al. Reactive power optimization for distribution system with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 168-174.
- [18] 郝广涛, 韩学山, 梁军, 等. 多代理系统和黑板模型结合的全景电网拓扑分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 200-208.
HAO Guangtao, HAN Xueshan, LIANG Jun, et al. Panorama power system topology analysis based on multi-agent system and blackboard model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 200-208.
- [19] 雷振, 韦钢, 言大伟, 等. 基于多 Agent 联盟算法的含分布式电源配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 95-100, 105.
LEI Zhen, WEI Gang, YAN Dawei, et al. Study of reconfiguration for the distribution network with distributed generations based on multi-agent alliance algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 95-100, 105.
- [20] 黎恒焯, 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.
- [21] 刘红进, 袁斌, 戴宏伟, 等. 多代理系统及其在电力系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(19): 45-51.
LIU Hongjin, YUAN Bin, DAI Hongwei, et al. Multi-agent system and its application in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(19): 45-51.
- [22] 朱亮, 黄怡, 江全元. 多智能体开发系统 SWARM 在电力系统中的应用[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 550-554.
ZHU Liang, HUANG Yi, JIANG Quanyuan. Principle and application of multi-agent developing system swarm in power system[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 550-554.
- [23] 王健, 王玮, 屈志坚, 等. 基于多代理技术的含分布式电源的智能配电网[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 86-89.
WANG Jian, WANG Wei, QU Zhijian, et al. Intelligent distribution network with distribution generations based on multi-agent technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 86-89.
- [24] 廖恩荣. 多代理(Multi-Agent)技术在电力系统控制中的应用[J]. 机械制造与自动化, 2013, 41(2): 159-163.
LIAO Enrong. Application of multi-agent in power supply system control[J]. Machine Building & Automation, 2013, 41(2): 159-163.
- [25] 郝雨辰, 吴在军, 窦晓波, 等. 多代理系统在直流微网稳定控制中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 27-35.
HAO Yuchen, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. Application of multi-agent systems to the DC microgrid stability control[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 27-35.
- [26] 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): 54-61.
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): 54-61.

收稿日期: 2015-04-27; 修回日期: 2015-08-30

作者简介:

高大棚(1989-), 男, 通信作者, 本科, 助理电气工程师, 主要从事电气设备管理及安全管理; E-mail: gaodpsc@163.com

叶兴旺(1988-), 男, 本科, 助理工程师, 主要从事仪器仪表及自动化;

兰启奎(1989-), 男, 本科, 助理工程师, 主要从事电气、机械技术管理工作。

(编辑 周金梅)