

多代理系统框架下的主动配电系统故障诊断

田方媛¹, 张 岩¹, 徐 兵¹, 文福拴^{1,2}, 朱炳铨³, 徐立中³

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027;

2. 文莱科技大学 电机与电子工程系, 文莱 斯里巴加湾 BE1410;

3. 国网浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007)

摘要: 现有的针对单端电源配电系统所配置的继电保护需要升级改造以适应嵌入了分布式电源的主动配电系统的运行要求。作为配电自动化系统的核心功能,故障诊断模块对于快速而准确地判断配电系统中发生的故障、进而加快系统恢复过程具有重要作用。在此背景下,提出一种基于多代理系统 MAS(Multi-Agent System)的主动配电系统故障诊断方法,包括 MAS 的基础架构设计、通用 Agent 模型构建以及基于 MAS 的故障诊断策略制定。在所提 MAS 框架下,在各个母线/节点配置了以故障诊断解析模型为基础的 Agent,并引入关联因子来反映各 Agent 间的耦合关系,区别分析信息缺失和信息畸变对故障诊断正确性的影响,基于此重点研究了利用 Agent 间通信和协商机制实现故障诊断的策略以得到全局最优故障诊断结果。最后,32 节点测试系统的仿真表明了所提方法可以在相当程度上容纳警报信息缺失和畸变,并能够对保护和断路器的动作特性进行评价。

关键词: 主动配电系统; 分布式电源; 故障诊断; 解析模型; 多代理系统

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.06.004

0 引言

近年来,随着分布式发电技术的快速发展,配电系统中分布式电源的渗透率提高,逐步形成所谓的主动配电系统或主动配电网 ADN(Active Distribution Network)^[1]。与传统单端电源配电系统相比,ADN 中的潮流流向不再是单向的,潮流分布也可能发生很大变化,这导致针对单端电源配电系统所配置的继电保护无法适应嵌入了分布式电源的 ADN 的运行要求,从而给配电自动化系统带来了挑战。分布式可再生能源发电出力的间歇性和波动性导致故障电流难以预测,且分布式电源中的逆变器可在相当程度上限制短路电流幅值^[2],这些因素给保护的配置和整定带来了新的问题,进而也影响了故障诊断。

近年来,就主动配电系统的故障诊断问题国内外已经有了一些研究报道。文献[3]针对含多电源的复杂配电系统,提出了一种基于矩阵算法的多重故障定位统一判据。文献[4]联合采用搜索树和矩阵算法对故障区段进行准确定位。考虑到由直接电流控制的变流器类分布式电源所提供的短路电流最大不超过其额定电流的 1.5 倍^[2],这会导致文献[3]、

[4]中提出的故障判据难以准确识别故障。文献[5]提出通过分析有源配电系统非故障区段与故障区段两侧开关短路电流的幅值关系进行故障诊断。文献[6]提出一种基于最小电压偏差向量 2-范数的故障定位算法,考虑了配电系统三相不平衡状态,原理上也适用于处理含高渗透率分布式电源的情形。文献[7]提出配电系统故障定位双层模型,上层利用遥信信息建立解析模型,下层则以遥测数据为基础建立模型,所提模型可容纳警报信息的误报与漏报。

前已述及,分布式电源接入配电系统导致针对单端电源配电系统所配置的继电保护无法适应其运行要求。国际大电网会议(CIGRE)的保护与自动化专业委员会(B5)在 2012 年提出^[8],含分布式电源的非放射型(网络化)配电系统要求采用新原理的继电保护技术,以适应主动配电系统的需求;换言之,在主动配电系统中应该引入输电系统的继电保护技术,可采用电流差动保护和方向比较保护来解决。这样,在对主动配电系统进行故障诊断时可借鉴输电系统故障诊断模型与方法^[9-10],充分挖掘保护和断路器警报信息的特征。随着分布式电源渗透率的不断提高,主动配电系统的分布式特性会越来越明显,数据交互越来越多,信息传递过程中就更容易发生通信拥挤和堵塞。

在上述背景下,提出一种基于多代理系统 MAS(Multi Agent System)的针对中高压主动配电系统的故障诊断方法。采用 MAS 这种分布式智能处理方式,一方面可以避免集中式处理机制对系统整体信

收稿日期:2016-04-18;修回日期:2016-05-12

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2015-AA050202);国网浙江省电力公司科研项目(5211ZD13000R);国家电网公司总部科技项目(52110115009Q)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2015AA05-0202),State Grid Zhejiang Electric Power Corporation Project(5211ZD13000R) and State Grid Corporation of China Science Project(52110115009Q)

息的高度依赖,另一方面也能够明显降低馈线自动化系统对通信带宽的需求。MAS 具备自主性和智能性,符合主动配电系统所具备的分布式特点,且已经在电力系统恢复、协调控制等方面得到广泛应用^[11-15]。不过,有关基于 MAS 的主动配电系统故障诊断问题,尚鲜有研究报道。本文首先给出了基于母线/节点代理 BA(Bus Agent)的主动配电系统 MAS 框架,包括代理工作方式和信息交互通信机制;接着,基于电气量信息、保护动作信息和断路器变位信息,发展了计及 Agent 间关联关系和信息缺失影响的故障诊断解析模型;然后,给出了各 Agent 利用其通信和协商机制实现故障诊断的过程;最后,采用 32 节点测试系统对所提的故障诊断模型与方法进行了说明。

1 主动配电系统故障诊断的 MAS 基本架构

1.1 MAS 架构设计

与传统集中式配电系统故障诊断方法不同,本文提出由 BA 组成的完全分布式 MAS 框架,用以实现主动配电系统的故障诊断,如图 1 所示。该 MAS 的架构体系分为 2 层,上层是由 BA 组成的 MAS 层,下层是由配电系统构成的物理层。BA 配置于配电系统的各条母线上,它对应的物理层区域包括该母线以及与该母线直接相连的各条线路,如图 1 虚线框中所示。各 Agent 可以对相应的物理层区域进行数据采集和控制决策,也可以实现与相邻 BA 的信息交互。需要指出,位于相邻 BA 重叠区域内的线路同时属于 2 个 BA 的诊断区域,可通过 Agent 间的协调机制确定最终诊断结果,这种冗余性有助于提高故障诊断结果的准确性。这种 MAS 框架是分布式的,且不受配电系统拓扑结构的影响,可扩展性强。当配电系统新增或减少分支线路时,只影响与之相邻的母线/节点,可通过修改该母线的 BA 配置文件来适应新的拓扑结构。

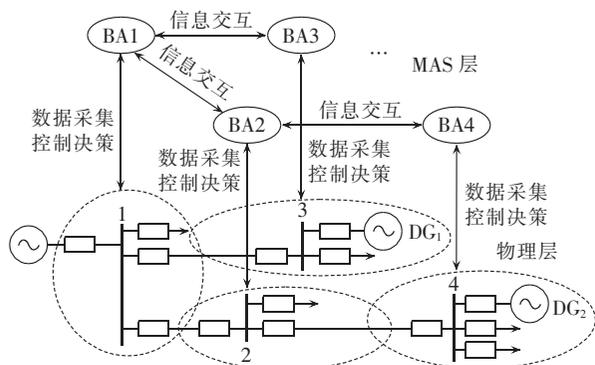


图 1 MAS 的架构设计

Fig.1 Design of MAS framework

1.2 MAS 通信机制

Agent 通过通信获取相关的必要信息,其交流和通信能力表征其重要特征。MAS 系统可以利用配电

调度自动化系统的各种通信手段构建通信网络。以太无源光网络 EPON(Ethernet Passive Optical Network)具有高带宽、低成本、易维护等特点,已成为现代配电自动化系统主流通信方式之一^[16]。Agent 可采用 EPON 构成 BA 之间的通信通道,以实现代理之间的信息交互。在此基础上,还可增加通信设施的冗余性来改善通信传输的实时性和可靠性,例如,建立物理双通道备份机制、实施通道自检机制^[17]等。

本文基于智能代理基金会 FIPA(the Foundation for Intelligent Physical Agents)规范框架^[11]设计了 MAS 通信机制。FIPA 请求交互协议允许一个 Agent(发起者)请求(request)另一个 Agent(参与者)执行一个动作。参与者处理该请求并决定同意(agree)或者拒绝(refuse)该请求。Agent 通过符合 FIPA 标准的 ACL(Agent Communication Language)实现无缝通信,通信内容一般包含发送者、接收者和内容参数。在此定义了如表 1 所示的“查询(query)”、“通知(inform)”、“更新(update)”3 类消息类型。这样,相邻 BA 之间可进行信息交互,信息类别包括电气量信息、保护动作信息、断路器状态信息及故障诊断结果等。例如,在图 1 所示的系统中,母线代理 BA1 可向相邻的母线代理 BA2 发出对断路器状态的“查询”请求,母线代理 BA2 在收到该请求后,回复所请求的断路器状态。

表 1 通信行为描述

Table 1 Description of communication behaviors

| 消息类型 | 发送者消息参数 | 接收者消息参数 | 消息描述 |
|------|--|---|---------------------------|
| 查询 | 目的类型标志 “request”、消息 发送代理标识、消息 接收代理标识、 消息内容 | 目的类型标志 “agree/refuse”、消息发 送代理标识、 消息接收代理标识、 消息内容 | 查询相邻 代理覆盖 区域的 信息 |
| 通知 | 目的类型标志 “inform”、消息 发送代理标识、消息 接收代理标识、 消息内容 | 目的类型标志 “inform”、消息 发送代理标识、消息 接收代理标识、 消息内容 | 发送本地 代理覆盖 区域的 信息 |
| 更新 | 目的类型标志 “update”、消息 发送代理标识、消息 接收代理标识、 消息内容 | 目的类型标志 “update”、消息 发送代理标识、消息 接收代理标识、 消息内容 | 更新 诊断 信息 |

这里采用 JADE(Java Agent DEvelopment framework)进行 MAS 设计。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^[18],其通信设计符合 FIPA 规范。在 JADE 中,将 Agent 的各种任务定义为 Behaviour 类,通过调用 Behaviour 类来执行相应任务。每个 Agent 将任务放在各自的任务池中,依次取出执行,每完成一项任务后就将其从任务池中

删除,直到完成所有的任务。

2 Agent 诊断模型

配电系统发生故障时,会出现电气量明显变化、保护动作、断路器变位等特征信息,充分利用这些信息有助于实现准确而快速的故障诊断。在主动配电系统中,一般采用差动保护和方向比较保护^[8,16,19-21]。在此基础上,针对主动配电系统,本文综合利用电气量信息、保护信息和断路器信息构造故障判据,并计及通信故障的影响,构建多代理故障诊断解析模型。然后,采用改进的生物地理学优化 BBO(Biogeography-Based Optimization)算法^[22-23]和禁忌搜索 TS(Tabu Search)的混合寻优算法(BBO-TS)求解优化变量,利用 BBO 的全局搜索能力和 TS 的局部搜索能力来搜索解空间,以期求得全局最优解。

2.1 电气量判据

对于图 2 所示的母线 M ,当其发生故障时,与其直接相连的所有元件流入该母线的电流之和等于故障点的短路电流。此时,与该母线相连的所有元件的故障电流正序分量(以离开母线的方向为正方向)满足下述关系:

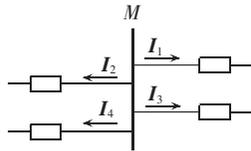


图 2 母线电气量信息
Fig.2 Electric information of a given bus

$$|I_k| = |I_1^{(1)} + I_2^{(1)} + I_3^{(1)} + I_4^{(1)}| = \left| \sum_{i=1}^{n_k} I_i^{(1)} \right| > I_{set} \quad (1)$$

其中, I_k 为与母线 M 直接相连的所有元件流出该母线的电流之和; $I_i^{(1)}$ ($i=1, 2, \dots, n_k$) 为线路 i 故障电流的正序分量, n_k 为与母线 M 直接相连的所有线路的数目; I_{set} 为设定的接近 0 的电流阈值。

同理,当线路发生故障时,存在类似关系。以图 3 所示的线路为例,存在:

$$|I_k| = |I_M + I_N| > I_{set} \quad (2)$$

依据上述原理,可建立基于故障电流正序分量的

0-1 故障判据,用 m 表示,其值定义为:

$$m = \begin{cases} 1 & |I_k| > I_{set} \\ 0 & |I_k| \leq I_{set} \end{cases} \quad (3)$$

2.2 Agent 模型的建立

2.2.1 故障假说

Agent 模型的决策变量即为 Agent 所对应区域内的故障假说。假设某个 Agent 所对应停电区域内存在 n_d 个设备、 n_r 个保护装置及 n_c 个断路器,故障假说 H 可表示如下:

$$H = [D \ R \ C \ | \ O] \quad (4)$$

其中, $D = [d_1, d_2, \dots, d_{n_d}]$, $d_i = 1$ 或 0 分别表示该 BA

覆盖区域内第 i 条线路/母线处于故障或正常状态; $R = [r_1, r_2, \dots, r_{n_r}]$, $r_i = 1$ 或 0 分别表示该 BA 覆盖区域内第 i 个主保护/后备保护动作或没有动作; $C = [c_1, c_2, \dots, c_{n_c}]$, $c_i = 1$ 或 0 分别表示该 BA 覆盖区域内第 i 个断路器处于分闸或合闸状态; $O = [o_1, o_2, \dots, o_{n_o}]$, o_i 为关联因子, $o_i = 1$ 或 0 分别表示异地 BA 故障触发或未触发本地第 i 个后备保护动作, n_o 为关联因子个数(详见 2.3.2 节)。

2.2.2 目标函数

当一次设备(母线、线路和变压器等)发生故障时,其状态信息和故障信息均通过电力通信系统进行传递;此时若二次设备(保护等)或者关键通信元件发生故障,母线代理可能无法获取可靠的警报信息,这会使得故障诊断问题复杂化。考虑二次设备及通信元件故障的影响时,Agent 故障诊断模型可描述为:

$$E(H) = \Delta E^*(H) + \Delta E^\circ(H) + \Delta F \quad (5)$$

其中, $\Delta E^*(H)$ 为设备故障差异度指标; $\Delta E^\circ(H)$ 为通信系统故障差异度指标; ΔF 为故障假说中故障数目最小化指标。

(1) 设备故障差异度指标 $\Delta E^*(H)$ 。

$\Delta E^*(H)$ 反映电气量判据、保护、断路器的期望状态与实际状态之间的差异程度,其计算公式如下:

$$\Delta E^*(H) = \sum_{i=1}^{n_m} |m_i - m_i^*(H)| + \sum_{p=1}^{n_r} |r_p - r_p^*(H)| + \sum_{k=1}^{n_c} |c_k - c_k^*(H)| \quad (6)$$

其中, n_m 为 Agent 停电区域内电气量判据的个数; m_i , r_p 和 c_k 分别为第 i 个电气量判据、第 p 个保护(主保护或后备保护)和第 k 个断路器的实际状态; m_i^* , r_p^* 和 c_k^* 分别为 m_i , r_p 和 c_k 的期望状态,均为故障假说 H 的函数。其中, m_i 由式(3)求得。

(2) 通信系统故障差异度指标 $\Delta E^\circ(H)$ 。

$\Delta E^\circ(H)$ 反映保护、断路器的观测状态与实际状态之间的差异程度,用以识别通信异常情况。其计算公式为:

$$\Delta E^\circ(H) = \sum_{p=1}^{n_r} |r_p^\circ - r_p| + \sum_{k=1}^{n_c} |c_k^\circ - c_k| \quad (7)$$

其中, r_p° 和 c_k° 分别对应 r_p 和 c_k 的观测状态。

通信异常主要包括信息丢失和信息畸变 2 种情况:①信息丢失,即信息状态无法获取,属于未知状态;②信息畸变,即信息传输过程中发生畸变,信息状态由 1 变为 0 或由 0 变为 1,但信息仍为已知状态。通信过程中信息丢失或者畸变的情况越严重,故障诊断结果的可行性就越低。无论发生通信中断或信息包偶然丢失,当无法获取信息的观测状态时,可给定相关信息的状态取值为 0.5。在传统的集中

式故障诊断中,不可观测的信息的状态被默认为没有变化,即保护没有动作或断路器没有跳闸。这种处理方式直接将丢失信息判定为已知信息,可能得到错误的差异度指标,进而导致错误的诊断结果。

(3)故障假说中故障数目最小化指标 ΔF 。

ΔF 是在差异度指标一样的情况下,按照一定的原则确定正确的故障假说。由于单个设备故障的概率一般大于 2 个甚至多个设备同时故障的概率,因此在警报差异度指标一样的情况下,故障设备总数、异地故障未切除总数越少,故障假说 H 的可信度越高。 ΔF 的计算公式为:

$$\Delta F = \alpha \left(\sum_{i=1}^{n_i} |d_i| + \sum_{l=1}^{n_l} |o_l| \right) \quad (8)$$

其中, α 为故障假说中故障数目最小化要求在故障诊断目标函数中所占的权重,一般取很小的数值,如 0.01。

2.3 期望状态的定义

2.3.1 电气量的期望状态

电气量的期望状态与 Agent 所辖区域内的设备相对应。当所保护的元件 d_i 发生故障,则其期望状态应为 1,即:

$$m_i^* = d_i \quad (9)$$

2.3.2 保护的期望状态

(1)线路或母线主保护的期望状态。

线路或母线主保护的逻辑为:当所保护的元件 d_i 故障,则主保护 r_i 应该动作,即式(10)成立。

$$r_i^* = d_i \quad (10)$$

(2)线路近后备保护的期望状态。

线路近后备保护的逻辑为:元件故障后,所对应的主保护 r_i 应该动作,但实际拒动,此时近后备保护 r_j 应动作,即式(11)成立。

$$r_j^* = r_i^* \otimes \bar{r}_i \quad (11)$$

其中,“ \otimes ”表示逻辑“与”; \bar{r}_i 表示主保护 r_i 拒动。

(3)线路远后备保护的期望状态。

线路远后备保护的逻辑为:本地所对应的近后备保护 r_j 期望动作,但实际拒动或者关联路径上的故障没有切除,则远后备保护 r_l 应动作,即式(12)成立。

$$r_l^* = r_j^* \otimes \bar{r}_j \oplus \sum_{d_j \in Z_i(r_l)} \left(d_j \otimes \prod_{c_p \in p(r_l, d_j)} \bar{c}_p \right) \oplus o_l \quad (12)$$

其中,“ \oplus ”表示逻辑“或”; r_j 为安装位置与 r_l 相同的近后备保护; $Z_i(r_l)$ 为位于 r_l 保护范围内且与 r_l 属于同一 BA 的设备集合; $p(r_l, d_j)$ 为从保护 r_l 安装位置到设备 d_j 的关联路径上的断路器集合; o_l 为本地 BA 与相邻 BA 的关联因子,表示是否存在异地 BA 设备故障触发 r_l 动作。异地 BA 设备故障触发 r_l 动作的条件为:该设备位于 r_l 保护范围内且其关联路径上的断路器未跳闸。

2.3.3 断路器的期望状态

任何能够跳开断路器 c_j 的保护 r_x 动作并向断路器 c_j 发送跳闸指令,则 c_j 应动作,即式(13)成立。

$$c_j^* = \sum_{r_x \in R_{\text{related}}} r_x \quad (13)$$

其中, R_{related} 表示出口为 c_j 的保护集合; \sum 表示连续的逻辑加法运算。

3 基于 MAS 的主动配电系统故障诊断策略

针对所属主动配电系统中相关设备的实际情况,BA 可处于 2 种不同的 Agent 状态:①待机状态,此时 BA 覆盖区域内无停电设备,无需执行故障诊断任务;②诊断状态,此时 BA 覆盖区域内出现停电设备,需要执行故障诊断任务。对处于诊断状态的 BA,基于 MAS 实现故障诊断的主要思路如下:

a. 首先根据遥测及遥信数据求解 Agent 的故障诊断解析模型,得到局部最优解;

b. 根据 Agent 间的冗余关联进行沟通和协调,进一步确定停电范围内的全局最优解。

详细的故障诊断过程如图 4 所示,大致可分为识别故障关联代理、确定局部最优故障假说、关联部分匹配校验、局部最优故障假说修正以及保护动作性能评价 5 个部分。

(1)识别故障关联代理。

主动配电系统正常运行时,全部 BA 处于待机状态。发生故障后,区域内的保护启动或者断路器变位警报信息触发 BA 进行失电校验。如果校验表明该 BA 覆盖区域内有设备处于失电状态,则将该 BA 切换为诊断状态,否则该 BA 保持待机状态。将切换为诊断状态的 BA 称为故障关联 BA,故障发生后,所有故障关联 BA 将覆盖整个停电区域。需要指出,处于待机状态的 BA 仍能通过通信端口与其他 BA 进行信息交互,协助其他 BA 进行故障诊断。

(2)确定局部最优故障假说。

每个故障关联 BA 依据停电区域内的元件构建故障假说向量 H 。基于 MAS 信息交互,向相邻 Agent 发送“查询”消息以获取相关的电气量信息、保护动作警报和断路器跳闸警报。建立 Agent 故障诊断解析模型并采用 BBO-TS 算法获得本地 BA 的局部最优故障假说,并将其存储于数据库。

(3)关联部分匹配校验。

每个故障关联 BA 在确定局部最优故障诊断结果后,通过 MAS 的信息交互“查询”本地代理与相邻代理关联部分的故障假说,并对该部分的假说进行关联匹配校验。关联部分包括本地代理与相邻代理之间的物理重叠区域,以及本地 BA 后备保护范围内

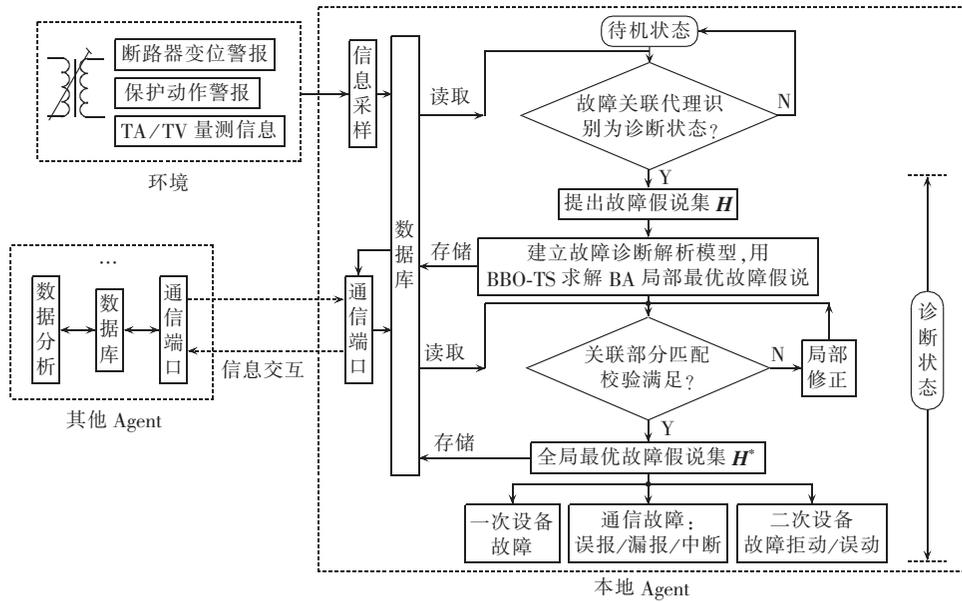


图 4 BA 中的自适应故障诊断过程

Fig.4 Adaptive fault diagnosis procedure in a given BA

除本地设备外的区域。关联匹配校验指检查不同 BA 对关联部分的故障假说的一致性,定义关联匹配校验函数 S 如下:

$$S = \sum_{d_i \in Z_{related}} |d_i - d'_i| + \sum_{r_p \in Z_{related}} |r_p - r'_p| + \sum_{c_k \in Z_{related}} |c_k - c'_k| + \sum_{d'_i \in Z_o(r_i)} \left| o_i - \prod_{c'_k \in P(r_i, d_i)} \bar{c}'_k \right| \quad (14)$$

其中, d'_i 、 r'_p 和 c'_k 分别为相邻 BA 局部最优故障假说中第 i 个设备、第 p 个保护和第 k 个断路器的状态; $Z_{related}$ 为与相邻代理的公共区域; $Z_o(r_i)$ 为除本地设备外, r_i 保护范围内的设备集。

如果 BA 满足关联匹配校验(即 $S=0$)且在给定时间内没有收到相邻 BA 的“通知”消息,则认为当前局部最优故障假说为全局最优故障假说 H^* ,然后对故障设备、可疑动作及警报进行识别。

如果 BA 不满足关联匹配校验(即 $S \neq 0$),则标识导致关联匹配校验失败的决策变量集为矛盾假说 $g=[g_1, g_2, \dots, g_n]$,其中 g_i 为矛盾因子。依次对 S 中的决策变量取非,使得 S 减小的决策变量即为矛盾因子,并将该变量信息发送“通知”消息给相邻 BA,之后进入第(4)部分。

(4)局部最优故障假说的修正。

当关联匹配校验失败时,需修正当前的局部最优故障假说以期获得整个停电范围内的最优故障假说。具体修正方法如下。

步骤 1:定义修正前后 BA 局部最优故障假说分别为 H 和 H' 。确定 H' 的方法如下:优先确定 H' 中任一矛盾因子 g'_i ,即令 $g'_i = \bar{g}_i$ (对 g_i 取非),其余变量采用 BBO-TS 重新求解,以求取修正后 BA 局部最优故障假说 H' 。

步骤 2:计算 BA 的信息修正代价。定义 C_{cost} 为 BA 的信息修正代价,采用下式计算:

$$C_{cost} = \Delta E(H) - \Delta T = E(H) - E(H') - \Delta T \quad (15)$$

其中, $E(H)$ 和 $E(H')$ 分别为原故障假说 H 和修正后的故障假说 H' 的目标函数值; ΔT 为 BA 数据丢失的影响因子,这里给定为 0.5,用来表征对于不同 BA 的修正代价相近时,数据丢失越严重的 BA 的故障假说的可行性越低。

步骤 3:比较本地 BA 与相邻 BA 的 C_{cost} 值。遵循信息修正量最小的原则,对局部最优故障假说做如下修正:如果本地 BA 信息修正代价较大,则保持局部最优故障假说 H 不变,同时向相邻 Agent 发布“通知”消息;否则,将本地 BA 局部最优故障假说更新为 H' ,同时向相邻 Agent 发布“更新”消息。

步骤 4:返回上述第(3)部分(即关联部分匹配校验),重新校验修正后的局部最优故障假说,进而确定全局最优故障假说 H^* 。

(5)故障设备、可疑动作及警报的识别。

根据全局最优故障假说 H^* ,可识别 5 类差异度错误(误动/拒动/误报/漏报/数据丢失)。以保护动作特性为例,其识别方法如表 2 所示。同理可对断路器的动作特性进行评价。

需要指出,通信中断可导致 Agent 间的信息交互失败,从而影响故障诊断。当 BA 受到通信中断影响时,可采用如下方法解决:① Agent 模型将对由通信中断引起的丢失数据进行自适应处理(详见 2.2 节),然后求解解析模型以获取局部最优故障假说;② BA 保持与其他通信正常的相邻 BA 进行信息交

表 2 保护装置的可疑动作及警报识别

Table 2 Identification of suspicious operations and alarms of protective equipments

| 期望状态 r_p^* | 观测状态 r_p^o | 实际状态 r_p | 可疑动作及警报识别 |
|--------------|--------------|------------|-----------|
| 1 | / | 0 | 保护拒动 |
| 0 | / | 1 | 保护误动 |
| / | 1 | 0 | 保护警报漏报 |
| / | 0 | 1 | 保护警报误报 |
| / | 未知 | / | 保护数据丢失 |

注：“/”表示对应的状态为 0 或 1。

互,此时全局最优解为通信正常范围内的全局最优故障假说。

4 算例

以图 5 所示的 32 节点测试系统^[24]为例来说明所提出的方法。假设故障场景为:线路 L_1 中部、母线 2 和线路 L_{17} 发生三重故障且 BA1 与 BA2 间通信中断。故障发生后,接收到的保护和断路器的警报信号为:线路 L_1 两侧主保护动作,线路 L_2 上靠近母线 3 侧后备保护动作,线路 L_{17} 上靠近母线 17 侧近后备保护动作;线路 L_1 两侧断路器跳闸、线路 L_2 两侧断路器跳闸,线路 L_3 靠近母线 2 侧断路器跳闸,线路 L_{17} 两侧断路器跳闸。这是一个区域内出现三重故障,同时伴随通信故障、保护及断路器错误动作的复杂情况。

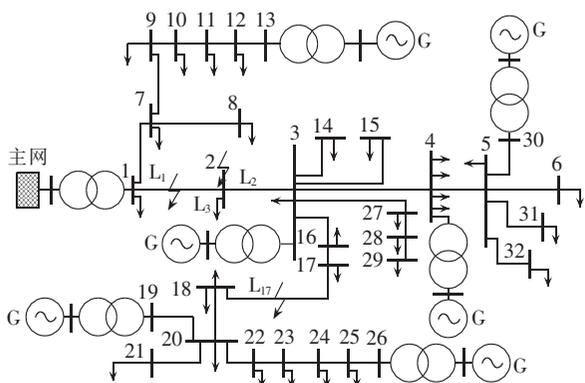


图 5 改进的 32 节点测试系统单线图

Fig.5 Single-line diagram of a modified 32-bus test system

首先,接收到警报的 BA 进行失电校验,确定下列 BA 进入诊断状态:BA1、BA2、BA3、BA17、BA18。基于 JADE 平台实现 Agent 间的信息交互,部分通信消息如表 3 所示。采用基于 MAS 的故障诊断方法,最终得到如表 4 所示的全局最优故障假说。

通过分析全局最优故障假说,可得到诊断结果为:线路 L_1 、母线 2 及线路 L_{17} 故障,BA1 与 BA2 通信中断,母线 2 主保护动作警报漏报,线路 L_2 靠近母线 3 侧后备保护误动并导致线路 L_2 靠近母线 3 侧断路器动作,线路 L_{17} 靠近母线 18 侧主保护拒动。

表 3 消息类型

Table 3 Message types

| 消息类型 | 发送者 | 接收对象 | 消息意图 | 消息状态 |
|-------|-----|------|-------------------------|------|
| 查询 | BA1 | BA2 | 查询 L_1 在母线 2 侧遥测/遥控信息 | 失败 |
| 查询 | BA2 | BA1 | 查询 L_1 在母线 1 侧遥测/遥控信息 | 失败 |
| 查询 | BA2 | BA3 | 查询 L_2 在母线 3 侧遥测/遥控信息 | 成功 |
| 回复—查询 | BA3 | BA2 | 回复 BA2 查询信息 | 成功 |
| 查询 | BA3 | BA2 | 查询 L_2 在母线 2 侧遥测/遥控信息 | 成功 |
| 回复—查询 | BA2 | BA3 | 回复 BA2 查询信息 | 成功 |
| 通知 | BA2 | BA3 | BA2 通知 BA3 关联部分诊断结果 | 成功 |
| 回复—通知 | BA3 | BA2 | 回复通知收到 | 成功 |
| 更新 | BA3 | BA2 | BA3 通知 BA2 更新的诊断结果 | 成功 |
| 回复—更新 | BA2 | BA3 | 回复更新收到 | 成功 |

表 4 求得的全局最优故障假说

Table 4 Obtained global optimal fault hypothesis

| 可疑元件集 | L_1 | 母线 2 | L_2 | L_3 | L_{17} | | | |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | d_1 | d_2 | d_3 | d_4 | d_5 | | | |
| 主保护动作信息 | r_{11} | r_{12} | r_{13} | r_{14} | r_{15} | r_{16} | r_{17} | r_{18} |
| 近后备保护动作信息 | r_{21} | r_{22} | / | r_{23} | r_{24} | r_{25} | r_{26} | r_{27} |
| 远后备保护动作信息 | r_{31} | r_{32} | / | r_{33} | r_{34} | r_{35} | r_{36} | r_{37} |
| 断路器变位信息 | c_1 | c_2 | / | c_3 | c_4 | c_5 | c_6 | c_7 |
| m 判据 | m_1 | m_2 | m_3 | m_4 | m_5 | | | |

注: $X_1/X_2/X_3$ 中 X_1 、 X_2 、 X_3 分别表示实际状态、期望状态、警报状态;“/”表示“不存在”。

对上述复杂故障情形的故障诊断结果表明,基于 MAS 的主动配电系统故障诊断系统具有如下特征。

a. 能够充分挖掘本地 BA 信息与异地 BA 的关联特征。在通信中断时,能够对异地故障进行估计。例如,利用 BA1 与相邻 Agent 的关联性可以预测;故障发生在线路 L_2 且 BA1 覆盖区域内无其他故障。

b. 可以计及数据丢失对 Agent 模型的影响。通过对丢失数据进行特别处理,避免了把丢失数据模拟为错误信息从而可能导致的错误诊断结果。例如,对于 BA1 和 BA2 之间通信失败的情形,按照传统的集中式处理方式一般将未接收到的警报信息均赋值为 0,这会导致 L_1 无故障、 L_1 靠近母线 2 侧保护拒动这样的错误诊断结果。在本文中给出的基于 MAS 的故障诊断方法中,区别处理丢失数据和漏报数据,更加合理。

5 结语

针对嵌入了分布式电源的主动配电系统,提出了一种基于多代理系统的故障诊断方法。首先,设计了基于母线代理的分布式 Agent 构架及其通信机制。然后,在故障诊断解析模型的基础上发展了通用的计及了 Agent 间的关联和耦合关系的分布式解析模型,并着重分析了信息缺失与信息畸变对故障诊断结果准确性的影响。所提出的故障诊断策略利用 BA 之间的通信、推理和协商,对整个停电区域进行故障诊断,这种分布式架构减轻了系统元件间需要交互的信息量。算例结果表明,所提方法能够处理复杂故障,并能容纳信息缺失和畸变等情况。

参考文献:

- [1] 李鹏, 窦鹏冲, 李雨薇, 等. 微电网技术在主动配电网中的应用[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 8-16.
LI Peng, DOU Pengchong, LI Yuwei, et al. Application of microgrid technology in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 8-16.
- [2] 刘健, 张小庆, 同向前, 等. 含分布式电源配电网的故障定位[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(2): 36-42.
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, TONG Xiangqian, et al. Fault location for distribution systems with distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 36-42.
- [3] 梅念, 石东源, 杨增力, 等. 一种实用的复杂配电网故障定位的矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(10): 66-70.
MEI Nian, SHI Dongyuan, YANG Zengli, et al. A practical matrix-based fault location algorithm for complex distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10): 66-70.
- [4] 吴宁, 许扬, 陆于平. 分布式发电条件下配电网故障区段定位新算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 77-82.
WU Ning, XU Yang, LU Yuping. New fault section location algorithm for distribution network with DG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 77-82.
- [5] 高孟友, 徐丙垠, 张新慧. 基于故障电流幅值比较的有源配电网故障定位方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(7): 21-25.
GAO Mengyou, XU Bingyin, ZHANG Xinhui. Fault location based on fault current amplitude comparison for active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7): 21-25.
- [6] 戴志辉, 崇志强, 李川, 等. 基于电压偏差向量 2-范数的主动配电网故障定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 96-102.
DAI Zhihui, CHONG Zhiqiang, LI Chuan, et al. Fault location method of active distribution networks based on 2-norm of voltage deviation vectors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 96-102.
- [7] 张勇, 董明, 张岩, 等. 含分布式电源配电系统中计及警报错误的故障定位[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 57-62, 82.
ZHANG Yong, DONG Ming, ZHANG Yan, et al. Fault location in distribution systems with distributed generators with incorrect and missing alarm messages taken into account[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 57-62, 82.
- [8] 李瑞生. 适用主动配电网的差动保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 104-109.
LI Ruisheng. Differential protection scheme to apply to active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 104-109.
- [9] 徐兵, 张岩, 田方媛, 等. 利用有限相量测量单元的故障识别与广域后备保护策略[J]. 电力建设, 2016, 37(2): 25-33.
XU Bing, ZHANG Yan, TIAN Fangyuan, et al. Fault section identification and wide-area backup protection strategy employing limited phasor measurement units[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(2): 25-33.
- [10] 张岩, 张勇, 文福拴, 等. 融合信息理论的电力系统故障诊断解析模型[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 158-164, 174.
ZHANG Yan, ZHANG Yong, WEN Fushuan, et al. Analytical model for power system fault diagnosis integrated with information theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 158-164, 174.
- [11] 刘丹丹, 段斌, 王俊, 等. 基于 IEC61850 的主动配电网故障自恢复多代理系统[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 119-126.
LIU Dandan, DUAN Bin, WANG Jun, et al. A multi-agent system for fault self-recovery of distribution systems in active distribution network based on IEC61850 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 119-126.
- [12] 郝雨辰, 吴在军, 窦晓波, 等. 基于 IEC61850 的多代理系统在微电网运行控制中的应用[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 139-146.
HAO Yuchen, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. Application of IEC61850-based multi-agent system in microgrid operation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 139-146.
- [13] 王晶, 李瑞环, 束洪春. 基于智能多代理的能量协调控制在直流微网中的应用[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7): 132-138.
WANG Jing, LI Ruihuan, SHU Hongchun. Energy coordination control based on intelligent MAS for DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7): 132-138.
- [14] BARAN M E, EL-MARKABI I M. A multiagent-based dispatching scheme for distributed generators for voltage support on distribution feeders[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 52-59.
- [15] REN F M, ZHANG M J, SUTANTO D. A multi-agent solution to distribution system management by considering distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1442-1451.
- [16] 徐光福, 张春合, 严伟, 等. 基于 EPON 通信的智能配电网馈线差动保护[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 91-96.
XU Guangfu, ZHANG Chunhe, YAN Wei, et al. Feeder differential protection based on EPON communication for smart distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 91-96.
- [17] 唐成虹, 杨志宏, 宋斌, 等. 有源配电网的智能分布式馈线自动化实现方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 101-106.
TANG Chenghong, YANG Zhihong, SONG Bin, et al. A method of intelligent distributed feeder automation for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 101-106.
- [18] 李红伟, 孔冰, 李超. 基于网损最小的配电网多代理复电系统设计[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 155-161.
LI Hongwei, KONG Bing, LI Chao. Design of multi-agent

distribution network restoration system based on minimum grid loss[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 155-161.

- [19] 刘凯,李幼仪. 主动配电网保护方案的研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16):2584-2590.
LIU Kai, LI Youyi. Study on solutions for active distribution grid protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16):2584-2590.
- [20] ZEINELDIN H H, SHARAF H M, IBRAHIM D K, et al. Optimal protection coordination for meshed distribution systems with DG using dual setting directional over-current relays[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1):115-123.
- [21] 高厚磊,李娟,朱国防,等. 有源配电网电流差动保护应用技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5):40-44.
GAO Houlei, LI Juan, ZHU Guofang, et al. Study on application technology of current differential protection in active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5):40-44.
- [22] SIMON D. Biogeography-based optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2008, 12(6):702-713.
- [23] BHATTACHARYA A, CHATTOPADHYAY P K. Biogeography-based optimization for different economic load dispatch problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 1064-1077.
- [24] ZAYANDEHROODI H, MOHAMED A, FARHOODNEA M, et al. An optimal radial basis function neural network for fault

location in a distribution network with high penetration of DG units[J]. Measurement, 2013, 46(9):3319-3327.

作者简介:



田方媛

田方媛(1992—),女,江苏扬州人,硕士研究生,主要从事电力系统故障诊断和系统恢复方面的研究(E-mail:fangyuantian@gmail.com);

张岩(1990—),男,山东巨野人,博士研究生,从事电力系统故障诊断和系统恢复方面的研究(E-mail:zhangyan_1990@126.com);

徐兵(1992—),男,浙江绍兴人,硕士研究生,从事电力系统故障诊断和系统恢复方面的研究(E-mail:xubing_zju@126.com);

文福拴(1965—),男,河南林州人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电力系统故障诊断与系统恢复、电力经济与电力市场、智能电网与电动汽车等方面的研究工作(E-mail:fushuan.wen@gmail.com);

朱炳铨(1967—),男,浙江绍兴人,高级工程师,硕士,主要从事电网调度运行管理工作(E-mail:hzzbq@sina.com);

徐立中(1983—),男,浙江杭州人,工程师,博士,主要从事电力系统调度运行控制工作(E-mail:lizhoxu@gmail.com)。

Fault diagnosis based on multi agent system for active distribution system

TIAN Fangyuan¹, ZHANG Yan¹, XU Bing¹, WEN Fushuan^{1,2}, ZHU Bingquan³, XU Lizhong³

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Department of Electrical and Electronic Engineering, Universiti Teknologi Brunei, Bandar Seri Begawan BE1410, Brunei; 3. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, China)

Abstract: The relay protections originally configured for traditional distribution network with single power-supply should be updated to meet the operational requirements of active distribution network with distributed generations. As a core function of distribution automation system, the fault diagnosis module plays an important role in the accurate and quick fault detection for speeding up the system recovery. A method of fault diagnosis based on MAS(Multi Agent System) is proposed for the active distribution network. The MAS framework is designed, the general agent model is established and the fault diagnosis strategy based on MAS is developed. In the designed MAS framework, each bus/node is equipped with an agent based on the analytical model of fault diagnosis and a correlation factor is employed to represent the coupling relationship between any two bus agents. The impact of information loss or information distortion on the accuracy of fault diagnosis is analyzed separately. The developed strategy adopts the communication and negotiation mechanism between agents to obtain the global optimal results of fault diagnosis. The simulation for a modified 32-bus test system demonstrates that, the proposed method can tolerate the loss or distortion of alarm information and evaluate the operating characteristics of protections and circuit-breakers.

Key words: active distribution network; distributed power generation; fault diagnosis; analytical model; multi agent systems