

基于多代理技术的有源配电网供电恢复策略

董志辉,林凌雪,管 霖,陈恒安,梁倩仪

(华南理工大学 电力学院,广东 广州 510641)

摘要:针对有源配电网发生故障后的快速供电恢复需求,提出基于多代理技术的自愈恢复系统。该系统采用分层协调的恢复模式,由下层区域代理为本区域发起供电恢复进程,上层馈线代理协调处理下层代理间的冲突。提出功率平衡度和转供容量裕度指标,基于该指标,当配电网故障隔离后,非故障失电馈线被分解为多个独立的区域,自愈系统能通过微网聚合恢复失电区域的供电,还可利用联络开关对孤岛区域进行负荷转供,达成综合恢复供电的目标。在供电恢复过程中,同时考虑馈线电压和电流的约束限制,保证系统在故障恢复后的安全稳定运行。在DIgSILENT软件上搭建含分布式电源的4馈线配电系统,仿真结果验证了所提策略的可行性和有效性。

关键词:供电恢复;多代理系统;有源配电网;功率平衡度;转供容量裕度

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.05.004

0 引言

故障发生后的供电恢复是智能配电网的核心功能,对提升配电网的供电可靠性有重大作用^[1]。传统配电网是基于单向潮流的辐射形网络,供电恢复在满足配电网安全运行的约束条件下,利用联络线路以达到快速恢复供电的目标^[2-4]。近年来,随着大量分布式电源 DG (Distributed Generator) 接入配电网,配电网由单电源开环的运行方式逐渐转变为多端电源的运行方式,从而给配电网的供电恢复提出了更高的要求。

传统的配电网供电恢复方案采用集中式的控制策略,利用数学优化算法^[5-6]、遍历法^[7]、启发式算法^[8-9]以及人工智能算法^[10-11]等集中式算法来解决供电恢复问题。该策略的优势是基于全局信息计算可得到最优的恢复方案,且实现的方式较为简单。然而集中式的决策需要可靠的通信通道支持,并需要进行大量的复杂计算分析,从而影响供电恢复的快速性;同时依赖于一个集中的决策单元会降低系统控制的可靠性。而随着分布式控制技术的不断发展和应用,许多文献提出利用多代理系统 MAS (Multi-Agent System) 解决供电恢复问题。文献^[12]提出当配电网发生故障时系统确定一个复电总代理,并由该代理通过全局优化计算获取最优供电恢复方案。该系统的决策只依赖于一个代理,缺少与其他代理间的协调合作,因此可靠性较低。文献

[13-14]提出馈线代理 FA (Feeder Agent) 和区域代理 RA (Region Agent) 分层协作的自愈构架,并考虑分布式电源的接入以及负荷优先级的影响,但是其忽略了转供时原馈线电压约束的条件。文献^[15]提出的供电恢复策略考虑了可控负荷的合理投切,保证负荷重要程度的同时尽可能恢复更多负荷,然而实现该方案的多代理系统需要大量的代理,每个负荷和分布式电源都需要接入对应的代理,针对大型的配电网是不现实的。文献^[16]提出的馈线代理首先利用知识库寻找是否存在满足当前状态下的优化恢复路径,若不存在则通过集中式优化计算获取最优供电恢复路径,然而自建知识库不适用于当下不断变化的网络结构,且集中的优化计算花费时间过长,影响恢复进度。文献^[17]采用对等协调控制下的多代理供电恢复系统,各个代理之间地位平等,通过相邻代理之间的信息交换,迭代得到全局信息从而实现供电恢复决策,其本质上需要做全局优化算法。文献^[18]提出在依靠全局信息的前提下,故障区域代理对失电区域进行遍历组合从而得到最终的恢复方案,然而该恢复策略仅局限于馈线的先后联络顺序,而无法同时考虑所有可用联络馈线,因此恢复后的网络运行状态较差。

为了克服上述研究的不足,本文提出一种双层协作式多代理系统来解决供电恢复的问题。其中多代理系统下层的区域代理具备为本区域发起供电恢复的能力,而上层的馈线代理起到全局管理和协调冲突作用。本文策略以配电馈线电流和电压不越限为约束条件,以恢复尽可能多失电负荷的决策目标,并考虑失电区域下的负荷优先级。基于提出的功率平衡度和转供容量裕度指标,该自愈系统不仅能通过微网聚合来恢复失电区域的供电,还能够利用联络开关对孤岛区域进行负荷转供。通过在改进的4馈线系统上进行仿真测试验证了策略的可行性和有

收稿日期:2018-08-05;修回日期:2019-02-11

基金项目:国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(51761145106);广东省自然科学基金资助项目(2017A0303-10260)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51761145106) and the Natural Science Foundation of Guangdong Province(2017A030310260)

效性。

1 基于多代理的配电网自愈恢复系统构架

多代理系统为面向复杂互联系统而实现分布式控制提供了一种有效的框架和实现机制,其最突出的优点表现为自治性、灵活性。每个代理可以基于对外部环境的观测和内建的知识库自行作出响应和行为的规划,并且可以适应不同的系统配置。同时各个代理间通过信息交换和协调合作,共同实现全局目标。针对分布式电源广泛接入的有源配电网,可以将供电恢复问题分解为多阶段、多区域的问题^[19],因此分散协调控制下的多代理系统很适用于解决该问题。

为实现配电网的供电恢复,本文提出双层协作多代理系统控制框架,通过在馈线首端和区域边界上设置智能代理,实现对一次系统的监控。其中上层构架为包含馈线代理的协调层,其配置在变电站出线侧的每回馈线上,对管控的馈线进行状态汇集、监视和分析,以及对下层代理之间的冲突进行协调判断。下层为包含区域代理的决策层,其中配电网中每条馈线被划分为多个分治区域,每个区域均以多个分段开关作为区域边界。区域代理配置在各个分治区域的首端开关上,可对本地范围内的多种设备(包括负荷、分布式电源以及连接至节点上的进出侧分段开关)进行管理控制。区域代理一方面能够完成本地状态信息的及时采集和上传,另一方面可自主完成内、外部状态感知和判断,并在故障隔离后实现供电恢复的功能。针对节点区域在供电恢复过程中的位置和状态,区域代理可自动标记为正常区域代理 NRA (Normal Region Agent)、待转供区域代理 NTRA (Non-Transfer Region Agent)、从属区域代理 SRA (Subordinate Region Agent) 中的一种。

正常区域代理管控下的区域处于正常运行馈线的范围,且未经历过失电或微网状态。待转供区域代理管控的区域在配电网故障后处于停电或微网状态,即未联络至正常运行馈线上。从属区域代理管控下的区域经历过失电或微网状态,但在供电恢复的过程中已联络至正常运行馈线上。每个区域代理都具有相同的初始逻辑功能,只有当配电网发生故障后,各个区域代理才根据系统状态自动标记自身类型。图1为配电网中多代理系统的控制框架示意图,图中F表示馈线。

该多代理系统采用分布式的控制方式,不依赖于大量广域信息,只根据有限的局域信息进行决策,相对于集中式的控制方式极大地提升了响应速率,符合本文提出的配电网快速供电恢复的需求。

2 供电恢复过程的指标定义

本文设定的供电恢复策略中,代理之间只需通

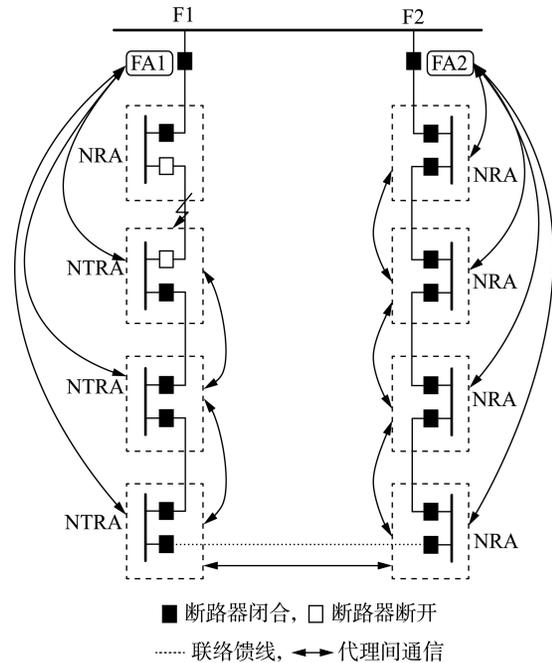


图1 多代理系统构架示意图

Fig.1 Structure of multi-agent system

过简单的逻辑判断即可实现快速而并行的供电恢复。该方案在满足配电网正常运行时电流和电压约束的情况下,计及负荷优先程度,尽可能多地恢复负荷。针对逻辑判断过程中的信息需求,本节分别定义了区域代理的状态划分、微网功率平衡度指标、转供容量裕度指标以及区域负荷优先级指标。

2.1 区域代理的状态划分

在有源配电网供电恢复的过程中,区域代理需要确定自身管控区域的状态。为了明确区域状态的划分,本文首先针对接入配电网内的分布式电源进行以下分类。

a. 可控型分布式电源。该类分布式电源具有稳定、可控的能力,如微型燃气轮机、大容量储能等。该类分布式电源在并网运行时,一般处于停机或浮充状态,而在孤岛运行时可转变为V-F控制模式,稳定孤岛内电压和频率的平衡,可承担主电源的作用。

b. 不可控型分布式电源。该类分布式电源不能够独立运行,需借助外部电源提供的频率和电压伴随运行,一般以波动性较强的光伏电源和风力发电为主。在并网或跟随主电源运行时,采用PQ控制的分布式电源以最大功率点跟踪的方式输出功率,采用PV控制的分布式电源保持其接入点的电压恒定,输出额定有功功率。当该类分布式电源处于孤岛运行时,系统将其快速切除,退出运行。

本文针对供电恢复时的微网运行采用成熟的主从控制模式。若待转供区域代理管控范围内有可控型分布式电源,且满足区域内功率平衡要求,则判断本区域为微网运行区域;反之,若待转供区域代理管

控区域内没有可控型分布式电源或无法满足区域内功率平衡要求,则判断本区域为失电区域。

2.2 微网功率平衡度指标

当失电区域通过分布式电源恢复供电时,需要满足分布式电源和负荷的容量平衡要求以及保持形成的微网稳定运行。因此本文提出针对微网能量平衡下的功率平衡度指标 C_{PB} 。该指标是基于失电区域收到微网区域发送的容量信息并结合自身信息所得的最大负荷恢复能力,其数学模型为:

$$C_{PB} = \sum_{i \in IUJ} S_{Gi,B} + \sum_{j \in IUJ} S_{Mj} - \sum_{k \in I} S_{LDk} \quad (1)$$

其中, $S_{Gi,B}$ 为不可控分布式电源 i 在故障发生时刻的瞬时功率; S_{Mj} 为可控型分布式电源 j 的额定功率; S_{LDk} 为微网区域内负荷 k 的容量; I 表示微网区域; J 表示失电区域。

2.3 转供容量裕度指标

当利用配电网联络馈线对孤岛进行负荷转供时,需要满足配电馈线上电流和电压的约束条件,从而保证转供后配电网的正常运行。对应的约束条件可转换为转供所需的容量指标,具体如下。

a. 保持负荷转供后馈线流过的电流不超过馈线额定电流,转供前正常运行馈线在满足电流约束下所能提供的最大电流为:

$$I_{ava,Z} = \min_Z (I_{max,j} - I_j) \quad (2)$$

其中, $I_{ava,Z}$ 为转供前馈线 Z 能提供的最大可用电流; $I_{max,j}$ 为位于馈线 Z 的支路 j 最大额定电流; I_j 为转供前支路 j 流过的电流值。

b. 保持负荷转供后原正常运行馈线上节点电压不越限,将电压约束条件以对应的电流约束值的形式表达为:

$$I_{vh} = \frac{V_{bh} - V_{min}}{Z_{ph}} \quad (3)$$

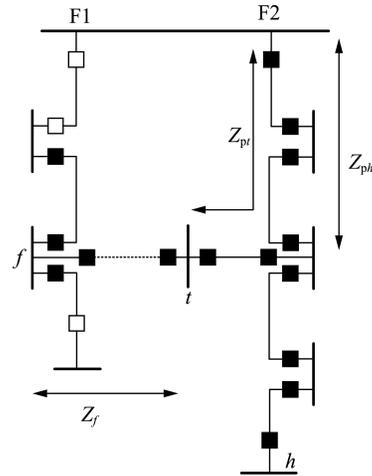
其中, I_{vh} 为保证原正常馈线电压不越限下的最大附加电流; V_{bh} 为正常馈线上最低电压节点 h 对应的电压值; V_{min} 为馈线最小允许电压值; Z_{ph} 为正常运行馈线首端到距离节点 h 最近的转供路径节点的线路阻抗值。

c. 保持负荷转供后转供区域的节点电压不越限,可将对应的电压约束条件以电流约束值的形式表述为:

$$I_{vf} = \frac{V_{bt} - V_{min}}{Z_{pt} + 0.5Z_f} \quad (4)$$

其中, I_{vf} 为保证转供区域电压不越限下的最大附加电流; V_{bt} 为正常馈线上联络节点 t 电压值; Z_{pt} 为正常运行馈线首端到联络节点 t 上的线路阻抗值; Z_f 为转供区域 f 的线路阻抗值。

式(3)、(4)中的各阻抗如图2所示。



■ 断路器闭合, □ 断路器打开, 联络馈线

图2 电压约束下的馈线阻抗示意图

Fig.2 Schematic diagram of feeder impedance under voltage limit

为了保证配电网负荷转供满足电流和电压的约束条件,正常运行馈线所提供的最大转供电流 I_{tr} 为:

$$I_{tr} = \min(I_{ava,Z}, I_{vh}, I_{vf}) \quad (5)$$

根据式(5)计算所得的馈线最大转供电流,并且考虑分布式电源接入对转供的影响,本文提出负荷转供过程所需的转供容量裕度指标 C_{MA} ,该指标是基于转供区域在收到正常馈线发送的约束信息并结合自身容量信息所得的最大转供恢复能力,其数学模型为:

$$C_{MA} = U_N I_{tr} + \sum_{i \in R} S_{Gi,B} + \sum_{j \in R} S_{Mj} \quad (6)$$

其中, U_N 为馈线额定电压值; I_{tr} 为正常运行馈线所提供的最大转供电流; R 为待转供区域。

2.4 区域负荷优先级指标

每个区域代理根据自身管控范围内的负荷信息,计算可得本区域的负荷优先级指标 M_{re} :

$$M_{re} = \sum_{i \in D} x_i S_i \quad (7)$$

其中, x_i 为负荷的重要度指标,根据馈线代理收集的所有区域负荷信息进行重要等级分类,分别为 A 类、B 类和 C 类,给定相对应的数值,并由馈线代理预存至对应从属的区域代理中; S_i 为区域内负荷额定功率; D 为区域范围。

3 基于多代理系统构架下的供电恢复进程

当配电网故障隔离后,故障点下游区域会失去与公共配电网的连接而处于孤岛状态。若检测到孤岛为失稳状态(区域内频率和电压无法维持正常值),对应的区域代理开始发起孤岛分解模式。然而为了提高配置和运行的灵活性,通常每个代理并不储存完整的网架拓扑结构和运行信息,通过在区域代理中设计基于本地信息的被动式孤岛检测方案,

代理仅根据本地电压和频率的偏移程度与偏移持续时间,即可判断自身区域是否处于孤岛失稳状态。

各个区域代理在检测本区域满足孤岛失稳判据后,控制其边界分段开关跳闸,断开与相邻区域之间的联络,非故障失电馈线被分解为相互独立的区域,供电恢复进程开始启动。各个代理根据其管控区域在供电恢复过程中的位置和状态标记自身角色,并执行相应的操作,具体操作步骤如本节下文所述,综合供电恢复的流程图如图 3 所示,图中数字表示对应信息的传递路径,传递路径如图中传递箭头所示。

3.1 待转供区域代理

在分布式电源广泛接入配电网的背景下,本文对于待转供区域代理的设计,不仅需要考虑到微网对失电负荷快速复电的作用,同时也可以利用联络馈线进行负荷转供,从而提升供电恢复的可靠性。每个待转供区域代理具体决策流程如下。

a. 首先待转供区域代理主动寻找联络至正常馈线的通道,即向相邻的正常区域代理和从属区域代理发送转供申请和区域负荷优先级 M_{re} 。

b. 对侧的正常区域代理或从属区域代理回复约束信息(包括选取正常馈线的最大可用电流 $I_{ava,z}$ 和最大附加电流 I_{vh} 中的较小者以及自身区域电压

值 V_m) 至待转供区域代理。

c. 每个待转供区域代理结合对侧区域电压值 V_m 和自身区域的阻抗信息,计算得到待转供区域电压不越限下的最大附加电流 I_{vf} 。

d. 待转供区域通过式(5)计算满足转供后馈线电压和电流约束下的最大转供电流 I_{tr} ,进而计算得到转供容量裕度 C_{MA} 。

e. 当待转供区域代理收到多端代理回复的约束信息并计算得到多个 C_{MA} 时,选择最大的 C_{MA} 判断是否大于本区域负荷需求。若满足负荷容量需求,则给对应的区域代理发送联络请求信号,并拒绝其他区域代理;若不满足负荷容量需求,则回复所有代理拒绝转供。

f. 当待转供区域代理判断没有相邻的正常区域代理和从属区域代理,或收到拒绝转供的信号时,待转供区域需继续识别自身管控区域是微网区域还是失电区域。

g. 当待转供区域代理识别自身管控区域为微网区域时,开始启动主动式微网聚合进程,向相邻的待转供区域代理发送主动聚合邀请和自身容量信息。

h. 当待转供区域代理收到相邻代理回复的同意聚合信号和区域负荷优先级 M_{re} 后,需选择优先

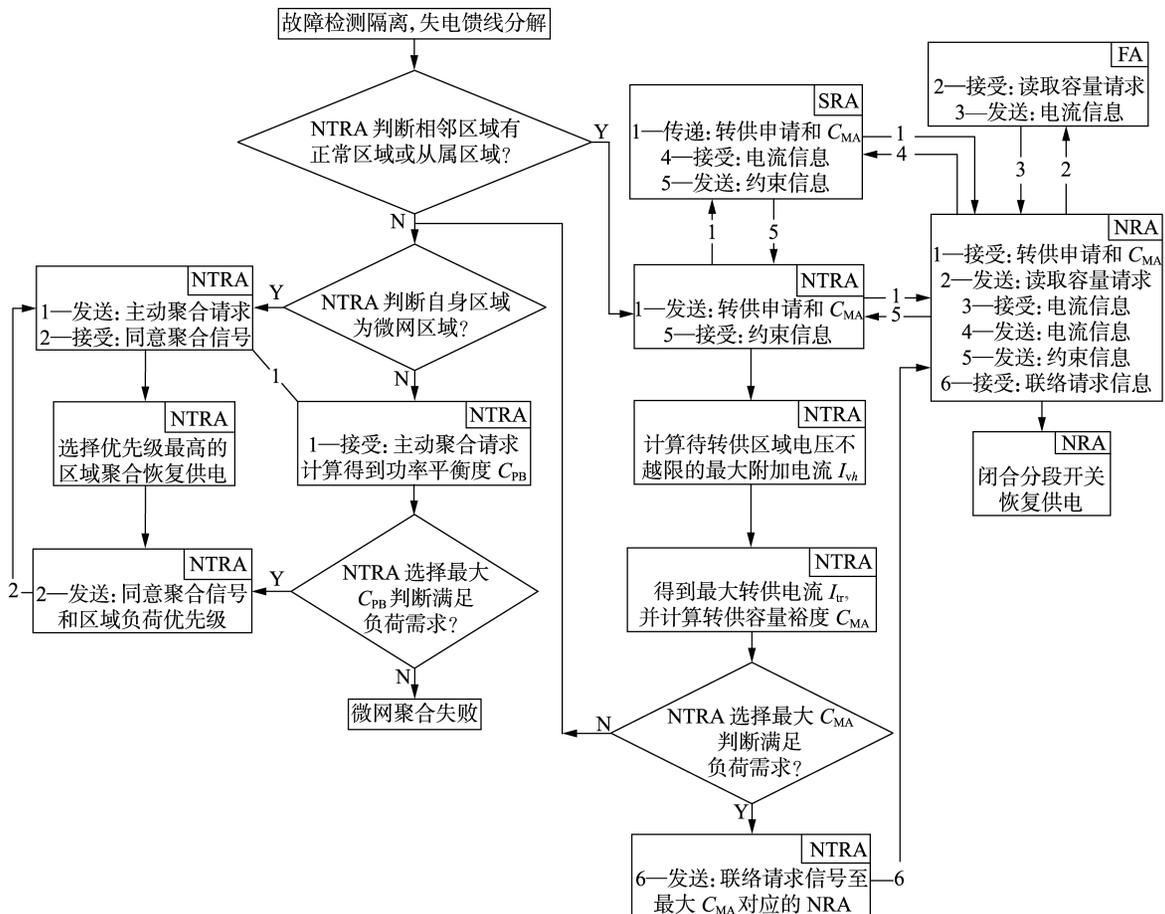


图 3 供电恢复的流程图

Fig.3 Flowchart of power supply restoration

级较高的待转供区域闭合分段开关,从而恢复供电。发起主动微网聚合的待恢复区域代理对新形成的微网实行主导权,同时闭锁其他区域代理的控制功能。

i. 当待转供区域代理识别自身区域为失电区域且收到其他代理的主动聚合邀请时,利用对侧区域的容量信息和自身区域的分布式电源信息,通过式(1)计算功率平衡度指标 C_{PB} 。

j. 当待转供区域代理计算得到多个功率平衡度指标 C_{PB} 时,选择最大的 C_{PB} 判断是否满足本区域的负荷需求。若满足负荷容量需求,则向对应的区域代理发送同意聚合信号和自身区域负荷优先级 M_{re} ,并拒绝其他区域代理;若不满足负荷容量需求,则回复所有代理拒绝聚合。

3.2 从属区域代理

当待转供区域联络至正常馈线而恢复供电后,其区域代理根据预定义的特征识别将该区域定义为上游正常运行区域下的从属区域,对应区域的代理为从属区域代理,并受上游正常区域代理所管理。每个从属区域代理具体的决策流程如下:

a. 从属区域代理收到待转供区域代理发送的转供申请和区域负荷优先级 M_{re} 后,将申请信息和对应的 M_{re} 值传递至上级的正常区域代理中;

b. 从属区域代理收到正常区域代理回复的电流信息后,结合本区域的电压值,将约束信息发送至最大 M_{re} 值对应的待转供区域代理中;

c. 从属区域代理收到待转供区域代理发送的联络请求信号后,闭合与待转供区域间的分段开关,实现供电恢复。

3.3 正常区域代理

每个正常区域代理由系统预设定的上层馈线代理管理,同时其对转供至本区域内的从属区域代理起上级主导作用,且正常区域代理拥有其主导范围内所有从属区域的拓扑信息。每个正常区域代理具体的决策流程如下:

a. 当正常区域代理在收到待转供区域代理或从属区域发送的转供申请和 M_{re} 值后,向其上层馈线代理发送读取容量请求;

b. 正常区域代理收到上层馈线代理回复的电流信息后,将电流信息反馈至发送最大 M_{re} 值的从属区域代理中,或者结合本区域的电压值,将约束信息发送至最大 M_{re} 值对应的待转供区域代理中;

c. 正常区域代理收到待转供区域代理发送的联络请求信号后,闭合与待转供区域间的分段开关,实现供电恢复。

3.4 馈线代理

本文设定的馈线代理拥有管控馈线的拓扑信息,并掌握着馈线正常运行状态下的实时潮流信息,

每个馈线代理具体的决策流程如下:

a. 当馈线代理收到下层正常区域代理发送的读取容量请求后,通过式(2)和(3)计算得到电流信息(包括最大可用电流 $I_{ava,z}$ 和最大附加电流 I_{vh})。

b. 若馈线代理接收到其范围内多个正常区域代理发送的读取容量请求,由该馈线代理对所有管辖下的正常区域做出转供优先级排序,该转供优先级排序的规则为越靠近馈线首端的区域优先级越高,馈线代理向优先级较高的正常区域代理反馈电流信息。

4 算例分析

4.1 算例参数

本文算例采用 4 馈线配电系统来验证所提供电恢复策略的有效性,并采用 DIgSILENT 进行仿真分析。该配电系统有 70 个节点、73 条支路,5 个联络开关在正常运行条件下处于常开的状态,系统基准电压为 12.66 kV,基准功率为 10 MW,各节点负荷按优先级程度分为 A、B、C 这 3 类,对应的优先程度值分别为 100、50 和 25,其线路参数及各时段具体负荷数据参考文献[20]。此外分别在节点 13、27 和 40 接入额定容量为 250 kW 的风机,风机参数及风速预测值参考文献[21];在节点 61 处接入额定容量为 150 kW 的燃气轮机。具体系统如图 4 所示,图中 s 表示断路器,L 表示负荷,GT 表示燃气轮机,WP 表示风机。

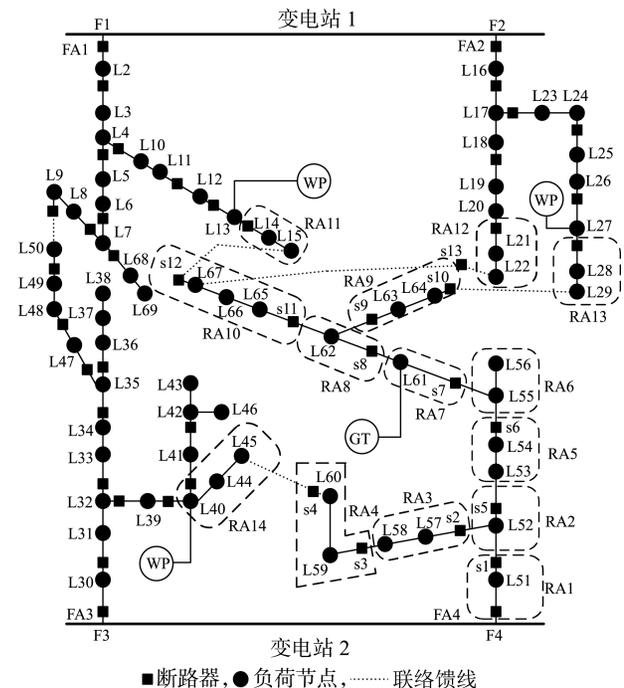


图 4 基于多代理构架下的 4 馈线配电系统
Fig.4 Four-feeder distribution system based on multi-agent framework

4.2 算例结果与分析

假设在 F4 的出线侧发生永久性故障,触发保护

动作,跳开该出线处断路器从而隔离故障。故障点下游的馈线处于孤岛失稳状态,触发各个区域代理内的孤岛分解模块,RA1—RA10 控制本区域断开与相邻区域的分段开关,对应的区域 1—10 进入完全孤岛状态,以故障发生时刻下的分布式电源出力 and 负荷功率作为供电恢复进程中的计算依据。

根据上述区域划分策略可知,RA7 管控范围内的燃气轮机和负荷可满足容量平衡关系,触发 RA7 内的微网能量平衡管理模块,燃气轮机作为主控分布式电源,以 V-F 控制模式输出功率,使区域 7 可微网运行,而剩余的孤岛区域范围内无可控分布式电源,因此区域 1—6、8—10 都被划分为失电区域。

各个孤岛区域下的区域代理并行启动供电恢复过程。首先待转供区域代理向相邻但不相连的区域代理发送转供申请,对侧区域代理在所管控区域为正常运行状态的条件下可反馈容量信息,然后在接收到容量信息的前提下,待转供区域代理进行转供裕度的计算并进行判断,从而完成转供过程,同时管控微网区域的区域代理可发起主动微网聚合进程。在供电恢复第一阶段,NTRA10 同时向相邻的 NRA11 和 NRA12 发送转供申请,NTRA9 和 NTRA4 分别向 NRA13 和 NRA14 发送转供申请,进而正常区域代理向对应的上级馈线代理容量读取请求,通过读取本馈线的实时潮流信息后,FA1 和 FA3 分别反馈容量信息至 NR11 和 NR14 中,FA2 选择转供优先级较高的 NR13 反馈容量信息,NTRA10、NTRA9 和 NTRA4 收到对侧正常区域代理回馈的容量信息后,在满足约束条件下完成转供过程,同时,RA7 发起主动微网聚合进程,选择负荷优先级较高的 RA6 恢复供电;在第二阶段,RA8 在收到两端从属区域代理回馈的容量信息(分别对应 F1 和 F2)后,分别计算转供容量,选择转供容量裕度较大的 F2 恢复供电,另一方面,微网区域的功率平衡度不足而无法完成下一轮的微网聚合,从而保持原状;在第三阶段的供电恢复,RA2 和 RA7 管控区域就近联络至正常运行馈线而恢复供电;在第四阶段,SRA2 和 SRA6 都选择负荷优先级较高的 NTRA5 反馈容量信息,而 NTRA5 选择转供容量裕度较大的 F3 恢复供电;最后阶段,RA1 管控区域就近联络至 F3 恢复供电。

本文给定代理间通信量的计算规则为:命令信号采用面向通用对象的变电站事件 GOOSE(Generic Object-Oriented Substation Event)报文,其单位占用容量为 76 Byte;数据信息(模拟量)采用采样值 SV(Sampled Value)报文,其单位占用容量为 169 Byte。表 1 给出各个阶段下的代理间通信量、恢复过程耗时以及开关动作结果。根据表 1 可知,本文策略在复电过程中保持区域代理并行工作,每一阶段下失

电区域能够就近寻找到最优的供电恢复路径,并保证负荷优先级较高的区域得到优先恢复。

表 1 各个阶段下的代理通信量、恢复过程耗时以及开关动作结果

Table 1 Agent traffic, restoration time consumption and switch actions at all stages

阶段	开关动作结果	代理通信量/Byte	恢复过程耗时/ms
第一阶段	闭合 s12、s10 和 s4,区域 10、9 和 4 分别联络至 F1、F2 及 F3; 闭合 s7,区域 7 与 6 组成微网	2 289	400
第二阶段	闭合 s9 和 s3,区域 8 和 3 分别联络至 F2 和 F3	1 419	470
第三阶段	闭合 s8 和 s2,区域 7 和 2 分别联络至 F2 和 F3	946	410
第四阶段	闭合 s5,区域 5 联络至 F3	870	530
第五阶段	闭合 s1,区域 1 联络至 F3	473	400

为了证明本文基于多代理系统的供电恢复策略在计算速度和网络恢复结果上的优势,将其与文献[12]提出的方案 1 以及文献[18]所提的方案 2 进行对比。方案 1 利用复电总代理进行集中式的优化计算,从而获得最优的供电恢复结果。方案 2 提出故障区域代理对失电区域进行遍历组合而得到最终恢复结果。表 2 中对比了供电恢复后系统的网损值、最低电压值(标么值)、开关动作方案以及恢复全时段内的通信量。由表中各项对比可知,本文所提基于分布式决策的供电恢复策略在保证通信量适中的前提下,所得恢复方案中的系统网损值和节点电压能够接近方案 1 对应的全局最优解,且远优于方案 2 对应的遍历组合解。通过比较各方案在恢复过程的耗时可知,本文所提策略能够兼顾并行性和快速决策性的优点,无需进行集中式的优化计算,其计算速度远快于其余 2 个方案。综合对比各策略的计算速度和结果可知,本文策略更具备优越性和全面性。

表 2 不同供电恢复策略的结果比较

Table 2 Result comparison among different restoration strategies

参数	本文策略	方案 1	方案 2
网损值/kW	148.34	147.58	170.12
最低电压值	0.931 6	0.936 7	0.902 1
开关动作方案	闭合 s12、s10 和 s4,断开 s11 和 s6	闭合 s12、s10 和 s4,断开 s11 和 s7	闭合 s12 和 s4,断开 s11
全时段通信量/Byte	5 997	10 560	5 271
恢复过程总耗时/s	3.2	12.4	4.8

由上述算例分析可知,本文策略的优势在于每个区域代理的逻辑设计相同,代理间判断规则简单,无需集中式的转供电优化搜索过程,只需简单的信息交互即可实现快速而并行的供电恢复,并且在每

一轮恢复阶段中失电区域都能够寻求到满足约束下的最优联络路径,从而确保得到全时段下相对较优的供电恢复结果。供电恢复后的电网结构能较好地利用所有联络通道的转供电能力,且对复杂网架结构和多联络接线模式具有较强的适应能力。

5 结论

本文充分利用多代理技术的优势,提出基于多代理系统的综合供电恢复策略。在该多代理系统中,上层馈线代理对供电恢复过程起协调冲突的作用,下层区域代理能够根据区域状态识别自身的角色并发起供电恢复进程。该策略在满足配电馈线电流和电压不越限的约束条件下,尽可能多地恢复失电负荷,并考虑负荷优先级的选择,同时充分利用分布式电源和联络馈线在供电恢复中的作用。仿真结果表明,通过实现本文提出的策略可得到预期的供电恢复方案,区别于传统集中式的供电恢复方案,该策略无需集中式的转供电优化搜索过程,只需要简单的交互信息即可实现快速而并行的供电恢复,适用于各种复杂的网架结构,同时保证得到的恢复方案相对较优。

参考文献:

- [1] 邓良辰,刘艳丽,余贻鑫,等. 考虑故障处理全过程的配电网信息物理系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2017,37(12):22-29.
DENG Liangchen, LIU Yanli, YU Yixin, et al. Reliability assessment of distribution network CPS considering whole fault processing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 22-29.
- [2] 李春燕,杨强,魏蔚,等. 计及风速与负荷相关性的配电网重构方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(2):148-153.
LI Chunyan, YANG Qiang, WEI Wei, et al. Distribution network reconfiguration considering correlation between wind-speed and load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 148-153.
- [3] LI J, MA X Y, LIU C C, et al. Distribution system restoration with microgrids using spanning tree search [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 3021-3029.
- [4] 周滨,解慧力,郑柏林,等. 基于混合算法的配电网故障重构与孤岛运行配合[J]. 电网技术,2015,39(1):136-142.
ZHOU Quan, XIE Huili, ZHENG Bolin, et al. Hybrid algorithm based coordination between distribution network fault reconfiguration and islanding operation [J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 136-142.
- [5] 王旭东,林济铿. 基于分支定界的含分布式发电配电网孤岛划分[J]. 中国电机工程学报,2011,31(7):16-20.
WANG Xudong, LIN Jikeng. Island partition of the distribution system with distributed generation based on branch and bound algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 16-20.
- [6] LIN Jikeng, WANG Xudong, WANG Peng, et al. Two-stage method for optimal island partition of distribution system with distributed generations [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2012, 6(3): 218-225.
- [7] 侯宇翔,彭敏放,朱亮,等. 考虑联络线转供及孤岛划分的配电网风险评估[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):79-85.
HOU Yuxiang, PENG Minfang, ZHU Liang, et al. Risk assessment for distribution network considering tie line transfer and island partition [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 79-85.
- [8] 刘志文,夏文波,刘明波. 实现微网供电恢复的分布式电源自组网策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):192-199.
LIU Zhiwen, XIA Wenbo, LIU Mingbo. Distributed generator self-organized network strategy applied to microgrid service restoration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 192-199.
- [9] 郑兰,别朝红,王秀丽. 一种快速启发式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.
- [10] 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.
- [11] 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):47-51.
WU Dengguo, LI Xiaoming. Distribution grid reconfiguration based on extreme learning machine [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 47-51.
- [12] ZIDAN A, EL-SAADANY E F. A cooperative multiagent framework for self-healing mechanisms in distribution systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1525-1539.
- [13] ERIKSSON M, ARMENDARIZ M, VASILENKO O O, et al. Multi-agent based distribution automation solution for self-healing grids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4): 2620-2628.
- [14] 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 Bin, 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.
- [15] 杨丽君,张广超,吕雪姣,等. 考虑可控负荷的含分布式电源配电网短时故障供电恢复[J]. 电力自动化设备,2016,36(11):11-17.
YANG Lijun, ZHANG Guangchao, LÜ Xuejiao, et al. Power restoration considering controllable load for short-time fault of distribution network with DGs [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11): 11-17.
- [16] GHORBANI M J, CHOUDHRY M A, FELIACHI A. A multiagent design for power distribution systems automation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 7(1): 329-339.
- [17] CHEN C, WANG J, QIU F, et al. Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 958-966.
- [18] HAFEZ A A, OMRAN W A, HEGAZY Y G. A decentralized technique for autonomous service restoration in active radial distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 1911-1919.
- [19] 李振坤,周伟杰,纪卉,等. 主从控制模式下有源配电网供电恢复研究[J]. 电网技术,2014,38(9):2575-2581.
LI Zhenkun, ZHOU Weijie, JI Hui, et al. Service restoration of distribution system containing DG under master-slave control mode [J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2575-2581.

- [20] DAS D. Reconfiguration of distribution system using fuzzy multi-objective approach [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2006, 28(5): 331-338.
- [21] 易海川,张彼德,王海颖,等. 提高 DG 接纳能力的配电网动态重构方法[J]. *电网技术*, 2016, 40(5): 1431-1436.
YI Haichuan, ZHANG Bide, WANG Haiying, et al. Distribution network dynamic reconfiguration method for improving distribution network's ability of accepting DG[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(5): 1431-1436.

作者简介:

董志辉(1994—),男,浙江温州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行和规划(E-mail: 867245716@qq.com);



董志辉

林凌雪(1979—),女,广东汕头人,讲师,博士,主要研究方向为电力系统运行和规划(E-mail: linlx@scut.edu.cn);

管霖(1970—),女,湖北孝感人,教授,博士,主要研究方向为电力系统运行和控制(E-mail: lguan@scut.edu.cn);

陈恒安(1995—),男,广东广州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行和规划(E-mail: 2110524578@qq.com);

梁倩仪(1994—),女,广东广州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行和规划(E-mail: 515111198@qq.com)。

Service restoration strategy of active distribution network based on multi-agent technology

DONG Zhihui, LIN Lingxue, GUAN Lin, CHEN Heng'an, LIANG Qianyi

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Aiming at the fast service restoration requirement of active distribution network after fault, a self-healing service restoration system based on multi-agent technology is proposed. A hierarchical coordinated restoration mode is adopted in the system, and the regional service restoration process is initiated by the region agent of lower layer, while the conflict between the region agents is coordinated by the feeder agent of upper layer. The power balance and transfer capacity margin indexes are proposed, on this basis, the non-fault outage feeder is decomposed into several independent zones after the fault of distribution network is isolated, the self-healing system can restore service of outage zone through microgrid aggregation, and utilize tie switch to transfer load of island zone, by which the service restoration can be comprehensively obtained. The voltage and current constraints of feeder are considered in the service restoration process to ensure the secure and stable system operation after fault restoration. A four-feeder distribution system with distributed generators is built in software of DIGSILENT, and the simulative results verify the feasibility and effectiveness of the proposed strategy.

Key words: service restoration; multi-agent system; active distribution network; power balance; transfer capacity margin

(上接第 21 页 continued from page 21)

Two-stage coordinated voltage control scheme of active distribution network with voltage support of distributed energy storage system

ZHANG Jianglin^{1,2}, ZHUANG Huimin², LIU Junyong¹, GAO Hongjun¹, ZHANG Li³, XIA Yuhang⁴

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

2. School of Control Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;

3. Skill Training Center of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610072, China;

4. Chengdu Power Supply Company of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: Aiming at the voltage problem of ADN(Active Distribution Network), a coordinated control method of traditional voltage regulation devices and DESS(Distributed Energy Storage System) based on two-stage operation optimization is proposed. The first stage is model predictive control, which uses a long time interval to regulate the network node voltage, takes traditional voltage regulation devices as the control objects, and an optimization model is built with the minimum power loss as its objective and solved by cone optimization algorithm with high efficiency. The second stage is voltage sensitivity based decentralized DESS control responsible for controlling critical node voltage with frequent fluctuation, which includes reactive power control and active power charging/discharging control, and coordinates with the central controller to control other critical nodes besides local control. The case analysis of modified IEEE 34-bus system shows that the proposed method can effectively restrain frequent voltage fluctuation of critical nodes, prohibit network voltage violate the limit, and relieve the voltage regulation stress of traditional voltage regulation devices.

Key words: ADN; DESS; two-phase optimization; cone optimization algorithm; decentralized control