

# 基于多代理系统的智能配电网分散协调恢复策略

杨丽君, 常雪婷, 曹玉洁, 安立明, 汪 明

(河北省电力电子节能与传动控制重点实验室, 燕山大学, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 针对智能配电网故障后自愈恢复需求,在智能配电网复杂的能量控制资源和技术手段基础上,本文给出了以电能交换器为核心组网设备的智能配电系统架构,并在此基础上提出了基于多代理系统(MAS)的智能配电网故障后的分散协调恢复策略。该 MAS 由设置在电能交换器处的代理和供电线路其他元件上的代理组成。当配电网发生小面积停电时,计及分布式电源(DG)功率输出的波动性,由各 DG 代理通过等可能路径组合确定初始孤岛划分方案,再由电能交换器代理协调冲突孤岛,保证快速恢复重要负荷供电;发生大面积停电时,在孤岛供电方案确定后,由电能交换器代理以网损最小为目标,利用改进蚁群算法寻优以进一步恢复失电负荷。同时,所设计的 MAS 可有效缓解信息逐级纵向传递和接收过程中容易造成的通信拥堵情况。算例结果验证了该策略的可行性和有效性。

**关键词:** 智能配电网; 故障恢复; 多代理系统; 等可能路径组合; 改进蚁群算法

**DOI:** 10.12067/ATEEE1703079      **文章编号:** 1003-3076(2018)02-0019-11      **中图分类号:** TM732

## 1 引言

智能配电系统是智能电网中连接主网和面向用户供电的重要组成部分,自愈是其主要特征,故障恢复是自愈的重要环节<sup>[1]</sup>。分布式电源(DG)、分布式储能(DES)的快速发展和高渗透率接入给配电系统的恢复供电带来了新资源,同时也正在或即将改变传统电网结构、运行方式。以微电网方式接入配电网被认为是解决目前分布式发电系统大量接入配电网的有效手段之一。目前构建的微电网模式多是利用分布式电源配套的电力电子并网逆变器接入配电变压器交流线路,再通过公共耦合点(PCC)开关接入配电网,这种接入方式存在一些不足,如设备多、体积大、控制不灵活、效率低。文献[2,3]提出了电能交换器的概念,并对其系统结构及核心模块提出了设计方案,电能交换器可以实现将不同电压、不同频率的各种分布式电能转变成电压灵活可控频率恒定的交流电,从而使分布式电源和储能即插即用接入配电网成为可能。

本文重点研究在故障准确定位及隔离的基础

上,基于电能交换器构建的分布式电源、储能和配电网互联系统的故障恢复问题。在智能配电网构架下,故障恢复既可以合理协调分布式能源(DER)和馈线共同为停电区域供电<sup>[4,5]</sup>,也可以由未发生故障的 DG 孤岛运行恢复供电<sup>[6-8]</sup>。近年来由于分布式人工智能的需求以及计算机技术的不断成熟,多代理技术迅速发展,因代理本身具有很强的自主能力和沟通能力,在电力系统诸多领域得到广泛应用<sup>[9,10]</sup>。在故障恢复方面,文献[11]提出一种完全分布式的多代理系统(MAS)来解决配电网的故障恢复问题,但代理采集的信息量大,信息传递过程中容易造成通信拥堵。文献[12]基于 IEC61850 信息模型构建的 MAS 缓解了通信压力,确保了主动配电网供电恢复的快速性和可靠性。文献[13]综合利用备用线路和内部 DG 的孤岛运行,基于多代理技术构建了多层分布式决策系统,为故障后的失电负荷恢复供电,但忽视了联络开关的可操作性。在孤岛划分方面,文献[14]利用基于分支定界理论的动态规划算法获得孤岛划分方案;文献[15]先利用隐枚举法获得初始孤岛划分方案,再通过可行性校验

收稿日期: 2017-03-22  
基金项目: 国家自然科学基金项目(61573302)、河北省自然科学基金项目(E2014203254)  
作者简介: 杨丽君(1972-),女,吉林籍,教授,博士,研究方向为电力系统恢复控制;  
常雪婷(1988-),女,河北籍,硕士研究生,研究方向为配电网故障恢复(通讯作者)。

与调节得到最终划分方案;文献[16]给出了配电网故障下划分孤岛范围的启发式搜索方法;文献[17, 18]在已知 DG 容量的前提下划定最佳孤岛供电范围,再对孤岛外的停电区域最大限度地恢复供电。然而,文献[14-18]缺少对冲突孤岛协调方法的有关阐述,且没有考虑不同时段内 DG 出力的随机性和波动性对孤岛划分方案制定的影响。

本文采用电能交换器取代传统的配电变压器,将其连接于配电系统与 DER、负载间,构建一种智能配电系统。新标准 IEEE1547-2003<sup>[19]</sup>鼓励供电方及用户通过技术手段实现孤岛运行,从而在满足潮流约束的前提下,减少非故障停电区域的失电负荷,提高供电可靠性。当智能配电网发生小面积停电时,故障点附近的 DG 直接孤岛带负荷运行,大大缩短了恢复时间,提高了供电可靠性。当智能配电网发生大面积停电时,利用本文提出的基于 MAS 的智能配电网故障后的分散协调恢复策略,合理调度 DER 和联络开关来恢复供电,并将具体的恢复策略分成孤岛划分与剩余网络重构两个子问题。孤岛划分计及 DG 功率输出的波动性,由非故障失电区的 DG 代理通过等可能路径组合<sup>[20]</sup>获得初始最优孤岛划分方案,再由电能交换器代理对存在矛盾的划分方案进行协调优化;剩余网络重构则由电能交换器代理通过分析剩余网络的拓扑结构,整理当前存在联络开关的“节点-支路”连接关系,对其重新编号,采用改进蚁群算法,以网损最小为目标,得到剩余网络中分段开关与联络开关的理想组合,进一步恢复剩余网络中的失电负荷。最后以 IEEE33 节点系统为例利用所提恢复策略进行仿真验证。

## 2 基于电能交换器的智能配电网架构

电能交换器是一种高度融合电力电子变换技术和信息技术、可实现分布式电能高效利用和传递的新型全可控设备。通过电能交换器可以构建分布式电源、储能和配电网互联系统,如图1所示。由电能交换器统一进行并网控制,统一提供交流和直流线路,而不需要其他变换器提供直流线路,也不需要加装 PCC 开关。

每条馈线供电区域可看成一个自治区域<sup>[21]</sup>,一台电能交换器控制一个自治区域,若干个由电能交换器控制的自治区域构成整个智能配电网。电能交换器作为自治区域与主网的交互接口,一方面要负责自治区域内部各个设备的运行和能量管理,另一

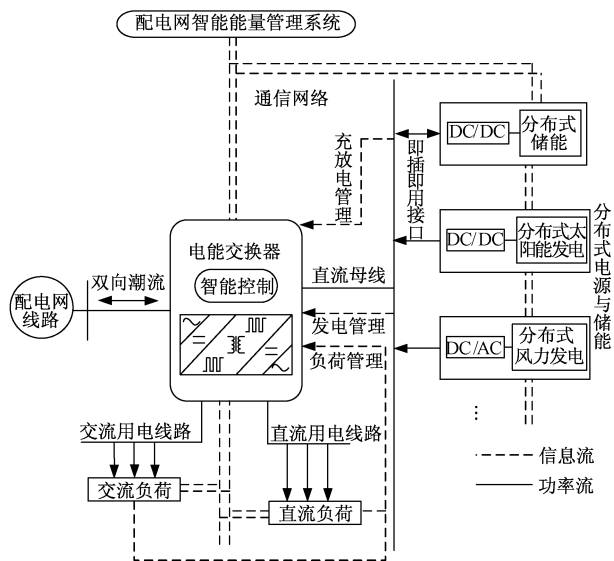


图1 基于电能交换器的DG、储能和配电网互联的系统

Fig.1 Interconnected system based on energy switcher

方面要接受上一级电力调度中心的控制指令并上传自治区域的运行状态。

## 3 智能配电系统故障恢复数学模型

### 3.1 孤岛划分模型

配电网发生停电事故时,由电能交换器快速、可靠地统一统筹和合理调度自治区域内的风力发电、光伏发电、储能,将这些清洁能源作为集中式发电的有效补充,建立短时间的孤岛保障重要负荷用户的持续供电,这样可有效提高配电网的供电可靠性。

#### (1) 孤岛划分的目标函数

发生停电事故后的首要目标在于最大限度恢复重要用户电力供应,根据分布式电源在故障修复期间的实际发电量,以在各个故障时段内获得稳定供电的孤岛重要负荷总用电量最大为目标,建立目标函数,即

$$\max f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in D} w_i P_{i,t} x_{i,t} \quad (1)$$

式中,  $T$  为时段数;  $D$  为孤岛内的节点集合;  $w_i$  为位于节点  $i$  的负荷权重系数;  $P_{i,t}$  为在时段  $t$  孤岛内节点  $i$  的负荷大小;  $x_{i,t}$  为节点  $i$  在时段  $t$  的状态变化参数,  $x_{i,t} = 1$  表示恢复供电,  $x_{i,t} = 0$  表示未恢复供电。

#### (2) 孤岛内功率约束

$$P_{G,t} \geq \sum_{i \in D} P_{i,t} \quad (2)$$

式中,  $P_{G,t}$  为在时段  $t$  光储系统的总出力值。

### (3) 功率平衡约束

$$P_{i,t} - U_{i,t} \sum_{j=1}^n U_{j,t} (G_{ij} \cos \delta_{ij,t} + B_{ij} \sin \delta_{ij,t}) = 0 \quad (3)$$

$$Q_{i,t} - U_{i,t} \sum_{j=1}^n U_{j,t} (G_{ij} \sin \delta_{ij,t} - B_{ij} \cos \delta_{ij,t}) = 0 \quad (4)$$

式中,  $P_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$  为在时段  $t$  节点  $i$  注入的有功、无功;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 、 $\delta_{ij,t}$  分别为节点  $i$ 、 $j$  间的电导、电纳以及在时段  $t$  节点  $i$ 、 $j$  间的电压相角差;  $n$  为孤岛内节点个数;  $U_{i,t}$ 、 $U_{j,t}$  分别为在时段  $t$  节点  $i$ 、 $j$  的电压幅值。

### (4) 支路功率约束

$$P_{r,t} \leq P_{r\max} \quad (5)$$

式中,  $P_{r,t}$  为在时段  $t$  支路  $r$  的有功功率;  $P_{r\max}$  为支路  $r$  的有功功率最大容许值。

### (5) 节点电压约束

$$U_{\min} \leq U_{i,t} \leq U_{\max} \quad (6)$$

式中,  $U_{i,t}$  为在时段  $t$  节点  $i$  的电压值;  $U_{\max}$ 、 $U_{\min}$  分别为节点  $i$  电压上下限。

### (6) 配电网辐射运行约束

$$g \in G \quad (7)$$

式中,  $g$  为故障恢复后的网络拓扑结构;  $G$  为网络辐射状拓扑结构的集合。

## 3.2 剩余网络重构模型

若发生小面积停电,且失电区域含有 DER,对含 DER 配电网进行孤岛划分即可恢复全部失电负荷,则无需再进行网络重构。若发生大面积停电,单靠分布式能源不能恢复全部失电负荷,则此时需要在孤岛供电方案确定后,通过分析剩余网络的拓扑结构,整理当前存在联络开关的“节点-支路”连接关

系,对其重新编号,采用优化算法得到剩余网络中分段开关与联络开关的理想组合,进一步恢复剩余网络中的失电负荷,以系统网损最小为剩余网络重构的目标函数,即

$$\min f_2 = \sum_{b \in S_Y} k_b r_b (P_b^2 + Q_b^2) / U_b^2 \quad (8)$$

式中,  $S_Y$  为剩余网络支路集合;  $k_b$  为支路  $b$  上开关状态变量,0 表示断开,1 表示闭合;  $r_b$  为支路  $b$  的电阻;  $P_b$ 、 $Q_b$  分别为支路  $b$  末端流过的有功、无功功率;  $U_b$  为支路  $b$  末端节点的电压。

其他约束条件同 3.1 节中式(3)~式(7)约束条件。

## 4 基于电能交换器构建的多代理自愈系统

图 1 中,电能交换器管辖的自治区域内开关、负荷类型和 DER 等种类很多,并且每个元件功能各异。为提高供电恢复的快速性和可靠性,充分发挥智能配电网主动控制和管理 DER、负荷的优势,本文在自治区域内的每个分段开关、联络开关、负荷、分布式电源、储能上设置一个元件代理,并由部署在电能交换器处的代理管理和协调各元件代理之间的矛盾与冲突;同时,电能交换器代理需要接受上层调度中心的调度指令,并将自治区域的用电情况、发电情况和实时电气参数上报给上一级调度中心,以实现配电网实时能量管理。代理结构具体如图 2 所示。其中,ACL (Agent Communication Language) 为代理通信语言。

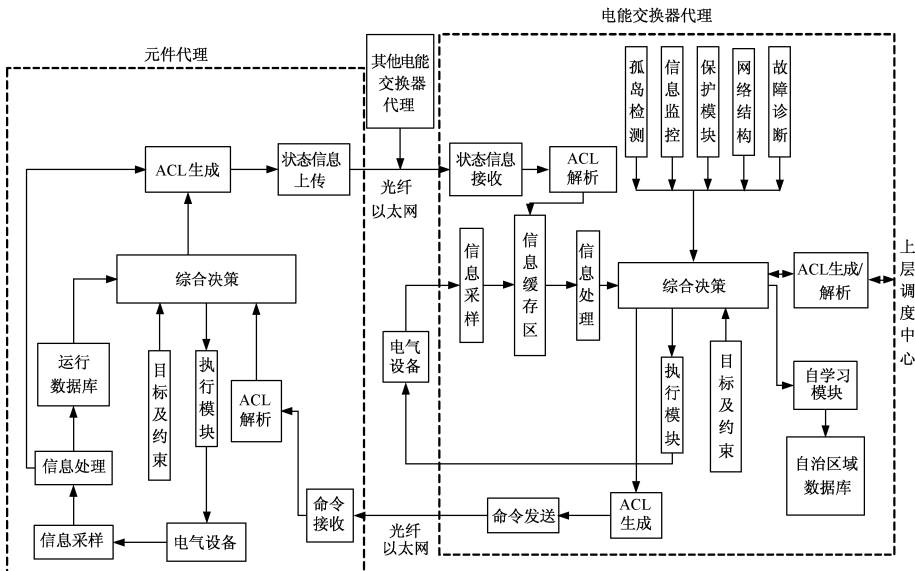


图2 自治区域中2种代理结构

Fig. 2 Structure of two agents in autonomy area



由电能交换器代理 (Energy Switcher Agent, ESA)、分段开关代理 (Sectional Switch Agent, SSA)、联络开关代理 (Contact Switch Agent, CSA)、负荷代理 (Load Agent, LA)、分布式电源代理 (Distributed Generator Agent, DGA)、储能代理 (Energy Storage Agent, ESA) 组成的多代理系统如图3所示。

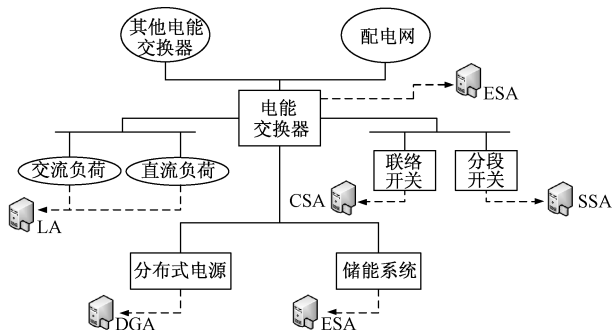


图3 多代理系统控制架构

Fig.3 Multi-agent system based control framework

电能交换器代理中的各个模块有其各自特殊的功能,其中网络结构模块负责将当前电网的运行结构汇报给综合决策模块;故障诊断模块从SCADA系统的实时数据库<sup>[22]</sup>中获取当前电网的实时运行数据并实时监控故障信息,确认停电故障发生以后,根据自治区域数据库中存储的正常运行状态下电网结构进行网络拓扑分析,定位故障区域并向综合决策模块汇报这些信息;综合决策模块通过与元件代理通讯获取当前全网DG出力、储能出力及负荷需求情况,并在获取故障信息的基础上,通知失电区内各DG代理准备进行孤岛划分,并对DG代理上报的初始孤岛划分方案进行优化,产生并下达协调恢复命令,以及对孤岛外的剩余网络采用嵌入其中的蚁群算法进行寻优,通过对分段开关代理和联络开关代理下达开关调整指令实现剩余网络故障重构。具体过程如下:

(1)进行故障定位、隔离后,电能交换器代理根据综合决策模块的分析结果“通知”失电区内DG代理准备执行孤岛划分方案的确定任务,然后转步骤(2);若失电区内无DG代理,则转步骤(5)。

(2)各DG代理与附近的其他元件代理交互信息,根据嵌入综合决策模块中等可能路径组合的寻优方法得到各自的初始最优孤岛划分方案,并将划分方案上报给电能交换器代理。

(3)电能交换器代理对存在冲突的划分方案进行协调优化,并将协调后的方案反馈给参与恢复任

务的DG代理。DG代理组织相关的其他元件代理共同执行孤岛恢复方案。

(4)判断停电区域负荷是否全部恢复供电,是,则运算结束;否则转至步骤(5)。

(5)电能交换器代理整理剩余网络存在联络开关的“节点-支路”连接关系,对其重新编号,并根据嵌入综合决策模块中改进蚁群算法的寻优结果“通知”相关分段开关、联络开关代理执行网络重构方案,相关分段开关、联络开关代理执行命令。

(6)判断失电区是否全部恢复供电,是,则运算结束,得到一组孤岛划分和开关操作方案;否则由电能交换器代理向上一级调度中心发送协助恢复的请求,运算结束且由上一级调度中心进行恢复决策。

基于电能交换器构建的多代理系统分散协调恢复流程如图4所示。

在集中控制中,由控制中心对故障恢复方案进行统一判断、统一决策,制定的恢复方案能实现全局最优,但需要可靠的通信通道的支持,并需要承担大量的分析计算任务;在分散控制中,需要本地信息,而不需要每个个体单元之间通信及信息交互,具有简单、可靠、易于实现的特点,但缺少个体单元之间配合,使得到的恢复方案往往是局部最优<sup>[23]</sup>。本文综合考虑集中控制和分散控制的特点,提出的分散协调控制策略将集中控制方法中由电能交换器代理来完成的初始孤岛划分的工作,下放给DG代理来完成,其只需对各DG代理获得的各故障时段的初始孤岛划分方案中存在包含关系或交叉关系的孤岛进行协调优化,减少了工作量,又避免了生成的孤岛方案只是各孤岛的局部最优。

未来智能配电网将由多个具有精确计算、可靠通信、精准控制、远程协作与自治功能的电能交换器代理统一管理调度自治区域内的元件代理,参与解决各元件代理间公共资源的分配、矛盾的协调、任务的划分等,可大大提高配电网故障后的快速响应能力。同时,本文采用的信息传递原则是:分散在自治区域的各元件代理将各自收集的运行状态信息汇报给电能交换器代理,在电能交换器代理未作出恢复决策前各元件代理之间不进行信息交互,一旦电能交换器代理“通知”DG代理准备执行孤岛划分方案的确定任务后,该DG代理才可与附近的其他元件代理进行信息交互。因此,该多代理系统结构可有效缓解信息逐级纵向传递和接收过程中容易造成的通信拥堵情况。

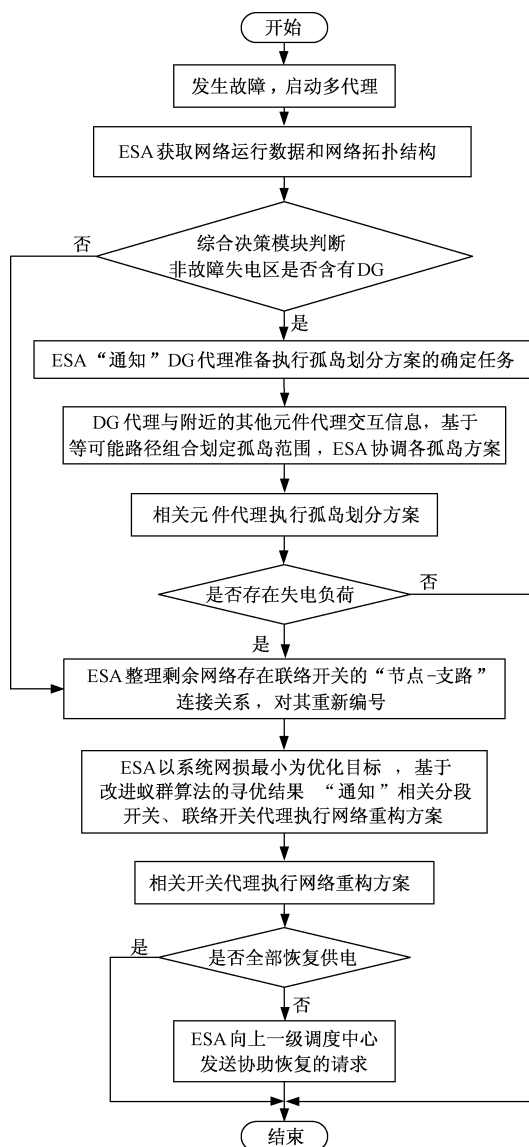


图4 多代理系统恢复流程

Fig. 4 Restoration flowchart of multi-agent system

另外,为保证信息传递的可靠性和实时性,要求电力数据通信网络具备容错能力。正常情况下,通信网络中的任意2个网络节点须保持至少2条独立物理路由的连通,必须满足  $N-1$  原则,尽量满足  $N-2$  原则。

## 5 基于等可能路径组合和改进蚁群算法相结合的故障恢复方法

### 5.1 各DG代理等可能路径组合恢复方法

各DG代理负责确定初始孤岛划分方案。非故障失电区的各DG代理接到电能交换器代理要求准备进行孤岛划分的“通知”后,与其附近的元件代理进行通信,获取负荷数据信息、开关状态信息、储能

荷电状态(SOC)信息等,并综合电能交换器代理反馈的非故障失电区拓扑结构以及故障点信息,利用等可能路径组合形成各自的初始最优孤岛划分方案,其过程如图5所示。

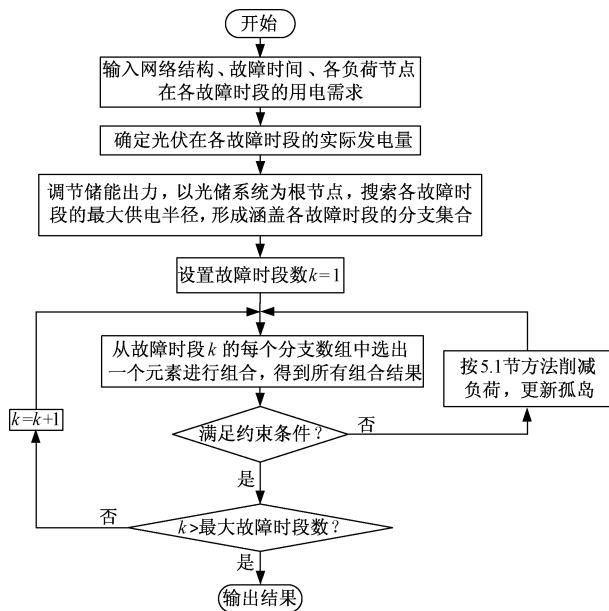


图5 孤岛划分过程

Fig. 5 Flowchart of island partition

特别指出,为简化计算以及方便供电恢复方案的确定,本文采用分布式电源与储能打包形式,以其联合输出功率计入后面的计算当中。以光储系统为例介绍各DG代理通过等可能路径组合搜索恢复路径的过程。借鉴文献[24]中的光储系统模型和负荷特性模型,根据配电网故障修复持续的时间,对光伏电源可用发电出力进行预测,确定光伏电源在故障发生后各时段的实际出力,并在某些光伏发电出力较低的时段调度储能装置的出力,保证在各故障时段内恢复孤岛中的光储系统,使其能够为孤岛内负荷可靠供电。特别说明,下文提到的DG容量皆表示光储系统联合出力。

具体过程主要分为以下3个部分:

#### (1) 形成分支集合

以各光储系统代理所在节点为搜索树的根节点,读取节点度数,即根节点分支数,生成包含各故障时段的分支集合  $\{S(t) = [S_1(t), S_2(t), \dots, S_n(t)], t = 1, 2, \dots, T\}$ , 此时各分支数组是空集;再按深度优先搜索原则对某一分支进行搜索,并将可中断负荷的可中断部分置零,当搜索到某一节点为该分支的末端节点,或融入该节点后负荷功率超出

光储系统在某一故障时段总出力值时,则终止搜索,得到该时段该分支最大可能恢复区域;然后回溯,生成一系列该时段可行的恢复供电电路,形成该故障时段分支数组  $S_i(t), i = 1, 2, \dots, n$ 。按上述方法生成其他故障时段的分支数组,最终形成涵盖各故障时段的分支集合。

(2) 初始可行方案和数据库的生成

涵盖各故障时段的分支集合生成后,同一故障时段的不同分支数组间的元素相互组合,得到可能满足各故障时段约束条件的孤岛划分方案。每种方案成为最优解的概率相同,将这些方案存入上层供电恢复协调代理的数据库中,形成可行方案集,供上层协调代理对存在矛盾的恢复孤岛进行协调优化时使用。

(3) 切负荷

当出现孤岛划分方案不符合约束条件的情况时,将该方案中所有分支的最末端负荷节点标记成待切负荷点,并按负荷重要程度由低到高、容量由小到大排序,形成待切负荷列表  $M^1_{load}$ ; 然后依次切除  $M^1_{load}$  中的负荷直到满足容量约束为止;若  $M^1_{load}$  中的所有负荷切除后仍不满足容量约束,则生成新拓扑结构下的待切负荷列表  $M^2_{load}$ , 并按前述方法切负荷;重复进行上述操作直到该孤岛划分方案满足功率平衡约束和电量约束。

将所有削减掉的负荷节点标记成未完成恢复的节点,并得到最终的初始孤岛划分范围。

5.2 电能交换器代理协调优化恢复方案

各 DG 代理采用等可能路径相互组合的方法得到各故障时段的初始孤岛划分方案,将方案上报给电能交换器代理,电能交换器代理对存在冲突的划分方案进行协调,根据形成的初始方案关系不同采取不同的协调方法,具体如下:

(1) 如果在某故障时段出现孤岛 A 包含于孤岛 B 的情况,则将孤岛 A 与 B 合并,合并后的 DG 发电量为:

$$P_{G,t} = P_{AG,t} + P_{BG,t} - \sum_{i \in I} P_{i,t}$$

式中,  $P_{AG,t}$ 、 $P_{BG,t}$  分别为孤岛 A、B 中光储系统在时段  $t$  的发电量;  $I$  为故障时段  $t$  内连接 2 个光储系统线路上的负荷节点集合;  $P_{i,t}$  为时段  $t$  位于节点  $i$  的负荷大小。

电能交换器代理将  $P_{G,t}$  赋给发电量较大的光储系统节点,而发电量较小的光储系统节点的注入有功置零,并更新数据库中集合  $I$  中节点在故障时段  $t$  的负荷大小和对应线路阻抗的信息(即将这些参数

置零),同时“通知”发电量较大 DG 代理重新寻优,寻找新的可行方案,更新数据库。若新方案中没有包含发电量较小的光储系统节点,则从数据库中选择包含较小光储系统节点且  $\sum_{i \in D} w_i P_{i,t} x_{i,t}$  最大的方案为故障时段  $t$  的新方案。

(2) 如果在某故障时段出现孤岛 A 与 B 相交的情况,则将交叉负荷由孤岛 A(或 B)供电,然后从孤岛 B(或 A)的各 DG 代理形成的可行解集中选择不包含交叉节点的解。比较两种情况下生成的可行解,选择  $\sum_{i \in D} w_i P_{i,t} x_{i,t}$  最大的解存入电能交换器代理中。

5.3 基于改进蚁群算法的剩余网络重构流程

本文将改进蚁群算法嵌入电能交换器代理的综合决策模块中,作为剩余网络重构的优化算法。若由 DG 代理确定的孤岛供电方案不能恢复所有失电负荷,则由电能交换器代理整理剩余网络存在联络开关的“节点-支路”连接关系,对其重新编号,根据改进蚁群算法的寻优结果“通知”相关分段开关、联络开关代理执行网络重构方案,具体运算流程如图 6 所示。图 6 中,  $Tabu$  表示已连入树中的节点集合,  $Nnode$  表示未连入树中的节点集合,  $Nzhl$  表示可选的待建支路集合。

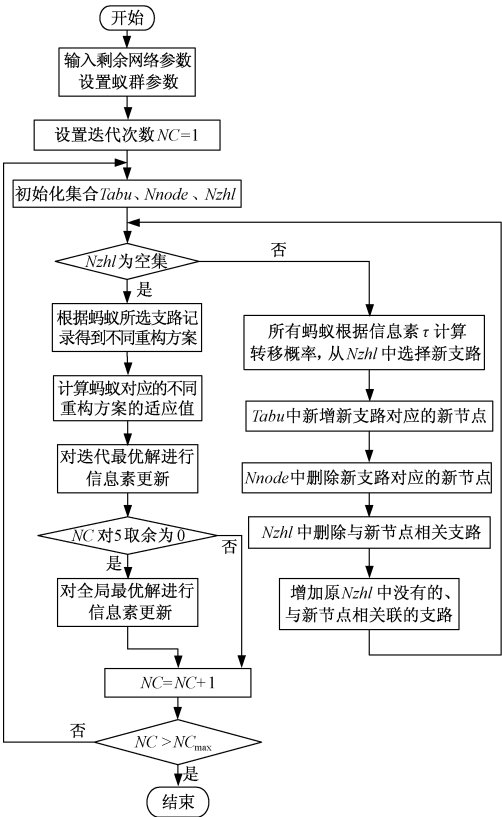


图 6 改进蚁群算法流程图

Fig. 6 Flow chart of improved ant colony optimization



## 6 算例分析

### 6.1 算例参数

以 IEEE33 节点系统为例进行仿真。如图 7 所示,该配电系统有 33 个节点,37 条支路,5 条联络开关且处于断开状态,分别在母线 11、17、24 处接入光储系统 PV1、PV2、PV3,它们的出力如图 8 所示。总负荷为  $3715\text{kW} + \text{j}2300\text{kVar}$ ,额定电压为  $12.66\text{kV}$ ,各支路阻抗参数及功率参数见文献[25],各节点负荷等级如表 1 所示。一级、二级、三级负荷单位权重系数分别取 100、10、1。改进蚁群算法相关参数与文献[26]一致。

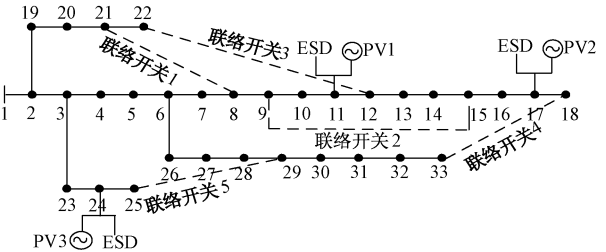


图 7 IEEE33 节点配电网系统

Fig.7 IEEE33 distribution system

### 6.2 算例结果及分析

#### (1)算例 1

设支路 2-3 处发生永久性故障,且故障发生在 9:00,完成故障修复在 16:00,故障时间为 7h,即  $T=7$ ,以 1h 为一个步长。光储系统 PV1、PV2、PV3 的额定容量分别为  $400\text{kW}$ 、 $400\text{kW}$ 、 $1600\text{kW}$ ,储能的最大充放电功率为  $50\text{kW}$ 。

表 2 相交孤岛协调和最优方案选取

Tab.2 Integration of intersecting islands and selecting optimal scheme

协调方案	协调前恢复节点	协调后恢复节点	目标函数值	目标函数值之和
方案一:PV1 恢复 相交节点	PV1 16、15、14、13、12、11 PV2 14、15、16、18、17	与协调前相同 18、17	11340 9600	20940
方案二:PV2 恢复 相交节点	PV1 16、15、14、13、12、11 PV2 14、15、16、18、17	8、9、10、11 与协调前相同	7700 15780	23480

电能交换器代理对上述两种划分方案进行协调,从各 DG 代理形成的数据库中选出不包含节点 14、15、16,且目标函数值最大的划分方案,协调方案一得到的总目标函数值为 20940,小于方案二的 23480,因此协调方案二为最终孤岛划分方案,其恢复结果如图 9 所示。

所有故障时段各 DG 代理形成的恢复方案如表 3 所示。由于孤岛供电方案确定后仍有失电负荷存在,电能交换器代理通过分析剩余网络的拓扑结构,

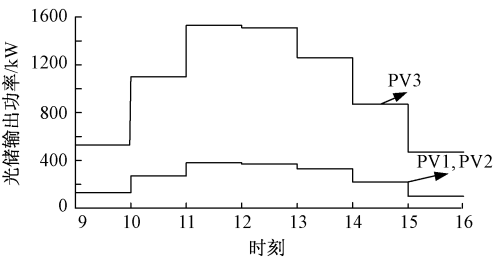


图 8 光储系统出力曲线(算例 1)

Fig.8 Output of PVs (example 1)

表 1 负荷等级

Tab.1 Priorities of loads

负荷等级	节点编号
一级负荷	3、11、16、18、25、27
二级负荷	5、6、8、9、10、12、17、24、30
三级负荷	2、4、7、13、14、15、19~23、 26、28、29、31~33

各 DG 代理以各自光储系统所在节点 11、17、24 为根节点进行初始孤岛划分,然后由电能交换器代理对划分方案进行协调优化。另外,由于不同时段光伏电源输出功率存在差异,则 DG 代理需要根据 SCADA 系统上报的信息,适时调整恢复方案。其中,在第 3 个时段(11:00~12:00)内各 DG 代理形成的初始最优方案中,光储系统 PV1 的 DG 代理和光储系统 PV2 的 DG 代理形成的恢复方案在节点 14、15、16 出现相交,由于不满足配电网辐射性约束,电能交换器代理需要对存在冲突的孤岛范围进行协调,协调方案和结果如表 2 所示。

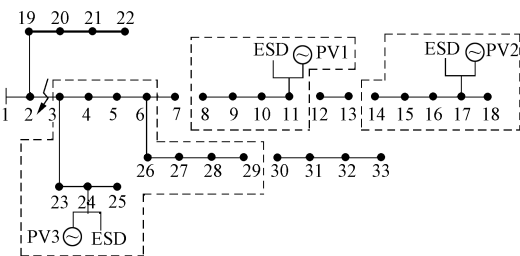


图 9 DG 形成的最优孤岛划分方案

Fig.9 Optimal island partition scheme formed by DGs

表 3 不同故障时段各 DG 代理的恢复方案

Tab. 3 Restoration scheme formed by DG agents in different fault periods

时段	各光储系统恢复节点		
	PV1	PV2	PV3
9:00 ~ 10:00	10、12、11	18、17	23、24
10:00 ~ 11:00	9、10、13、12、11	15、16、18、17	4、3、23、25、24
11:00 ~ 12:00	8、9、10、11	14、15、16、18、17	29、28、27、26、6、5、4、3、23、25、24
12:00 ~ 13:00	8、9、10、11	14、15、16、18、17	28、27、26、6、5、4、3、23、25、24
13:00 ~ 14:00	9、10、13、12、11	15、16、18、17	6、5、4、3、23、25、24
14:00 ~ 15:00	9、10、12、11	16、18、17	25、24
15:00 ~ 16:00	10、12、11	18、17	23、24

整理当前网络存在联络开关的“节点-支路”连接关系,对其重新编号,并根据改进蚁群算法的寻优结果“通知”相关分段开关、联络开关代理执行网络重构方案,进一步恢复剩余网络中的失电负荷。具体的

重构方案及结果如表 4 所示。

由表 3 和表 4 的仿真结果可以看出,由于故障期间光伏电源的输出功率不断变化,因此在故障修复完成前需要根据电源出力的波动相应地调整恢复方案,从而能够充分利用清洁能源的可用发电出力为更多用户提供电力供应。另外,考虑了联络开关的作用,通过对剩余网络重构可以进一步恢复更多失电负荷,提高供电可靠性。

(2)算例 2

设支路 6-7 处发生永久性故障,且故障发生的时间在 9:00,完成故障修复在 16:00,故障时间为 7h,即 $T=7$ ,以 1h 为一个步长。

支路 6-7 故障,光储系统 PV3 位于非故障区,不进行孤岛划分,而采用并网运行方式。对 PV1 和 PV2 进行光伏预测,结果如图 10 所示。储能的最大充放电功率为 50kW。以各 DG 代理所在光储系统节点 11、17 为根节点,同时进行孤岛划分,在第 3 个故障时段(11:00~12:00)内具体划分过程如图 11 所示。

表 4 剩余网络重构方案及结果

Tab. 4 Reconfiguration schemes and results of residual network

时段	闭合/断开开关	失电节点	不考虑联络开关的作用下失电节点
9:00 ~ 10:00	闭合联络开关 1、2、5	无	3、4、5、6、7、8、9、13、14、15、16、25、26、27、28、29、30、31、32、33
10:00 ~ 11:00	断开联络开关 2、5	14	5、6、7、8、14、26、27、28、29、30、31、32、33
11:00 ~ 12:00	断开联络开关 1, 闭合联络开关 3	7、30、31、32、33	7、12、13、30、31、32、33
12:00 ~ 13:00	无	7、29、30、31、32、33	7、12、13、29、30、31、32、33
13:00 ~ 14:00	断开联络开关 3, 闭合联络开关 1	14、26、27、28、29、30、31、32、33	7、8、14、26、27、28、29、30、31、32、33
14:00 ~ 15:00	无	13、14、15	3、4、5、6、7、8、13、14、15、26、27、28、29、30、31、32、33
15:00 ~ 16:00	闭合联络开关 2、5	无	3、4、5、6、7、8、9、13、14、15、16、25、26、27、28、29、30、31、32、33

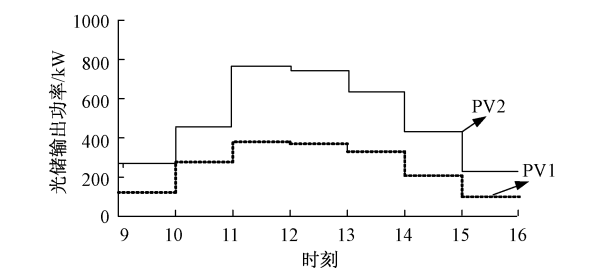


图 10 光储系统出力曲线(算例 2)  
Fig. 10 Output of PVs (example 2)

各 DG 代理按深度优先搜索原则形成各自以最大供电半径为约束的可行解区域,同时生成支路数组,通过等可能路径组合获得初始恢复方案,如图 11(b)所示。电能交换器代理判断各孤岛划分方案之间的关系,发现光储系统 PV1 恢复的节点包含于 PV2 中,则将两孤岛合并,并按 5.2 节方法重新生成新的恢复方案,最终结果如图 11(c)所示。由图 11 可以看出,最终的孤岛供电方案可以实现全部失电负荷恢复供电,此时无需进行网络重构。因此,在发



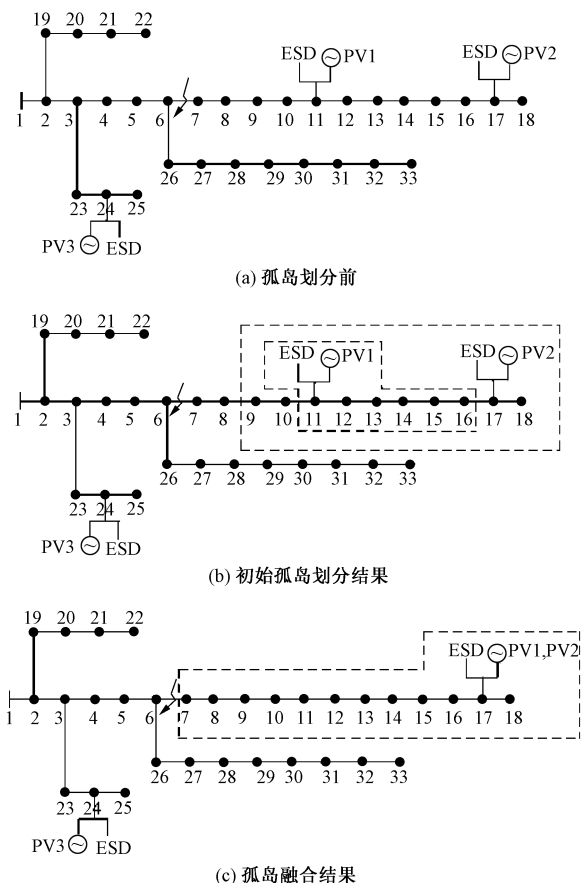


图 11 含分布式电源的最优孤岛划分

Fig. 11 Optimal island partition with DGs

生小面积停电时,本文策略充分发挥可再生清洁能源发电的短时支撑潜力而无需进行复杂繁琐的网络重构,可迅速恢复重要用户电力供应。

## 7 结论

目前各种分布式发电系统生产的电能不能直接供给负荷或者接入电网,针对这一现状,本文利用电能交换器构建了分布式电源、储能与配电网互联的系统,能够满足能量多向流动和功率流的主动准确控制等要求。在此基础上,利用本文建立的完全分布式用于故障恢复的 MAS,可有效缓解信息逐级纵向传递和接收过程中容易造成的通信拥堵情况。分别对小面积失电情况和大面积失电情况采用不同的恢复策略,合理配合孤岛划分与电网重构,共同确定最优供电路径,减少停电范围。算例验证了本文所提方法的可行性和有效性,本文对智能配电网故障后的动态安全调度具有一定的指导意义。

## 参考文献 (References):

- [1] 庞清乐, 高厚磊, 李天友 (Pang Qingle, Gao Houlei, Li Tianyou). 基于负荷均衡的智能配电网故障恢复 (Load balancing based fault service restoration for smart distribution grid) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2013, 37 (2): 342-348.
- [2] 段青, 盛万兴, 孟晓丽, 等 (Duan Qing, Sheng Wanxing, Meng Xiaoli, et al.). 面向能源互联网的新型能源子网系统研究 (Research of energy sub grid for the future energy internet) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (2): 388-398.
- [3] 盛万兴, 段青, 梁英, 等 (Sheng Wanxing, Duan Qing, Liang Ying, et al.). 面向能源互联网的灵活配电系统关键装备与组网形态研究 (Research of power distribution and application grid structure and equipment for future energy internet) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2015, 35 (15): 3760-3769.
- [4] Higgins N, Vyatkin V, Nair N C, et al. Distributed power system automation with IEC 61850, IEC 61499, and intelligent control [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2011, 41 (1): 81-92.
- [5] 杨丽君, 魏玲玲, 卢志刚, 等 (Yang Lijun, Wei Lingling, Lu Zhigang, et al.). 考虑可中断负荷的配电网分区动态故障恢复 (Fault partition dynamic recovery strategy for distribution network considering interruptible loads) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (8): 73-80.
- [6] Balaguer I J, Lei Q, Yang S, et al. Control for grid-connected and intentional islanding operations of distributed power generation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 (1): 147-157.
- [7] Vasquez J C, Guerrero J M, Luna A, et al. Adaptive droop control applied to voltage-source inverters operating in grid-connected and islanded modes [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56 (10): 4088-4096.
- [8] 卢志刚, 刘照拯, 张晶, 等 (Lu Zhigang, Liu Zhaozheng, Zhang Jing, et al.). 含分布式电源的配电网灾后分阶段抢修策略 (Staged rush repair strategy of distribution networks with distributed generators after disaster) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (1): 69-74.

- [9] 马静, 刘天琪, 李兴源, 等 (Ma Jing, Liu Tianqi, Li Xingyuan, et al.). 基于多代理的多馈入直流输电换相失败协调预防研究 (Method of coordinated prevention of commutation failure based on multi-agent in MIDC) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (3): 61-65.
- [10] 段斌, 谭成, 刘艳, 等 (Duan Bin, Tan Cheng, Liu Yan, et al.). 基于 IEC 61850 和多代理技术的保护定值在线追踪系统 (An online tracking system of protection settings based on IEC 61850 and multi-agent technology) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2014, 38 (7): 70-76.
- [11] 黎恒烜, 孙海顺, 文劲宇 (Li Hengyuan, Sun Haishun, Wen Jingyu). 含分布式电源的配电网多代理故障自愈恢复系统 (A multi-agent system for reconfiguration of distribution systems with distributed generations) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2012, 32 (4): 49-57.
- [12] 刘丹丹, 段斌, 王俊, 等 (Liu Dandan, Duan Bin, Wang Jun, et al.). 基于 IEC61850 的主动配电网故障自愈恢复多代理系统 (A multi-agent system for fault self-recovery of distribution systems in active distribution network based on IEC61850) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2015, 39 (9): 119-126.
- [13] 李振坤, 周伟杰, 纪卉, 等 (Li Zhenkun, Zhou Weijie, Ji Hui, et al.). 主从控制模式下有源配电网供电恢复研究 (Service restoration of distribution system containing DG under master-slave control mode) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2014, 38 (9): 2576-2581.
- [14] 王旭东, 林济铿 (Wang Xudong, Lin Jikeng). 基于分支定界的含分布式发电配电网孤岛划分 (Island partition of the distribution system with distributed generation based on branch and bound algorithm) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2011, 31 (7): 16-21.
- [15] 向月, 刘俊勇, 姚良忠 (Xiang Yue, Liu Junyong, Yao Liangzhong). 故障条件下含分布式电源配电网的孤岛划分与重构优化策略研究 (Optimization strategy for island partitioning and reconfiguration of faulted distribution network containing distributed generation) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2013, 37 (4): 1025-1032.
- [16] 易新, 陆于平 (Yi Xin, Lu Yuping). 分布式发电条件下的配电网孤岛划分算法 (Islanding algorithm of distribution networks with distributed generators) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2006, 30 (7): 50-54.
- [17] 赵晶晶, 杨秀, 符杨 (Zhao Jingjing, Yang Xiu, Fu Yang). 考虑分布式发电孤岛运行方式的智能配电网供电恢复策略研究 (Smart distribution system service restoration using distributed generation islanding technique) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2011, 39 (17): 45-49.
- [18] 孙洁, 王增平, 王英男, 等 (Sun Jie, Wang Zengping, Wang Yingnan, et al.). 含分布式电源的复杂配电网故障恢复 (Service restoration of complex distribution system with distributed generation) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2014, 42 (2): 56-62.
- [19] IEEE Std. 1547, IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems [S].
- [20] 杨丽君, 张广超, 吕雪娇, 等 (Yang Lijun, Zhang Guangchao, Lv Xuejiao, et al.). 考虑可控负荷的含分布式电源的配电网短时故障供电恢复 (Power restoration considering controllable load for short-time fault of distribution network with DGs) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2016, 36 (11): 11-17, 26.
- [21] 于文鹏, 刘东, 余南华, 等 (Yu Wenpeng, Liu Dong, Yu Nanhua, et al.). 主动配电网的局部自治区域供蓄能力指标及其应用 (Power supply and storage capacity index of local autonomy area in an active distribution network and its applications) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2014, 38 (15): 44-55.
- [22] 马发勇, 厉启鹏, 马志斌, 等 (Ma Fayong, Li Qipeng, Ma Zhibin, et al.). 电力调度 SCADA 系统中历史数据压缩及存储策略 (The research of historical data compression and storage strategy in power dispatch SCADA system) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2014, 38 (4): 1109-1114.
- [23] 窦春霞, 李娜, 徐晓龙 (Dou Chunxia, Li Na, Xu Xiaolong). 基于多智能体系统的微电网分散协调控制策略 (Multi-agent system based decentralized coordinated control strategy for micro-grids) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (7): 125-134.
- [24] 王雨婷, 张筱慧, 唐巍, 等 (Wang Yuting, Zhang Xiaohui, Tangwei, et al.). 考虑光伏及负荷时变性的配电网故障恢复 (Fault recovery of distribution network considering time variation of photovoltaic and load) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2016, 40 (9): 2706-2713.

- [25] Baran M E, Wu F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4 (2): 1401-1407.

[26] 杨丽君, 于琦, 魏玲玲, 等 (Yang Lijun, Yu Qi, Wei Lingling, et al.). 基于移动多代理动态联盟的配电网故障恢复研究 (A distribution network fault recovery study on the dynamic alliance of mobile multi-agent) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2016, 31 (8): 147-155.

**Multi-agent system based decentralized coordinated recovery strategy for smart distribution grid**

YANG Li-jun, CHANG Xue-ting, CAO Yu-jie, AN Li-ming, WANG Ming  
(Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province,  
Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** For the demand of self-healing restoration after developing an electrical fault in smart distribution grid, on the basis of complex energy control resources and technical means, a smart distribution system structure based on the energy switcher is given and a decentralized coordinated recovery strategy for smart distribution grid after fault based on the multi-agent system (MAS) is proposed in this paper. The MAS is composed of an energy switcher agent and other components agents on a power supply line. When the distribution network has a small area power outage, considering the volatility of the distributed generator (DG) output power, each DG agent in non-fault zones determines initial island scheme by the equal possible path combination, than the energy switcher agent coordinates islands in conflict, which will ensure rapid recovery of important load power supply. When a large area power outage occurs, after the island power supply scheme is determined, the energy switcher agent finds the optimal power supply path to further restore the loss of electric loads by the improved ant colony algorithm to minimize the network loss as the goal. Simultaneously, the designed MAS can effectively alleviate the traffic congestion caused by the gradual vertical transmission and reception of the information. The feasibility and effectiveness of the proposed strategy is verified by numerical results of 33-bus test systems.

**Key words:** smart distribution grid; fault service restoration; multi agent system; equal possible path combination; improved ant colony algorithm