

含分布式电源的配电网大面积断电供电恢复策略

王增平, 张丽, 徐玉琴, 李雪冬

(电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室(华北电力大学), 河北省保定市 071003)

Service Restoration Strategy for Blackout of Distribution System With Distributed Generators

WANG Zengping, ZHANG Li, XU Yuqin, LI Xuedong

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control (North China Electric Power University), Ministry of Education, Baoding 071003, Hebei Province, China)

ABSTRACT: An agent-environment-rule (AER) model was proposed to solve the service restoration problem in the event of a blackout in a power distribution network with distributed generators (DGs). Various factors during service restoration of distribution system with DGs were expressed as agents, environment and interactive rules. Integrating with multi-agent-system (MAS), the proposed model constructs a lattice-like environment, and all agents can sense their local environment and move in it. By use of asynchronous backtracking algorithm to solve the AER model, the position of each agent in solution space was continuously updated through the interaction among agents and mutual influence between environment and agents to make the agents possible to search optimal solution quickly. The example results indicate the superiority and effectiveness of the proposed method.

KEY WORDS: distribution network; service restoration; agent-environment-rule (AER) model; distributed generator (DG); large-scale blackout; asynchronous backtracking algorithm

摘要: 提出利用智能体环境规则(agent-environment-rule, AER)的数学模型以解决包含分布式电源(distributed generator, DG)的配电网大面积断电供电恢复问题。考虑孤岛运行的情况,将含分布式电源的配电网供电恢复中的各种因素表示为AER模型中的智能体、环境和环境更新规则。该模型结合多智能体系统(multi-agent-system, MAS),构造了一个格子环境,所有智能体均可感知局部环境并在环境中进行移动。使用异步回溯算法不断地通过智能体间的交互和智能体与环境间的相互影响来更新每个智能体在解空间的

位置,使其能够快速搜索到最优解。算例结果证明了所提方法的有效性和优越性。

关键词: 配电网; 供电恢复; 智能体环境规则模型; 分布式电源; 大面积断电; 异步回溯算法

0 引言

配电网供电恢复的主要目标是在配电网发生故障后,在确保系统安全运行的条件下,通过网络重构,快速恢复对非故障区域失电负荷的供电。国内外学者已提出了多种方法解决此问题,主要思路是应用人工智能与数值计算相结合的方法,包括遗传算法^[1-3]、模糊评估算法^[4]、专家系统方法^[5]、启发式搜索算法^[6]等。

近年来,随着全球对环境保护和节能问题的日益关注,以及风力发电、光伏发电等可再生能源发电技术的日益成熟,分布式发电(distributed generation, DG)技术成为国内外研究的热点。DG具有安装灵活、供电方便、环保等特点,通常DG安装在用户附近以提高负荷的供电可靠性及电能质量。尽管DG在电力系统中发挥了重要作用,但DG的引入使得配电系统从单电源辐射式网络变为双端或多端有源网络,配电系统的结构和运行都发生了较大变化^[7-9]。因而,引入DG后的配电网大面积断电恢复不能直接套用传统算法。研究配电网大面积断电后,利用DG孤岛效应,维持重要负荷供电前提下最大限度地对非故障区域恢复供电策略,对提高电力系统抗灾防御能力具有重要意义。文献[10]利用传统算法研究了包含DG的配电网故障恢复步骤,但用于配电网大面积断电情况时效率较低。文献[11]在配电网发生故障时采取

基金项目: 国家自然科学基金项目(50837002, 50777016)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50837002, 50777016).

启发式的搜索策略，能够快速得到可行的孤岛划分方案，但此方法并不能形成最大范围的潜在孤岛。文献[12]根据配电网树状结构及自上而下地进行故障恢复的特点，提出一种分层解列的孤岛划分，可以形成最大范围的孤岛。但上述文献均只是针对树状配电网而言，不适用于实际系统中较为复杂的网格状配电网。

近年来，分布式人工智能中基于智能体(agent)的计算已经成功应用于电力系统领域^[13-14]，而多个智能体为了达到特定目的、通过相互作用而形成的系统就称为多智能体系统(multi-agent-system, MAS)。基于 MAS 的智能体环境规则(agent-environment-rule, AER)模型以人工生命理论为指导，吸取了元胞自动化^[15]、多主体建模的基本思想，包含智能体、环境及更新规则 3 个主要概念，建立了一个具有“局部性、全局性、内聚力、动态性”的复杂自适应系统，能够高效求解多约束、非线性优化问题。

本文考虑故障后 DG 孤岛运行的情况，研究了 DG 在配电网大面积断电情况下的运行方式。建立了配电网供电恢复 AER 模型，该模型结合多智能体系统，构造了一个格子环境，所有智能体均可感知局部环境并在环境中进行移动。使用异步回溯算法对分布式发电条件下的配电网大面积断电供电恢复 AER 数学模型进行求解。算例结果表明，本文算法能够快速有效地求解含 DG 的配电网大面积断电供电恢复问题。

1 配电网大面积断电供电恢复数学模型

在配电网大面积断电的紧急状态下，运行人员主要关心的是快速将尽量多的断电负荷恢复供电，而经济运行并不重要，因此在供电恢复中，可以不进行细致的潮流计算，采用电流代表负荷，仅根据负荷间的叠加关系就可以达到目的^[16]。

本文考虑供电恢复的目标函数为甩负荷最少(或恢复最多负荷)和系统网络损耗最小^[17]：

$$f = \min\left\{k_B - \sum_{i \in \gamma} k_i + A(P_{\text{loss,sys}} + \sum_{j=1}^N P_{\text{loss,island}j})\right\} \quad (1)$$

式中： k_B 为断电区域内的总断电负荷量； γ 为故障隔离后得到的断电区域的集合； k_i 为恢复的第 i 个负荷的负荷量； A 的取值为 0 和 1，当所有断电负荷均能恢复时， A 为 1，否则为 0； N 为供电恢复后，处在断电区域内的 DG 形成孤岛运行的数目； $P_{\text{loss,sys}}$ 为不包括孤岛运行部分的配电系统的网络损耗；

$P_{\text{loss,island}j}$ 为第 j 个孤岛的有功损耗。

配电网供电恢复的求解过程，即搜索满足配电网运行且使目标函数最大的解向量。配电网供电恢复问题约束通常包括 3 种约束：1) 支路功率不超过最大功率约束；2) 节点电压应保持在允许电压范围内；3) 不包含 DG 时的网络辐射状运行约束。

2 包含分布式电源的配电网大面积断电供电恢复 AER 模型

2.1 基于约束满足问题的 AER 模型简介

约束满足问题(constraint satisfaction problem, CSP)是在一定的定义域范围内为所有的变量寻找满足它们彼此间约束关系的赋值的问题^[18]。约束满足问题可以形式化为一个约束网，由变量的集合、每个变量的定义域集合以及变量间的约束关系的集合来定义，表示为三元组 (X,D,C) ，其中： X 是变量的集合， $X=\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ ； D 是所有变量的定义域集合， $D=\{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ ， D_i 是变量 X_i 的所有可能取值的有限域； C 是变量之间的约束关系的集合， $C=\{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ ，其中每个约束包含一个 X 的子集 $\{X_i, \dots, X_j\}$ 和一个约束关系 $R \subseteq D_i \times \dots \times D_j$ 。

约束满足方法是一种有效的问题求解方法，它为每个变量在其定义域中寻找一个赋值，使得所有约束被满足^[19]。

AER 模型包含智能体、环境及更新规则 3 个主要概念。AER 系统是一个多智能体系统，智能体可以感知局部环境，不断演化到解状态。应用 AER 模型，为约束满足问题建立一个多智能体模型算法： $CSP\{X(\text{变量}), D(\text{值域}), C(\text{约束条件})\} \Rightarrow$ 多智能体系统 $D \& C \Rightarrow$ 环境 & 环境更新规则 $X \Rightarrow$ 智能体 (1 个智能体代表 1 个变量) 解答 \Rightarrow 所有智能体的位置。

2.2 包含分布式电源的配电网大面积断电供电恢复 AER 模型

对于配电网大面积断电的供电恢复问题，将能够提供电源的馈线看成智能体，这样，有几条可以用于恢复供电的馈线就有几个智能体。每个智能体的值域为每条馈线能够加载负荷的方式集，其中每种加载负荷的方式可采用以负荷为节点、开关为边的负荷树表示。对于分布式电源，将故障后处在断电区域的每个 DG 看作一个智能体，为了充分利用其发电能力，其值域只列举最大加载负荷方式。本文考虑的 DG 在故障发生后均可作为系统的备用电

源,且DG均可控,其操作状态可随时监测。

本文中处在断电区域中的DG在故障恢复过程中采用分层孤岛运行方式^[17],尽可能地形成多用户孤岛运行,以充分利用DG的发电能力;当多用户孤岛运行失败后,进一步解列成单用户孤岛,尽可能地保证负荷供电。

式(1)中目标函数 f 可分解为对每个智能体的目标函数值的线性叠加^[20]。配电网供电恢复问题约束1)、2)属于智能体内部约束,可以在单独的智能体的值域内部校验并满足;约束3)属于智能体间的约束,存在于各智能体之间,代表馈线的智能体间约束等价于每个负荷节点均由1个电源点供电,其形式可表示为邻接矩阵。代表馈线及代表DG的智能体之间的约束也可由邻接矩阵表示,但由于馈线和DG的供电负荷是可以连通的,因此与代表DG的智能体相关的约束矩阵均为零矩阵。当馈线加载负荷与DG加载负荷连通时,代表馈线和DG的智能体加载负荷量之和的最大值为馈线容量与DG容量之和。

可将各个智能体的环境表示为 n 行格子,每行代表一个智能体 a_j ,每行对应于一个智能体的值域 D_j ,智能体 a_j 有 $|D_j|$ 列, $j=1,2,\dots,n$ 。每个格子记录着值域的值和约束冲突数2种信息^[21]。值域的值即为联络开关及DG并网断路器加载负荷的大小。约束冲突数记录在当前状态与当前位置下不满足约束条件的智能体的个数,它由相关的邻接矩阵和智能体取值决定。

智能体 a_j 的值域 D_j 内所有元素的约束冲突数可由代表智能体之间约束关系的邻接矩阵计算得出:

$$a_{j,\text{attack}} = \sum_{k=1}^{j-1} R_{kj,d_k} \quad (2)$$

式中: $a_{j,\text{attack}}$ 为智能体 a_j 的值域 D_j 内元素的约束冲突数; R_{kj,d_k} 为邻接矩阵 R_{kj} 的第 d_k 行。

图1为一个示例配电网结构,每条馈线的容量为300A,DG的容量为50A。假设母线103发生故障,断路器 S_4 断开,则由母线101及102对断电区域恢复供电。依据供电恢复AER模型,母线101和102上的馈线及 DG_1 可由智能体 a_1, a_2, a_3 表示。智能体 a_1 的值域 D_1 为 $\{(1,2,3,4,5,13), (1,2,3,4,5,6), (1,2,3,4,5), (1,2,3,4,13), (1,2,3,4), (1,2,3), (1)\}$,已按目标函数值排序,目标函数值依次为267,265,226,222,181,135,65A。智能体 a_2 的值域 D_2 为

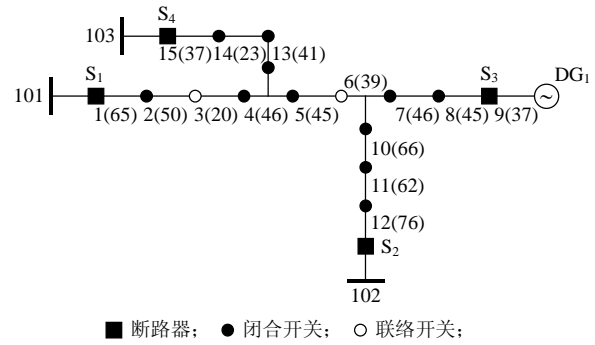


图1 某配电网结构图
Fig. 1 Example of a distribution system

$\{(12,11,10,6,7,8), (12,11,10,6,7), (12,11,10,5, 6), (12,11,10,6), (12,11,10), (12,11), (12)\}$,目标函数值依次为334,289,288,243,204,138,76A。智能体 a_3 的值域 D_3 为 $\{(9)\}$,目标函数值为37A。智能体 a_2 的最大加载负荷值已经超过了其容量限制,是因为其对应的加载负荷方式与 DG_1 加载的负荷构成连通区域,由母线102及 DG_1 共同供电。约

束矩阵为: $R_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}_{7 \times 8}; R_{13} =$

$0; R_{23} = 0$ 。

图2列出了智能体 a_1, a_2 及 a_3 的环境代表的值域的值,图3描述了智能体 a_1, a_2 及 a_3 均取值域里第1种加载负荷方式时,值域里每个元素的约束冲突值,此时 a_1, a_2 及 a_3 都处于约束冲突数为0的位置。

a_1	267	265	226	222	181	135	65	
a_2	289	288	271	243	205	204	138	76
a_3	37							

图2 a_1, a_2 及 a_3 代表的值域的值
Fig. 2 Values of the range represented by a_1, a_2 and a_3

a_1	0	1	0	0	0	0	0	
a_2	0	1	0	0	0	0	0	0
a_3	0							

图3 a_1, a_2 及 a_3 代表的约束冲突数
Fig. 3 Constraint conflicts of a_1, a_2 and a_3

3 基于AER模型的配电网大面积断电供电恢复优化算法

3.1 基础数据

算法的基础数据包括:配电网的馈线及DG,均由智能体代表;智能体的值域,即对应的馈线或DG加载负荷的方式,值域的所有元素按照目标函

数从大到小排序；代表各智能体之间约束关系的邻接矩阵。基础数据一般不会频繁变动，因此可以离线计算。

3.2 异步回溯算法搜索最优解

采用异步回溯算法对基于 AER 模型的配电网供电恢复模型进行求解。异步回溯算法中，每个智能体都有一个优先顺序，该优先顺序是预先定义好的，可根据设计者的意图确定。在基于约束满足问题 AER 模型的配电网供电恢复模型中，代表各个馈线的智能体的优先顺序由各馈线最大运行方式下加载负荷的目标函数值的大小决定。由于智能体之间也存在着约束关系，所以智能体间需要通过消息传递来进行通信，这是与传统算法的最大区别。有 2 种基本的消息需要通信，包括 ok? 消息以及 nogood 消息^[19]。

定义 1 ok? 消息，ok? 是指智能体将当前的赋值信息传递给相邻智能体的消息。

定义 2 nogood 消息，nogood 是用来传递约束是否发生冲突而产生新约束的消息。

异步回溯算法允许所有的智能体同时执行搜索，每个智能体与其相关的智能体进行通信，并以此为依据调整本地变量的值。算法过程中，每个智能体除了要发送接收 ok? 和 nogood 消息以外，还要维护一个 agent_view 数组，用以记录其他智能体的当前赋值。首先初始化各智能体，然后智能体向与之有约束关系的较低优先级的智能体发送包含当前赋值的消息，最后，智能体就等待接收到消息的智能体的响应，并决定其在值域范围内的取值。

利用 AER 模型求解配电网供电恢复问题具有局部性、全局性、内聚力及动态性 4 个特性^[21]。与已提出的解决配电网大面积断电供电恢复问题的集中智能方法^[16,20]相比较，AER 模型利用多个局部智能体互相配合，具有局部目标和行为的智能体能够通过动态环境达到整体的全局目标，因此 AER 模型能够更加高效地求解配电网大面积断电供电恢复约束满足模型；此外，AER 模型中代表 DG 的智能体能够通过环境实现与代表馈线的智能体进行信息交互，达到在配电网供电恢复过程中充分利用 DG 的发电能力、提高供电可靠性的目的。

利用异步回溯算法求解基于约束满足问题 AER 模型的配电网供电恢复问题算法流程图如图 4 所示。

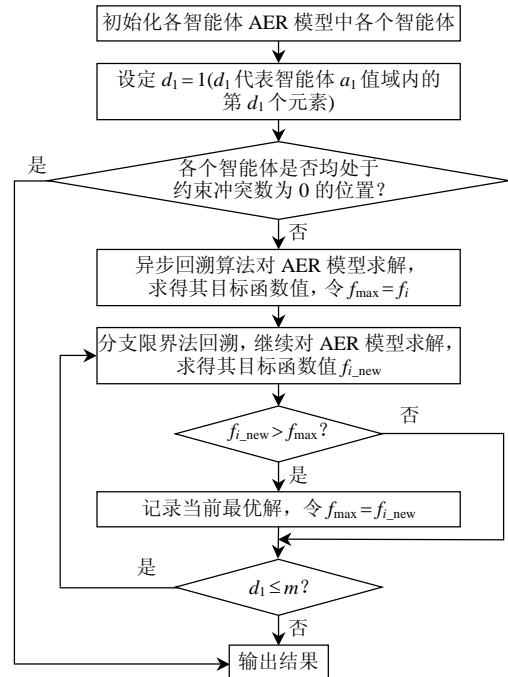


图 4 算法流程图

Fig. 4 Algorithm flow chart

4 算例分析

4.1 算例 1

算例 1 为某县城关包含 DG 的配电网，如图 5 所示^[22]，括号内为馈线段上的负荷大小，单位为 A，对负荷编号并标识在负荷大小的旁边，实心圆代表合闸，空心圆代表分闸。该配电网共包含 5 个分布式电源，容量均为 50 A。每条馈线的容量为 300 A。假设母线 101 故障，断路器 S₃ 和 S₄ 断开，需要由母线 102 及 103 恢复供电。DG₃、DG₄ 及 DG₅ 均处于断电区域中，故障发生后 DG₃ 解列为孤岛 A，以单元孤岛形式独立运行；DG₄ 及 DG₅ 可形成多用户孤岛 B，以多用户孤岛形式独立运行。

根据本文算法，母线 102 和 103 上的馈线及

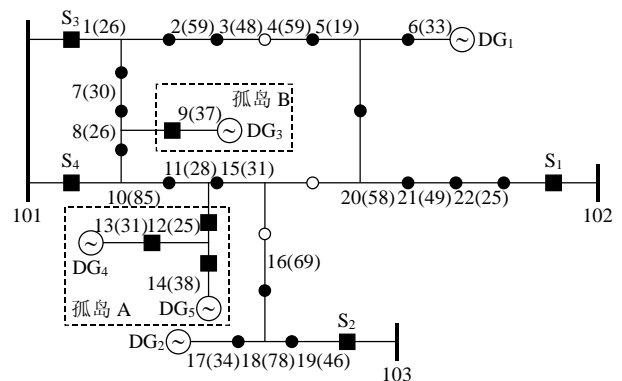


图 5 某县城关配电网简化图

Fig. 5 Simplified figure of distribution system in some county outskirts

DG₁ 和 DG₂, 分别由智能体 a_1, a_2, a_3 及 a_4 表示。供电恢复过程中, 将孤岛 A 及孤岛 B 看作可调度负荷。智能体 a_1 的值域 D_1 为 $\{(20,21,22,5,4,3,2), (20,21,22,15,11, \text{孤岛 A}, 10,8, \text{孤岛 B}), (20,21,22,5,15, 11, \text{孤岛 A}, 10), (20,21,22,5,4), \dots\}$, 共 17 个元素, 已按目标函数排序, 目标函数值依次为 327 A, 302 A, 295 A, 258 A, ...。智能体 a_2 的值域 D_2 为 $\{(16,18,19, 15,11, \text{孤岛 A}, 20), (16,18,19,15,20), (16,18,19,15,11, \text{孤岛 A}), (16,18,19,15,11), \dots\}$, 共 8 个元素, 已按目标函数排序, 目标函数值依次为 310 A, 282 A, 252 A, 252 A, ...。智能体 a_3 的值域 D_3 为 $\{(6)\}$, 只包含 1 个元素。智能体 a_4 的值域 D_4 为 $\{(17)\}$ 。

智能体 a_1, a_2, a_3 及 a_4 的环境依次表示为 4 行格子, 分别有 17、8、1 及 1 列。每个格子记录着值域的值和约束冲突数 2 种信息。图 6 为 4 个智能体值域的值。图 7 描述了初始值状态下(智能体 a_1, a_2, a_3 及 a_4 值域中目标函数值最大取值)环境的约束冲突数, 图中由于智能体 a_1 的优先级别最高, 所以其值域内各元素约束冲突数均为 0。

a_1	327	302	295	258	210	...
a_2	310	284	252	252
a_3	33					
a_4	34					

图 6 a_1, a_2, a_3 及 a_4 代表的值域的值

Fig. 6 Values of the ranges represented by a_1, a_2, a_3 and a_4

a_1	0	0	0	0	0	...
a_2	1	1	0	0
a_3	0					
a_4	0					

图 7 初始值状态下 a_1, a_2, a_3 及 a_4 代表的约束冲突数

Fig. 7 Constraint conflicts of a_1, a_2, a_3 and a_4 with initial values

利用异步回溯算法对此基于 AER 模型的配电网供电恢复问题进行求解, 最后得到优化的恢复方案为: 甩负荷 1、7、8、10, DG₁ 与 DG₂ 仍然并网运行, 由于 DG₃ 周边负荷均未恢复供电, 孤岛 B 继续独立运行, 孤岛 A 并网运行。

4.2 算例 2

图 8 为一个更为复杂的典型实际配电网^[23], 包含 85 个节点、15 条馈线、5 条变电站母线和 7 个分布式电源。每条馈线的容量为 400 A, 每个分布式电源容量为 100 A, 系统总负荷为 3.449 kA。假设母线 E 发生故障, 断路器 S₉—S₁₅ 断开以隔离母线 E, 由剩余 8 条馈线将尽可能多的失电负荷恢复供电。DG₁、DG₃ 及 DG₄ 均处于断电区域中, 故障发生后 DG₁ 解列为孤岛 A, 以单元孤岛形式独立运行; DG₃ 及 DG₄ 若以多用户孤岛形式独立运行, 则区域内负荷超出了 DG₃ 及 DG₄ 的容量之和, 因此 DG₃ 及 DG₄ 直接解列成单元孤岛 C 及单元孤岛 D 独立运行。

限定每条馈线的负荷加载方式均必须大于 300 A, 利用本文提出的算法进行优化计算, 优化结果如表 1 所示, 恢复断电负荷 1 150 A, 只需甩负荷 42, 搜索到最优解的计算时间为 9 ms。采用文献[24]所提出的混合智能算法进行供电恢复计算, 优化结果为恢复负荷 1 070 A, 甩负荷 6 和 42, 搜索到最优解的计算时间为 11 ms。由此可见: 本文算法具有更高的计算效率, 并且与文献[24]提出方法比较能够恢复更多的负荷, 因为本文将处于断电区域的 DG 看作智能体, 能够与代表馈线的智能体进行信息交互, 达到恢复尽量多负荷的目的。

对于配电网中不配置分布式电源的情况, 仍利

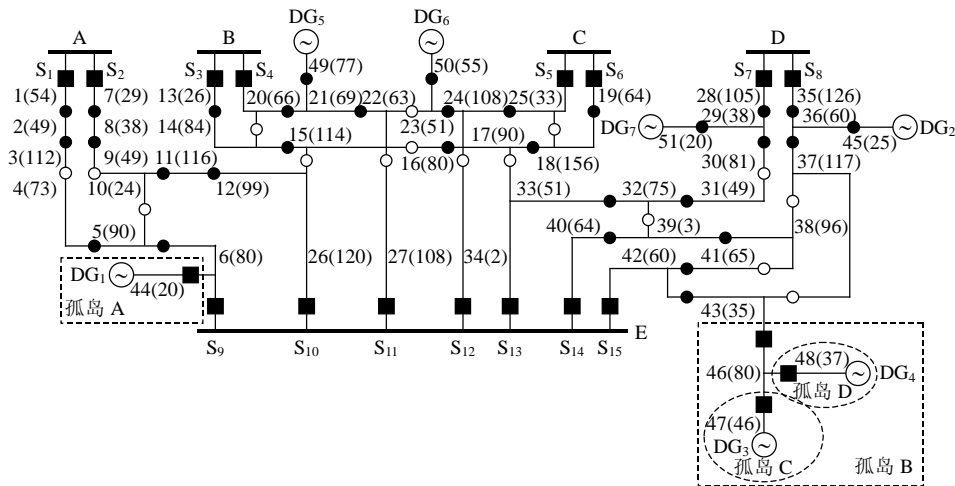


图 8 包含 DG 配电网供电恢复算例 2

Fig. 8 Sample 2 of the distribution restoration with DG

表 1 算例 2 优化计算结果
Tab. 1 Optimization results of sample 2

断路器	加载负荷	断路器	加载负荷
S ₁	1,2,3,4,5,6,孤岛 A	S ₅	23,24,25,27
S ₂	7,8,9,10,11,12	S ₆	17,18,19,33,34
S ₃	13,14,15,16	S ₇	28,29,30,31,32,39,40
S ₄	20,21,22,26	S ₈	35,36,37,38,41,43,孤岛 B

用本文提出的算法进行计算, 则只能恢复负荷 906 A, 甩负荷 6, 40, 41, 42。由上述分析可得, 利用本文提出的包含 DG 的配电网供电恢复 AER 模型进行优化计算, 能有效减少停电负荷, 提高系统的供电可靠性。

5 结论

本文采用基于约束满足问题的 AER 模型对包含分布式电源的配电网大面积断电供电恢复问题进行求解, 该模型结合多智能体系统, 将配电网供电恢复中的各种因素表示为 AER 模型中的智能体、环境和环境更新规则, 并且构造了一个格子环境, 所有智能体均可感知局部环境并在环境中进行移动。利用异步回溯算法求解分布式发电条件下的配电网大面积断电供电恢复 AER 模型, 能够快速搜索到最优解。算例结果表明, 文中所提出的方法能够快速有效地求解包含分布式电源的配电网大面积断电供电恢复问题, 对于分布式电源渗透率越来越高的配电网具有较为广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Luan W P, Irving M R, Daniel J S. Genetic algorithm for supply restoration and optimal load shedding in power system distribution networks[J]. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(2): 145-151.
- [2] Zhu J Z. Optimal reconfiguration of electrical distribution network using the refined genetic algorithm[J]. Electric Power System Research, 2002, 62(1): 37-42.
- [3] 余健明, 蔡利敏, 杨文字. 基于提高系统可靠性降低网损的配电网重构[J]. 电工技术学报, 2004, 19(10): 70-73.
Yu Jianming, Cai Limin, Yang Wenyu. Distribution network reconfiguration for system reliability improvement and power loss reduction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(10): 70-73(in Chinese).
- [4] 李海峰, 张尧, 钱国基, 等. 配电网故障恢复重构算法研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(16): 34-37.
Li Haifeng, Zhang Yao, Qian Guoji, et al. Study on the algorithm for service restoration reconfiguration in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(16): 34-37(in Chinese).
- [5] 葛朝强, 唐国庆, 王磊. 综合智能式的故障恢复专家系统与故障恢复算法集相结合的自学习模糊专家系统[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(2): 17-21.
Ge Zhaoqiang, Tang Guoqing, Wang Lei. Integrated intelligent service

- restoration system for distribution network: an auto-learning fuzzy expert system combined with service restoration algorithm set[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(2): 17-21(in Chinese).
- [6] 刘健, 武晓朦, 余健明. 考虑负荷不确定性和相关性的配电网网络重构[J]. 电工技术学报, 2006, 21(12): 54-59.
Liu Jian, Wu Xiaomeng, Yu Jianming. Distribution network reconfiguration considering load uncertainty and dependence[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(12): 54-59(in Chinese).
 - [7] Mcdermott T E, Dugan R C. PQ, reliability and DG[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2003, 9(5): 17-23.
 - [8] Pilo F, Celli G, Mocci S. Improvement of reliability in active networks with intentional islanding[C]/IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. Hong Kong, China: IEEE, 2004: 474-479.
 - [9] Zeineldin H H, Bhattacharya K, El-saadany E F, et al. Impact of intentional islanding of distributed generation on electricity market prices[J]. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(2): 147-154.
 - [10] 卢志刚, 董玉香. 含分布式电源的配电网故障恢复策略[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 89-92.
Lu Zhigang, Dong Yuxiang. Service restoration strategy for distribution system with DGs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 89-92(in Chinese).
 - [11] 易新, 陆于平. 分布式发电条件下的配电网孤岛划分算法[J]. 电网技术, 2006, 30(7): 50-54.
Yi Xin, Lu Yuping. Islanding algorithm of distribution networks with distributed generators[J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 50-54(in Chinese).
 - [12] 丁磊, 潘贞存, 丛伟. 基于有根树的分布式发电孤岛搜索[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 62-67.
Ding Lei, Pan Cunzhen, Cong Wei. Searching for intentional islanding strategies of distributed generation based on rooted tree[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 62-67(in Chinese).
 - [13] 朱永利, 宋少群. 基于广域网和多智能体的自适应协调保护系统的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 15-20.
Zhu Yongli, Song Shaoqun. Study on multi-agent and WAN Based adaptive coordinated protection system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(16): 15-20(in Chinese).
 - [14] 赵伟, 白晓民, 丁剑. 基于协同式专家系统及多智能体技术的电网故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 1-8.
Zhao Wei, Bai Xiaomin, Ding Jian. A new fault diagnosis approach of power grid based on cooperative expert system and multi-agent technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 1-8(in Chinese).
 - [15] Gutowitz H A. Cellular automata: theory and experiment[D]. Cambridge: Cambridge University, 1991.
 - [16] 刘健, 徐精求. 紧急状态下配电网断电快速恢复算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 132-138.
Liu Jian, Xu Jingqiu. Algorithms on fast restoration of large area breakdown of emergency states[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 132-138(in Chinese).
 - [17] 徐玉琴, 张丽, 王增平等. 基于多智能体遗传算法并考虑分布式电源的配电网大面积断电供电恢复算法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 61-67.

- Xu Yuqin, Zhang Li, Wang Zengping, et al. Algorithm of supply restoration for large area blackout in distribution network with distributed generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 61-67 (in Chinese).
- [18] Yokoo M, Durfee E H, Ishida T, et al. Distributed constraint satisfaction for formalizing distributed problem solving[C]//The 12th International Conference on Distributed Computing Systems. Yokohama, Japan: IEEE, 1992: 614-621.
- [19] 王秦辉, 陈恩红, 王煦法. 分布式约束满足问题研究及其进展[J]. 软件学报, 2006, 27(10): 2029-2039.
Wang Qinhui, Chen Enhong, Wang Xufa. Research and development of distributed constraint satisfaction problems[J]. Journal of Software, 2006, 27(10): 2029-2039(in Chinese).
- [20] 刘栋, 陈允平, 沈广, 等. 基于 CSP 的配电网大面积断电供电恢复模型和算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10): 28-32.
Liu Dong, Chen Yunping, Shen Guang, et al. CSP-based model and algorithm of service restoration for large area blackout of distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(10): 28-32(in Chinese).
- [21] 徐玉琴, 张丽, 王增平. 基于 AER 模型的配电网大面积断电供电恢复算法[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 23-28.
Xu Yuqin, Zhang Li, Wang Zengping. Agent-environment-rules-based model and algorithm of service restoration for large-area blackout of distribution system[J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 23-28(in Chinese).
- [22] 卢志刚, 董玉香. 含分布式电源的配电网故障恢复策略[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 89-92.
Lu Zhigang, Dong Yuxiang. Service restoration strategy for distribution system with DGs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 89-92(in Chinese).
- [23] 刘健, 石晓军, 程红丽, 等. 配电网大面积断电供电恢复及开关操作顺序生成[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 76-79.
Liu Jian, Shi Xiaojun, Cheng Hongli, et al. Restoration for large area blackout of distribution network and switching operation sequence management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 76-79(in Chinese).
- [24] 刘自发, 葛少云, 余贻鑫. 一种混合智能算法在配电网网络重构中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 73-78.
Liu Zifa, Ge Shaoyun, Yu Yixin. A hybrid intelligent algorithm for loss minimum reconfiguration in distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 73-78(in Chinese).



王增平

收稿日期: 2010-04-15。

作者简介:

王增平(1964), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统自动化、继电保护、变电站综合自动化等, wangzp1103@sina.com;

张丽(1983), 女, 博士研究生, 研究方向为配电网自动化, 电力系统继电保护, janezl_612@126.com;

徐玉琴(1964), 女, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制、电力系统继电保护等;

李雪冬(1984), 男, 硕士研究生, 研究方向为包含 DG 的配电网供电恢复。

(责任编辑 刘浩芳)