

DOI: 10.7667/PSPC170710

# 基于网络等效的配电网快速供电恢复策略并行化实现

茅逸斐<sup>1</sup>, 韩蓓<sup>1</sup>, 李国杰<sup>1</sup>, 张利军<sup>2</sup>, 徐晨博<sup>2</sup>, 孙轶恺<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240;

2. 国网浙江省电力公司经济技术研究院, 浙江 杭州 310000)

**摘要:** 现代智能配电网在故障后可以调度需求侧的“灵活源”实现快速供电恢复。针对智能配电网的特点, 提出了一种基于网络等效和并行化实现的快速供电恢复策略, 能够灵活地利用电网资源以应对不同的失电情况。算法将支援线路等效为电源节点(称为等效源点), 采用离线等效源点预存储与实时等效源点并行计算相结合的模式: 保存并优先使用离线数据; 在失电负荷较大时, 调取实时数据对不同的调度可能进行并行计算。为进一步提升算法的时效性, 利用改进邻接矩阵记录和维护电网拓扑结构, 实现网络的高效重构。通过若干个算例, 验证了该供电恢复策略在面对不同程度失电时均能合理高效地运用电网的各类支援资源, 实现快速供电恢复。

**关键词:** 供电恢复; 智能配电网; 网络等效; 并行化; 邻接矩阵

## Parallel realization of fast restoration strategy for distribution system based on network equivalence

MAO Yifei<sup>1</sup>, HAN Bei<sup>1</sup>, LI Guojie<sup>1</sup>, ZHANG Lijun<sup>2</sup>, XU Chenbo<sup>2</sup>, SUN Yikai<sup>2</sup>

(1. School of Electric Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. State Grid Jiangsu Economic Research Institute, Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** Modern intelligent distribution network can achieve rapid power recovery by dispatching its “flexible sources” of the demand side. This paper proposes a fast power restoration strategy based on network equivalence and parallelization aiming at the characteristics of intelligent distribution network which can use power network resources flexibly to cope with different electrical energy loss. The algorithm uses special power supply nodes (called equivalent sources) to replace surrounding feeders, adopts parallel computation mode of combining off-line equivalent sources pre-storage with real-time ones. The off-line data is pre-stored and preferred to use. While facing larger electrical energy loss, the algorithm calculates in parallel the real-time equivalent sources corresponding to different dispatching possibilities. In order to further improve the efficiency, the algorithm uses improved adjacency matrix to maintain the radial topology and reconstruct the network efficiently. Several cases of different electrical energy loss are studied to show that this strategy can achieve rapid power recovery by using different support sources reasonably and efficiently.

This work is supported by a Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Company (No. 5211JY16000X).

**Key words:** power restoration; intelligent distribution network; network equivalence; parallelization; adjacency matrix

## 0 引言

供电恢复是配电网在故障情况下, 通过开关操作进行网络重构, 在保证系统安全的条件下对非故障失电区域进行快速恢复供电。其首要目标是在最短的时间内尽可能多地恢复失电负荷, 其次要考虑到在供电恢复期间的各类经济性因素: 如开关操作

次数、重构后的网损和负荷均衡程度等。同时供电恢复方案要满足网络中各类约束条件, 是一类多目标、多约束的组合优化问题。作为在数学上没有完美解决的 NP 难问题(Non-deterministic Polynomial-Time Hard Problems)<sup>[1]</sup>, 科研人员进行了大量研究。常用方法可分为三类<sup>[2]</sup>: 数学优化方法, 启发式搜索方法以及人工智能算法。数学优化方法最早被用于供电恢复<sup>[3]</sup>, 但其采用的模型精确程度决定了是否能搜寻到最优解, 同时其计算时间冗长。启发式

基金项目: 国网浙江省电力公司科技项目(5211JY16000X)

方法针对问题本身特点,将一些启发式信息、规则等加入搜索过程,使得搜索朝最优解的方向进行。该方法具有较强的实时性和实用性,可以快速地找到恢复方案且较易实现。配电网拓扑结构和图论中的树结构类似,不少启发式算法借鉴了图论理论来解决供电恢复问题<sup>[4-7]</sup>。随着计算机技术的发展,人工智能算法逐渐被用于该领域。如采用基于二进制粒子群优化算法进行供电恢复<sup>[8]</sup>,或是应用遗传算法求解供电恢复优化模型<sup>[9]</sup>等。各类方法都有优缺点,将几种方法结合起来相互取长补短,也能够取得良好效果<sup>[10-12]</sup>。

当下,分布式电源(Distributed Generation, DG),备用系统、储能设备以及负荷侧的需求响应(Demand Response, DR)等可调节的“灵活源”被接入现代电网<sup>[13]</sup>,并逐渐在供电恢复中发挥作用<sup>[14-17]</sup>。它们为供电恢复带来新的可能的同时,其实时运行和设备监测所产生的大量数据也对实时供电恢复算法的效率提出了更高的要求。考虑以上特性,本文在启发式贪婪搜索算法的基础上建立了一种结合网络等效和并行化计算的快速供电恢复策略。该策略主要有三个特点:(1)通过在联络开关处建立取代支援电网的等效源点来缩小开关操作搜索的解空间。(2)针对智能配电网的大数据特点,采用离线数据预判与并行处理实时数据相结合的方式,在满足需求的同时有效地减少数据传输量。通过对各支援因素(一级、二级馈线以及涉及线路所含的DG、储能(Energy Storage, ES)、需求响应(DR)等)的实时数据进行并行计算,整合形成新的等效源点表。(3)根据等效源点表选择合适的调度方案,利用基于图论所提出的改进邻接矩阵来高效地保存、维护电网辐射状拓扑结构,在充分发挥智能配电网转供能力的同时快速地实现网络重构。

本文将在第1节介绍该算法的总流程,第2、3、4节将具体介绍等效源点计算方法、改进邻接矩阵和并行式计算的详细算法。第5节中通过三个不同失电程度的算例验证了该策略在各种失电情况下均能合理高效地运用电网的各类支援资源,实现快速供电恢复。

## 1 算法总流程

整个算法的流程如图1所示,可主要分为三部分:①电网初始拓扑结构的存储和离线等效源点的计算;②对失电区域的启发式供电恢复搜索;③实时支援能力的并行计算。图1中也标示出第五节按照失电程度逐级加重的三个算例流程。

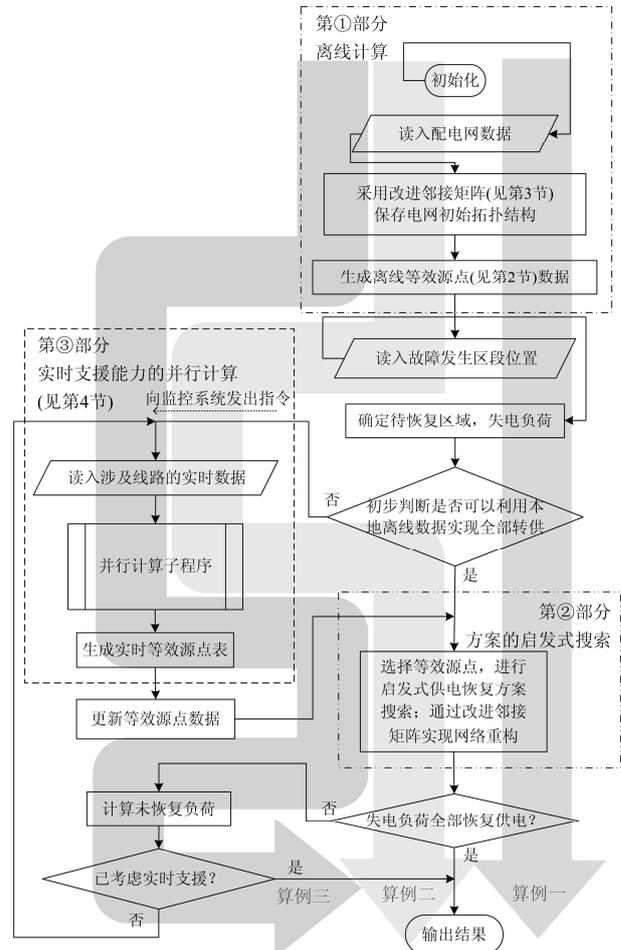


图1 算法总流程

Fig. 1 Algorithm flow chart

第①部分为离线计算。将电网初始拓扑数据录入改进邻接矩阵中以保存,并根据线路的历史负荷情况对其负荷水平进行分类,生成对应的离线等效源点数据。本地保存以上数据,遇到失电不严重的情况可以通过该离线数据直接搜寻恢复方案。

第②部分为实施启发式供电恢复搜索部分。传统的启发式搜索首先选取转供路径所经过的联络开关:对于与失电区域相连的联络开关(即一级联络开关),按照其备用容量 $P_M$ 从大到小进行排序形成联络开关列表,根据贪婪算法优先闭合列表中靠前的开关进行供电恢复尝试。联络开关的备用容量 $P_M$ 的定义如式(1),其中 $B$ 为联络开关与向该联络开关供电的电源之间路径上的所有支路的集合; $P_{l,max}$ 为支路 $l$ 允许的最大潮流, $P_l$ 为支路 $l$ 的潮流。当已闭合的若干个联络开关无法满足恢复需求时,将列表剩余项中 $P_M$ 最大的开关闭合,并断开其间的分段开关进行分区转供方案搜索。直到实现转供所有失电负荷,或是列表变空、部分恢复供电。

$$P_M = \min \{P_{l,max} - P_l\}, \quad l \in B \quad (1)$$

本文在传统启发式搜索的基础上进行优化, 算法运用了等效源点并引入了改进邻接矩阵。用等效源点的最大支援功率取代备用容量  $P_M$ , 同时量化其操作成本。另一方面, 采用改进邻接矩阵来维护电网结构、进行潮流计算并验证方案的可行性。作为在故障恢复前的临时决策, 供电恢复方案对于经济运行方面的要求(如最小化网损等)相对较弱。因而本算法的目标是尽可能多地恢复失电负荷, 同时使得方案的总操作成本最少。目标函数为

$$\max f_1 = \sum_{i \in D} P_i \quad (2)$$

$$\min f_2 = C_{SS} + \sum_{i \in \text{lines}} (C_{TS}^i + C_{\text{else}}^i + C_{DG}^i + C_{ES}^i + C_{DR}^i) \quad (3)$$

式(2)中:  $P_i$  为失电负荷  $i$  的大小;  $D$  为系统所有未恢复供电的负荷集合。式(3)中:  $C_{SS}$  是原失电线路区域的分段开关操作成本;  $\text{lines}$  是故障线路的一级馈线集合;  $C_{TS}^i$  为供电恢复方案中一级馈线  $i$  的联络开关操作成本;  $C_{\text{else}}^i$  则为馈线  $i$  在方案中的其他操作成本(如方案中与馈线  $i$  通过与之相连的二级馈线转移馈线  $i$  的部分负荷所需的操作成本等);  $C_{DG}^i$ 、 $C_{ES}^i$ 、 $C_{DR}^i$  分别是方案中 DG、ES 及 DR 调度操作的成本。

第③部分为根据实时数据并行计算电网可提供的实时支援能力。当离线数据无法满足转供需求时, 算法调取各线路的实时负荷水平以及一、二级馈线范围内的可控 DG、ES、DR 等数据并对其作并行计算, 将各有关操作对供电恢复的作用体现在等效源点中, 形成实时等效源点表。根据实际失电情况, 结合该实时等效源点表得到最终恢复方案。这一部分的详细说明在第 4 节展开。

## 2 邻域支援能力的等效源点计算

若将邻域网络等效为位于一级联络开关向失电区域供电的电源节点(称之为等效源点), 则在校验时将不再需要考虑邻域网络, 开关操作搜索范围也缩小为包含等效源点的失电区域, 算法效率将有效提高。为达到该等效的精确度: 被支援区域的潮流计算需足够精确以验证电压和线路容量约束, 同时对邻域网络提供的支援功率大小有足够精确的限制以杜绝容量越限。在本节等效源点计算方法中, 潮流计算的精确性由戴维南等效定理保证, 而邻域提供功率由最大支援功率进行限制。

### 2.1 等效源点的输出电压和等效阻抗

对于待恢复区域, 邻域支援线路为一“含源一端口”: 该支援线路的变压器(该线路的根节点)为一独立电压源; 端口位于联络开关处。对于这样一个含源一端口, 可以通过戴维南定理将其等效为一个

电压源和一个阻抗的串联组合, 等效后外电路中电压、电流均保持不变<sup>[18]</sup>。如图 2 所示, 含源一端口  $N_s$ (即连接失电区域的支援线路)通过联络开关与外电路(即恢复供电的部分)相连, 等效后支援线路对恢复后的原失电线路的作用可以由一个输出电压为  $u_{oc}$  的电压源和一个阻抗  $Z_{eq}$  组成的串联电路代替。称为“等效源点”, 该节点与联络开关节点之间由阻抗为  $Z_{eq}$  的等效线路相连。

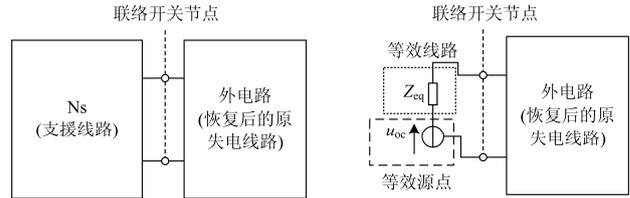


图 2 等效源点示意图: 实际电路(左)和等效后(右)

Fig. 2 Diagram of equivalent source - real (left) and equivalent (right) structure

图 2 中  $u_{oc}$  为  $N_s$  的开路电压, 即未连接失电线路时, 在正常供电线路的联络开关端口侧测得的电压; 等效阻抗  $Z_{eq}$  是将  $N_s$  中的独立电源置零后(即将正常线路所连接的变电站变压器短路), 在联络开关端口处测得的输入阻抗。因而,  $u_{oc}$  取决于正常供电线路的潮流计算结果; 而  $Z_{eq}$  则取决于电网结构以及涉及线路的负荷情况。考虑到负荷值一般远大于线路段的阻抗值, 且两者通常为并联关系, 因而可考虑仅采用线路段阻抗来计算  $Z_{eq}$ , 从而使得  $Z_{eq}$  独立于负荷值而仅取决于拓扑结构。

### 2.2 等效源点的最大支援功率

不同于变电站电源节点, 等效源点必须要考虑其供电能力的限制, 以保证转供后其内部区域无电压越限和支路容量越限等。同时, 量化等效源点的供电能力也为启发式算法中通过贪婪算法进行方案择优带来了便利。不少文献采用供电恢复路径上的支路最小容量裕度或电流裕度作为该线路所能提供的最大功率/电流。该裕度值虽然对不同路径的支援能力具有参考意义, 但未考虑转供失电负荷所增加的电流导致的线路损耗增量, 因而并不能实际作为等效源点所能提供的最大功率。

对图 2 的  $N_s$ , 失电区域可以等效为无源负荷。所求的最大支援功率即为  $N_s$  等效后的源点能向负荷侧提供的最大功率。同时认为系统中存在充足的无功补偿装置, 所以主要限制的为输出的有功功率。由于配电网不适合使用 P-Q 解耦法计算潮流, 所以无法在不受  $Q$  值影响的条件下单独对  $P$  求极值。为了固定合适的  $Q$  值, 可以采用待恢复线路的实际负

荷情况。将故障线路与等效源点相连,通过调节实际负荷值求出等效源点允许的最大出力。可以对所连负荷的  $Q$  值适量抬高,以得到更为保守的  $P$  极值限定。这样计算得到的等效源点最大支援功率,去除了转供时支援线路自身的损耗增量,是其可实际提供的支援功率。

### 3 改进邻接矩阵

作为算法潮流计算的依据,改进邻接矩阵用于记录各节点之间的连接情况和开关的开闭情况。所有开关操作都通过修正改进邻接矩阵来保存。搜索恢复方案时,程序读取改进邻接矩阵得到电网当前拓扑结构,并进行潮流校验。

改进邻接矩阵是基于图论中保存顶点之间相连关系的邻接矩阵得到的。图  $G=(V, E)$  有  $n$  个节点,则该图的邻接矩阵  $A_{n \times n}$  表示为

$$A[i][j] = \begin{cases} 1, & \text{if } (v_i, v_j) \in E(V) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $E(V)$  表示图  $G$  中的边。即如果图中有从节点  $i$  到节点  $j$  的边,则其邻接矩阵  $A$  的第  $i$  行第  $j$  列元素为 1, 否则为 0。无向图的邻接矩阵  $A$  是一个对称矩阵, 有向图的则未必。邻接矩阵的表示并不唯一。在边有权重的图中, 邻接矩阵的元素 1 可变为该条边的权重值, 这样在保存节点之间连接关系的同时也记录了该边的权重值。

对配电网进行供电恢复方案搜索时, 原辐射状的树形拓扑结构会因开关操作而频繁地改变。树常用链式结构来存储节点的连接关系, 但这一存储方式对于连接关系经常改变的图需要通过遍历来修正。相比之下, 采用邻接矩阵保存对于修改拓扑结构具有明显的优越性。由于节点之间是通过序号排列的, 因而修改某一条边可以通过节点号迅速定位。同时, 电网“边”的数据是由其所连接的两条母线唯一确定的(配电网辐射状结构确保了其唯一性), 在读入该数据时就可以开始构建邻接矩阵。

改进邻接矩阵相较于普通的无向图邻接矩阵, 其“改进”之处在于当两节点之间存在边时, 该位置的矩阵元素不再为 1, 而是该边在数据库中的索引号。在查找该边是否存在的同时, 也可以直接得到其索引号, 从而在数据库中迅速定位、获得该边的所有信息。当某条边由于某些原因断开后(如故障, 或者该处有开关需要断开等), 为了避免将元素置零导致的索引信息丢失, 将该元素置为其相反数。若将对应元素由原来的索引号置为 0 会丢失该边的索引信息, 当需要再次连通该边(如开关合上等)时必须重新搜索位置。为了便于邻接矩阵的维护且提

高算法效率, 对断开的可连边采用负的索引号表示, 这样在表示该边断开的同时不丢失索引信息。综合上述说明, 采用的改进邻接矩阵为

$$A[i][j] = \begin{cases} i, & (v_j, v_k) \in E(V) \text{ and connected} \\ 0, & (v_j, v_k) \notin E(V) \\ -i, & (v_j, v_k) \in E(V) \text{ but disconnected} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $i$  为边  $(v_j, v_k)$  在“边”数据库中的索引号(即边  $(v_j, v_k)$  位于“边”数据库的第  $i$  行)。电网表示的图也属于无向图, 所以上述的改进邻接矩阵同样具有对称性。

根据上述改进邻接矩阵中大于 0 的元素可以得到图的联通情况。如从某一棵树的根节点出发对该邻接矩阵进行遍历搜索, 可以得到该树的所有联通节点。这样就可以避免通过矩阵求幂计算可达性矩阵来判断节点的连通性<sup>[19]</sup>。同样也可以得到某一节点到其根节点的路径。在改变电网拓扑结构的过程中不断更新维护邻接矩阵, 可以有效地使电网辐射状树形结构约束得到满足, 同时也可以快速地得到子节点的从属关系和连通性等信息。

### 4 电网实时支援能力的并行计算

智能配电网的供电恢复涉及的数据总量较大, 可能的方案众多。采用并行计算模式更新电网的实时数据, 可以有效地利用计算资源、更快地得到结果, 以满足实时供电恢复对时效性的需求。

实时支援能力的并行计算具体流程如图 3 所示。将从监控系统读取的实时数据整理为一个有序集合:  $\{(一级馈线, 一级馈线支路, 与该支路相连的二级馈线)\}$ 。图中大写字母(A, B, ...)表示一级馈线; 带有角标 L 的一级馈线字母(A<sub>L</sub>, B<sub>L</sub>, ...)表示一级馈线支路, 指与二级馈线相连的一级馈线的支路(若存在多条, 选负荷最大的支路); 二级馈线由对应一级馈线的小写字母表示(a, b, ...)。对该集合中的每一组元素, 首先计算二级馈线转移一级馈线支路负荷的不同操作方案(图中  $P_{Xi}$  表示二级馈线  $x$  转移一级馈线  $X$  的支路上负荷的第  $i$  个操作方案)及对应的成本(图中  $C_{Xi}$  为  $P_{Xi}$  所需的成本)。再对经过  $P_{Xi}$  操作后的一级馈线  $X$  实行一级馈线子程序, 得到  $X$  内部可进行的各类操作及对应成本, 并同时生成对失电区域的各个等效源点。每个等效源点的最终成本为其一级馈线子程序所得成本与  $C_{Xi}$  之和。在整个过程中, 对不同线路、不同操作方案的计算都采用并行式计算, 充分利用计算资源的同时也使得算法更加高效。

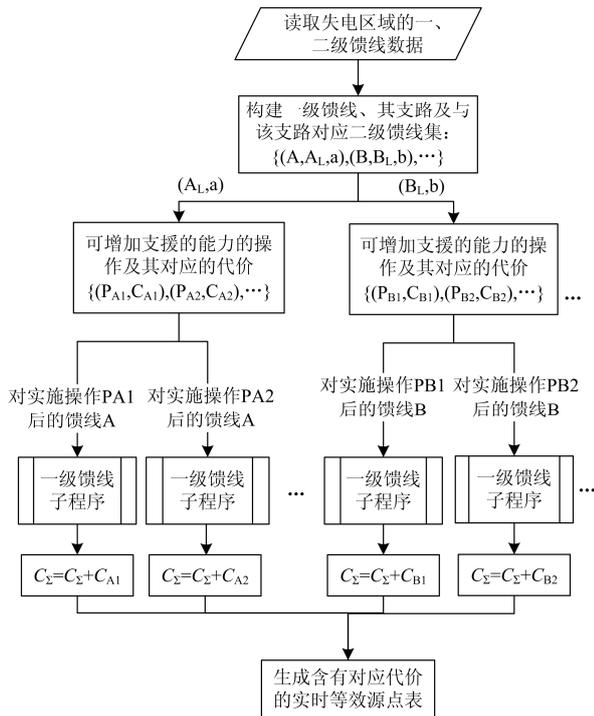


图 3 实时支援能力并行计算流程图

Fig. 3 Parallel calculation of real-time supporting ability

流程图中的一级馈线子程序展开如下：获取一级馈线实时监控数据，并行地考虑其所含的可控 DG、可支援的 SP 和 ES 以及可实施 DR 的负荷，计算各自所能提供的支援电量增量，同时计算电网对其调度所需要的成本。再将这些因素组合起来形成不同方案，并体现在不同的等效源点及对应的操作成本  $C_{\Sigma}$ 。图 4 以采用方案  $P_{Xi}$  的一级馈线 X 为例，显示子流程的并行计算方式。

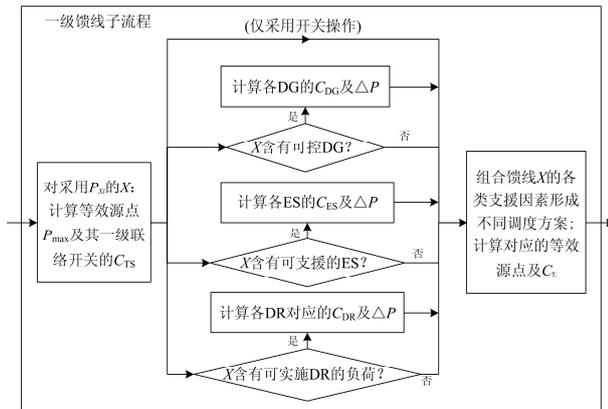


图 4 一级馈线子程序

Fig. 4 Sub-program of connecting feeder

## 5 算例

本文算例以某市配网中 5 条 10 kV 互联馈线为

基础，在其中加设 2 个可控 DG 和 1 个 ES，并设置了一处可实施 DR 的负荷，如图 5 所示。图中标出 5 处变电站节点，故障设于馈线 A 的出口断路器处 (支路 1-2)，通过改变失电时馈线 A 的负荷水平从而得到不同的失电程度。一级馈线支援情况见表 1。

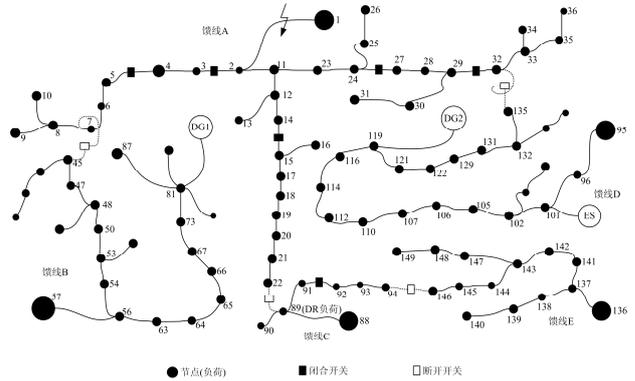


图 5 系统接线图

Fig. 5 Wiring diagram of distribution system

表 1 一级馈线所含支援因素情况

Table 1 Support factors of connecting feeders

一级馈线	所含支援因素	支援因素所在节点/联络开关
馈线 B	DG1	81
馈线 C	馈线 E(二级馈线)	94-146
	DR 负荷	89
馈线 D	ES	101
	DG2	119

简化系统接线图如图 6，把各条一级馈线作为可向馈线 A 提供支援的不同邻域，并标出馈线 A 的 5 个分段开关。可知当需要转供馈线 A 的全线负荷时，该系统理论上存在多种转供方案。

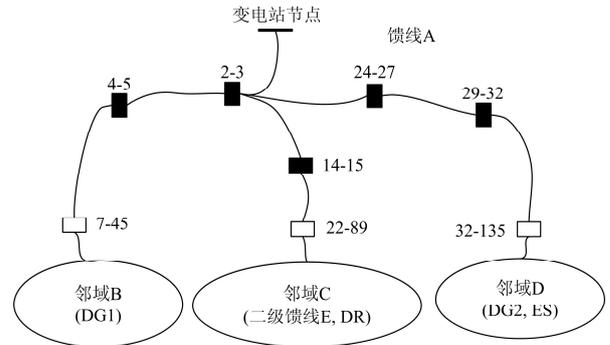


图 6 系统接线简化示意图

Fig. 6 Simplified wiring diagram of distribution system

将历史最大负荷数据定为基准负荷水平，用 100%表示。通过对所有节点的负荷值都乘以系数  $X\%$ (称为负荷系数,  $X < 100$ )来仿真不同负荷水平。若在 A 发生故障时，正常运行的一级馈线 B、C、D 的负荷系数为 93%、82%和 88%。不考虑并网运

行的 DG, 三条一级馈线的运行情况如表 2。

表 3 列出了系统中 DG、ES 以及 DR 负荷的参数。ES 投运时输出恒定的额定功率 120 kW; DR 负荷在正常运行状态下的功率大于 150 kW。

表 2 一级馈线 B、C、D 的运行情况

Table 2 Operation situation of connecting feeders B, C and D

馈线名称	B	C	D
负荷系数(X%)	93%	82%	88%
变电站有功出力/MW	3.793 5	1.597 3	4.919 6
线路总有功负荷/MW	3.753 9	1.584 8	4.684 1
线路总无功负荷/Mvar	1.094 9	0.462 2	1.366 2

表 3 系统中 DG、ES 和 DR 负荷的参数

Table 3 Parameters of DG, ES and DR load in the system

名称	额定功率/kW	最大功率/kW	最大可调节功率/kW
DG1	150	230	80
DG2	120	170	50
ES	120	—	120
DR 负荷	—	—	150

本文策略选择尽可能多恢复、总成本最小的方案。总操作成本  $f_2$  由转供过程中的各类操作成本求和构成;  $C^i$  为支援线路  $i$  上的所有操作成本, 式中各项  $N$  表示下标对应设备的操作次数。

$$f_2 = aN_{SS} + \sum_{i \in lines} C^i \quad (6)$$

$$C^i = bN_{TS}^i + (cN_{else}^i + dN_{DG}^i + eN_{ES}^i + fN_{DR}^i) \quad (7)$$

式(7)中括号内的项是在生成线路  $i$  的等效源点表时计算得到的, 当选定各条线路使用的等效源点后, 再进行供电恢复计算得到方案的  $N_{SS}$  和  $N_{TS}^i$ 。根据操作执行所需时间和调度所需经济代价, 将操作成本分为不同级别并给出不同的权重系数。算例中认为所有开关操作所需时间较短、调度代价小, 将开关操作权重系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  的数量级设为 1。DG、ES、需求响应等非开关支援因素, 通过电网协调调度、第三方实施, 因而响应时间长、调度成本高。这几类调度操作权重系数用数量级为  $10^2$  的  $d$ 、 $e$ 、 $f$  表示。因此, 在本文算例中, 当仅通过开关操作就可以实现全部转供时, 将不对非开关支援进行调度。

通过三个不同失电程度的算例进行验证。其中, 算例一的失电负荷较小, 将采用预存的离线数据解决供电恢复问题; 算例二中面对中等程度的负荷失电, 计算电网的实时支援能力, 选取总操作代价最低的方案实现供电恢复; 算例三在大量负荷失电的情况下, 充分利用配电网的各种支援因素, 尽可能多地转供失电负荷。

### 5.1 算例一: 较小程度失电

算例一在故障发生时馈线 A 处于轻载, 整条线

路的有功失电负荷为 1.230 MW。故障发生前的网络初始拓扑数据已由改进邻接矩阵预先存储好, 且从各一级馈线的离线等效源点表中选取合适的数数据(具体做法见附录)优先进行供电恢复尝试。三条一级馈线所选出的离线等效源点数据汇总如表 4。

表 4 根据各线路实际负荷所选取的离线等效源点

Table 4 Off-line equivalent sources chosen by real loads of each line

对应馈线	B	C	D
所在节点号	45	89	135
等效支路	7-45	22-89	32-135
$Z_{eq}$	0.037 + 0.076i	0.451 + 0.162i	1.472 + 2.361i
预存负荷系数	100%	90%	90%
$P_{max}/MW$	0.723 8	1.419 3	0.620 3
$u_{oc}/p.u.$	1.039 7	1.044 7	0.967 8

根据各  $P_{max}$  初步判断可以利用离线等效源点数据对馈线 A 实现全部转供, 计算后得到的开关操作数  $\leq 3$  的转供方案如表 5。其中“操作”一栏记录了改变通断状态的开关。后三列中记录了采用不同数据及形式进行方案计算所需的时间(以秒为单位): 除去结合离线数据和等效源点的本文方法外, 其中倒数第二列是采用离线负荷数据的传统算法(不运用等效源点)所用计算时间; 最后一列是传统算法根据实时负荷数据计算方案所花时间。

表 5 较小程度失电时开关操作数  $\leq 3$  的恢复方案比较

Table 5 Comparison of recovery plans (switch operation  $\leq 3$ ) of minor energy loss

方案号	操作	总操作成本 $f_2$	方案计算所用时间 $t/s$		
			本文方法	采用离线数据的传统方法	采用实时数据的传统方法
1	22-89	b	0.101 6	0.126 1	6.005
2	2-3, 7-45, 22-89	2b+a	0.238 7	0.276 5	6.355 5
3	4-5, 7-45, 22-89	2b+a	0.223 8	0.261 2	6.071
4	7-45, 14-15, 22-89	2b+a	—	—	6.378 1
5	7-45, 24-27, 32-135	2b+a	—	—	6.436 3
6	22-89, 24-27, 32-135	2b+a	0.336 5	0.424	6.508 6
7	22-89, 29-32, 32-135	2b+a	0.324 0	0.368 8	6.490 3

注: “22-89”表示需要闭合位于节点 22 和节点 89 之间的开关。

由比较结果可知, 在使用离线数据时, 本文算法与传统方法所得方案一致, 且本文利用等效源点更加高效; 相较于完全使用实时数据的供电恢复, 本文算法虽然在使用离线数据后可能会丢失部分可行解(方案 4 和 5), 但在时效性上具有绝对优势, 更适用于实时供电恢复。选取总操作成本最低的方案 1, 对电网进行供电恢复(图 7)。框出的开关编号表

示对应开关在方案中需要进行操作, 操作旁边括号内记录对应的操作成本。失电区域通过联络开关 22-89 全部由邻域 C 供电, 邻域 C 向失电区域支援 1.238 MW 和 0.364 Mvar 的有功、无功功率。由于离线数据可以满足供电恢复需求, 本算例中不再调取计算实时数据, 理论上计算方案一所需的时间即为下达供电恢复调度指令所需时间。

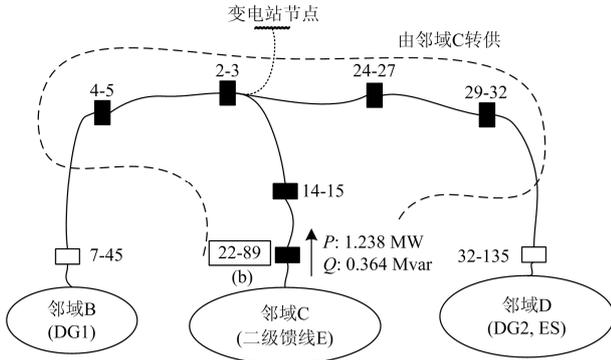


图 7 较小程度失电情况下的优选供电恢复方案示意图  
Fig. 7 Preferred restoration schema for small energy loss

虽然智能配电网中存在各类可控、不可控的源、荷, 且随着电网的运行过程会产生大量数据, 但是在遇到小规模、等级轻的失电情况时, 通过采用离线数据预存的手段可以避免对大量数据的调取, 而直接进入供电恢复策略的搜索。同时利用一级支援馈线进行供电恢复也减少了调度难度和操作成本。智能配电网的灵活高效性将得以保证。

## 5.2 算例二：中等程度失电

算例二中馈线 A 的有功失电负荷为 2.893 MW。同样先选取离线等效源点进行恢复尝试。由于馈线 B、C、D 的负荷水平不变, 因而选取的各离线数据仍如表所示。由表中各  $P_{\max}$  易知该数据无法实现完全转供, 因此算例二需要计算电网实时支援能力。

采用第 4 节介绍的实时支援能力并行计算程序对一级馈线 B、C、D 及其可控支援因素进行并行计算。表 6 中列出了在更新实时数据后, 仅采用开关操作可以得到的等效源点最大支援功率。

表 6 一级馈线实时与离线等效源点对比

Table 6 Comparison of off-line and real-time equivalent sources of connecting feeder

线路	采用实时数据后的等效源点			离线等效源点
	序号	$P_{\max}/\text{MW}$	说明	$P_{\max}/\text{MW}$
B	1	1.158 8	DG1 出力	0.723 8
	1	1.564 0	—	
C	2	2.185 5	通过馈线 E 转移部分负荷	1.419 3
	1	0.870 5	DG2 出力	0.620 3

更新实时数据后, 各等效源点的最大支援功率都有所提升。对于馈线 B、D, 由于采用实际负荷值低于预设数据, 且计及了并网 DG 的出力(DG 出力见表 7); 对于馈线 C, 1 号等效源点的支援功率提升是由于实时负荷数据的采用, 2 号等效源点的支援功率增大是由于二级馈线 E 转移了其 92、93、94 号节点的负荷(通过断开分段开关 91-92、闭合联络开关 94-146)。因而在计算这些实时等效源点时, 线路 C 的 2 号等效源点的线路操作成本  $C^i = 2c$ , 其余等效源点的  $C^i$  线路操作成本均为 0。

表 7 DG1 和 DG2 在未调度时的处理情况

Table 7 Contribution of unscheduled DG1 and DG2

	输出功率/kW	供电负荷/kW
DG1	200	199.933
DG2	150	150

根据 2.893 MW 的失电情况, 选取表中馈线 B、D 的 1 号等效源点及馈线 C 的 2 号等效源点进行恢复尝试。发现该等效源点组合可以满足失电负荷的全部转供, 并得到如表 8 所示的两个可行方案, 表中同时列出了各方案的操作成本及计算该方案所用的时间对比。其中待打开的开关为失电馈线 A 的分段开关, 待闭合的开关为与馈线 A 相连的联络开关。

表 8 算例二恢复方案(仅开关操作)、操作成本和计算时间

Table 8 Recovery plans (only switch operations) with corresponding costs and calculation time in case 2

方案号	1	2
待打开开关	2-3	2-3, 29-32
$N_{ss}$	1	2
待闭合开关	7-45, 22-89	7-45, 22-89, 35-135
$\sum N_{TS}^i$	2	3
$C^i$	$2c$	$2c$
$f_2$	$2c + 2b + a$	$2c + 3b + 2a$
本文方法计算所用时间/s	3.593 8	3.708 9
传统方法计算所用时间/s	12.548 1	12.765 2

选用总成本最小的方案 1, 图 8 为该方案的示意图。失电区域被断开的分段开关 2-3 分为两个部分, 左边部分由邻域 B 通过联络开关 7-45 转供, 右边部分通过 22-89 由邻域 C 转供。邻域 B 向失电区域支援 0.823 MW/0.241 Mvar 的有功/无功功率; 邻域 C 向失电区域支援 2.093 MW/0.620 Mvar 的有功/无功功率。在与原馈线 A 相连的联络开关处标出了有关邻域提供的支援功率大小, 并在各邻域的圈内标出了该邻域的 DG、ES 状态以及所需操作。图中也框出了需操作的开关并用括号标出了操作成本。

算例二中通过对各线路实时数据的并行计算,

可以比传统方法更快地掌握电网实际运行情况并搜索得到转供方案。面对中等程度失电，算法在并行化更新得到精确等效源点数据后，根据失电程度选取操作成本低的等效源点组合，满足供电恢复需求。

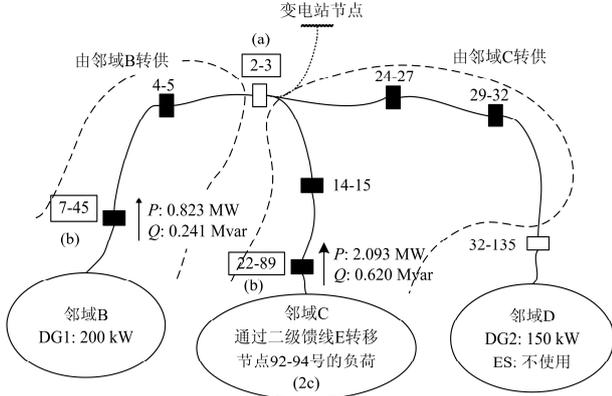


图 8 中等失电情况下的优选供电恢复策略示意图

Fig. 8 Preferred restoration schema for medium energy loss

### 5.3 算例三：严重程度失电

馈线 A 在失电时处于重载的情况，有功失电负荷为 5.540 MW。同算例二一样，该算例需要计算电网的实时支援能力。且由于失电负荷大，此算例中需要对操作成本较高的支援因素进行调度。

对一级馈线 B、C、D 及其所有可控支援因素进行并行计算，得到如表 9 所示的完整实时等效源点表。该表包含了系统中所有一级馈线可增加支援能力的操作及其成本和该操作得到的等效源点的最大支援功率。以馈线 C 为例，其 1 号等效源点通过计算实时负荷得到的(因此  $C^i = 0$ )；2 号采用实时负荷且负荷需求响应使其功率需求最小化，因此  $C^i = f$ ；3 号在 1 号的基础上通过馈线 E 转移了部

表 9 算例中的一级馈线 B、C、D 完整实时等效源点表

Table 9 Complete equivalent source table of connecting feeder B, C and D

线路号	序	$P_{max} /$ MW	操作(在实时负荷的基础上)	线路操作 成本 $C^i$
B	1	1.158 8	DG1 出力	0
	2	1.238 9	最大化 DG1 出力	$d$
	1	1.564 0	—	0
C	2	1.714 0	最小化 DR 负荷	$f$
	3	2.185 5	部分负荷转移	$2c$
	4	2.335 6	最小化 DR 负荷且部分负荷转移	$2c + f$
D	1	1.109 9	DG2 出力	0
	2	1.160 0	最大化 DG2 出力	$d$
	3	1.230 1	使用 ES	$e$
	4	1.280 3	最大化 DG2 出力且使用 ES	$d + e$

分负荷，如算例二中所述该操作的  $C^i = 2c$ ；4 号等效源点结合了 2 号和 3 号的操作，使得馈线 C 的  $P_{max}$  最大化，同时其操作成本也最高，为  $2c + f$ 。

表中 B 的 1 号、C 的 1 号和 3 号以及 D 的 1 号等效源点组成了算例二表 6 中的实时等效源点。算例二中失电负荷不太大，所以优先考虑用操作成本低的等效源点进行供电恢复。而在本算例中失电负荷过大(5.540 MW)，需要采用各支援馈线所能提供最大支援功率的等效源点，即馈线 B 的 2 号等效源点，馈线 C 和 D 的 4 号等效源点。

通过程序计算，得到对失电区域的划分如下(图 9)：断开分段开关 2-3，24-27 和 29-32，将原失电区域划分为四部分。再闭合 7-45，22-89 和 32-135 三个联络开关使其分别与三条支援线路连通。失电负荷中，开关 2-3 左侧的负荷由邻域 B 通过联络开关 7-45 转供，邻域 B 提供 1.235 MW/0.362 Mvar 的功率支援；开关 2-3 和 24-27 之间的负荷由邻域 C 通过联络开关 22-89 供电，邻域 C 所提供的功率为 2.312 MW/0.684 Mvar；开关 29-32 右侧的负荷与邻域 D 通过联络开关 32-135 相连通，邻域 D 的支援功率为 1.219 MW/0.289 Mvar。供电恢复后仍处于失电状态的为分段开关 24-27 和 29-32 之间的负荷节点(图中加粗线路段)，有功失电负荷为 0.993 MW。

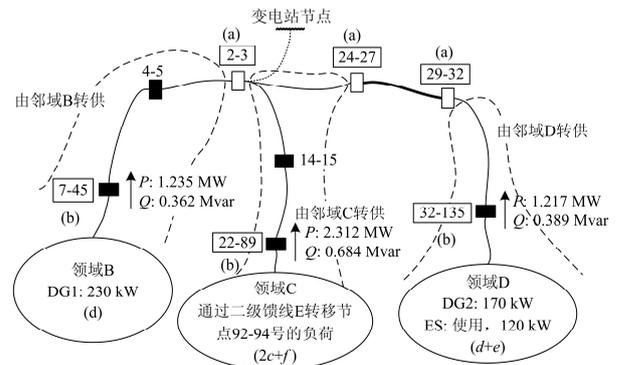


图 9 严重失电情况下的优选供电恢复方案示意图

Fig. 9 Preferred restoration schema for severe energy loss

为实现该分区转供方案，除了上述开关操作外需要对各一级馈线进行调度：调节 DG1、DG2；调用 ES；通过二级馈线 E 转移馈线 C 的部分负荷，并且 DR 负荷减少部分功率。涉及到的 DG1、DG2、ES 的出力情况和 DR 负荷的减少量见表 10。

该方案的具体操作以及操作对应成本总结如表 11，总操作成本为  $3a + 3b + 2c + 2d + e + f$ 。

该方案是以尽量恢复失电负荷为首要目的，因而把所有可提供支援的因素都纳入调度范围之内。如果馈线 A 的失电负荷并非重要负荷，或是调度成

表 10 算例三严重失电情况下 DG、ES、DR 负荷运行情况

	接入节点/所属线路	输出功率/kW	减少负荷量/kW
DG1	81/B	226.564	—
DR 负荷	89/C	—	126.366
ES	101/D	120.000	—
DG2	119/D	108.289	—

表 11 严重失电下的优选供电恢复策略所需操作及对应成本

操作	操作所属种类	成本
最大化 DG1 出力	$N_{DG}^B$	$d$
最小化 DR 负荷	$N_{DR}^C$	$f$
通过馈线 E 转移部分负荷	$N_{ese}^C$	$2c$
最大化 DG2 出力	$N_{DG}^D$	$d$
使用 ES	$N_{ES}^D$	$e$
7-45, 22-89, 32-135	$N_{TS}^B, N_{TS}^C, N_{TS}^D$	$3b$
2-3, 24-27, 29-32	$N_{SS}$	$3a$
总操作成本 $f_2$	$3a + 3b + 2c + 2d + e + f$	

本过高, 也可能舍弃部分失电负荷而不实施代价过大的操作。实际供电恢复中应当根据具体情况, 对方案的选取做相应调整。

## 6 结论

现代智能电网融入了 DG、SP、ES、DR 等因素, 为故障下的供电恢复带来了更多可能。本文提出的供电恢复策略充分考虑和发挥智能配电网的供电恢复能力, 对数据采用离线预存储与实时并行计算结合的处理方式, 并运用等效源点法和改进的邻接矩阵进一步提高算法的整体计算效率。通过三个不同失电程度的算例验证了所采用的策略在解决实时问题时具有快速、有效、充分的特点。其优点主要体现在: (1) 无论失电程度的大小, 算法均能迅速地找到安全可靠的供电恢复方案; (2) 将操作方案的经济性纳入考虑; (3) 对于含有“灵活源”的配电网, 有效地利用各类可调度支援资源。综上所述, 该策略具有较强的实用性和可操作性, 适用于智能电网的实时供电恢复分析。

同时本文也存在着一些欠缺之处: “灵活源”的模型较为简单, 忽略了其调度控制的具体实现细节; 对不同支援因素时间顺序上的相互配合没有做进一步分析。这些也将是本文未来的研究方向。

## 附录 A

### 离线等效源点数据的生成和选取

如第 1 节所述, 算法需要各一级馈线的离线等效源点数据以快速应对小规模失电的供电恢复。该数据是根据线路在失电时刻的实际负荷水平, 从其离线等效源点表中选出的。

以算例所用系统中的馈线 B 为例, 首先生成其离线等效源点表。根据其历史全年负荷水平分布情况将其负荷系数预设值设定为 30%, 40%, 60%和 100%, 即馈线 B 的离线等效源点表中有 4 个选项(见表 12)。这些等效源点位于 45 号节点处(与 A 相连的联络开关处), 等效支路 7-45 的阻抗值  $Z_{eq}$  为  $0.037 + 0.076i$ , 由于负荷系数预设值不同所以最大支援功率  $P_{max}$  和输出电压  $u_{oc}$  不同。

表 12 馈线 B 的离线等效源点表

所在节点号	等效支路	$Z_{eq}$	
45	7-45	$0.037 + 0.076i$	
序号	负荷系数(预存)	$P_{max}/MW$	$u_{oc}/p.u.$
1	30%	3.552 3	1.046 9
2	40%	3.149 6	1.045 9
3	60%	2.342 8	1.043 9
4	100%	0.723 8	1.039 7

故障发生后, 调度系统根据馈线 B 的实时负荷水平, 在第一时间选取离线等效源点数据。采用的选取标准是选择表中负荷系数预设值最小且该预设值  $\geq$  实际负荷水平的离线等效源点。仍以馈线 B 为例, 算例中其实际负荷水平为 93%, 因此选取表 12 中 4 号等效源点(负荷系数预设值为 100%)。

对其余一级馈线进行同样的处理, 得到表 4 所示数据。

## 参考文献

- [1] CHEN K, WU W, ZHANG B, et al. Robust restoration decision-making model for distribution networks based on information gap decision theory[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 587-597.
- [2] 刘莉, 陈学锋, 翟登辉. 智能配电网故障恢复的现状与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 148-154.  
LIU Li, CHEN Xuefeng, ZHAI Denghui. Status and prospect of service restoration in smart distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 148-154.
- [3] NAHMAN J, STRBAC G. A new algorithm for service restoration in large-scale urban distribution systems[J]. Electric Power Systems Research, 1994, 29(3): 181-192.

- [4] 吴文传, 张伯明. 基于待恢复树切割的配电网故障恢复实时算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 50-54.  
WU Wenchuan, ZHANG Boming. A candidate restoring tree cutting based algorithm for real-time distribution system restoration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 50-54.
- [5] DIMITRIJEVIC S, RAJAKOVIC N. Service restoration of distribution networks considering switching operation costs and actual status of the switching equipment[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(3): 1227-1232.
- [6] 冯雪平, 梁英, 郭炳庆. 基于图论的含分布式电源配电网供电恢复动态规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 24-29.  
FENG Xueping, LIANG Ying, GUO Bingqing. A dynamic programming method based on graph theory for restoration of distribution system with DGs[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 24-29.
- [7] 张钊, 封亚琴. 一种新型的配电网供电恢复重构寻优算法[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 51-55.  
ZHANG Zhao, FENG Yaqin. A novel optimization reconfiguration algorithm for power supply restoration of distribution network[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 51-55.
- [8] 赵晶晶, 杨秀, 符杨. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 45-49.  
ZHAO Jingjing, YANG Xiu, FU Yang. Smart distribution system service restoration using distributed generation islanding technique[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 45-49.
- [9] 黄弦超, 杨雨, 范闻博. 配电网多故障抢修与供电恢复联合优化模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 68-73.  
HUANG Xiachao, YANG Yu, FAN Wenbo. Combined optimization model for maintenance scheduling and service restoration of distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 68-73.
- [10] 吴建中, 余贻鑫. 一种高效的配电网供电恢复算法[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 82-86.  
WU Jianzhong, YU Yixin. An efficient algorithm for distribution network service restoration[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 82-86.
- [11] 徐玉琴, 李雪冬, 张丽. 基于多智能体免疫算法的配电网供电恢复[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2010, 37(2): 15-19.  
XU Yuqin, LI Xuedong, ZHANG Li. Application of multi-agent immune algorithm for distribution service restoration[J]. North China Electric Power University (Natural Science), 2010, 37(2): 15-19.
- [12] 赵冬梅, 郑朝明, 高曙. 配电网的供电优化恢复策略[J]. 电网技术, 2003, 27(5): 67-71.  
ZHAO Dongmei, ZHENG Zhaoming, GAO Shu. Optimal service restoration strategy of distribution network[J]. Power System Technology, 2003, 27(5): 67-71.
- [13] 张东霞, 姚良忠, 马文媛. 中外智能电网发展战略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 1-14.  
ZHAO Dongxia, YAO Liangzhong, MA Wenyuan. Development strategies of smart grid in China and abroad[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 1-14.
- [14] 王晶, 陈骏宇, 金华锋. 含分布式电源的配电网动态孤岛划分博弈模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 14-24.  
WANG Jing, CHEN Junyu, JIN Huafeng. A game model of dynamic island partition for distribution network with DGs[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 14-24.
- [15] 于文鹏, 刘东, 翁嘉明. 含分布式电源的配电网供电恢复模型及改进贪婪算法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(24): 23-30.  
YU Wenpeng, LIU Dong, WENG Jiaming. A power restoring model for distribution network containing distributed generators and improved greedy algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(24): 23-30.
- [16] 冯杰, 陈骏宇, 陈明军, 等. 基于图论的含分布式电源配电网故障恢复算法[J]. 中国电力, 2015, 48(6): 63-71.  
FENG Jie, CHEN Junyu, CHEN Mingjun, et al. Research on graph theory-based service restoration algorithm of distribution network containing distributed generation[J]. Electric Power, 2015, 48(6): 63-71.
- [17] 林霞, 时永, 李强, 等. 基于 DG 接入的配网自动化系统保护策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 137-144.  
LIN Xia, SHI Yong, LI Qiang, et al. Research on the protection strategy of distribution automation system based on DG access[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 137-144.
- [18] 邱关源. 电路[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 1999: 88-89.
- [19] 胡美玉, 胡志坚, 邓奥攀, 等. 基于元件层级和电源可达性的配电网可靠性评估混合算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 22-29.  
HU Meiyu, HU Zhijian, DENG Aopan, et al. Hybrid algorithm for reliability evaluation of distribution network based on element hierarchy and power accessibility[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 22-29.

收稿日期: 2017-05-11; 修回日期: 2017-08-07

作者简介:

茅逸斐(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网自动化. E-mail: fiomeiya@sjtu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)