

分布式发电系统故障定位新算法

唐斐, 陆于平

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 分布式电源 (Distributed Generation, DG) 接入配电网后, 配电网由单电源辐射状网络变成了分布电源供电的复杂网络, 保护的运行环境发生了深刻变化。根据分布式发电系统结构和特点, 提出一种基于分布决策的故障定位新算法, 进行网络划分形成智能电子装置 (IED) 的关联区域, 利用关联区域边界节点信息完成故障初步定位, 再根据故障关联区域的节点连接关系, 利用各区段两端节点信息精确定位故障。算法采用静态区域划分, 划分结果可动态修整, 降低了实时性要求且对 IED 信息缺失及 DG 投切造成的电网结构变化具有一定的适应性; 故障一次和二次定位原理清晰, 信息和计算量小。通过对算法的算例分析, 验证了算法的正确性。

关键词: 分布式发电系统; 故障定位; IED 关联区域; 分布决策; 区域划分

A new fault location algorithm for distributed generation system

TANG Fei, LU Yu-ping

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The connection of DG makes distribution network change from single-power radiant to a complicated one with distributed power, thus operation environment of protection changes profoundly. According to the structure and feature of distributed generation system, this paper proposes a new distributed decision-based fault location algorithm. Firstly, associated region is determined on the basis of network segmentation. Then by using the information at the boundary node of associated region, preliminary location for fault is implemented. Finally, based on the node connectivity of fault-related region, fault location with high precision is realized by the information at the two ending nodes of each section. For using static region division, which can be dynamically dressed, in this algorithm, it reduces restriction for real-time performance and has certain adaptability for scarcity of IED information and changes of power network structure resulting from switching of DG. Additionally, both first and secondary fault location are clear in principle and have features of little information and low computational complexity. Through a case analysis, the validity of this algorithm is verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50577006 and No.50977012).

Key words: distributed generation system (DGS); fault location; associated region of IED; distributed decision; region division

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0062-07

0 引言

近年来, 分布式发电以其投资省、发电方式灵活、与环境兼容等特点得到了快速发展。分布式电源 DG (Distributed Generation) 指容量较小 (几千瓦到几十兆瓦) 的发电装置, 直接与配网相连, 向负荷或电网供电。伴随 DG 接入, 配网由原来的单电源辐射型网络逐步转变成多电源的互联网络, 保护

的运行环境发生了深刻变化^[1-3]。

基于多电源区域的配电网故障定位算法虽然能够解决保护选择性^[4-5], 但是需要利用故障时的功率方向与定义的正方向相比较, 以判断故障的搜索方向, 由于馈线上一般不装设电压互感器, 所以其应用领域受到限制。

目前, 已有学者对分布式发电环境下无 PT 通道的保护方案展开了研究^[6-7], 其方案基于广域保护的集中决策模式, 由集中控制器收集全网故障信息, 形成故障信息矩阵, 由矩阵算法定位故障, 信息交换和处理量大。但就保护而言, 接受故障信息的范

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50577006, 50977012)

围并非越大越好, 主要出于两方面原因: 1.接收和处理大范围的信息不易满足保护的快速性要求; 2.故障可能只对局部范围产生影响, 而该范围的故障信息对于故障判断至关重要, 该范围以外信息则无关紧要^[8]。

本文将分布决策广域保护模式引入分布式发电系统, 针对实际的分布式发电网络模型, 阐述了有关拓扑矩阵的建立方法, 智能电子装置 (IED) 关联区域划分方式以及特殊情况下关联区域的修整。基于划分好的区域, 仅需结合区域内的电流量信息, 进行一次定位和二次定位计算, 即可确定故障区段。该算法条理清晰, 实用性强, 对于IED信息缺失和DG投切造成的网络结构变化具有很好的适应性。

1 分布式发电广域保护系统

1.1 分布式发电系统网络结构

为了最大限度地利用DG, 在故障情况下便于实现孤岛或微网运行, 本文讨论的方案中, DG由配电网各级母线接入 (如图1所示)。各母线节点 (下文简称节点) 按所连接分支数量分为多分支节点 (图1节点1), 三分支节点 (包括中间三分支节点, 如图1节点2、6以及边缘三分支节点, 如图1节点4、7) 和两分支节点 (图1节点5)。根据基尔霍夫电流定律, 故障情况下, 多分支节点和三分支节点可以判断故障方向 (具体方法下文提及), 两分支节点在没有电压量参与的情况下不易判断故障方向。

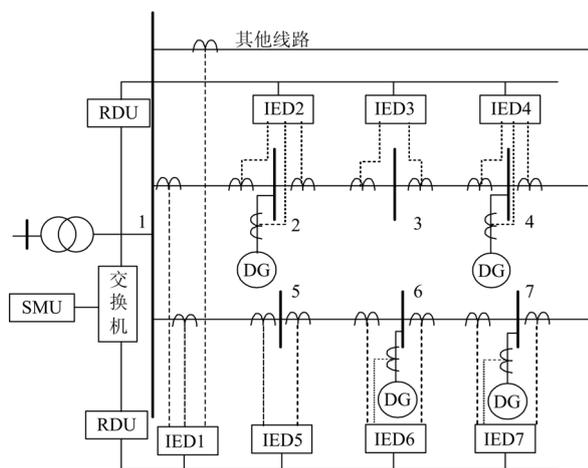


图1 分布式发电系统及其保护构架

Fig.1 DGS and framework of relay

说明一下, 本文所指故障均为单一线路故障, 母线故障和DG故障由相应的母线保护和DG分支快速保护切除, 不在考虑之列。

1.2 分布式发电广域保护系统结构形式

目前, 广域保护系统主要采用两种结构形式: 集中决策式和分布决策式。集中决策结构由集中控制器和分散安装的IED组成, 利用集中控制器收集各IED的信息, 综合判断, 完成故障定位。而在分布决策结构中, 不设置集中控制器, 保护工作由分散安装的IED完成。IED不仅负责安装点信息的采集、运算和传输, 还要完成故障的定位和判断^[9]。

鉴于集中决策模式对集中控制器和通信系统的依赖较高, 本文研究的分布式发电广域保护系统采用分布决策模式, 取消集中控制器, 仅保留IED与变电站主控装置 (SMU) 的通信接口, 用以上传信息, 更新任务及数据。IED安装于配网各级母线处, 采集母线各分支电流, 计算比较, 完成保护任务。具体结构如图1所示。

2 IED关联区域划分

分布决策式广域保护系统中的IED, 理论上可以获得系统任意测量点的信息。但实际应用中, 盲目地大范围交换信息无疑会增加通信系统负担, 降低通信系统的可靠性, 对于保护系统也无意义^[9]。要使各IED快速、可靠地工作, 必须规定IED的信息交换范围, 通过故障时一定区域内的IED信息交换定位故障。本节将对IED关联区域 (下文简称关联区域) 的划分进行研究。

2.1 网络拓扑描述

分析一个配电网, 首先要根据相关网络数据建立各节点间的拓扑关系。本文规定从系统电源往线路末端的方向为正方向, 系统电源侧为上游, 线路末端为下游。以母线为节点, 支路为边形成 $m \times m$ 矩阵 D 描述网络结构 (规定同一支路下游节点编号大于上游节点, 以确立唯一的遍历方向, 避免关联区域的重复划分):

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mm} \end{bmatrix}$$

其中: $d_{ij}=1$ ($i \neq j$) 对应节点 i, j 之间存在支路连接; $d_{ii}=1$ 代表节点 i 为多分支或三分支节点; 其余矩阵元素为零。

由矩阵元素定义可知, 矩阵 D 为对称阵, 故只需保留对角线一侧的元素, 另一侧元素可清零, 以减少数据的存储和计算量。

图2为实际的分布式发电系统, 以图2所示系统为例形成网络描述矩阵, 并清零对角线下侧元素 (未

标出元素值即为零):

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ & & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & 1 & 1 & 0 \\ & & & & & & & & & & 0 & 1 \\ & & & & & & & & & & & 0 \end{bmatrix}$$

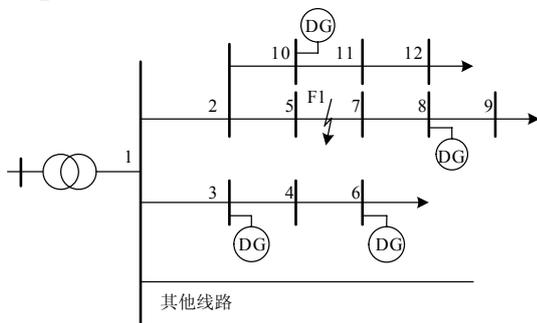


图2 实际的分布式发电系统网络结构

Fig.2 Practical structure of DGS

2.2 关联区域划分方法

网络描述矩阵仅指明了节点类型及其相互关系，而关联区域划分需要遍历网络节点，搜索形成以区域为单位的节点集（IED集）以及节点的链接关系，达到划分后的区域在故障时应能够快速、独立地判断区域内部是否发生故障的目的。由此给出两条划分原则：

1) 关联区域边界节点必须可以判断故障方向。

2) 关联区域应尽可能小，以缩小IED的信息交换范围，减小网络通信负担。

根据原则1,关联区域的边界节点必须是多分支或三分支节点。根据原则2,正常情况下,关联区域应是两个多分支或三分支节点确定的支路所包含的节点集或是边缘三分支节点下游支路所包含的节点集。具体划分流程如下：

(1) 形成 $m \times m$ 的网络描述矩阵 D ，并令初始 $i = 1$ 。执行步骤 (2)。

(2) 考察 D_{ii} ，若 $D_{ii} = 1$ ，发起搜索，执行步骤 (3)；若 $D_{ii} = 0$ ，则转至步骤 (6)。

(3) 若 $\forall D_{ij} = 0$ ，由网络结构可知发起搜索节点为边缘三分支节点，搜索完成，记录节点搜索路

径，转至步骤 (6)；若 $\exists D_{ij} = 1$ ，则以 D_{ij} 为考察对象，执行步骤 (4)。

(4) 对于考察的非对角线元素 D_{XY} ，若 $D_{YY} = 1$ ，搜索完成，记录节点搜索路径，转至步骤 (6)；若 $D_{YY} = 0$ ，则以 D_{YY} 为考察对象，执行步骤 (5)。

(5)对于考察的对角线元素 D_{YY} ，若 $\forall D_{YZ} = 0$ ，由网络结构可知发起搜索节点为边缘三分支节点，搜索完成，记录节点搜索路径，转至步骤 (6)；若 $\exists D_{YZ} = 1$ ，以 D_{YZ} 为考察对象，执行步骤 (4)。

(6) 判断 i 是否等于 m ，若 $i = m$ ，结束划分程序；若 $i \neq m$ ，则令 $i = i + 1$ ，转至步骤 (2)。

按上述流程对图2所示网络进行关联区域划分，划分结果如表1所示(★标注节点表示边缘三分支节点)。

表1 关联区域划分结果

Tab.1 Division result of associated region

区域编号	上游区域编号	下游区域编号	区域首节点	区域末节点	IED关联区域
1	无	3, 4	1	2	1-2
2	无	5	1	3	1-3
3	1	7	2	8	2-5-7-8
4	1	8	2	10	2-10
5	2	6	3	6	3-4-6
6	5	无	★6	6	6
7	3	无	★8	9	8-9
8	4	无	★10	12	10-11-12

2.3 特殊情况的关联区域修整

分布式发电系统特殊情况包括电网结构调整，继电保护的N-1状况等等。本文仅考虑对关联区域划分结果造成影响的两种情况：DG投切导致的电网结构变化和IED信息缺失。针对这两种情况，提出关联区域的修整方法，方法仅需修整相关的关联区域，不必对整个电网重新划分。

2.3.1 DG投切情况下关联区域的修整

由1.1所述分布式发电系统网络结构特点可知，DG投切会造成节点所连接分支数发生变化，从而可能改变节点性质：节点由可判断故障方向变为不可判断（DG切除）或不可判断故障方向变为可判断（DG投入）。针对这一情况，给出关联区域的修整方法：若节点DG切除，且分支数<3，将以此节点为首节点的区域合并至以此节点为末节点的区域；若节点投入DG，则以此节点分别作为区域末节点和区域首节点将原节点所在区域一分为二。

鉴于DG投切的随机性,对DG投切造成的关联区域修整结果进行讨论:根据上述修整方法,DG投入导致关联区域缩小,即缩小了通信范围,减小网络负担;而DG切除会扩大关联区域,但由2.2节的关联区域划分原则,极端情况下(即某条馈线DG大范围切除时),关联区域修整的最大范围也仅为原配电网络的多分支节点或三支节点的下游区域。如图2节点3和6所接DG全部切除时,关联区域即为1-3-4-6。而此时区域各段只要按三段式电流保护助增的情况整定保护启动电流就可以保证有选择性地动作^[1]。

2.3.2 IED信息缺失情况下关联区域的修整

根据标题2.2所述原则1,关联区域的边界节点必须可以判断故障方向,由此判断故障是否发生在本区域。此判断是以区域为单位,则可判断故障方向的IED信息(即关联区域边界节点的IED信息)至关重要,而非关联区域边界节点的IED信息缺失并不影响区域故障判断。针对这一特点,给出关联区域边界节点信息缺失时的修整方法:将信息缺失节点为首节点的区域合并至以此节点为末节点的区域。

图3为特殊情况下关联区域修整示例,虚线包围区域即为关联区域。

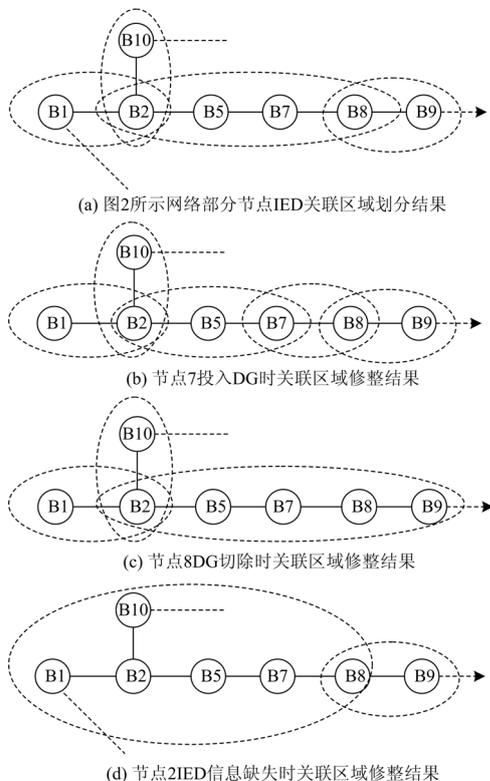


图3 特殊情况下的关联区域修整

Fig.3 Dressing of associated region in special conditions

3 故障定位的实现

关联区域的划分规定了各 IED 的信息交换范围,但实现故障定位还需要借助一定的判据及方法。本文采用先以关联区域为单位进行故障一次定位,再根据故障区域的节点连接关系进行二次定位的判断方法。其指导思想为:1) 电网预先划分为各关联区域,IED 根据划分规则属于不同的关联区域;2) 同一 IED 可能属于多个关联区域,在不同的区域内独立判断;3) 各 IED 列出其与所在关联区域内其他 IED 的连接关系表,同属一个关联区域的 IED 相互通信;4) 故障时,各 IED 根据其他 IED 传来信息对照表中关系计算,比较,确定故障区段。本节根据定位方法和指导思想,确定交换信息的内容、形式和故障判断的方法。

3.1 以关联区域为单位的故障一次定位

3.1.1 故障方向判断及故障电流判据

线路发生故障时,多分支和三支节点可以判断故障方向,其原理如图4所示。

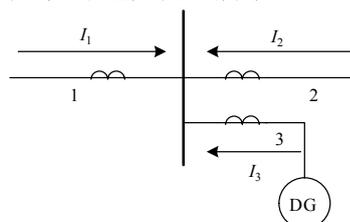


图4 故障状态下的三支节点图

Fig.4 Three-branch node under fault condition

图4所示的三支节点为例,故障情况下,根据 KCL 定律有 $I_1 + I_2 + I_3 = 0$, 即流入母线的故障电流之和等于流出故障电流。若故障发生在支路1, I_1 流出节点, I_2 和 I_3 为流入节点,移项并取幅值有 $|I_1| = |I_2 + I_3|$ 。

对于接入 DG 的配电网来说,一般 DG 与系统的功角差很小;而且由于系统和线路的阻抗以及发电机的暂态电抗都是感性的,阻抗角相差也很小。由此可以依照平行四边形法则做出向量图,如图5所示。

$$\text{由图5可知 } |I_1| > |I_2|。$$

若故障发生在支路2, I_2 流出节点, I_1 和 I_3 流入节点,移项并取幅值有 $|I_2| = |I_1 + I_3|$ 。与之前分析

类似得到 $\left| \dot{I}_2 \right| > \left| \dot{I}_1 \right|$ 。

即发生故障时，可以通过多分支或三分支节点各条支路流过的电流幅值大小来判断故障发生在哪条支路，从而间接判断出故障电流的方向。

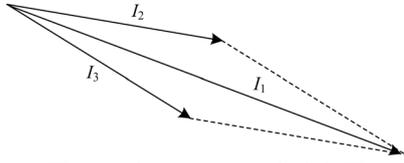


图5 三分支节点故障电流向图

Fig.5 Fault current vector graphic of three-branch node

3.1.2 故障一次定位的数学表述

设 $F(A)$ 为关联区域状态函数， $F(A_0)$ ， $F(A_e)$ 分别表示区域首末节点信息。定义：

$$F(A_0) = \begin{cases} 1 & \text{感受到故障电流且方向指向区域末节点} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$F(A_e) = \begin{cases} -1 & \text{感受到故障电流且方向指向区域首节点} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

若区域首节点为边缘三分支节点，节点下游支路感受到故障电流则可认为故障发生在下游，否则认为故障发生在上游支路，即 $F(A) = F(A_0) = 1$ 即可断定该区域发生故障，需要进行二次定位。 $F(A) = F(A_0) = 0$ 则区域内无故障。

若区域首节点非边缘三分支节点，定义故障判据为：

$$F(A) = F(A_0) \cdot F(A_e) = \begin{cases} -1 & \text{故障区域} \\ 0 & \text{非故障区域} \end{cases}$$

考虑某 IED 信息缺失修正后的关联区域首节点个数为 1，但区域末节点个数可能不唯一，关联区域为故障区域的充分条件为： $F(A_0) = 1$ 且 $F(A_0) = -F(A_{ei})$ ， $i = \{1, 2, \dots, n\}$ ， n 为区域末节点个数。

综合正常情况和 IED 信息缺失情况，修整故障判据：

$$F(A) = \left| F(A_0) \cdot \prod_{i=1}^n F(A_{ei}) \right| = \begin{cases} 1 & \text{故障区域} \\ 0 & \text{非故障区域} \end{cases}$$

3.1.3 算例分析

以图 2 所示的分布式发电系统为例，系统已在正常情况下完成关联区域划分，结果如表 1 所示。当 F1 点发生故障时，假设各 IED 均感受到故障电流，各关联区域判断结果如表 2 所示。

由判断结果可知，关联区域 3 为故障区域，由于区域节点数 > 2 即区域包含区段数不唯一，需要

进行二次定位。

表 2 图 2 关联区域判断结果

Tab.2 Judgment of associated region of fig.2

区域编号	$F(A_0)$	$F(A_e)$	$F(A)$
1	1	0	0
2	0	-1	0
3	1	-1	1
4	0	-1	0
5	0	-1	0
★6	0	无	0
★7	0	无	0
★8	0	无	0

注：★区域首节点为边缘三分支节点。

3.2 二次定位确定故障区段

一次定位确定出故障区域后，由于区域中可能包含无法判断故障方向的两分支节点，需要利用电流相位比较判据定位故障区段。

3.2.1 电流相位比较判据原理

故障电流流经非故障线段时同负荷电流一样具有穿越性，而故障电流流经故障段时则不同。

如图 6 所示，当 F1 处发生三相故障时，故障电流（包含负荷电流）中只有正序分量，非故障段 BC 两端互感器测得故障电流 I_{bcf1} ， I_{cbf1} 的相位同时超前或滞后负荷电流一个相位角 α ；而故障区段 AB 两端测得故障电流 I_{abf1} ， I_{baf1} 的相位一个滞后负荷电流 α 角，一个超前负荷电流 β ，且 $\alpha + \beta \approx \pi$ 。若负荷电流方向改变（图 7 中虚线相量表示），上述相位关系仍然成立。具体相位关系如图 7 所示。

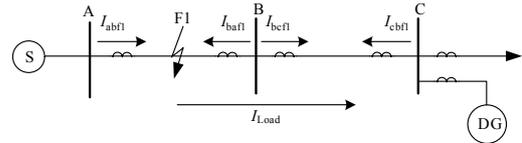


图6 故障状态下的两分支节点

Fig.6 Two-branch node under fault condition

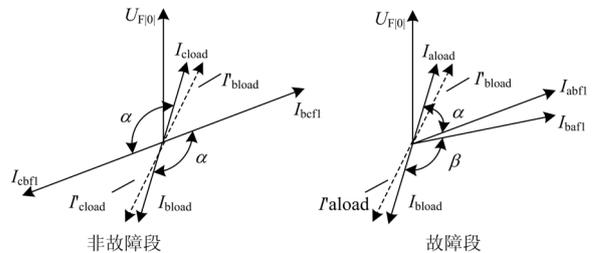


图 7 故障状态下电流正序分量与负荷电流相位关系

Fig.7 Phase relationship between the fault current positive sequence component and load current

当 F1 处发生两相故障时, 故障电流中既有正序分量也有负序分量, 两者互相独立。故障电流正序分量中有负荷电流分量, 负荷电流与故障电流相比, 显得很小, 对正序分量的相位影响很小。因此, 可以得到和三相故障时类似的结论。

综合两相短路和三相短路的情况可以看出: 非故障段两端的故障电流正序分量始终同时超前或者同时滞后于负荷电流; 而故障段一端的故障电流正序分量超前于负荷电流, 另一端的故障电流正序分量滞后于负荷电流。

3.2.2 故障二次定位的数学表述及算例分析

设 $G(i, j)$ 为区段状态函数, $G(l_i)$, $G(l_j)$ 分别表示区段首末节点信息。定义:

$$G(i, G(j)) = \begin{cases} 1 & \text{分支电流正序分量超前负荷电流} \\ -1 & \text{分支电流正序分量滞后负荷电流} \\ 0 & \text{分支无负荷电流} \end{cases}$$

$$G(i, j) = G(i) \cdot G(j) = \begin{cases} -1 & \text{故障区段} \\ 1 & \text{非故障区段} \\ 0 & \text{无负荷电流区段} \end{cases} \quad (1)$$

根据式 (1) 对故障区域各区段进行判别, 若 $G(i, j) = -1$ 则 $i-j$ 为故障区段, 断开线路首末开关, 若故障区域内无 $G(i, j) = -1$, 则认为 $G(i, j) = 0$ 即无负荷电流区段发生故障。

以式 (1) 对算例 3.1.3 确定的故障区域内各区段进行二次判断, 精确定位出故障区段, 结果如表 3 所示。

表 3 精确定位结果

区段	$G(i, j)$	结论
2-5	1	故障位于区段 5-7
5-7	-1	
7-8	1	

4 算法特点及工作流程

本文提出的故障定位算法特点:

a) 采用分布决策的广域保护模式, 通过离线划分关联区域规定各 IED 的通信范围, 减小了保护对于通信网络和集中控制器的依赖。

b) 通过一次和二次定位, 分别确定故障区域和故障区段, 思路清晰, 可靠性强。

c) 算法不依赖电压量, IED 可在现有的馈线终端单元 (FTU) 硬件基础上通过软件升级实现, 便于与现有的配网自动化 (DA) 系统配合。

故障定位算法的流程如图 8 所示。

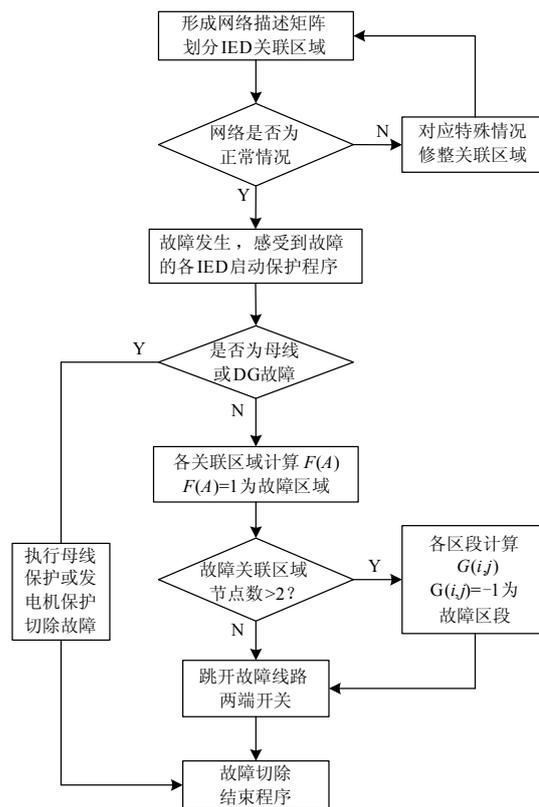


图 8 故障定位算法流程

Fig.8 Flowchart for the fault location algorithm

5 结语

目前, 对分布式发电保护系统的研究尚处于探索阶段。本文根据分布式发电系统的结构和特点, 提出了一种基于分布决策模式的故障定位新算法。该算法通过智能电子装置 (IED) 关联区域内的 IED 交换信息, 结合区域状态函数 $F(A)$ 和区段状态函数 $G(i, j)$ 的简单计算, 即可定位故障。文中详细阐述了 IED 关联区域的静态划分及动态修整方法, 定义了 $F(A)$ 、 $G(i, j)$ 的计算规则, 并给出了算法流程。该算法无需借助电压量, 避免保护汇聚大量信息, 对于分布式发电条件下的配电网信息量大、结构灵活多变等特点具有很好的适应性。通过对该算法的算例分析, 证明了算法的正确性。

参考文献

- [1] De Britto T M, Morais D R, Marin M A. Distributed generation impacts on the coordination of protection systems in distribution networks[C]. //IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition. Latin(America): 2004.
- [2] Girgis A, Brahma S. Effect of distributed generation on protective device coordination in distribution system[C]. //IEEE Large Engineering Systems Conference. Halifax:

2001.

[3] 刘杨华, 吴政球, 等. 分布式发电及其并网技术综述[J]. 电网技术, 2008, 32 (15): 71-76.
LIU Yang-hua, WU Zheng-qiu, et al. A survey on distributed generation and its networking technology[J]. Power System Technology, 2008, 32 (15): 71-76.

[4] 刘健, 倪建立, 杜宇. 配电网故障区段判断和隔离的统一矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (1): 31-33.
LIU Jian, NI Jian-li, DU Yu. A unified matrix algorithm for fault section detection and isolation in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (1): 31-33.

[5] 王飞, 孙莹. 配电网故障定位的改进矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (24): 45-47.
WANG Fei, SUN Ying. An improved matrix algorithm for fault location in distribution network of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (24): 45-47.

[6] 林霞, 陆于平, 王联合. 分布式发电条件下的新型电流保护方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (20): 50-56.
LIN Xia, LU Yu-ping, WANG Lian-he. New current protection scheme considering distributed generation impact[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (20): 50-56.

[7] 林霞, 陆于平, 王联合. 分布式发电条件下的多电源故障区域定位新方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23 (11): 1-8.
LIN Xia, LU Yu-ping, WANG Lian-he. New fault region location scheme in distribution system with DGs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23 (11): 1-8.

[8] 丛伟, 潘贞存, 赵建国, 等. 基于电流差动原理的广域继电保护系统[J]. 电网技术, 2006, 30 (5): 91-95.
CONG Wei, PAN Zhen-cun, ZHAO Jian-guo, et al. A wide area protective relaying system based on current differential protection principle[J]. Power System Technology, 2006, 30 (5): 91-95.

[9] 丛伟, 潘贞存, 赵建国. 基于纵联比较原理的广域继电保护算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (21): 8-14.
CONG Wei, PAN Zhen-cun, ZHAO Jian-guo. A wide-area relaying protection algorithm based on longitudinal comparison principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (21): 8-14.

[10] 翁蓝天, 刘开培, 刘晓莉, 等. 复杂配电网故障定位的链表法[J]. 电工技术学报, 2009, 24 (5): 190-196.
WENG Lan-tian, LIU Kai-pei, LIU Xiao-li, et al. Chain table algorithm for fault Location of complicated distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24 (5): 190-196.

[11] 张艳霞, 代凤仙. 含分布式电源配电网的馈线保护新方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (12): 71-74.
ZHANG Yan-xia, DAI Feng-xian. New schemes of feeder protection for distribution networks including distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (12): 71-74.

收稿日期: 2009-11-07; 修回日期: 2009-12-15

作者简介:

唐 斐 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式发电系统保护及控制; E-mail: tangfei316@163.com

陆于平 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护及分布式发电系统保护及控制。

(上接第 61 页 continued from page 61)

[4] 王守相, 王成山. 配电系统节点优化编号方案比较[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 54-58.
WANG Shou-xiang, WANG Cheng-shan. Comparative study of optimal node indexing schemes for distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 54-58.

[5] Haque M H. A general load flow method for distribution systems[J]. Electrical Power System Research, 2000, 54(1): 47-54.

[6] 吴文传, 张伯明. 配网潮流回路分析法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 67-71.
WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming. Study on loop analysis theorem of distribution system power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 67-71.

[7] Luo G X, Semlyen A. Efficient load flow for large weakly meshed networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(4): 1309-1316.

[8] Haque M H. Efficient load flow method for distribution

systems with radial or mesh configuration[J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(1):33-38.

[9] Hsiao Dong Chiang, Rene Jean Jumeau. Optimal network reconfiguration in distribution systems: part 2: solution algorithms and numerical results[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(3):1568-1574.

收稿日期: 2009-10-10

作者简介:

汪宇霆 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事配电网潮流分析及经济运行研究;

张 焰 (1958-), 女, 教授, 博士, 主要从事电力系统规划及电力系统可靠性等方面的研究工作; E-mail: zhang_yan@sytu.edu.cn

张益波 (1980-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统分析研究工作。