

DOI: 10.7667/PSPC171518

## 考虑分布式能源的配电网断线定位方法

王玥婷, 梁中会, 牟欣玮, 王邦惠, 鲍忠伟, 丛志鹏, 张颖, 史振宇

(国网山东省电力公司烟台供电公司, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 分布式能源接入配电网后, 传统的配电网断线定位方法面临着新的挑战。通过建立含分布式能源的配电网模型, 分析发现含分布式能源的配电网, 断线支路的不同节点会同时出现正功率和负功率(或零功率)特征, 而非断线支路则为单一的功率方向, 进而提出基于功率方向的配电网断线定位方法。介绍了配电网断线定位的功率方向原理, 并基于MAS技术设计了具体的流程。实例分析结果证明了该方法的有效性。

**关键词:** 配电网; 微电网; 断线; 定位; 功率方向

### Method of locating disconnection of distribution network considering distributed energy

WANG Yueting, LIANG Zhonghui, MU Xinwei, WANG Banghui, BAO Zhongwei,  
CONG Zhipeng, ZHANG Ying, SHI Zhenyu

(Yantai Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Yantai 264001, China)

**Abstract:** After the distributed energy access to the distribution network, the traditional distribution network disconnection and positioning method is facing new challenges. The distribution network model with distributed energy is established. And it is found that distributed nodes with disconnected branch have different positive and negative power (or zero power) characteristics, while the non-disconnection branch shares single power direction. In this paper, the power distribution method based on power direction is proposed. The power direction principle of the disconnection of the distribution network is introduced, and the specific process is designed based on MAS technology. The results of the example analysis show the effectiveness of the method.

This work is supported by Science and Technology Protect of State Grid Shandong Electric Power Company (No. 520605170014).

**Key words:** distribution network; micro-grid; disconnection; positioning; power direction

## 0 引言

配电网故障除了常见的短路故障外, 随着配电网规模日益庞大以及分布式能源高渗透接入微电网等更复杂的运行方式, 断线故障也成为了影响配电网正常运行的重要影响因素, 快速、便捷地发现并准确地定位配电网断路故障, 对于确保配电网高可靠运行具有重要意义<sup>[1]</sup>。

传统的配电网断线故障定位主要依赖于人工巡线, 通过对配电网线路进行分段拉合的方式来发现配电网断线区域, 这存在着工作量大、难以及时定位故障等问题<sup>[2]</sup>。当配电网现场线路情况复杂、短路点隐蔽时, 准确、实时地进行配电网断线定位尤

为困难, 严重影响配电网的供电可靠性。

配电网自动化作为智能电网建设的核心环节, 近年来得到了较为迅速地发展, 多地配电网陆续投运了FTU、DTU和负荷测录仪等各种配电网智能电子设备, 为配电网断线定位技术的发展提供了自动化基础, 陆续开展了基于各种配电网智能电子设备的配电网断线方法研究<sup>[3]</sup>。

一种经典的配电网断线定位方法采用基于暂态量的故障特征。文献[4]针对断线故障一直缺乏有效的定位或测距手段, 利用电力线路开断时行波的产生机理, 利用行波原理测量断线故障距离的方法。文献[5]提出了基于电流暂态分量的变化特性的配电网单相断线故障选线和定位保护方法。

而基于电网拓扑结构的序分量方法也广泛地应用于断线分析中。如文献[6]根据配电网发生单相断

线故障时负序电流的一般变化规律，提出了基于能量测度的断线故障选线方法。文献[7]采用梯形模糊数估计配变负荷变化情况，建立了单相线路网络模型，通过计算出某节点流出电流为零的可能性，从而确定此节点与其后节点之间发生了断线故障。文献[8]针对 10 kV 架空线辐射状的拓扑特点，采用故障分量法分析了单相断线故障的负序电压分布，提出了基于负序电压幅值的单相断线判据。

基于暂态量的断线识别方法需要利用故障后电气量的暂态量，这需要高速的数据采集装置支撑而目前的配用电信息系统一般不采集电气量暂态信息，而且在配电网中配置大量的高速采集系统花费昂贵，不容易在配电网现场中广泛应用。

基于电网拓扑结构的序分量方法，容易受到配电网系统结构复杂和运行方式多变的影响，而且当配电网规模较大时，不容易进行快速地拓扑结构计算。

另外，当分布式能源以微电网的形式接入配电网，微电网与配电网之间可以实现电能的双向流动，改变了配电网的拓扑结构，增加了配电网断线识别的难度，当前配电网断线研究大多都基于电源接入到馈线逐级发展的辐射式结构，并没有考虑微电网的影响。

以序分量为例，加入分布式能源后，配电网的序分量结构将发生变化。如文献[9]认为 DG 仅输出正序短路电流，而没有电压负序分量引起的功率倍频波动。但文献[10]认为不脱网运行时，DG 控制可能引起电流附加负序分量，需要考虑其在不对称故障时的负序电流控制要求，该文结合故障中 DG 序电流控制和无功功率支撑，建立 DG 短路计算序分量电流源模型。DG 的不同模型，会直接导致序分量的分析结果不一致，这对基于负序分量的断线定位方法产生了挑战。

本文将考虑分布式能源以微电网形式接入配电网后对配电网断线定位的影响，由于配电网功率在当前配电网运行中较容易获得，本文将研究基于功率方向的配电网断线定位方法。

### 1 分布式能源模型

当前运行的配电网大多采用开环运行的辐射式结构，从第一级配电网母线开始，电能从母线流向各个馈线支路，并由该级的馈线连接到下一级母线，下一级母线也连接到多个馈线回路中。以此类推，电能通过配电网各级母线和馈线支路，到达最终用户。

第一级配电网母线抽象为电源，各级馈线建模

为对应的阻抗，如图 1 所示的单相配电网系统等效电路模型。电源从第一级母线出发，经过由各级馈线等效阻抗组成的串、并联电路后，电压逐级下降。

当某条馈线支路发生断线时，配电网等效电路图中则缺少对应的阻抗支路，此时配电网等效电路发生变化，各个支路对应的电压和流经各个支路的电流也对应变化。根据支路断线导致的等效电路以及对应的电气量变化，为配电网断线定位提供了原理基础<sup>[11]</sup>。

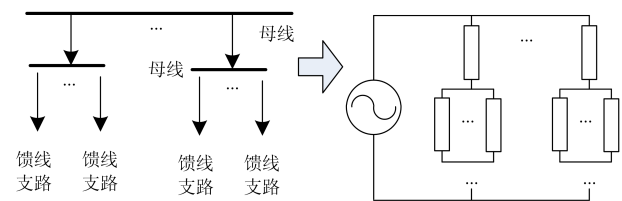


图 1 配电网等效电路图

Fig. 1 Distribution network equivalent circuit diagram

当分布式能源接入配电网，配电网结构更加复杂，如图 2 所示，图中的箭头表示潮流的流动方向。当前分布式能源通常采用全控的可关断电力电子器件，以微电网的形式接入配电网。微电网通过采取定压和定频率控制方式(即 VF 控制)，或采用定功率控制(即 PQ 控制)方式，灵活地控制微电网的电压稳定和功率平衡<sup>[12]</sup>。

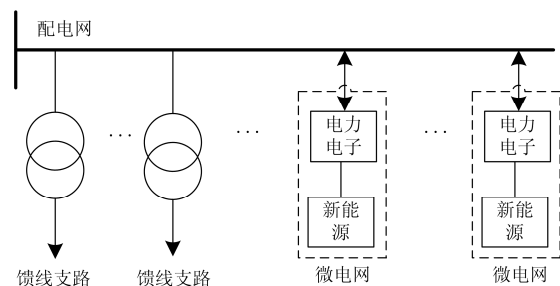


图 2 含分布式能源的配电网示意图

Fig. 2 Schematic diagram of distribution network with distributed energy

分布式能源接入配电网后，传统的配电网等效电路应用将面临新的挑战，主要表现在：1) 传统配电网馈线支路可以采用阻抗电路模拟，而以电力电子元件为基础的分布式能源支路，难以简单地等效为一定阻值的阻抗回路，也难以用负序电压等序分量模型简单分析单相断线情况。2) 当前配电网多以开环形式运行，有功和无功的流动方向固定，而分布式能源可以通过电力电子器件调节所属的微电网有功和无功，可以与配电网进行潮流的双向流动，基于配电网单电源结构的断线分析方法并不适用于分布式能源的情况。3) 分布式能源通过功率和电压

调节, 影响所接入的配电网系统, 使得配电网的潮流分布更加复杂。

分布式能源系统为了实现对分布式能源的有效调控和接入配电网时的同步并网需要, 几乎都会配备相应的自动化系统以采集电流、电压、有功和无功等关键电气信息。同时随着精细化智能用电逐步推进, 为了更好追踪用户的用电习惯和提供良好的用电服务体验, 电网公司也投放了很多配电网负荷监测系统, 通过通信网络向调度中心等运行部门传送所采集的配电网主要节点的功率等信息。

由于功率采集在当前配电网实际运行中较容易实现, 当含分布式能源的配电网发送断线故障时, 配电网的功率会发生相应的变化, 结合含分布式能源的配电网的结构特点, 将功率变化特性应用于配电网断线情况, 有望寻找便捷、有效的配电网断线定位方法。

## 2 基于功率方向的断线定位

传统配电网的单电源辐射性结构下, 配电网潮流具有固定的流动方向。配电网包含分布式微电网后, 微电网可以采用孤岛运行或并网运行两种模式。配电网与所接入的各个微电网间, 存在提供电能、消纳电能或孤岛下无电能交换等多种能量交换方式<sup>[13]</sup>。

配电网由原先的单电源变成了多电源, 电源的分布取决于微电网的接入地点, 具有分散性特点。传统微电网的潮流分布和断线情况下的故障特征, 由于微电网的影响会发生改变。加上微电网新能源发电通常具有间歇性和随机性, 使得配电网的潮流变化更加具有不确定性。

为了更好分析含分布式能源的配电网功率分布情况, 首先定义功率方向, 以配电网母线流向接入该母线的馈线支路方向为功率正方向。尽管微电网在正常运行过程中, 多采用分布式能源向配电网输送电能为主, 为了与馈线支路的功率方向定义一致, 本文也采用配电网母线流向接入该母线的微电网方向为功率正方向。

理论上, 分布式能源支路由于电力电子元件故障或该支路断线等原因而与配电网断裂时, 也可以归纳为配电网断线的一种特殊情况, 但因为与微电网孤岛运行而主动与配电网断开的情况具有相似性, 本文将重点考虑馈线支路断线情况。

### 2.1 功率方向分布

考虑配电网普遍采用开环运行模式, 建立如图 3 所示的辐射性配电网架构, 图中圆圈表征接入配电网的分布式能源微电网, 同一母线可以连接多个

分布式能源, 本文只罗列其中一个分布式能源支路。

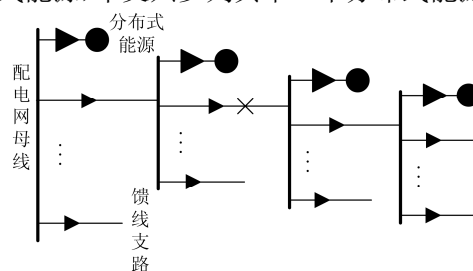


图 3 配电网功率方向分布

Fig. 3 Power direction in distribution network

配电网正常运行时, 功率由上一级母线经馈线流向下一级母线, 在馈线支路上表现为正功率方向。配电网母线接入分布式能源后, 分布式能源主要向配电网输送电能, 根据前文定义的功率方向, 此时分布式能源为负功率<sup>[14]</sup>。

当分布式能源所在的微电网状态发生变化时, 比如, 分布式能源不足以支撑所在微电网的电能需求, 需要配电网向微电网提供电能, 此时分布式能源为正功率方向; 或是微电网处于孤岛状态而与配电网无功率交换时。上述两种情况系下, 分布式能源支路的功率由负功率转变为正功率或是零功率, 配电网潮流会有一定程度的变化。

进一步分析馈线支路的功率方向情况。虽然配电网的分布式能源支路根据微电网的运行情况不同, 功率方向可能完全不同, 三种功率方向情况都可能发生。

但对于馈线支路而言, 尽管该馈线支路所连接的下一级母线, 也可能有分布式能源接入, 但下一级母线所连接的分布式能源容量有限, 不足以提供足够的电能, 使得功率由下一级母线流向该馈线支路。即配电网不发生断线故障时, 配电网馈线支路的功率方向都是正功率, 由上一级母线流向该支路, 不会发生功率倒向的情况。

观察馈线支路发生断路故障时配电网功率方向情况, 如图 3 所示第二级母线连接的其中一条馈线支路断线, 该馈线与第二级母线连接部分仍然为正功率方向; 该馈线与第三级母线连接部分的功率方向则不再是正功率方向, 功率方向取决于接入第三级母线的配电网分布式能源情况。

当分布式能源的微电网处于孤岛运行, 或是不足以提供足够的电能支撑所连接的配电网母线(本文称之为弱分布式电源), 此时该馈线与第三级母线连接部分呈现零功率特征; 当分布式能源具有较大的发电容量(本文称之为强分布式电源)时, 该馈线与第三级母线连接部分呈现负功率特征, 即从第二



级母线角度观察, 该部分馈线的功率由线路流向第二级母线。

综合上文分析可知, 考虑分布式能源的运行方式和发电容量影响, 配电网馈线支路正常运行时, 整条馈线支路都是正功率方向; 当发生断线故障时, 与上级母线连接部分仍然为正功率方向, 与下级母线连接部分为负功率或零功率方法。

## 2.2 断线定位方法

配电网馈线支路正常运行时, 整条支路呈现正功率特征; 馈线支路发生断线故障时, 该支路部分线路的功率方向将发生变化, 将转变为负功率或零功率。

由此, 考虑分布式能源影响情况下, 可根据馈线的功率方向进行配电网断线定位。针对配电网馈线支路断线故障时会呈现负功率或零功率特征, 本文提出基于功率方向的配电网断线识别方法, 配电网馈线支路只要检测到负功率或零功率, 则可以判断该配电网发生断线故障。该方法不需要采集配电网电气量暂态信息或是计算配电网的序分量, 实现简便高效。

配电网断线识别基础上, 进一步考虑配电网断线支路的定位方法, 即寻找具体的断线支路和断线点。当前配电网断线定位多基于配电网结构, 采用拓扑分析求解最小路径的分析方法以确定具体断线支路。比如, 文献[8]结合负荷监测点到电源点的最小路径分析, 提出了基于负荷监测仪的单相断线故障区域判定方法, 通过划定发生单相断线故障的可能区域和不可能区域, 并将这两个区域作差集运算, 得出最小断线故障区域。

本文考虑断线支路的功率方向特征, 直接进行配电网具体断线支路的识别和定位, 避免需要对配电网拓扑结构进行分析的断线定位方法。断线支路功率方向分布如图4所示, 正常运行时整条馈线支路都是正功率方向; 发生断线时, 馈线支路节点功率方向发生变化, 断线点与上一级母线相连的区域仍呈现正功率, 但断线点与下一级母线相连的区域

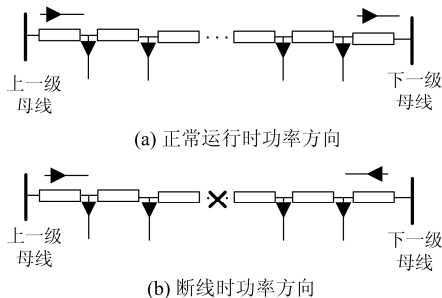


图4 断线支路的功率方向

Fig. 4 Power direction of the disconnection branch

则为负功率或零功率。

进一步分析断线支路所连接的下一级母线的各个馈线支路情况, 上一级馈线发生断路之前, 整条馈线支路都是正功率方向; 当上一级馈线发生断路后, 由于对应的母线不再提供电能, 若本地的分布式能源能够供电, 则整个馈线支路仍然为正功率方向; 若本地没有分布式能源或者分布式能源供电不足, 则整个馈线支路节点功率为零功率。

根据以上分析可快速定位具体的配电网断路支路: 断线支路不同节点, 会同时呈现正功率和负功率(或者零功率); 而没有断线的馈线支路或是受断线支路影响的下级馈线, 整个馈线支路为单一的功率方向。

## 3 具体实现流程

配电网断线定位方法涉及母线和多个支路等诸多单元, 既需要各个单元能发挥最大的监测功能, 又需要协同合作以快速地定位断路点。多智能体(Multi-Agent System, MAS)技术由多个 Agent 构成, 单个 Agent 具有决策分析能力, 同时又可以联系其它 Agent 以高效地解决更为复杂的问题<sup>[15]</sup>。

本文采用 MAS 解决配电网断线定位这类复杂问题, 利用智能配电网建设过程中的 FTU、DTU 和负荷监测仪等自动化设备, 将其升级为具有 Agent 功能, 并加入基于功率方向的配电网断线定位算法。同时借助于自动化设备的通信功能, 实现 Agent 间的信息交互。实现流程如图5所示, 主要包括:

1) 各个 Agent 采集本地的电气量和开关量信息, 并对所采集的电气量进行抗干扰等预处理。

电气量主要包括电流量和电压量, 对所采集的电流量和电压量进行信号调理以滤除各种高频噪声, 得到平滑后的电流量和电压量采样值, 分别记为  $\{i_k\}(k=1, 2, \dots)$ 、 $\{u_k\}(k=1, 2, \dots)$ 。

2) 提取最近一个周波的  $\{i_k\}$  和  $\{u_k\}$  采样值数据, 并采用傅里叶算法, 分别计算电流和电压的基波幅值和相角, 具体算法为

$$X_{\text{Re}} = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x_k \cos(k \frac{2\pi}{N}) \quad (1)$$

$$X_{\text{Im}} = -\frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x_k \sin(k \frac{2\pi}{N}) \quad (2)$$

式中:  $N$  为每周波采样点数;  $k$  为第  $k$  个采样点;  $X_{\text{Re}}$ 、 $X_{\text{Im}}$  分别电流或电压为基波正弦项(实部)和余弦项(虚部)的系数。根据所计算的基波正弦项(实部)和余弦项(虚部)的系数, 进一步获得基波分量幅值和相角<sup>[16]</sup>。

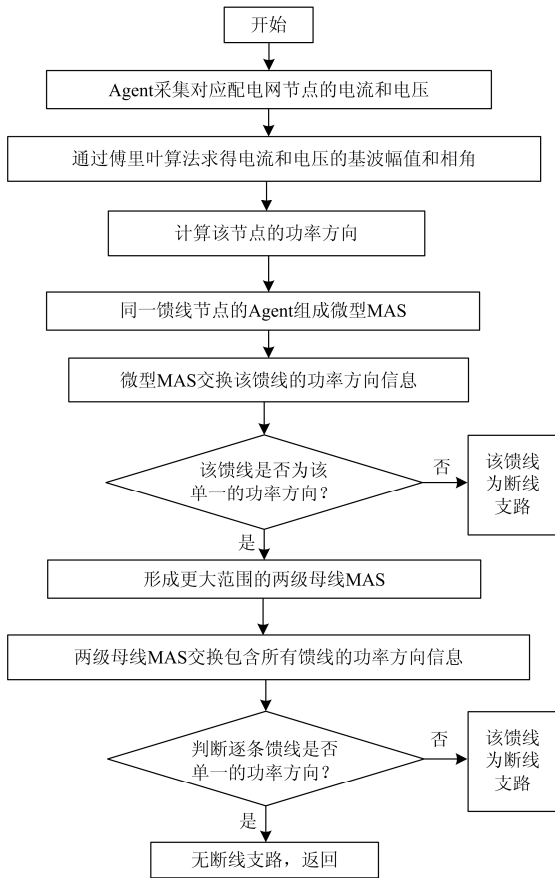


图5 实现流程

Fig. 5 Implementation process

$$\varphi = \arctg(X_{Re} / X_{Im}) \quad (3)$$

$$X = \sqrt{x_{Re}^2 + x_{Im}^2} \quad (4)$$

式中:  $X$  为基波分量的幅值;  $\varphi$  为基波分量的相角。

根据上述公式可方便求得电压和电流的基波幅值  $X_u$ 、 $X_i$  和相角  $\varphi_u$ 、 $\varphi_i$ 。

3) 根据所得到的电流和电压的基波幅值和相角, 按照所定义的功率方向, 计算出该 Agent 对应的配电网相关节点的功率方向  $P$ , 具体表达式为

$$P = X_u X_i \cos(\varphi_u - \varphi_i) \quad (5)$$

4) 采用就近归类的思想, 各个馈线支路 Agent 首先形成一个微型 MAS, 该 MAS 至少包含了该馈线支路的首尾两处 Agent, 避免了一下子就汇集太多配电网 Agent 导致管理效率低的难题<sup>[17]</sup>。

各个馈线支路的微型 MAS 通过信息交互, 获取该支路的各个节点的功率方向分布情况。若该支路节点同时包含了正功率和负功率(或者零功率)节点, 说明该支路为断线支路; 否则该支路为没有断线的馈线支路或是受断线支路影响的下级馈线, 此时, 该馈线支路为单一的功率方向。

5) 当步骤 4) 同一条馈线的微型 MAS 无法判断出断线故障时, 则充分利用 Agent 的灵活性和扩展性, 将 MAS 的范围扩大到与该馈线相连的母线的全部馈线所组成的 MAS, 该 MAS 包含了该馈线所连接的上级母线和下级母线及其连接的馈线, 为了便于表述, 区别于步骤 4) 的微型 MAS, 命名为两级母线 MAS。

两级母线 MAS 可以汇集到更丰富的配电网潮流分布情况, 而且当少数 Agent 由于采集系统或通信系统出现故障导致 MAS 所收集的功率方向信息不齐全时, 可以通过两级母线 MAS 的信息冗余性, 根据基尔霍夫电流定律推算信息不齐全节点的功率方向情况<sup>[18]</sup>。

通过两级母线 MAS 所包含的更大范围馈线支路的潮流分布情况, 判断每条馈线支路的功率方向。当馈线支路同时出现正功率和负功率(或者零功率)时, 则可以判断该支路出现断线故障; 若整个馈线支路为单一的功率方向, 则改馈线为非断线故障支路。

## 4 情景实例

为了测试基于功率方向的配电网断线识别方法有效性, 构建如图 6 所示的辐射状典型配电网, 正常运行时, 该配电网从主网(用电源  $S$  表示)向各个支路提供电能, 同时有两个分布式能源接入到配电网的不同母线, 分布式能源可能采用孤岛或并网两种方式, 以充分考察分布式能源采用不同运行方式的影响<sup>[19]</sup>。

每条馈线支路, 尤其是长距离、多节点的馈线, 可能装有多台负荷监测仪等配电网自动化设备, 配电网自动化设备越多, 将有助于更精确的定位, 本实例假定配电网每条馈线首尾配备有配电网自动化设备, 并发展成 Agent, 分布式能源在接入母线的地方也配备 Agent, Agent 之间用以太网等通信网络实现信息交互, 形成具有灵活性的 MAS。

馈线 L2 所连接的两级母线都接有分布式电源 DG, 潮流分布情况最为复杂, 因此重点分析馈线 L2 发生断线的情况。

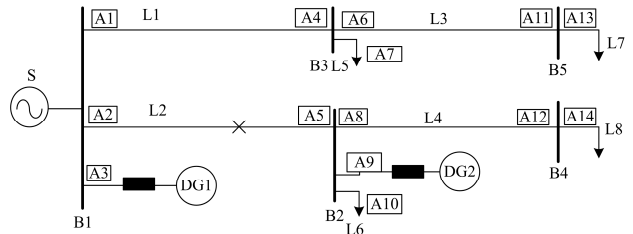


图6 配电网断线实例

Fig. 6 An example of distribution network disconnection

当馈线 L2 发生断线时, 配电网主网电源仍然能向馈线 L1、L2, DG1 所在的微网若为孤岛, 显然不影响配电网潮流分布, 若为并网, 只会与主网进行功率交换, 并不影响馈线 L1、L2 首端 A1 和 A2 的功率方向, 此时 A1 和 A2 仍然为正功率方向。

考虑 DG2 影响, 若 DG2 为弱分布式电源, DG2 不足以支撑母线 B2 或 DG2 处于孤岛情况, 此时, 母线 B2 没有电源支撑, L4 馈线两端 A8、A12 为零功率, 馈线 L2 的 A5 也为零功率; 而馈线 L3 跟正常运行时一样, A6 和 A11 都为正功率。

由以上分析, 列出 DG2 为弱分布电源时, 各个 Agent 所观察到的功率方向情况, 如表 1 所示, 从表 1 可以看出, 除了馈线 L2 的不同节点出现正功率和零功率情况(同一馈线同时出现两种功率方向)外, 其他馈线出现单一功率方向, 因此, 可判定馈线 L2 发生短路故障。

表 1 DG2 为弱分布式电源情况

Table 1 Situation of taking DG2 as weak distributed power

馈线及采集点	L1 (A1, A4)	L2 (A2, A5)	L3 (A6, A11)	L4 (A8, A12)
功率方向	(正, 正)	(正, 零)	(正, 正)	(零, 零)
诊断结果	非断线	断线	非断线	非断线

进一步分析 DG2 为强分布式电源的情况, 此时, DG2 通过 B2 母线向各个连接到该母线的馈线提供电源, 馈线 L2 的 A5 处的功率方向与正常运行时相反, 为负功率方向, 馈线 L4 两端 A8、A12 功率方向则与正常运行时相同。同时, 馈线 L1、L3 不受 DG2 影响, 馈线 L1 两端 A1、A4 和 L3 馈线两端 A6、A11 都是正功率方向,

DG2 为强分布式电源时, 具体的功率方向如表 2 所示。从表中可以看出, 此时, 除了馈线 L2 的不同节点出现正功率和负功率情况(同一馈线同时出现两种功率方向)外, 其他馈线只有单一功率方向, 这也与理论分析一致<sup>[20]</sup>。

表 2 DG2 为强分布式电源情况

Table 2 Situation of taking DG2 as strong distributed power

馈线及采集点	L1 (A1, A4)	L2 (A2, A5)	L3 (A6, A11)	L4 (A8, A12)
功率方向	(正, 正)	(正, 负)	(正, 正)	(正, 正)
诊断结果	非断线	断线	非断线	非断线

## 5 结论

考虑分布式能源影响情况下, 分析发现配电网断线支路的不同节点, 会同时出现正功率和负功率(或零功率)特征, 而非断线支路则为单一的功率方向, 因此本文提出基于功率方向的配电网馈线支路

断线方法, 该方法不需要采集配电网电气量暂态信息或是计算配电网的序分量, 实现简便高效。

在具体应用推广上, 虽然当前配电网已经陆续配备了负荷监测仪等自动化设备, 可以采集配电网功率分布情况, 并且采用 MAS 技术可以更好地解决配电网部分节点信息不全的问题, 但所采集的配电网节点数量和分布直接影响断线定位精度。如何合理分配采集节点的数量和分布情况, 是下一步需要解决的问题。

## 参考文献

- [1] 潘超, 焦薇羽, 孟涛, 等. 基于混合智能粒子群算法的广义电源主动配电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 69-75.  
PAN Chao, JIAO Weiyu, MENG Tao, et al. Optimal allocation of generalized power sources in active distribution network based on hybrid intelligent particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 69-75.
- [2] 许火炬, 缪希仁. 交直流混合配电方式及其故障保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 139-146.  
XU Huoju, MIAO Xiren. A review of AC/DC hybrid distribution and fault protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 139-146.
- [3] 曹海鸥, 高翔, 杨毅, 等. 基于全模型 SCD 二次系统在线检测及智能诊断应用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 136-141.  
CAO Haiou, GAO Xiang, YANG Yi, et al. Analysis of online monitoring and intelligent diagnosis based on the full model SCD secondary system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 46(14): 136-141.
- [4] 俞恩科, 薛永端, 李世强, 等. 断线故障行波测距分析[J]. 电气应用, 2015, 34(3): 121-125.  
YU Enke, XUE Yongduan, LI Shiqiang, et al. Analysis of fault traveling wave fault location[J]. Engineering Application, 2015, 34(3): 121-125.
- [5] 朱玲玲, 张华中, 王正刚, 等. 基于小波神经网络单相断线故障选线和定位[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 12-17.  
ZHU Lingling, ZHANG Huazhong, WANG Zhenggang, et al. Single-phase open-line fault selection and location based on wavelet neural networks[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 12-17.
- [6] 朱玲玲, 李长凯, 张华中, 等. 配电网单相断线故障负序电流分析及选线[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 35-38.

- ZHU Lingling, LI Changkai, ZHANG Huazhong, et al. Negative sequence current distributing and single-phase open-line fault protection in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 35-38.
- [7] 屈刚, 李长凯. 配电网架空线路断线故障定位[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(12): 35-38.  
QU Gang, LI Changkai. Fault locating of non-grounding line break in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(12): 35-38.
- [8] 尤毅, 刘东, 李亮, 等. 基于负荷监测仪的 10 kV 架空线单相断线不接地故障区域判定[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 144-149.  
YOU Yi, LIU Dong, LI Liang, et al. Detection method based on load monitoring for 10 kV overhead line single-phase ungrounded open fault area[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 144-149.
- [9] 吴争荣, 王钢, 李海锋, 等. 含分布式电源配电网的相间短路故障分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 130-136.  
WU Zhengrong, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Analysis on the distribution network with distributed generators under phase-to-phase short-circuit faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 130-136.
- [10] 周念成, 叶玲, 王强钢, 等. 含负序电流注入的逆变型分布式电源电网不对称短路计算[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 41-49.  
ZHOU Niancheng, YE Ling, WANG Qianggang, et al. Asymmetric short circuit current calculation for inverter interfaced distributed generator with negative sequence current injection integrated in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 41-49.
- [11] 贺家李, 宋从炬. 电力系统继电保护原理[M]. 增订版. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [12] 袁超, 吴刚, 曾祥君, 等. 分布式发电系统继电保护技术[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(2): 99-105.  
YUAN Chao, WU Gang, ZENG Xiangjun, et al. Effect of distributed generation on relay protection of distributed system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(2): 99-105.
- [13] 李升源, 梁礼明. 构成功率方向元件的一种新方案[J]. 电网技术, 2000, 24(4): 43-46.  
LI Shengyuan, LIANG Liming. A new project to design power direction relay[J]. Power System Technology, 2000, 24(4): 43-46.
- [14] 杨增力, 石东源, 段献忠. 基于方向比较原理的广域继电保护系统[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 87-93.  
YANG Zengli, SHI Dongyuan, DUAN Xianzhong. Wide-area protection system based on direction comparison principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 87-93.
- [15] 张宗包, 袁荣湘, 赵树华, 等. 微电网继电保护方法探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 204-209.  
ZHANG Zongbao, YUAN Rongxiang, ZHAO Shuhua, et al. Research on microgrid protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 204-209.
- [16] 阳熹, 闫琪. 浅谈分布式能源的系统可靠性[J]. 科技信息, 2009(25): 710-711.  
YANG Xi, YAN Qi. Discussion about the reliability of distributed energy resources[J]. Science & Technology Information, 2009(25): 710-711.
- [17] 任洪波, 吴琼. 分布式能源系统可靠性评价[J]. 热力发电, 2016, 45(4): 65-69.  
REN Hongbo, WU Qiong. Reliability assessment of distributed energy system[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(4): 65-69.
- [18] 王惠强, 陈校华. 10 kV 电网中性点接地方式的分析[J]. 广东电力, 2016, 19(1): 50-52.  
WANG Huiqiang, CHEN Xiaohua. Analysis of neutral point earthing manners of 10 kV power grid[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 19(1): 50-52.
- [19] 王佚. 对 110 kV 零序方向电流保护方向正确性的讨论[J]. 广东电力, 2016, 19(11): 31-34.  
WANG Yi. On direction validity of 110 kV zero-sequence directional current protection[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 19(11): 31-34.
- [20] 孟恒信, 梁旭, 刘愈倬, 等. 数字化变电站继电保护闭环实时仿真系统研究[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 198-203.  
MENG Hengxin, LIANG Xu, LIU Yuzhuo, et al. Research on closed loop real time simulation system of relay protection for digital substation[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 198-203.

收稿日期: 2017-10-12; 修回日期: 2017-12-28

作者简介:

王玥婷(1971—), 女, 硕士, 高工, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: kkujinm15@163.com

梁中会(1969—), 男, 学士, 高工, 主要研究方向为电力系统继电保护;

牟欣玮(1979—), 女, 硕士, 高工, 主要研究方向为电气工程。

(编辑 张爱琴)