DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191039

基于馈线树动态拓扑的高容错故障定段方法

熊郁芬[1]，秦飞翔[2]，黄智鹏[1]，王东芳[1]，朱革兰[2]

(1. 广东电网有限责任公司河源供电局，广东 河源 517000；2. 广州市奔流电力科技有限公司，广东 广州 510670)

摘要：开关的投切和分布式电源的渗透使得配电网拓扑和运行方式复杂多变，给馈线故障定段带来挑战。提出把馈线拓扑分解为树枝和分叉区两种连接单元的馈线树故障定段法。通过智能馈线终端单元识别馈线上各开关的状态变化以实时更新馈线拓扑信息，计算树枝状态函数。根据节点共识容错判据进行故障区段可信度判断，进一步结合分叉区状态进行交叉验证。对节点信息正方向的定义以过流前潮流信息为基准，解决有源配电网故障电流的方向定义问题。最后通过算例验证所提方法的优越性。

关键词：故障定段；馈线拓扑；动态拓扑；容错；馈线树

High fault-tolerant fault segmentation method based on feeder tree dynamic topology

XIONG Yufen[1], QIN Feixiang[2], HUANG Zhipeng[1], WANG Dongfang[1], ZHU Gelan[2]

(1. Heyuan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Company Ltd., Heyuan 517000, China;
2. Guangzhou Power Electrical Technology Co., Ltd., Guangzhou 510670, China)

Abstract: Switching of the switch and the penetration of the distributed power make the topology and operation mode of a distribution network complex and changeable. This brings challenges to the faulty section of the feeder. A feeder tree fault segmentation method is proposed, which decomposes the feeder topology into two connection units of a branch and a forked zone. The state of each switch on the feeder is identified by the intelligent feeder terminal unit so that the feeder topology information is updated in real time. This is used to calculate the branch state function. The consensus fault-tolerant criterion is used to judge the reliability of the fault zone. Cross-validation is further performed in conjunction with the state of the bifurcation zone. The definition of the positive direction of the node information is based on the pre-current flow information. In this way the problem of defining the direction of the fault current of the active distribution network is solved. Finally, an example is given to verify the superiority of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777077) and Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Company (No. GDKJXM20172882).

Key words: fault segmentation; feeder topology; dynamic topology; fault tolerant; feeder tree

0 引言

配电网的拓扑由于运行、检修或故障等原因经常会发生变化[1-5]，导致故障定位的不确定性很大。而分布式电源的接入，使配电网由单电源变成多电源双向潮流运行，更加剧了配电网馈线的故障定位的困难，对配电网运行管理和供电可靠性工作带来严重的影响。

随着配电网自动化的发展，配电网中智能馈线终端单元(Smart Feeder Terminal Unit, SFTU)[6-7]的推广应用使得多种馈线故障区段定位的方法得以实现。主要有基于矩阵算法的故障区段定位[8-13]以及基于人工智能算法的故障区段定位[13-22]等。矩阵算法的优势是针对固定的拓扑关系，但在多电源情况下，则需要多次构造矩阵，计算繁琐。且当发生故障信息缺失和畸变时，容错率和计算速度都有待于提高。基于人工智能算法的故障定段在多电源供电系统中同样需要对每个电源假定一次正方向，而且计算过程中需要反复迭代，部分文献[12-13]引入了较复杂的适应度评价函数，但算法流程也更为繁琐。文献[23]提出将测量的三相电压和三相电流分解为对

基金项目：国家自然科学基金项目资助(51777077)；广东电网公司科技项目资助(GDKJXM20172882)

称分量，根据故障前后对称分量的差异来进行故障区位定段的方法，但是在配电网中电压和电流波形很容易受到干扰，容错率不高。文献[24-25]中采用链表法进行两次故障定位，但是其方法同样是基于预设的固定拓扑关系信息。可见上述文献中所述方法都不能反应馈线实时拓扑，且容错率不高。为了提高容错率，文献[26]提出基于贝叶斯估计的故障定位方法，但需要建立主观的先验知识，在节点数较多的情况下进行评估都要付出一定的可信度成本。

本文提出一种基于馈线树动态拓扑的高容错故障区位定段方法。首先通过 SFTU 对等通信交换信息识别馈线上各开关的状态变化以实时更新馈线拓扑信息。对节点过流正方向的定义以过流前潮流信息为基准，解决了有源配电网运行的正方向定义问题。然后得到馈线以树枝及分叉区为单位的状态函数，通过节点共识容错判据进行故障区段可信度判断，进一步结合分叉区状态进行交叉验证，最后通过算例验证所提方法的优越性。

1 馈线拓扑动态识别的模型

1.1 馈线树

配电网辐射状馈线的起点是电源出口处开关，末端是用户端的负荷开关或联络开关，其余开关为中间节点。对于中间节点，定义其相邻上下游节点状态信息，对于起点和末端需定义其相邻的下游和上游节点，从而得到馈线上全部节点相邻位置信息和状态信息，构成馈线节点拓扑关系。若干串联连接的节点组合定义为树枝，当某个节点的下游有多个相邻节点时，将该节点及下游相邻节点区域定义为分叉区。本文定义的馈线树由树枝和分叉区组成。

1.2 馈线树拓扑动态识别

在单电源供电辐射网络中，通常把从某节点到其任意子节点的单向潮流方向定义为节点的正方向[7-9]。但随着配电网自动化的建设，要求馈线逐步实现环网供电，例如 *N* 分段 *n* 联络、2-1 单环网、两供一备等接线模式应用越来越广泛，运行中馈线各种转供电操作使得馈线拓扑经常发生变化。

随着分布式电源(Distributed Generation, DG)的渗透率不断提高，考虑配电网 DG 出率的波动以及大多采用自发自用余电上网的运行策略，使得馈线上各节点潮流并非一成不变，如图 1 所示含多个 DG 的“2-1”单环网中节点 K2、K3、K4 的潮流随着 DG 的投退和出率的变化，正常运行时的潮流方向也不再唯一。

另一方面，故障后 DG 的低压穿越特性和防孤岛保护的动作，使得配电线路的拓扑在故障后的短暂时间内也会发生变化，因此，配电网故障定位依据由主站下发给配电终端的拓扑关系显然不能适应故障后保护的快速动作，导致引言中提到的方法在故障判断时可能产生混乱。

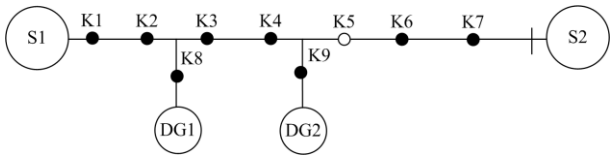


图 1 含 DG 的单环网

Fig. 1 A ring network with DG

下面以图 1 为例说明馈线树拓扑的动态识别过程。

假设选定节点 K2 为主控 SFTU 节点，则由 K2 发起馈线拓扑查询。通过和其相邻的 K1 和 K3、K8 对等通信，获取其开关状态、节点信息及 K4 通信地址，K1 为供电端即馈线树起点，K1 不再继续转发询查消息，K8 是用户端开关也是当前馈线树末端之一。然后 K2 再和 K4 通信获取其开关状态、节点信息及 K5、K9 通信地址，K5 处于断开位置判断为当前馈线树末端，K9 是用户端开关也是当前馈线树末端。查询完毕后，馈线树拓扑由主控 SFTU 生成，并上传主站。

为了适应多电源配电网节点电流方向的多变性，本文以正常运行时 SFTU 的电流信息为节点的正方向基准，实现了电流方向的自适应定义。无论馈线是单电源还是多电源供电，节点的方向信息均能反应故障特征。具体如式(1)所示。

$$s(i)=\begin{cases}1, & \text{有过流且与基准方向相同}\\ -1, & \text{有过流且与基准方向相反}\\ 0, & \text{没有过流信号}\end{cases} \tag{1}$$

式中，$s(i)$ 的值表示节点 i 的节点信息。

在每一次故障定位算法运行前，依据 SFTU 的实时节点信息检查馈线的结构是否发生变化，尤其是联络开关的状态，通过 SFTU 的测量信息，可以实时更新相邻节点信息，从而实现馈线拓扑的动态识别。

2 配电网馈线树故障定段方法

DG 接入配电网后，对 SFTU 的信息检测可能会产生影响，且这种影响会随着故障点和 DG 位置以及 DG 的输出容量发生变化。本文提出的配电网动态馈线树法故障定段方法步骤如下：

1) 根据 SFTU 上传的相邻节点信息实时构造馈线树拓扑信息。

2) 对树枝首末节点的故障信息进行比较，得到树枝的状态函数。

设 $F(T)$为树枝 T 的状态函数，$s(T_0)$、$s(T_e)$分别表示树枝 T 的首、末节点信息。则定义树枝 T 的状态函数为

$$F(T)=\begin{cases}0, s(T_0)=s(T_e)=0\\ 1, s(T_0)=s(T_e)=1\\ -1, s(T_0)=s(T_e)=-1\\ 2, s(T_0)\neq s(T_e)\end{cases} \tag{2}$$

根据树枝状态函数转去步骤 3)或 4)；

3) $F(T)=2$时，则表明该树枝存在内部故障，需要进行故障的二次定位，节点信息不同的两个节点之间为故障段。具体为从该树枝的首节点开始，判断节点与相邻下游节点的信息是否相同。如果不同，则判断为该节点与其相邻下游子节点之间的区段故障；如果相同，则该区域内无故障，继续搜索直至找到故障区域或到达该树枝的末节点为止。

4) 当 $F(T)=0,1,-1$时，理想情况下则可以判断故障不在该树枝内。但是，树枝中的节点信息可能存在畸变，本文提出了结合节点信息的共识容错判据进行可信度判断。

在树枝内节点数≥3 时，当首末节点状态相同而树枝内存在不同状态的节点时，假定树枝内节点个数为 N，与首末节点状态相同的节点个数为 n，则定义信息相异概率为

$$P=1-\frac{n}{N} \tag{3}$$

当 $P\le\frac{1}{3}$时，树枝内信息相异节点属畸变的可能性大，则修正树枝内相异节点信息，一次定位结果可信，转 5)；

当 $P>\frac{1}{3}$时，与首末节点信息相同的节点所占总节点的比例低于可信值$\frac{2}{3}$，则不宜再认为树枝内相异节点信息为畸变信息。这种情况较为罕见，要根据具体相异节点信息采取其他措施辅助判断。由于相异节点数较多，需等待一定延迟后的上传信息进行判断以排除通信通道故障。

共识容错判据同样适用在步骤 3)的可信度判断结果。

若树枝内节点数仅为 2 个，且其中一个发生畸变，这需要结合上下游分叉区信息进一步判断。

5) 分叉区故障判断

若分叉区内发生故障，则是上述故障定段方法的死区，因此需要单独对其分析判断。按其节点值共有 4 种情况，见表 1。

表 1 分叉区故障判别

Table 1 Fault diagnosis of the bifurcation area

	情况 1	情况 2	情况 3	情况 4
首节点	1	1	0	0
末节点	或−1 或 0	至少一个为 1	至少一个为 −1 或 1	全为 0
故障 判别	区内 故障	区外故障且故障 位于末节点为 1 的树枝枝上	联络开关的 分叉区内故 障	无故障

6) 综合验证

把故障的树枝与分叉区故障的判断结果综合，进一步进行相互验证。

配电网故障定段方法的总流程如图 2 所示。

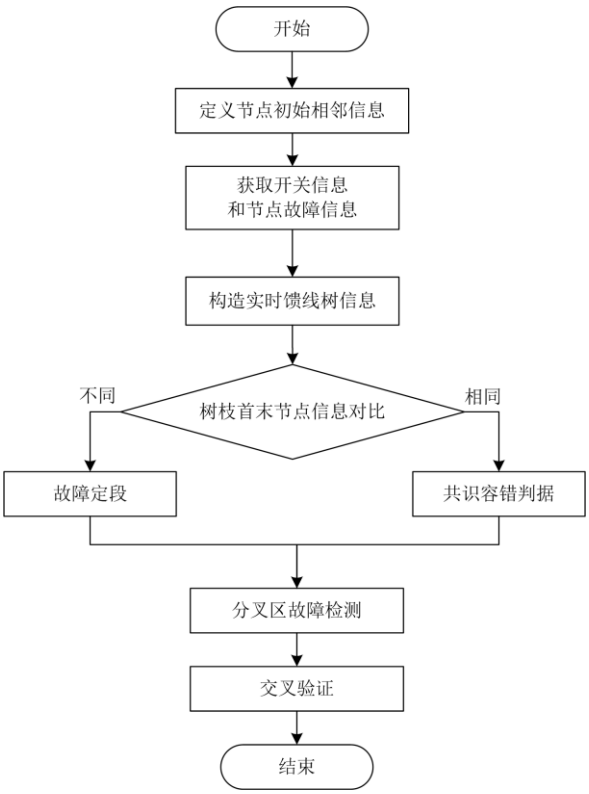


图 2 配电网故障定段流程

Fig. 2 Flow of the fault segmentation method

3 算例仿真

实际配电网情况复杂，为了验证本文的算法能够适应多种故障情况下的故障定位，在算例中考虑到了单电源的配电网络、含分布式电源的多电源配电网络、联络开关状态变化时的配电网络、多重故障以及信息畸变。本文算例模型是如图 3 所示的一个实际的 37 节点的单环网配电馈线。

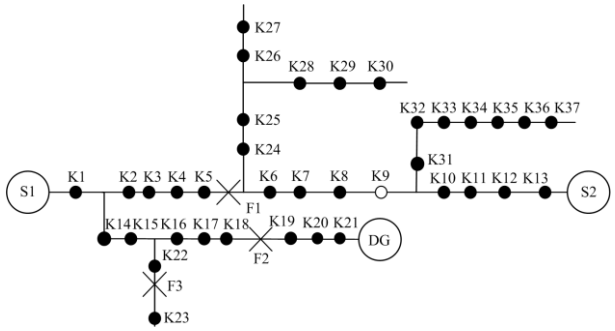


图 3 馈线拓扑示意图

Fig. 3 Schematic diagram of feeder

图中，S1 和 S2 是配电网电源，DG 是分布式电源，K9 是联络开关，F1、F2、F3 表示馈线上的故障点。在 SFTU 的配合下，根据各开关及 FTU 的实时信息构造各级树枝的节点，然后根据前文所述算法在 Matlab 中进行了仿真验证。

3.1 单电源供电

此时联络开关 K9 处于断开状态，DG 未投运，即单电源供电状态。假设图 2 中所示三点发生故障，且 SFTU 上传的节点状态信息中 4、7 号节点信息发生畸变，则单电源馈线拓扑信息表 2 所示。

表 2 单电源馈线拓扑信息

Table 2 Single power feeder topology information

树枝和分叉区	节点组成	节点信息	树枝状态值及分叉区情形
树枝	[1]	[1]	$F(T)$=1
	[2,3,4,5]	[1,1,0,1]	$F(T)$=1
	[6,7,8]	[0,1,0]	$F(T)$=0
	[14,15]	[1,1]	$F(T)$=1
	[16,17,18,19,20,21]	[1,1,1,0,0,0]	$F(T)$=2
	[22,23]	[1,0]	$F(T)$=2
	[24,25]	[0,0]	$F(T)$=0
	[26,27]	[0,0]	$F(T)$=0
	[28,29,30]	[0,0,0]	$F(T)$=0
分叉区	[1,2,14]	[1,1,1]	情况 2
	[15,16,22]	[1,1,1]	情况 2
	[5,6,24]	[1,0,0]	情况 1
	[25,26,28]	[0,0,0]	情况 4

判断结果：$F(T)=2$ 的树枝内发生故障，且故障点位于 K3 和 K4 之间以及 K22 和 K23 之间；分叉区[5,6,24]区内故障，与预设一致。

在容错方面，SFTU 上传的节点状态信息中发生了两处信息畸变，导致[2,3,4,5]和[6,7,8]两个树枝发生异常。为了验证与首末节点状态相异的节点是否是由于信息畸变造成的，算法通过节点信息的共识容错判据式(3)可知，两树枝的信息相异率均≤1/3，由此可以确定 4、7 号节点信息发生了畸变。

3.2 馈线拓扑变化(联络开关闭合)

假设 K10 节点的开关因故处于开位，此时联络开关 K9 闭合以供电 K31-K37 支路，DG 未投运。预设故障点不变，SFTU 上传的节点状态信息中 29、31、32、33 号节点信息发生畸变，此时由于联络开关状态的变化使得馈线拓扑发生变化，则变化后的馈线拓扑信息如表 3 所示。

表 3 变化后的馈线拓扑信息

Table 3 Topology information of changed feeder

树枝	节点组成	节点信息	树枝状态值
树枝	[1]	[1]	$F(T)$=1
	[2,3,4,5]	[1,1,1,1]	$F(T)$=1
	[6,7,8,9,31,32,33,34,35,36,37]	[0,0,0,0,1,−1,1,0,0,0,0]	$F(T)$=0
	[14,15]	[1,1]	$F(T)$=1
	[16,17,18,19,20,21]	[1,1,1,0,0,0]	$F(T)$=2
	[22,23]	[1,0]	$F(T)$=2
	[24,25]	[0,0]	$F(T)$=0
	[26,27]	[0,0]	$F(T)$=0
	[28,29,30]	[0,1,0]	$F(T)$=0

分叉区的馈线拓扑信息与表 2 中所列信息一致。算法的判断结果与 3.1 节相同。

在容错方面，SFTU 上传的节点状态信息中发生了四处信息畸变，导致[28,29,30]和[6,7,8,9,31,32,33,34,35,36,37]两个树枝发生异常，算法通过节点信息的共识容错判据式(3)判断可知，两树枝的信息相异率均≤1/3，由此可以确定 29、31、32、33 号节点信息发生畸变。在此例中树枝节点数达到 11，可以容许多达 3 个节点的信息畸变。

3.3 DG 投入运行

馈线上 K10 开关仍断开，联络开关 K9 闭合，DG 投入运行。此时不仅馈线拓扑发生了变化，而且由于 DG 的投入运行使得节点的状态信息发生改变。故障点如图 2 中所示，假设 SFTU 上传的节点信息中 25 号节点信息发生畸变，含 DG 的馈线拓扑信息如表 4 所示。

算法初步判断故障点位于 K3 和 K4 之间、K22 和 K23 之间以及 K24 和 K25 之间；分叉区[5,6,24]和[25,26,28]区内也存在故障。

进一步交叉验证时，树枝[24,25]只有 2 个节点，而其下游分叉区[25,26,28]中节点 K26、K28 没有过流，表明节点 K25 信息畸变，树枝[24,25]和分叉区[25,26,28]的故障定段不可信。判断结果表明故障区位定段不受 DG 的影响，与预设故障点一致。

表 4 含 DG 的馈线拓扑信息

Table 4 Topology information of feeder with DG

树枝和分叉区	节点组成	节点信息	树枝状态值及分叉区情形
树枝	[1]	[1]	$F(T)$=1
	[2,3,4,5]	[1,1,1,1]	$F(T)$=1
	[6,7,8,9,31,32,33,34,35,36,37]	[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]	$F(T)$=0
	[14,15]	[1,1]	$F(T)$=1
	[16,17,18,19,20,21]	[−1,−1,−1,0,0,0]	$F(T)$=2
	[22,23]	[1,0]	$F(T)$=2
	[24,25]	[0,1]	$F(T)$=2
	[26,27]	[0,0]	$F(T)$=0
	[28,29,30]	[0,0,0]	$F(T)$=0
分叉区	[1,2,14]	[1,1,1]	情况 2
	[15,16,22]	[1,−1,1]	情况 2
	[5,6,24]	[1,0,0]	情况 1
	[25,26,28]	[1,0,0]	情况 1

4　结论

1) 本文所提方法可以实现馈线拓扑的动态识别，能实时更新馈线树信息。

2) 当发生信息畸变，不论是畸变为 1 或 0，在树枝的节点数大于等于 3 时，只要畸变的节点信息小于等于总节点数的 1/3，就能准确地判断出故障区段；在树枝节点数小于 3 时，通过进一步交叉验证，仍然能够判断故障位置。大大提高了算法的容错率。

3) 节点信息的正方向基准是故障前的潮流方向，因此该方法不受分布式电源投切和出率大小的影响。

4) 在不同树枝发生多重故障情况下也能够准确判断所有故障位置。

通过具有对等通信功能的馈线终端采集配网各分段开关、断路器、联络开关的过流信息实时生成馈线树拓扑，利用馈线树故障定段方法判断故障位置，原理清晰、无复杂运算、不存在稳定性问题、实时性好且具有较好的容错性，满足配电网接线复杂多变的特性，适用于分布式电源接入的有源配电网馈线故障定段。

参考文献

[1] 杜健文. 多联络配电网分布式智能馈线自动化系统研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.

[2] 范开俊, 徐丙垠, 董俊, 等. 基于智能终端逐级查询的馈线拓扑识别方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 180-186.
FAN Kaijun, XU Bingyin, DONG Jun, et al. Identification method for feeder topology based on successive polling of smart terminal unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 180-186.

[3] 高孟友, 徐丙垠, 范开俊, 等. 基于实时拓扑识别的分布式馈线自动化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 127-131.
GAO Mengyou, XU Bingyin, FAN Kaijun, et al. Distributed feeder automation based on automatic recognition of real-time feeder topology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 127-131.

[4] 陈冉, 陆健, 刘明祥, 等. 适应分布式馈线自动化的配电网拓扑模型生成方法[J]. 南方电网技术, 2019, 13(1): 60-65.
CHEN Ran, LU Jian, LIU Mingxiang, et al. Topology model generation method of distribution network for distributed feeder automation[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(1): 60-65.

[5] 张安龙, 李艳, 黄福全, 等. 基于动态拓扑分析的配电网自适应保护与自愈控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 111-117.
ZHANG Anlong, LI Yan, HUANG Fuquan, et al. Adaptive protection and self-healing control method of distribution network based on dynamic topology analysis[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 111-117.

[6] 郭阳春. 馈线终端单元的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.

[7] HAN Guozheng, XU Bingyin, SUONAN Jiale. IEC 61850-based feeder terminal unit modeling and mapping to IEC 60870-5-104[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2046-2053.

[8] ZHAO Jianwen, MA Yanxin. A fault section location method based on matrix beam algorithm[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 267(4).

[9] 徐彪, 尹项根, 张哲, 等. 矩阵算法和优化算法相结合的配电网故障定位[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 152-161.
XU Biao, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Fault location for distribution network based on matrix algorithm and optimization algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 152-161.

[10] ZHANG Yujun, LU Yongfang. Distribution network fault location and isolation based on matrix topology algorithm[J]. International Journal of Digital Content Technology and its Applications, 2013, 7(6).

[11] 王一非, 贾燕冰. 含分布式电源配电网故障定位改进矩阵算法[J]. 计算机仿真, 2018, 35(4): 58-64.
WANG Yifei, JIA Yanbing. Fault location of distribution

networks with DGs based on an improved matrix algorithm[J]. Computer Simulation, 2018, 35(4): 58-64.

[12] 杨斐然, 于永进. 基于时间约束的分层模糊 Petri 网的配电网故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 99-106.
YANG Feiran, YU Yongjin. Fault diagnosis of distribution network based on time constrained hierarchical fuzzy petri nets[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 99-106.

[13] 王一非. 含分布式电源的配电网故障定位研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.

[14] MAJIDI M, ETEZADI-AMOIL M, FADALI M S. A novel method for single and simultaneous fault location in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3368-3376.

[15] REDDY M J B, RAJESH D V, GOPAKUMAR P, et al. Smart fault location for smart grid operation using RTUs and computational intelligence techniques[J]. IEEE Systems Journal, 2014, 8(4): 1260-1271.

[16] SHI Haitao. Fault section location for distribution network with DG based on binary hybrid algorithm[C] // Proceedings of 2017 International Conference on Mechanical and Mechatronics Engineering (ICMME2017), Science and Engineering Research Center, 2017: 6.

[17] GUO Hongyi. Research on fault recovery of construction engineering distribution network based on genetic algorithm[C] // Proceedings of 2018 2nd International Conference on Systems, Computing and Applications (SYSTCA 2018), International Information and Engineering Association: Computer Science and Electronic Technology International Society, 2018: 4.

[18] 郭壮志, 徐其兴, 洪俊杰, 等. 配电网故障区段定位的互补约束新模型与算法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3742-3751.
GUO Zhuangzhi, XU Qixing, HONG Junjie, et al. A novel fault section location model with complementarity constraints and its optimization algorithm for distribution network.[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3742-3751.

[19] 杨刚. 含分布式电源配电网故障定位[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.

[20] 李开文, 袁荣湘, 邓翔天, 等. 含分布式电源的环网故障定位的改进矩阵算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(12): 62-68.
LI Kaiwen, YUAN Rongxiang, DENG Xiangtian, et al. Improved matrix algorithm for fault location in ring distribution system with distributed generations[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(12): 62-68.

[21] 吴凡, 赵晋泉, 朱斌, 等. 基于 MOPSO 的含分布式光伏配电网故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 46-53.
WU Fan, ZHAO Jinquan, ZHU Bin, et al. Faulty section location based on MOPSO for distribution networks with distributed photovoltaic generation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 46-53.

[22] 钱涛. 粗糙集及神经网络在配电网故障诊断中的应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.

[23] RAJARAMAN P, SUNDARAVARADAN N A, MALLIKARJUNA B, et al. Robust fault analysis in transmission lines using synchrophasor measurements[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 108-110. DOI: 10.1186/s41601-018-0082-4.

[24] 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 Lantian, LIU Kaipei, LIU Xiaoli, et al. Chain table algorithm for fault location of complicated distribution networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 190-196.

[25] CAI Baoping, LIU Yu, XIE Min. A dynamic-Bayesian-network-based fault diagnosis methodology considering transient and intermittent faults[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017, 14(1): 276-285.

[26] 贾科, 李论, 杨哲, 等. 基于贝叶斯压缩感知理论的配网故障定位研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3475-3486.
JIA Ke, LI Lun, YANG Zhe, et al. Research on distribution network fault location based on Bayesian compressed sensing theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3475-3486.

收稿日期：2019-08-27；　　修回日期：2019-11-08

作者简介：

熊郁芬(1985—)，女，本科，工程师，主要从事配网及计量自动化工作；E-mail: 462885886@qq.com

秦飞翔(1997—)，男，通信作者，硕士研究生，主要研究方向为有源配电网故障诊断；E-mail: qin_feixiang@126.com

黄智鹏(1988—)，男，本科，工程师，主要从事配网安全运行与综合管理研究。E-mail: 409839243@qq.com

（编辑　葛艳娜）