

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191372

多源信息辅助分区的主动配电网故障区段定位

程云祥¹, 李阳¹, 卢芳¹, 殷爽睿², 艾芊², 刘祥波¹, 扈佃爱¹, 肖喜鹏¹

(1. 国网山东省电力公司日照供电公司, 山东 日照 276826; 2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 在分布式电源快速发展的背景下, 实现主动配电网的快速、准确故障定位面临普适性和容错性等挑战。首先结合主动配电网故障发生位置与过流报警信息之间的关系, 分析了现有故障区段定位方法的适用性问题, 基于改进的开关函数与适应度函数构建了故障区段定位的数学模型。然后将用电信息采集系统作为故障定位的第二信息源, 提出了多源信息故障辅助分区方法, 进而利用离散智能优化算法进行求解。最后, 采用多种故障及信息畸变场景进行算例仿真, 并对对比分析了是否利用多源信息及是否采用离散寻优算法等不同定位方法的测试结果, 验证了所提方法在主动配电网故障区段定位问题中的适用性、准确性和高效性。

关键词: 主动配电网; 故障区段定位; 多源信息; 用电信息采集系统; 离散智能优化算法

Fault-section location for active distribution networks assisted by multi-source information

CHENG Yunxiang¹, LI Yang¹, LU Fang¹, YIN Shuangrui², AI Qian², LIU Xiangbo¹, HU Dian'ai¹, XIAO Xipeng¹

(1. Rizhao Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Rizhao 276826, China; 2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: With the background of the rapid development of distributed generators, realizing fast and accurate fault location of Active Distribution Networks (ADNs) faces challenges of universality and fault-tolerance. First, the applicability of the existing fault location methods is analyzed according to the relationship between the fault locations of ADNs and over-current alarm information. Based on improved switch function and fitness function, a mathematical model of fault location is constructed. Then taking the Customer Electric Information Acquisition System (CEIAS) as the second information source for fault location, a fault auxiliary partition method using multi-source information is proposed, and the discrete intelligent optimization algorithm is used to solve the problem. Finally, several kinds of fault with different kinds of information distortion scenarios are used for simulation. The test results of different fault location methods such as whether multi-source information is used and whether discrete optimization algorithm is used are compared and analyzed, so as to verify the applicability, accuracy and efficiency of the proposed method for the fault location problem of ADNs.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company (No. 52061718004F) and National Natural Science Foundation of China (No. U1866206).

Key words: active distribution network; fault-section location; multi-source information; customer electric information acquisition system; discrete intelligent optimization algorithm

0 引言

配电网相较于输电网来讲具有分支众多、结构复杂、且所处环境更为恶劣的特点, 使得其更易发生故障引起用户停电^[1-4]。因此, 配电网发生故障后

实现故障的快速定位、隔离与恢复对提高配电网可靠性, 保障经济社会活动和居民生活的正常运转至关重要^[5-7]。随着配电自动化系统的完善, 可利用安装在断路器或分段开关处的馈线终端单元(Feeder Terminal Unit, FTU)上传的报警信息或开关状态变动信息进行故障区段定位^[8-9]。

传统配电网的故障区段定位方法大致可分为直接法和间接法两类^[10]。其中, 直接法通过故障信息

基金项目: 国网山东省电力公司科技项目资助(52061718004F); 国家自然科学基金项目资助(U1866206)

和网架结构,直接根据逻辑关系判断故障发生位置,包括矩阵算法^[11]、链表法^[12]、过热区域搜索法^[13]等;间接法主要是将故障区段定位问题建模成数学优化问题,进而利用遗传算法、粒子群算法等智能优化算法求解。文献[14]对比分析了直接法与间接法的优缺点,并提出了将矩阵算法与智能优化算法相结合的思路,提高了故障定位方法的整体性能。文献[15-16]针对配电网三相不平衡特性,分别利用斐波那契数列和微扰原理实现配电网的故障定位。然而,即使可以忽略配电网同一分支上同时发生两处及以上区段故障的小概率事件,对于多分支配电网发生双重故障的情况仍需要在故障定位问题中考虑。尤其是上游干路区段与下游支路区段上同时故障时,由于存在故障信息判别的“逻辑盲区”,直接法与间接法均只能将故障定位到上游区段,从而加剧故障的影响时长与范围。

随着可再生能源与分布式电源(Distributed Generator, DG)的快速发展,配电网逐渐转变为潮流可双向流动的主动配电网(Active Distribution Network, ADN),传统故障定位中的直接法难以适用。但对于间接法来讲,配电网末端或下游接入分布式电源使得故障电流的流向更为多样,在改进的电流极性判别方法的支持下^[17-18],相应FTU上传的报警信号可包含过流方向信息^[19],从而在一定程度上减小了“逻辑盲区”的范围。不少学者利用新型的FTU过流报警信息,基于改进的开关函数和适应度函数,分别采用二进制粒子群-遗传混合算法^[20]、蚁群算法^[21]、二进制万有引力算法^[22]、和声算法^[23]等智能算法进行求解。文献[24]针对现有的配电网故障定位算法存在的故障定位模型复杂、计算速度慢等问题,提出了一种利用因果网络反向推理函数进行故障定位的方法。但另一方面,分布式电源的接入也使得FTU信息出现不可识别畸变^[2]的情况增多,容易造成故障定位错误,上述方法的普适性无法得到保证。

针对以上问题,本文利用泛在物联网建设中逐渐完善的用电信息采集系统(Customer Electric Information Acquisition System, CEIAS)^[25]作为冗余信息源,基于改进的开关函数和适应度函数,提出了一种多源信息辅助分区的主动配电网故障区段定位方法。不同于利用D-S证据理论的信息融合方法^[25-26],本文将CEIAS中智能终端上传的电压报警信号作为故障辅助分区依据,进而基于分区结果采用离散智能优化算法求解。算例仿真结果验证了该

方法的有效性 with 实用性。

1 主动配电网故障区段定位模型

1.1 开关函数构建

分布式电源的接入使得配电网内部潮流可以呈现出双向流动的特性。类似地,配电网发生故障后的故障电流流向也不再仅仅是从系统电源到故障点,还会受到整个配网区域内系统电源与各个分布式电源的位置分布的影响。若规定从系统电源到用户端的方向为整个网络唯一的正方向, N 为开关总数量,则发生故障后,开关 $j(j=1,2,L,N)$ 处FTU上传的过流报警信号编码方式为^[20]

$$I_j = \begin{cases} 1 & \text{开关 } j \text{ 检测到正方向的故障电流} \\ 0 & \text{开关 } j \text{ 未检测到故障电流} \\ -1 & \text{开关 } j \text{ 检测到负方向的故障电流} \end{cases} \quad (1)$$

对于配电网中总共 M 个馈线区段,引入0-1变量 $x_i(i=1,2,L,M)$ 表示区段 i 的故障状态,故障时取值为1,反之为0。从开关 j 处将主动配电网分为两个半区,其中包含系统电源的称为上半区,另一部分称为下半区,则常用的主动配电网中开关 j 处FTU的期望状态函数,即开关函数为

$$I_{j,ori}^*(x) = \left[\prod_{S_1} K_{S_1} \left(1 - \prod_{i_1} x_{j,S_1}(i_1) \right) \right] \prod_{q=1}^Q x_j(q) - \left[\prod_{S_2} K_{S_2} \left(1 - \prod_{i_2} x_{j,S_2}(i_2) \right) \right] \prod_{p=1}^P x_j(p) \quad (2)$$

式中:“ Π ”代表逻辑“或”运算; K_{S_1} 、 K_{S_2} 分别表示上、下半区内各个电源的接入状态,接入取1,反之取0; x_{j,S_1} 、 x_{j,S_2} 分别为开关 j 到上半区电源 S_1 、下半区电源 S_2 所经过路径上的区段故障状态值; $x_j(p)$ 、 $x_j(q)$ 分别表示开关 j 对应上、下半区中的区段故障状态值; P 、 Q 分别为开关 j 对应上、下半区中的馈线区段总数。

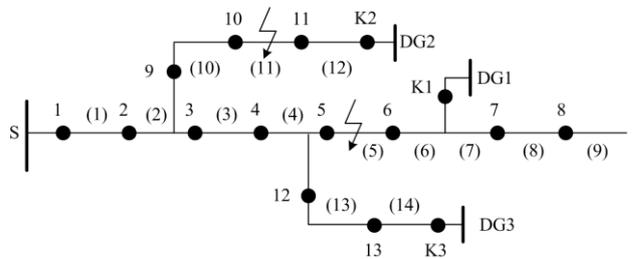


图 1 多 T 接线主动配电网拓扑图

Fig. 1 Topology diagram of active distribution network with many T-line sections

然而, 对于图 1 所示的多分支主动配电网(S 为系统电源, DG1、DG2、DG3 为分布式电源, K1、K2、K3 分别对应各分布式电源并入配电网的开关, 黑色圆点代表断路器或分段开关, 圆点间的线段代表馈线区段), 若区段 5 和 11 上发生双重故障, 则按照式(2)计算开关 3 处 FTU 的开关函数, 得到

$$I_{3,ori}^*(\mathbf{x}) = [(1-x_1|x_2)|(1-x_2|x_{10}|x_{11}|x_{12})] \times \\ (x_3|x_4|x_5|x_6|x_7|x_8|x_9|x_{13}|x_{14}) - \\ [(1-x_3|x_4|x_5|x_6)|(1-x_3|x_4|x_{13}|x_{14})] \times \\ (x_1|x_2|x_{10}|x_{11}|x_{12}) = 1 \times 1 - 1 \times 1 = 0 \quad (3)$$

但根据线路拓扑和实际情况判断可知开关 3 正确的函数值应该为 1, 这是由于上述开关函数计算公式中未对系统电源和配电网下游分支的分布式电源进行区分, 对于开关 3 来说, 系统电源对其故障电流流向起主导作用, 下游 3 号分布式电源送出的故障电流并不会经过开关 3。为避免该情况造成的故障误判, 本文在式(2)的基础上进行改进, 考虑系统电源的主导作用, 构造如式(4)所述的新型开关函数。

$$I_{j,imp}^*(x) = \begin{cases} 1, & F(I_j) = 1 \\ \left[\prod_{S_1} K_{S_1} \left(1 - \prod_{i_1} x_{j,S_1}(i_1) \right) \right] \prod_{q=1}^Q x_j(q) - \\ \left[\prod_{S_2} K_{S_2} \left(1 - \prod_{i_2} x_{j,S_2}(i_2) \right) \right] \prod_{p=1}^P x_j(p), & F(I_j) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$F(I_j) = \left(1 - \prod_{i_0} x_{j,S_0}(i_0) \right) \prod_{q=1}^Q x_j(q)$$

式中, x_{j,S_0} 为开关 j 到系统电源 S_0 所经过路径上的区段故障状态值。与式(2)不同的是, 上半区电源 S_1 将不再包含系统电源。

采用式(3)所示的开关函数后, 针对上述区段 5 和 11 上发生双重故障的情况, 对于开关 3, 有

$$F(I_3) = (1-x_1|x_2) \times \\ (x_3|x_4|x_5|x_6|x_7|x_8|x_9|x_{13}|x_{14}) = 1 \quad (5)$$

$$I_{3,imp}^*(x) = 1 \quad (6)$$

由此可以看出, 改造后的开关函数由于优先考虑了系统电源对故障电流流向的影响, 因而在计算 FTU 过流方向时不会出现上、下半区电源冲突的现象。

1.2 适应度函数构建

配电网发生故障后, FTU 将检测到的过流信号上传至主站, 但由于工作环境恶劣及通信干扰等问

题, 实际运行中可能会出现故障信息的漏报和误报, 影响故障区段定位的准确性。常用的处理方法是构建一个反应期望故障信息与实际接收信息之间差异的适应度函数, 将故障定位问题转化为求解目标函数的最小值问题, 继而利用智能寻优算法求解^[20-21]。传统的适应度函数为

$$Fit(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^N |I_j - I_j^*(\mathbf{x})| + \omega \sum_{i=1}^M |x_i| \quad (7)$$

式中: I_j 为 FTU 实际上传的故障过流信号; ω 为反映故障区段总数的权系数。

然而, 在采用上述适应度函数计算时, 由于主动配电网中开关函数值分为 1、0、-1 三种情况, 若某一故障信号出现 1 到 -1, 或 -1 到 1 的误报, 适应度函数值将会比出现其他情况的漏报、误报多 1, 与信息漏报、误报作为随机事件发生概率和具体信息畸变类型无关的事实不符。另一方面, 当配电网中一条最小通路上元件数量远远小于 10 000 左右时, 发生双重故障的概率远低于发生单一故障的概率, 而三重故障概率远低于双重故障概率^[27]。类似地, 随着通信系统的不断完善, 在不考虑通信系统发生大面积通信故障(通常是某一片区的大量信息畸变或缺失)的小概率场景后, 多处 FTU 同时出现漏报或误报的概率也大大降低。综合考量故障区段信息与 FTU 上传信号准确度的影响, 本文构造的新型适应度函数为

$$Fit(\mathbf{x}) = A \wedge \left(\sum_{j=1}^N (I_j \oplus I_j^*(\mathbf{x})) \right) + \omega \cdot B \wedge \left(\sum_{i=1}^M |x_i| \right) \quad (8)$$

式中: “ \oplus ” 代表广义“异或”运算, 即 I_j 与 $I_j^*(\mathbf{x})$ 数值不同时取 1, 相同则取 0; A、B 为指数函数的底数常量, 可根据多处故障信息畸变发生频次和多重故障发生频次之间的数据对比进行调整; ω 仍表示权系数, 本文取值为 0.6。

式(8)将传统适应度函数中 FTU 过流信号接收值与期望值之间“差的绝对值”变成了广义异或的逻辑运算, 实现了 FTU 误报、漏报类型的无差别处理。同时, 指数函数的形式也能更好地反映多重故障及多处信息畸变实际发生概率间的关系。

2 多源信息故障辅助分区方法

2.1 用电信息采集系统的利用

随着泛在电力物联网建设的不断推进, 在主动配电网自动化水平不断提高的同时, 用户智能终端的覆盖率也显著提升。智能终端与云-边计算平台以及通信模块相配合, 形成面向电力用户的具有信息

采集、数据处理和实时监控的用电信息采集系统(CEIAS)。考虑到配电网发生故障时,故障区域下游的智能终端由于无法召测电压或检测到的电压低于一定阈值,会向系统主站上传电压报警信息,且信息可靠性较高^[25]。因此,CEIAS 可以作为配电网故障区段定位过程中良好的辅助信息源。

考虑到智能终端基本安装于室内,避免了恶劣环境对设备运行的干扰,且为实现自动抄表、电能质量监管等功能,智能终端需频繁地与系统主站通信,其通信系统的工作状态得到了实时监测,故可忽略配电网故障与 CEIAS 通信系统故障同时发生的情况,即智能终端上报准确的电压报警信号。在传统配电网中,若系统电源到智能终端所在电力用户的最小通路上发生故障,则上传“1”的电压报警信号,无故障则不上传报警信号,显示为“0”。然而,由于主动配电网中分布式电源的存在,即使电力用户上游(相对于系统电源)发生故障,但受到邻近分布式电源的影响,智能终端也有可能不会发出电压报警信号。因此,在利用 CEIAS 辅助故障定位时,应提前通过仿真分析确定主动配电网内各个分布式电源的最大电压支撑范围。针对图 1 中的主动配电网,在靠近分布式电源的区段上进行故障仿真,得到各分布式电源的最大电压支撑范围如图 2 中虚线框所示。

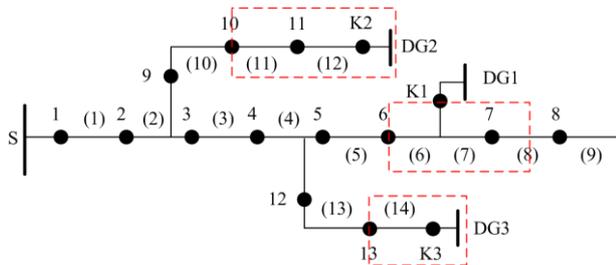


图 2 分布式电源最大电压支撑范围

Fig. 2 Maximum voltage support range of DGs

2.2 故障定位辅助分区方法

对于多 T 接线的主动配电网,分支节点将整个网络划分成了多个支路,若能确定故障区段处于哪条支路或哪些支路,则会大大缩小故障定位的寻优范围。在主动配电网中,不同分支可根据是否接入分布式电源以及分布式电源的接入位置分为以下三种: 1) 分支无分布式电源(I 型分支); 2) 分支末端接入分布式电源(II 型分支); 3) 分支中部接入分布式电源且其最大电压支撑范围未覆盖分支末端区段(III 型分支)。

考虑 CEIAS 电压报警信号的触发条件和分布式电源的电压支撑范围,对于 I 型分支,选取分支

末端的智能终端作为该分支的关键终端,如图 3 中的 LT1、LT2; 对于 II 型分支,应选取分支中靠近末端且未被分布式电源电压支撑范围覆盖的智能终端作为关键终端,如图 3 中的 LT4、LT5; 而对于 III 型分支,虽然位于分布式电源上、下半部的区段对应的外部拓扑不同,但为简便起见,可仅选取分支末端的智能终端作为关键终端,对应图 3 中的 LT3。

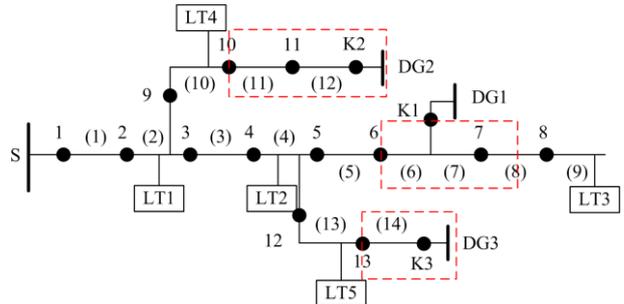


图 3 CEIAS 关键终端选取示意图

Fig. 3 Selection of the key terminals of CEIAS

各分支的关键终端确定后,系统主站可根据各个关键终端上传的电压报警信息初步推断故障区域。例如,当 LT1—LT5 上传报警信号集合为 $[0,0,0,1,0]$ 时,便可确定区段 10 发生了故障,同时系统电源通向各关键终端最小路径未覆盖的区域也有可能发生故障,即图中的区段 11、12、14。上文中已经提到,配电网同时发生三重及以上故障的概率极低,不失普适性,在故障定位时可只考虑配网单一故障和双重故障的情况。这样利用 CEIAS 关键终端的报警信号就能对配电网故障进行辅助分区,缩小定位范围,提高优化算法的寻优效率。图 3 中所有可能出现的关键终端报警信号集合与对应故障辅助分区结果如表 1 所示。

表 1 CEIAS 故障辅助分区结果

Table 1 Results of secondary fault partitions with CEIAS

报警信号集	确定故障区段集	可疑故障区段集
$[0,0,0,1]$	[13]	$[0,11,12,14]$
$[0,0,0,1,0]$	[10]	$[0,11,12,14]$
$[0,0,1,0,0]$	$[5,6,7,8,9]$	$[0,11,12,14]$
$[0,0,1,1,0]$	$[5,6,7,8,9];[10]$	[0]
$[0,0,1,0,1]$	$[5,6,7,8,9];[13]$	[0]
$[0,0,0,1,1]$	$[10];[13]$	[0]
$[0,1,1,0,1]$	[3,4]	$[0,5,6,7,8,9,11,12,13,14]$
$[0,1,1,1,1]$	$[3,4];[10]$	[0]
$[1,1,1,1,1]$	[1,2]	$[0,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14]$

表 1 中,确定故障区段和可疑故障区段中每个“[]”里的区段集合在优化中只能取其中之一。可疑故障区段集中若优化结果为 0,则表示对应集合

中无区段故障的情况, 结果非 0 则表示对应区段发生故障, 主动配电网处于双重故障状态。从表 1 中可以看出, 除了在所有关键终端均发出报警信号的情况下, 为判断主动配电网是否发生双重故障, 需要对所有区段进行寻优, 其余情况下均将配网区段分为了确定故障区段集、可疑故障区段集以及剩下的正常区段集, 达到了辅助分区的效果。

经上述故障辅助分区后, 建立以式(6)适应度值最小为目标函数, 式(4)为开关函数且包含二元离散变量的故障区段定位优化模型, 可利用离散粒子群优化(Discrete Particle Swarm Optimization, DPSO)算法^[28]等离散智能寻优算法进行求解。

3 算例分析

本文采用图 4 中的主动配电网模型进行算法分析, 图中的符号含义与图 1—图 3 相同。首先, 根据故障仿真得到各分布式电源的最大电压支撑范围, 如图 5 中虚线框所示。进而可参照 2.2 节中的故障定位辅助分区方法确定用电信息采集系统关键终端的位置, 如图 5 中的 LT1—LT7。

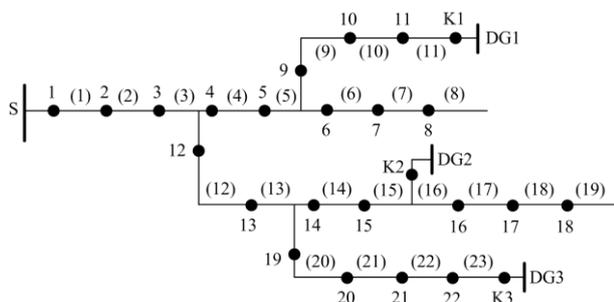


图 4 主动配电网算例模型

Fig. 4 Test example of active distribution network

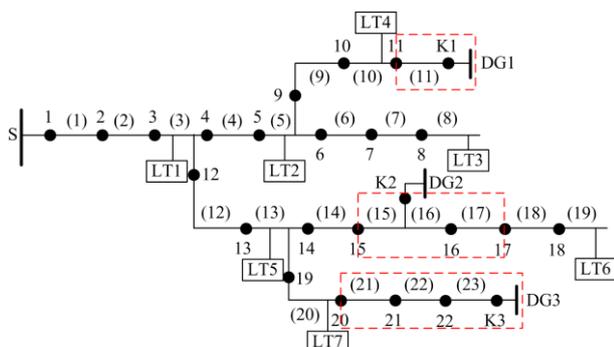


图 5 算例配电网 CEIAS 关键终端位置示意图

Fig. 5 Locations of the key terminals of CEIAS in the test example AND

本文选取离散粒子群算法进行求解, 算法参数设置如下: DPSO 种群规模 $N=100$, 种群空间维数 $D=2$, 惯性权重 $w=0.8$, 学习因子 $c_1=c_2=0.9$ 。假设

所有的分布式电源均接入配电网运行, 即 $K_1=K_2=K_3=1$ 。

为验证本文所提出的主动配电网故障区段定位方法的准确性和有效性, 首先对配电网发生单一故障的情况进行仿真, 分别设置区段 6、13 为故障区段。当区段 6 发生故障时, 用电信息采集系统关键终端上传的电压报警信号集为 $[0,0,1,0,0,0]$, 从而可以得到确定故障区段集 $[6,7,8]$ 和可疑故障区段集 $[0,11,21,22,23]$, 然后利用 DPSO 算法进行寻优。同理, 当区段 13 发生故障时, CEIAS 的报警信号集为 $[0,0,0,1,1,1]$, 得到确定故障区段集 $[12,13]$ 和可疑故障区段集 $[0,11,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23]$ 。两种故障情况下的测试结果分别见表 2、表 3。

表 2 区段 6 故障测试结果

FTU 故障过流信号集	定位结果	畸变位置
$[1,1,1,1,1,1,0,0,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,0,0,0,-1,-1,-1,-1]$	(6)	无
$[1,-1,1,1,1,1,0,0,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,0,0,0,-1,-1,-1,-1]$	(6)	2
$[1,1,1,1,1,1,0,0,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,0,-1,0,0,0,-1,-1,-1,-1]$	(6)	14
$[1,1,1,1,0,1,0,0,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,0,0,0,-1,-1,-1,-1]$	(6)	5,21
$[1,1,1,1,1,1,1,0,0,-1,0,0,-1,-1,-1,-1,-1,-1,0,1,0,-1,-1,-1,-1]$	(6)	10,11,17

表 3 区段 13 故障测试结果

FTU 故障过流信号集	定位结果	畸变位置
$[1,1,1,-1,-1,0,0,0,-1,-1,-1,1,1,-1,-1,-1,0,0,0,-1,-1,-1,-1]$	(13)	无
$[1,1,1,-1,-1,0,-1,0,-1,0,-1,-1,-1,1,1,-1,-1,-1,0,0,0,-1,-1,-1,-1]$	(13)	7
$[1,1,1,-1,-1,0,0,0,-1,-1,-1,1,1,1,-1,-1,-1,0,0,0,-1,-1,0,-1]$	(13)	21
$[1,1,1,1,-1,0,0,0,-1,-1,-1,1,1,1,-1,-1,1,0,0,0,-1,-1,-1,-1]$	(13)	4,16
$[1,1,1,-1,-1,0,0,0,0,-1,-1,-1,1,1,-1,-1,0,0,0,-1,-1,-1,-1]$	(13)	9,12,20

考虑到配电网还可能发生小概率的双重故障情况, 此处设置区段 4 和区段 7 同时发生故障的场景, 可得到用电信息采集系统提供的电压报警信号集为 $[0,1,1,1,0,0,0]$, 对应的确定故障区段集为 $[4,5]$, 可疑故障区段集为 $[0,6,7,8,9,10,11,21,22,23]$ 。该双重故障情况下的故障区段定位结果如表 4 所示。

从表 2—表 4 中的测试结果中可以看出, 主动

配电网不论是发生单一故障还是双重故障，也不论 FTU 上传的过流报警信号是否发生误报或漏报，该方法都能够实现准确的故障区段定位，说明所提出的多源信息辅助分区的故障区段定位方法具有良好的普适性和容错性。

表 4 区段 4、7 故障测试结果

Table 4 Test results of fault at Section 4 and 7

FTU 故障过流信号集	定位结果	畸变位置
[1,1,1,1,-1,1,1,0,-1,-1,-1,-1,-1,-1,0,0,0,-1,-1,-1,-1]	(4),(7)	无
[1,1,1,1,-1,1,1,0,-1,0,-1,-1,-1,-1,-1,0,0,0,-1,-1,-1,-1]	(4),(7)	10
[1,1,1,1,-1,1,1,0,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,0,0,0,-1,-1,-1,-1]	(4),(7)	16
[1,1,1,1,-1,1,1,0,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,0,0,0,1,-1,-1,-1]	(4),(7)	19
[1,1,1,1,-1,1,1,0,-1,-1,-1,0,-1,-1,-1,0,1,0,-1,-1,-1,-1]	(4),(7)	12,17

此外，为了验证本文提出的 CEIAS 信息辅助分区与离散粒子群算法相结合进行求解的优势，这里将该方法(方法 1)与 FTU 单源信息与 DPSO 结合的方法(方法 2)以及 FTU 单源信息与二进制粒子群算法(BPSO)相结合的方法(方法 3)进行对比分析。其中方法 2 采用 DPSO 算法时也存在忽略主动配电网同时发生三重及以上故障情况的假定条件，但由于未利用多种信息，DPSO 在求解时只能将配电网简单划分成两个半区进行故障定位寻优。选取表 2 和表 3 中的三种故障类型，分别对上述三种故障定位方法仿真 50 次，测试结果如表 5 所示。

表 5 不同方法故障定位结果对比

Table 5 Comparison of fault location results of different methods

故障区段	(6)	(13)	(13)
FTU 畸变位置	无	无	9,12,20
定位结果	方法 1	(6)	(13)
	方法 2	(6)	(13)
	方法 3	(6)	(13)
最优解出现 平均代数	方法 1	1	1
	方法 2	1.5	1.8
	方法 3	72.4	61.7
未成熟收敛 次数	方法 1	0	0
	方法 2	0	7
	方法 3	34	19

从表 5 中的对比结果可知，方法 1(本文提出的方法)和方法 2 由于将问题简化后采用的 DPSO 算法寻优范围大幅度缩小，且在寻优效果方面比 BPSO

算法更好，故在种群规模相同的情况下其最优解出现时平均迭代进行到的代数和未成熟收敛次数明显低于方法 3，并且方法 1 和方法 2 在最优解出现后再经过代数或数十代后所有粒子均能收敛至最优解，这在 BPSO 算法中是无法实现的。但另一方面，由于方法 2 和方法 3 仅利用 FTU 过流报警信号作为信息来源，在主动配电网故障定位中不可识别畸变发生概率明显增大的背景下，方法 2 和方法 3 很容易出现定位误判。如表 5 中在区段 13 发生故障，同时第 9、12、20 号开关处 FTU 出现信息畸变时，方法 2 和方法 3 可能得出区段(3)、(13)或(21)故障这三种定位结果，且其适应度值完全相同。而本文提出的方法利用 CEIAS 作为辅助信息源，大大提高了故障区段定位的容错性。

4 结论

在分布式可再生能源渗透率进一步提升以及配电网自动化、智能化发展的背景下，本文针对现有主动配电网故障区段定位问题，提出了利用多源信息辅助分区的故障区段定位方法。首先分析了常用配电网故障区段定位方法中开关函数在多分布式电源接入的主动配电网中的适用性，基于系统电源的特殊性对现有开关函数进行了改进。其次针对定位优化算法中适应度函数与配电网故障概率和 FTU 信息畸变概率吻合度较低的情况，构造了新型的适应度函数表达形式。在上述故障定位模型的基础上，利用用电信息采集系统作为辅助信息源，提前确定故障发生区域及可疑故障区域的区段范围，进而采用离散粒子群算法进行求解。仿真结果表明，本文提出的故障区段定位方法有效适应了现有主动配电网的故障特点及信息源特点，提高了故障定位算法效率，同时避免了传统区段定位方法应用中可能出现的误判问题和算法的“未成熟收敛”问题。

参考文献

- [1] BILLNTION R, JONNAVITHULA S. Optimal switching device placement in radial distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3): 1646-1651.
- [2] 彭正良. 基于改进 D-S 证据理论的配电网故障定位与分析[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [3] PENG Zhengliang. Distribution network fault location and analysis based on improved D-S evidence theory[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [4] 何正友. 配电网故障诊断[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2011.
- [4] ZHAO J, HOU H, GAO Y, et al. Single-phase ground

- fault location method for distribution network based on traveling wave time-frequency characteristics[J]. *Electric Power Systems Research*, 2020, 186.
- [5] 牛耕, 周龙, 裴玮, 等. 低压有源配电网在线故障区间定位与识别方法[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(9): 2525-2538.
- NIU Geng, ZHOU Long, PEI Wei, et al. On-line fault section location and classification technique for low voltage active distribution network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(9): 2525-2538.
- [6] HOU Kaiyuan, SHAO Guanghui. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(2): 119-125. DOI: 10.1186/s41601-018-0086-0.
- [7] USMAN M U, FARUQUE M O. Validation of a PMU based fault location identification method for smart distribution network with photovoltaics using real-time data[J]. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2018, 12(21): 5824-5833.
- [8] 张维, 宋国兵, 豆敏娜, 等. 基于自适应重合闸的配电网快速故障定位与隔离方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(18): 60-67.
- ZHANG Wei, SONG Guobing, DOU Minna, et al. A quick fault location and isolation method in distribution network based on adaptive reclosure[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(18): 60-67.
- [9] JIN Tao, LU Siyuan, ZHANG Yizhen, et al. A novel fault section location method based on binary global-best harmony search algorithm for electric power distribution systems[C] // 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia, May 21-24, 2019, Chengdu, China: 262-269.
- [10] 孙艳明. 含分布式电源的配电网故障定位方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- SUN Yanming. Research on distribution network fault location methods with DG[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [11] MA Yi, MAO Yi, LI Huijiao. An improved matrix algorithm for fault location in distribution network[C] // 2013 Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications, January 16-18, 2013, Hong Kong, China: 289-293.
- [12] 翁蓝天. 基于链表的配电网供电中断型故障诊断方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
- WENG Lantian. Distribution network power supply interrupted fault diagnosis method based on chain table[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010.
- [13] 梅念, 石东源, 段献忠. 基于过热区域搜索的多电源复杂配电网故障定位方法[J]. *电网技术*, 2008, 32(12): 95-99.
- MEI Nian, SHI Dongyuan, DUAN Xianzhong. A fault location algorithm for complex multi-source distribution networks based on over-heated region searching[J]. *Power System Technology*, 2008, 32(12): 95-99.
- [14] 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): 152-158.
- 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): 152-158.
- [15] 梁梦可, 滕欢, 李雪松, 等. 考虑非平衡特性的辐射状配电网故障定位方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2020, 35(2): 61-68.
- LIANG Mengke, TENG Huan, LI Xuesong, et al. A novel fault location algorithm for radial distribution networks considering the unbalanced characteristics[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(2): 61-68.
- [16] 张磐, 张愉, 丁一, 等. 基于微扰法的低压有源配电网故障定位方法[J]. *中国电力*, 2018, 51(12): 63-71.
- ZHANG Pan, ZHANG Yu, DING Yi, et al. Fault location for low voltage active distribution network based on perturbation method[J]. *Electric Power*, 2018, 51(12): 63-71.
- [17] 庞清乐, 刘昱超, 李希年, 等. 基于电流极性比较的主动配电网故障定位方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(20): 101-108.
- PANG Qingle, LIU Yuchao, LI Xinian, et al. Current polarity comparison based fault location for active distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(20): 101-108.
- [18] 朱逸凡, 赵宏程, 陈争光, 等. 适用于逆变型电源接入的配电网故障方向判别元件[J]. *中国电力*, 2019, 52(5): 76-82.
- ZHU Yifan, ZHAO Hongcheng, CHEN Zhengguang, et al. Fault direction discriminating element used for the distribution network with IIG integration[J]. *Electric Power*, 2019, 52(5): 76-82.
- [19] HUANG X, XIE Z, HUANG X. Fault location of distribution network based on improved cuckoo search

- algorithm[J]. IEEE Access, 2020, 8: 2272-2283.
- [20] 金涛, 李鸿南, 刘对. 基于 BPSOGA 的含风电机组的配电线路故障区段定位[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 27-33.
JIN Tao, LI Hongnan, LIU Dui. Faulty section location based on BPSOGA for distribution line with wind turbine generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 27-33.
- [21] GE J, ZHANG J, HU X, et al. A fault location method of error correction based on ant colony algorithm for distribution network[C] // 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, 2017, Chongqing, China: 18-21.
- [22] 张志文, 刘军, 周冠东, 等. 基于改进二进制万有引力算法的含 DG 配电网故障定位[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(4): 30-34.
ZHANG Zhiwen, LIU Jun, ZHOU Guandong, et al. Fault location in distribution network with distributed generations based on improved binary gravitational search algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(4): 30-34.
- [23] 陈辉, 周羽生, 刘诗涵, 等. 基于改进和声算法的含 DG 配电网故障定位[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(2): 123-128, 134.
CHEN Hui, ZHOU Yusheng, LIU Shihan, et al. Fault location of distribution network with distributed generation based on an improved harmony algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2): 123-128, 134.
- [24] XIE X, GAO Z, ZHANG J, et al. A fault location method based on cause-effect network in active distribution network[C] // Proceedings of 2019 IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference, 2019, Chongqing, China: 837-842.
- [25] 李伟健. 基于多源信息的配电网高容错性故障精确定位方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
LI Weijian. Research on distribution network high fault-tolerant fault accuracy location method based on multi-source information[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [26] 高湛军, 李思远, 彭正良, 等. 基于网络树状图和改进 D-S 证据理论的配电网故障定位方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6): 65-71.
GAO Zhanjun, LI Siyuan, PENG Zhengliang, et al. Fault location method of distribution network based on tree structure diagram and improved D-S evidence theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 65-71.
- [27] 颜秋容, 曾庆辉. 多重故障对配电网可靠性指标的影响度[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 108-111.
YAN Qiurong, ZENG Qinghui. Influence degree of multiple faults on reliability indices of distribution system[J]. Power System Technology, 2010, 34(8): 108-111.
- [28] 郭文忠, 陈国龙. 离散粒子群优化算法及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.

收稿日期: 2019-11-03; 修回日期: 2020-04-29

作者简介:

程云祥(1971—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制, 继电保护。E-mail: ch-yunxiang@163.com

(编辑 周金梅)