

基于改进开关函数的弹性配电网复杂多重故障区段定位方法

王秋杰^{1,2}, 姬晨旭^{1,2}, 谭洪^{1,2}, 李振兴^{1,2}, 翁汉琰^{1,2}, 谭坤侨³

(1. 三峡大学 新能源微电网湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

3. 国网湖北省电力有限公司 恩施市供电公司, 湖北 恩施 445000)

摘要:极端灾害下当配电网发生复杂多重故障时, 现有开关函数难以完全描述多重故障电流方向特征, 导致配电网故障区段定位方法的定位准确性和容错性较差, 对此提出一种基于改进开关函数的弹性配电网复杂多重故障区段定位方法。分析现有开关函数的不足, 根据开关函数构建逻辑, 提出一种完全描述多重故障电流方向特征的开关函数; 将微型同步相量测量装置故障信息和区域保护断路器动作信息计入配电网故障区段定位, 构建基于多源信息的配电网故障区段定位模型; 利用黑翅鸢算法求解配电网故障区段定位模型, 并给出故障区段定位流程。IEEE 33节点配电系统仿真实验表明: 所提配电网故障区段定位方法在复杂多重故障下的定位准确性和容错性有较大提高。

关键词:弹性; 配电网; 故障区段定位; 复杂多重故障; 改进开关函数; 黑翅鸢算法

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202509003

0 引言

近年来, 为减小极端天气对配电网带来的停电损失, 台风、冰雪等极端天气引发的配电网停电事故逐渐引起人们关注^[1], 学术界和工业界提出了弹性配电网的概念^[2]。根据弹性配电网的定义, 配电网弹性提升方案可划分为3个阶段: 灾前防御规划^[3], 灾中抵御、吸收和响应^[4], 灾后恢复^[5]。灾中的故障隔离和重构、灾后的短时间尺度供电恢复都以准确获取故障区段为前提^[6], 因此, 准确定位故障区段对弹性配电网建设和发展具有重要意义。

随着配电网自动化系统的不断完善, 利用馈线终端单元(feeder terminal unit, FTU)遥信信息的故障区段定位方法具有定位速度快、通用性好等特点, 其应用越来越广泛^[7]。由于FTU工作环境恶劣, FTU遥信信息漏报和误报成为该定位方法应用的最大不利因素^[8]。故障区段定位容错性是指非完备信息下准确定位故障区段的能力, 提升定位容错性是解决FTU遥信信息漏报和误报最为直接、有效的方案^[9]。基于优化模型的故障区段定位方法因利用配电网广域节点状态信息进行故障定位, 具有较好的容错能力, 故得到了广泛研究。

基于优化模型的故障区段定位容错原理为: 通过开关函数计算节点期望状态, 根据FTU采集节点实际状态, 利用最小集理论构建期望和实际之间的

逼近模型。根据该原理, 开关函数是由区段状态和配电网拓扑结构计算节点期望状态的逻辑函数, 决定着故障区段定位模型的适用故障类型。故障区段定位模型建立初期, 文献[10-11]构造了二次规划模型, 其采用的开关函数只描述了单电源配电网发生单重故障时的故障电流方向特征, 故该模型只适用于单电源配电网单重故障。为解决这一问题, 许多专家对故障电流方向形成逻辑进行分析, 并改进了开关函数, 故适用于多电源配电网单重故障和多电源配电网简单多重故障的故障区段定位模型被陆续提出^[12-15]。文献[12]构造了线性整数规划模型, 其开关函数描述了多电源配电网单重故障电流方向特征; 文献[13-15]构造了线性整数规划模型, 其开关函数描述了多电源配电网单重故障和简单多重故障电流方向特征。但上述开关函数均难以完全描述多重故障电流方向特征, 导致现有故障区段定位模型难以适用于复杂多重故障。

常规天气下, 单重故障为主要故障形式, 现有故障区段定位模型的性能基本能够满足供电恢复要求。极端天气下, 其定位场景发生了较大变化, 配电网发生多重故障的概率大幅度提升, 然而现有故障区段定位模型在复杂多重故障下难以准确定位故障区段^[16-17]。因此, 解决多重故障和FTU遥信信息漏报、误报情况下配电网故障区段定位的准确性和容错性问题是提升配电网弹性的首要目标。

对此, 本文提出一种基于改进开关函数的弹性配电网复杂多重故障区段定位方法。首先, 分析开关函数构建逻辑, 根据多重复杂故障下故障电流方向分布特征, 建立一种完全描述多重故障电流方向特征的开关函数, 解决故障区段定位模型对多重复

收稿日期: 2024-12-19; 修回日期: 2025-04-29

在线出版日期: 2025-09-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52307109)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52307109)

杂故障的适应性;利用黑翅鸢算法(black-winged kite algorithm, BKA)求解配电网故障区段定位模型,提升故障区段定位模型的收敛速度和改善局部收敛性。算例结果表明:本文所提配电网故障区段定位方法在复杂多重故障和FTU遥信信息漏报、误报情况下的准确性和容错性有明显提高。

1 故障区段定位模型

1.1 目标函数

根据配电网故障区段定位的原理^[9],本文所建立的目标函数为:

$$F(\mathbf{x}) = M - \left[\sum_{j=1}^J (I_j - I_j^*(\mathbf{x})) + \omega \sum_{j=1}^J |x_j| \right] \quad (1)$$

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{区段}(j)\text{故障} \\ 0 & \text{区段}(j)\text{无故障} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $F(\mathbf{x})$ 为解集中每个解(区段状态向量 $\mathbf{x}$)所对应的适应度值; J 为FTU总数; M 为FTU总数的2倍; I_j 为第 j 个FTU(即 FTU_j)实际上传的故障电流信息; $I_j^*(\mathbf{x})$ 为计算得到的 FTU_j 的期望故障电流信息; x_j 为区段(j)的状态; ω 为根据故障诊断最小集理论设置的权重系数,为避免误判现象发生,一般取 $\omega=0.5$; $\sum_{j=1}^J |x_j|$ 为所有故障区段数目的总和。

1.2 节点期望状态约束

开关函数是计算节点期望状态的逻辑函数,因此构建节点期望状态约束需要对开关函数进行分析。

1.2.1 传统开关函数

针对配电网故障区段定位问题,传统开关函数中节点状态期望值 I_j^* 一般由式(3)~(5)计算。

$$I_{ju}(\mathbf{x}) = \prod_u \left[k_{j,u} \left(1 - \prod_{j, S_u} x_{j, S_u} \right) \right] \prod_{j, d} x_{j, d} \quad (3)$$

$$I_{jd}(\mathbf{x}) = - \prod_d \left[k_{j,d} \left(1 - \prod_{j, S_d} x_{j, S_d} \right) \right] \prod_{j, u} x_{j, u} \quad (4)$$

$$I_j^*(\mathbf{x}) = I_{ju}(\mathbf{x}) + I_{jd}(\mathbf{x}) \quad (5)$$

式中: $I_{ju}(\mathbf{x})$ 、 $I_{jd}(\mathbf{x})$ 分别为正向、反向节点期望状态; x_{j, S_u} 、 x_{j, S_d} 分别为节点 j 至上游电源、下游电源之间区段的状态; M_j 、 N_j 分别为节点 j 上游、下游的电源数量; $x_{j, u}$ 、 $x_{j, d}$ 分别为节点 j 上游、下游区段的状态; M'_j 、 N'_j 分别为节点 j 上游、下游的总区段数; $k_{j, u}$ 、 $k_{j, d}$ 分别为节点 j 上游、下游分布式电源(distributed generator, DG)的接入情况, DG接入时,其值为1,否则为0;算子 $\prod$ 表示逻辑“或”。

现有开关函数难以完全描述多重故障电流方向特征,使故障区段定位模型难以适用于复杂多重故障,其背后的根本原因在于:复杂多重故障下,若多

源配电网中变电站(substation, Sub)作为主电源所提供的故障电流与DG提供的故障电流在共享支路上反向,则现有开关函数无法正确计算出该部分节点的期望状态。以图1所示的复杂多重故障下多电源配电网故障电流分布为例,当配电网发生复杂双重故障时,主电源提供的故障电流与DG提供的故障电流在共享支路上反向,计算各电源共享支路上的节点状态:由式(3)可计算得到 $I_{ju}(\mathbf{x})=1$,由式(4)可计算得到 $I_{jd}(\mathbf{x})=-1$,而由式(5)却计算得到 $I_j^*=0$,这表示该节点没有故障电流流过。实际共享支路上的节点故障电流方向取决于主电源提供的故障电流与DG提供的故障电流的大小。因此,由现有开关函数计算所得的节点期望状态与实际不符。

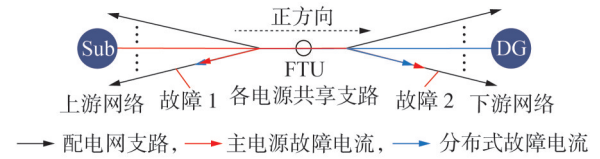


图1 复杂多重故障下多电源配电网故障电流分布示意图

Fig.1 Schematic diagram of fault current distribution in multi-source distribution network under complex and multiple faults

1.2.2 改进开关函数

利用故障区段假设和配电网拓扑结构,可得到 FTU_j 的期望状态。在此之前,以 FTU_j 为分界点,将整个配电网划分成2个部分,包含Sub的部分为上游网络,另一部分为下游网络。设定正方向为主电源流向负荷或者DG,假设配电网中 FTU_j 在发生故障时检测到正向故障电流,则 FTU_j 必须同时满足3个条件:①在 FTU_j 上游网络中至少有1个电源;②从 FTU_j 到上游网络中每个电源的路径中,至少有1条路径没有故障;③在 FTU_j 下游网络中,至少有1个区段发生故障。图2展示了 FTU_j 中流过正向电流的3个条件,则 FTU_j 的正向节点期望状态可表示为:

$$I_{ju}(\mathbf{x}) = \bigcup_{k=1}^{N_{S_u}} \left(\bigcap_{u \in \Omega_{\text{FTU}_j, S_{uk}}} x_u^k \right) \bigcap \left(\bigcup_{l \in \Omega_{\text{FTU}_j, d}} x_l \right) \quad (6)$$

式中: N_{S_u} 为 FTU_j 上游网络中的电源数量; $\Omega_{\text{FTU}_j, S_{uk}}$ 为 FTU_j 到上游电源 S_{uk} 的路径上的区段集合; x_u^k 为 $\Omega_{\text{FTU}_j, S_{uk}}$ 内区段(u)的状态; $\Omega_{\text{FTU}_j, d}$ 为 FTU_j 下游网络中全部区段的集合;“ $\bigcup$ ”表示逻辑“或”;“ $\bigcap$ ”表示逻辑“与”;“ $\neg$ ”表示逻辑“非”。

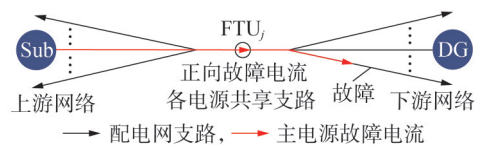


图2 FTU流过正向电流的条件

Fig.2 Conditions for forward current flow in FTU

假设配电网中的FTU_j在发生故障时检测到反向故障电流,则FTU_j必须同时满足3个条件:①在FTU_j的下游网络中至少有1个电源;②从FTU_j到下游网络中每个电源的路径中,至少有1条路径没有发生故障;③在FTU_j上游网络中,至少有1个区段发生故障。图3展示了FTU_j中流过反向电流的3个条件,因此,FTU_j的反向节点期望状态可表示为:

$$I_{jd}(\mathbf{x}) = -\bigcup_{k=1}^{N_{S_d}} \left(\bigcup_{m \in \Omega_{FTU_j, S_{dk}}} x_m^k \right) \bigcap \left(\bigcup_{l \in \Omega_{FTU_j, u}} x_l \right) \quad (7)$$

式中: N_{S_d} 为FTU_j下游网络中的电源数量; $\Omega_{FTU_j, S_{dk}}$ 为FTU_j到下游电源 S_{dk} 的路径上的区段集合; x_m^k 为 $\Omega_{FTU_j, S_{dk}}$ 内区段(m)的状态; $\Omega_{FTU_j, u}$ 为FTU_j上游网络中全部区段的集合。

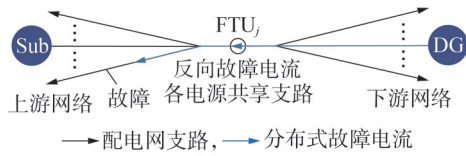


图3 FTU流过反向电流的条件

Fig.3 Conditions for reverse current flow in FTU

以图4所示的配电网并网系统典型拓扑为例,当配电网发生复杂多重故障(图4中为区段(3)和区段(7)发生故障)时,规定电流正方向为主电源流向负荷或DG,对于共享支路上的节点3和节点7,主电源故障电流和分布式故障电流同向且为正向故障电流;而对于共享支路上的节点5和节点6,主电源故障电流与DG故障电流反向,这导致该部分节点上的故障电流方向无法确定。

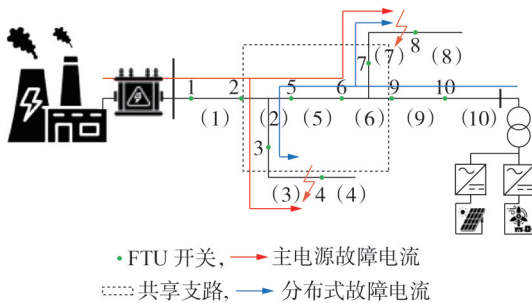


图4 配电网并网系统典型拓扑

Fig.4 Typical topology of distribution grid-connected system

主电源通常由同步发电机接入电网,短路容量大,主干线阻抗低,具有较强的短路电流输出能力。而DG通常由逆变器接入电网,受到逆变器功率限制,其短路容量较小,同时分支支路阻抗较高,故输出的短路电流通常较小。综上所述,在复杂多重故障下,共享支路上的节点会同时流过主电源和分布式故障电流,且主电源故障电流始终大于分布式故障

障电流,当二者同向、反向时,共享支路上的故障电流方向均为正。所有故障类型下,FTU期望状态的可能组合如表1所示。

表1 FTU期望状态的可能组合

Table 1 Possible combinations of expected states for FTU

$I_{ju}(\mathbf{x})$	$I_{jd}(\mathbf{x})$	$I_j^*(\mathbf{x})$	说明
1	0	1	FTU探测到正向故障电流
0	-1	-1	FTU探测到反向故障电流
0	0	0	FTU没有探测到故障电流
1	-1	1	FTU探测到正向故障电流

根据表1,FTU节点期望状态与正向节点期望状态、反向节点期望状态之间的逻辑关系可表示为:

$$I_j^*(\mathbf{x}) = I_{ju}(\mathbf{x}) - \overline{I_{ju}(\mathbf{x})} \bigcap I_{jd}(\mathbf{x}) \quad (8)$$

综合上述分析,可得出改进后的开关函数为:

$$\begin{cases} I_{ju}(\mathbf{x}) = \bigcup_{k=1}^{N_{S_u}} \left(\bigcup_{u \in \Omega_{FTU_j, S_{uk}}} x_u^k \right) \bigcap \left(\bigcup_{l \in \Omega_{FTU_j, d}} x_l \right) \\ I_{jd}(\mathbf{x}) = -\bigcup_{k=1}^{N_{S_d}} \left(\bigcup_{m \in \Omega_{FTU_j, S_{dk}}} x_m^k \right) \bigcap \left(\bigcup_{l \in \Omega_{FTU_j, u}} x_l \right) \\ I_j^*(\mathbf{x}) = I_{ju}(\mathbf{x}) - \overline{I_{ju}(\mathbf{x})} \bigcap I_{jd}(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (9)$$

1.3 故障支路约束

随着通信技术和广域测量技术的不断发展,微型同步相量测量装置(micro-synchronous phasor measurement unit, μ PMU)在配电网中的应用愈加广泛。 μ PMU能获取配电网中高精度、同步的电气相量数据,其幅值和相角误差分别仅为0.5%和0.01°,这为配电网故障区段定位提供了条件。

配电网 μ PMU优化配置常采用以下模型^[18]:

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^{N_1} c_i k_i \\ \text{s.t. } \mathbf{A}_{\text{rel}} \mathbf{K} \geq \mathbf{E}_{N_1 \times 1} \\ k_i = \begin{cases} 1 & i \text{ 为非拓扑末端节点且 } \sum_{j=1}^{N_1} a_{ij} \geq b \\ 0 & i \text{ 为拓扑末端节点} \end{cases} \\ \mathbf{K} = [k_1, \dots, k_i, \dots, k_{N_1}]_{N_1 \times 1}^T, \quad \mathbf{E}_{N_1 \times 1} = [1, \dots, 1]_{N_1 \times 1}^T \end{cases} \quad (10)$$

式中: c_i 为 $\mathbf{K}$ 的权重系数,表示在节点 i 安装 μ PMU的成本,取 $c_i=1$; k_i 为系统节点 i 的 μ PMU配置情况, $k_i=1$ 、 $k_i=0$ 分别表示节点 i 配置、未配置 μ PMU; N_1 为安装的 μ PMU数量; $\mathbf{A}_{\text{rel}}$ 为节点关联矩阵,表示节点间连接关系,若 $\mathbf{A}_{\text{rel}}$ 的元素 $a_{ij}=1$,则表示节点不相连,规定 $\mathbf{A}_{\text{rel}}$ 的对角线元素等于1;取 $b=3$,表示连接支路数超过3条的节点上配置 μ PMU。

根据 μ PMU配置的位置,当配电网发故障时,利用 μ PMU采集的故障信息,可以确定故障支路^[19]。对于配电网而言,故障区段一定位于故障支路上,因

此,故障支路约束可表示为:

$$x_1 \cup x_2 \cup \dots \cup x_j = 1 \quad j \in \Omega_{LS, \mu} \quad (11)$$

式中: $\Omega_{LS, \mu}$ 为 μ PMU 所确定的故障支路上的区段集合。

μ PMU 数据传输以光纤通信为主,本文假设 μ PMU 在极端灾害下不发生漏报和误报。

1.4 故障重数约束

即使在极端天气下,三重以上故障出现的概率也非常小,因此限定极端天气下的最大故障重数 $f_{\max}=3$ 。故障重数约束为:

$$\sum_{j \in \Omega_{LS}} x_j \leq f_{\max} \quad (12)$$

式中: Ω_{LS} 为配电网中所有区段的集合。

1.5 停电区域约束

在 DG 接入电网前,配电网通常采用三段式电流保护和电流速断保护方案。DG 接入电网后,配电网从单电源辐射型网络转化为多电源多向型网络,原有保护无法适用,故学者们陆续提出了多种保护方案^[20-21],例如自适应电流速断保护、距离保护、差动保护、区域保护等。本文采用区域保护作为 DG 接入配电网后的保护方案^[21],其保护原理为:

$$\begin{cases} M_1 = (E=1) \cap \sum (C_z=0) = 1 \Rightarrow \\ \text{保护动作,向上级区域发送闭锁信号} \\ M_1 = (E=1) \cap \sum (C_z=0) = 0 \Rightarrow \text{保护不动作} \end{cases} \quad (13)$$

式中: M_1 为区域动作保护信号, $M_1=1$ 、 $M_1=0$ 分别表示保护动作、不动作; E 为区域内故障判据, $E=1$ 、 $E=0$ 分别表示区域内区段故障、正常; C_z 为下级保护区域 z 的闭锁信号, $C_z=1$ 、 $C_z=0$ 分别表示下级保护区域 z 收到、未收到闭锁信号。

由配电网区域保护原理可知,故障发生后,离馈线区段最近的上游断路器跳闸,可确定停电区域。故障区段一定位于动作保护设备的保护范围内,因此停电区域的约束可表示为:

$$x_1 \cup x_2 \cup \dots \cup x_j = 1 \quad j \in \Omega_{LS-R_k}, R_k \in \Omega_{OR} \quad (14)$$

式中: Ω_{LS-R_k} 为保护设备 R_k 所设定保护范围内的区段构成的集合; Ω_{OR} 为保护设备的集合。

本文假设区域保护采用光纤通信,因此不会发生断路器动作信息漏报和误报^[22]。

1.6 区段状态约束

由于 DG 接入配电网,配电网拓扑结构发生变化,故根据故障电流方向进行编码,如式(15)所示。

$$I_j = \begin{cases} 1 & \text{电流幅值越限且方向为正} \\ 0 & \text{电流幅值没有越限} \\ -1 & \text{电流幅值越限且方向为反} \end{cases} \quad (15)$$

综上所述,配电网故障定位模型可表示为 1 个

具有 0-1 离散约束条件的优化问题,如式(16)所示。

$$\begin{cases} \min F(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_J] \\ x_j = \{0, 1\} \quad 1 \leq j \leq J \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

2 BKA

BKA 在全球搜索能力以及收敛速度方面具有优势。BKA 根据黑翅鸢的捕猎行为和迁徙行为,不断更新黑翅鸢的位置,个体通过相互之间的位置信息共享和种群协作,从而逐步逼近最优解。

初始化种群,设置 BKA 的种群规模 N 、搜索空间维数 W 和最大迭代次数 T ,初始化种群位置的公式为:

$$X_h = L_b + \text{rand}(U_b - L_b) \quad (17)$$

式中: $h=1, 2, \dots, N$; U_b 、 L_b 分别为种群中个体 X_h 的上、下限值;函数 rand 用于返回(0,1)内均匀分布的随机数。

种群初始化后,选择适应度值最好的个体作为种群的领导者。选择领导者 X_L 的公式为:

$$f_{\text{best}} = \min(f(X_h)) \quad (18)$$

$$X_L = X(\text{find}(f_{\text{best}} = f(X_h))) \quad (19)$$

式中: X 为种群中个体集合; $f(X_h)$ 为种群中个体 X_h 当前所在位置的适应度值;函数 find 用于找到 $f_{\text{best}} = f(X_h)$ 时个体 X_h 的索引值 h 。

黑翅鸢在捕猎过程中会表现出 2 种不同的攻击行为,其攻击行为的数学模型为:

$$y_{t+1}^{h,v} = \begin{cases} y_t^{h,v} + l_w(1 + \sin r)y_t^{h,v} & r > p \\ y_t^{h,v} + l_w(2r - 1)y_t^{h,v} & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

$$l_w = 0.05 \times e^{-2 \times \left(\frac{t}{T}\right)^2} \quad (21)$$

式中: $y_t^{h,v}$ 、 $y_{t+1}^{h,v}$ 分别为第 t 、 $t+1$ 次迭代中黑翅鸢 h 在第 v 维度的位置; r 为 $[0, 1]$ 内的随机数; p 取值为 0.9,具体原因将在下文进行分析。

鸟类迁徙通常由领导者领导,若当前种群的适应度值小于随机种群,则领导者放弃领导,加入迁徙种群;否则,领导种群到达目的地。迁徙行为的数学模型为:

$$y_{t+1}^{h,v} = \begin{cases} y_t^{h,v} + C(0, 1) \times (y_t^{h,v} - L_t^v) & F_h < F_{rh} \\ y_t^{h,v} + C(0, 1) \times (L_t^v - M_0 y_t^{h,v}) & \text{其他} \end{cases} \quad (22)$$

$$M_0 = 2 \times \sin(r + \pi/2) \quad (23)$$

式中: L_t^v 为到目前为止,在第 t 次迭代中第 v 维度黑翅鸢的领导者位置; F_h 为第 t 次迭代中黑翅鸢 h 在第 v 维度当前位置的适应度值; F_{rh} 为黑翅鸢 h 在第 t 次迭代中第 v 维度随机位置的适应度值; $C(0, 1)$ 为柯西突变。

3 基于 BKA 的故障区段定位流程

随着主动配电网的不断发展,配电网中 DG 数

量逐渐增多,且各DG随配电网运行状态变化而动态适应投切。因此,故障区段定位模型中DG动态投切的实现方法如下^[12]。

1)首先对含有 G 个开关、 Q 个馈线区段、 D 个DG的配电网,建立 $G \times Q$ 维配电网拓扑描述矩阵 B 和 $G \times G$ 维DG拓扑描述对角阵 K_d 。对于矩阵 B ,若区段 (q) 位于开关 g 下游,则 $b_{gq}=1$,否则 $b_{gq}=0$ 。

$$K_d = k_d \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_G\} \quad (24)$$

式中: k_d 为 DG_d 的投切系数,若该DG接入配电网,则 $k_d=1$,否则 $k_d=0$; λ_g ($g=1, 2, \dots, G$)为 DG_d 的下游系数,若 DG_d 在开关 g 的下游,则 $\lambda_g=1$,否则 $\lambda_g=0$ 。

2)根据 K_d 计算 $G \times G$ 维DG投切状态对角阵 P 。

$$P = \prod_{d=1}^D K_d \quad (25)$$

3)根据 B 和 P 计算 $G \times 1$ 维开关函数向量 $H(X)$ 。

$$H(X) = BX - P(F - B)X - S \quad (26)$$

式中: X 为含 Q 个馈线区段状态的 $Q \times 1$ 维向量; F 为所有元素为1的 $G \times Q$ 维矩阵; S 为FTU实际上传信息的 $Q \times 1$ 维向量。

DG自动投切完成后,执行基于BKA的配电网故障区段定位,其具体步骤见附录A。

4 算例分析

以附录B图B1所示的含2个DG的IEEE 33节点配电网为例,在MATLAB 2021b环境下进行仿真。假设馈线有33个带方向元件的FTU,含变压器的一侧为主电源,在节点18、33处投入DG,并规定从主电源到馈线末端或DG为正方向,馈线区段编号为(1)~(33),由 μPMU_a — μPMU_g 形成7个监测域 P_a — P_g , QF_1 — QF_3 为断路器。参数初始化设置: $N=500$, $W=33$, $T=100$,并以维数状态值表示区段状态编码。

4.1 算法参数的选取

在BKA中,参数 p 用于控制种群在搜捕猎物中所表现的不同行为。具体而言, p 调节黑翅鸢在搜索空间中进行全局搜索或局部搜索的比例, p 的大小直接影响算法的寻优能力和收敛性能。5种 p 值下单重、多重故障区段定位的仿真结果见附录C表C1,表中采用加粗字体表示最佳结果。由表可见:当 p

较小时,BKA的全局搜索能力较强,然而 p 过小时,会导致BKA在后期仍大范围跳跃,影响收敛速度;当 p 接近0.9时,BKA在全局和局部之间达到相对平衡; p 取值超过1时,会破坏BKA设计的平衡机制,全局搜索能力减弱,收敛速度提高,但更容易陷入局部最优。综上所述, p 取0.9时,BKA的寻优性能较好。

4.2 单重与多重故障区段定位仿真结果分析

为验证本文所提配电网故障区段定位方法的有效性和容错性,对配电网发生单重、多重故障以及FTU遥信信息健全、漏报和误报情形进行仿真。

1)单重故障区段定位验证。

信息畸变情况下发生单重故障的区段定位结果如表2所示,相应区段状态见附录C图C1。表2中:以算例1为例,FTU上传故障电流信息 $[1 \ -1*17 \ 0*7 \ -1*8]$ 中的“ $-1*17$ ”表示节点2—18的故障电流信息值均为-1,其他以此类推。

以表2中的算例5为例阐述故障区段定位过程。区段(24)发生单重故障,则其区段状态值应为1,其他区段状态值均应为0。无信息畸变情况下,FTU上传到数据采集与监视控制(supervisory control and data acquisition, SCADA)系统的故障电流信息为 $[1*3 \ -1*5 \ 0*4 \ 1*2 \ 0 \ -1*8]$,当节点18处FTU发生漏报且节点3、23处FTU发生反向误报时,节点18处FTU的上传信息畸变为0,节点3、23处FTU的上传信息均畸变为-1。由于区段(24)位于 μPMU_f 所监测的监测域 P_f 和断路器 QF_1 的保护区域内,由1.3节分析可知,故障支路约束可表示为 $x_{23} \cup x_{24} \cup x_{25} = 1$,其表征故障区段只能位于区段(23)、(24)、(25);由1.5节可知,停电区域约束可表示为 $x_1 \cup \dots \cup x_7 \cup x_{19} \cup \dots \cup x_{27} = 1$,其表征故障区段只能位于断路器 QF_1 的保护范围内。这2个约束可限制故障域范围,使故障区段定位不受其他支路上FTU遥信信息畸变的影响。将FTU实际上传信息输入故障区段定位模型,启动算法可得到个体的最大适应度值为64.5,并输出定位结果:区段(24)。

2)多重故障区段定位验证。

信息畸变情况下发生多重故障的区段定位结果见附录C表C2,相应的区段状态见附录C图C2。

表2 信息畸变情况下的单重故障区段定位结果

Table 2 Single fault section location results under information distortion conditions

算例	预设故障区段	预设FTU上传信息畸变节点		FTU上传故障电流信息	故障区段定位结果
		漏报	误报		
1	(1)	—	—	$[1 \ -1*17 \ 0*7 \ -1*8]$	(1)
2	(3)	6	—	$[1*3 \ -1*2 \ 0 \ -1*12 \ 0*7 \ -1*8]$	(3)
3	(15)	—	20	$[1*15 \ -1*3 \ 0 \ 1 \ 0*5 \ -1*8]$	(15)
4	(20)	26	3	$[1*3 \ -1*15 \ 1*2 \ 0*6 \ -1*7]$	(20)
5	(24)	18	3, 23	$[1*2 \ -1*15 \ 0*5 \ -1 \ 1 \ 0 \ -1*8]$	(24)
6	(30)	7, 8	19	$[1*5 \ 0*2 \ -1*12 \ 0*6 \ 1*5 \ -1*3]$	(30)

表2、C2表明,本文所提配电网故障区段定位方法适用于不同单重、多重故障以及FTU遥信信息健全、漏报和误报情形下含多个DG的配电网。发生故障时,故障区段所在支路的 μ PMU会限制故障域为该 μ PMU所监测的监测域,且相应的断路器跳闸,其保护范围即为故障域,形成双重保护机制,从而解决其他支路FTU遥信信息漏报、误报时的误判问题,确保在复杂多重故障下能准确定位故障区段。

4.3 与传统开关函数的对比分析

为进一步验证本文所提开关函数的优势,对不同故障类型和FTU遥信信息健全、畸变情况下共享支路上的节点FTU遥信信息进行测试,分别使用基于本文所提开关函数和传统开关函数的故障区段定

位方法进行定位,信息畸变情况下的故障区段定位结果如表3所示,信息健全情况下的结果如附录C表C3所示。由表3、C3可见:在单重、简单双重及简单三重故障的仿真中,无论FTU遥信信息是健全的还是畸变的,应用2种开关函数都能得到准确的故障区段定位结果;在复杂双重故障仿真中,当FTU遥信信息健全时,传统开关函数在绝大部分情况下均得到了错误的故障区段定位结果,当FTU遥信信息畸变时,传统开关函数所得故障区段定位结果都是错误的;在复杂三重故障仿真中,无论FTU遥信信息是健全的还是畸变的,传统开关函数所得故障区段定位结果都是错误的;而本文所提开关函数在所有故障情形下都能得到准确的故障区段定位结果。

表3 信息畸变情况下,2种开关函数性能的对比结果

Table 3 Performance comparison between two switch functions under information distortion

预设故障区段	预设FTU上传信息畸变节点		节点3—6的FTU上传信息		故障区段定位结果	
	漏报	误报	本文开关函数	传统开关函数	本文开关函数	传统开关函数
单重故障	(1)	10	—	-1,-1,-1,-1	√	√
	(5)	—	28	1,1,1,-1	√	√
	(13)	3	27	0,1,1,1	√	√
简单双重故障	(1),(4)	13	3	1,0,-1,-1	√	√
	(3),(20)	8	23	1,-1,-1,-1	√	√
	(1),(24)	5	17	-1,-1,0,-1	√	√
	(4),(21)	11	8	1,1,-1,-1	√	√
复杂双重故障	(13),(21)	5	24	1,1,0,1	√	×
	(20),(25)	—	5	-1,1,1,-1	√	×
	(19),(28)	4	31	1,0,1,1	√	×
	(24),(29)	11	3	-1,1,1,1	√	×
	(19),(24)	6	5	1,-1,1,0	√	×
简单三重故障	(1),(5),(16)	32	20	0,0,0,-1	√	√
	(3),(15),(27)	18	8	1,0,0,0	√	√
	(2),(24),(28)	5	21	-1,-1,0,-1	√	√
复杂三重故障	(12),(20),(24)	29	15	1,1,1,1	√	×
	(21),(25),(32)	27	11	1,1,1,1	√	×

4.4 DG数量及位置的影响分析

为了验证本文所提方法在不同DG数量、接入位置下的灵敏性,设置3种DG接入IEEE 33节点配电网方式。

- 1)配电网1:3个DG,分别接入节点18、25、33。
- 2)配电网2:3个DG,分别接入节点11、22、33。
- 3)配电网3:4个DG,分别接入节点18、22、25、30。

在同一故障情形下,基于上述3种DG接入方式进行仿真,结果如表4所示。

表4中的仿真结果进一步表明,本文所提配电网故障区段定位模型适用于多个DG接入的弹性配电网,且适用于不同的DG接入位置,在FTU遥信信息健全、畸变情况下均能准确定位到故障区段。

4.5 算法性能对比分析

为更充分地验证BKA的优势,本文对BKA、量子免疫优化算法(quantum immune optimization

表4 存在信息畸变情况下,不同配电网的故障区段定位结果对比

Table 4 Comparison of fault section location results among different distribution networks under information distortion

算例	预设故障区段	预设FTU上传信息畸变节点		故障定位结果		
		漏报	误报	配电网1	配电网2	配电网3
1	(4),(9)	—	—	√	√	√
		10	32	√	√	√
		—	—	√	√	√
2	(11),(30)	5	25	√	√	√
		—	—	√	√	√
3	(8),(24)	30	4	√	√	√
		—	—	√	√	√
4	(5),(13),(31)	24	17,26	√	√	√
		—	—	√	√	√
5	(21),(23),(32)	11	27	√	√	√
		—	—	√	√	√
6	(4),(20),(29)	33	9,24	√	√	√
		—	—	√	√	√

algorithm, QIOA)^[23]、二进制粒子群优化(binary particle swarm optimization, BPSO)算法和遗传算法(genetic algorithm, GA)的混合算法(简称为BPSO-GA)^[9]、粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法和GA在相同故障情形下的故障区段定位性能进行对比。分别用5种算法对同一单重、双重故障连续定位30次,5种算法的收敛曲线见附录C图C3,5种算法出现未成熟收敛的次数见附录C表C4。

由图C3可见:同一故障下,BKA的收敛曲线更陡峭且更平滑,说明其以更快的速度收敛到最优值,能够克服未成熟收敛问题;QIOA的收敛曲线的陡度和波折数量次之;而BPSOGA、PSO算法和GA的收敛曲线波折较多,说明其容易出现未成熟收敛现象。由表C4可知:使用PSO算法和GA进行故障区段定位时,所有故障类型下均出现了未成熟收敛现象,且次数随着故障重数的增加而增加;使用QIOA、BPSOGA和BKA后,未出现该现象。

5 结论

现有配电网故障区段定位方法对极端灾害下复杂多重故障的定位准确性和容错性较差,本文提出了一种基于改进开关函数的弹性配电网复杂多重故障区段定位方法。通过算例分析,可以得出以下结论:

1)改进的开关函数在复杂多重故障下能够完全描述故障电流方向特征,提升了区段定位准确率;

2)通过计及 μ PMU信息和断路器动作信息,实现了故障区段定位的多源信息融合,有效减小了极端灾害下FTU信息畸变对区段定位的影响,提高了极端灾害下定位的容错性;

3)采用BKA求解故障区段定位模型,求解速度快,适应性强,在一定程度上能够弥补其他算法未成熟收敛和易陷入局部最优的缺陷。

本文研究未考虑风灾时空不确定性和灾前对线路和杆塔强化信息对配电网故障区段定位的影响,后续将从考虑风灾不确定性故障场景和区段强化信息入手,深入研究弹性配电网故障区段定位方法。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 唐雅洁,李俊豪,林达,等.考虑分布式光伏高效消纳与负荷损失最小的区域配电网应急资源协同配置策略[J].电力自动化设备,2024,44(7):78-85.
TANG Yajie, LI Junhao, LIN Da, et al. Coordinated allocation strategy of emergency resource for regional distribution network considering distributed photovoltaic efficient absorption and minimum load loss[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7): 78-85.
- [2] 杜诗嘉,郭创新,俞啸玲,等.台风灾害下的弹性配电网研究综述与展望[J].电力自动化设备,2022,42(2):176-186,209.
- [3] DU Shijia, GUO Chuangxin, YU Xiaoling, et al. Review and prospect of resilient distribution network under typhoon disaster[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(2): 176-186, 209.
- [4] WANG Chong, HOU Yunhe, QIU Feng, et al. Resilience enhancement with sequentially proactive operation strategies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 2847-2857.
- [5] HUANG Gang, WANG Jianhui, CHEN Chen, et al. Integration of preventive and emergency responses for power grid resilience enhancement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4451-4463.
- [6] ARIF A, WANG Zhaoyu, WANG Jianhui, et al. Power distribution system outage management with co-optimization of repairs, reconfiguration, and DG dispatch[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4109-4118.
- [7] YUAN Yuxuan, DEGHANPOUR K, WANG Zhaoyu, et al. Multisource data fusion outage location in distribution systems via probabilistic graphical models[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(2): 1357-1371.
- [8] 金凡凡,郭瑞鹏,林振智,等.考虑配电网供电可靠性与经济性的FTU优化配置[J].电力自动化设备,2024,44(12):132-139.
JIN Fanfan, GUO Ruipeng, LIN Zhenzhi, et al. Optimal placement of FTUs considering power supply reliability and economy of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(12): 132-139.
- [9] 王秋杰,金涛,刘军.计及FTU漏报和误报的配电网故障定位分层解析模型[J].电力自动化设备,2019,39(1):141-147.
WANG Qiujie, JIN Tao, LIU Jun. Hierarchical analytic model for fault location of distribution network considering FTU missing and false positives[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 141-147.
- [10] 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.
- [11] 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):3742-3750.
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): 3742-3750.
- [12] 郭壮志,陈涛,洪俊杰,等.基于故障辅助因子的配电网高容错性故障区段定位方法[J].电力自动化设备,2017,37(7):93-100.
GUO Zhuangzhi, CHEN Tao, HONG Junjie, et al. High-tolerance faulty section locating based on fault accessory factors for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 93-100.
- [13] 何瑞江,胡志坚,李燕,等.含分布式电源配电网故障区段定位的线性整数规划方法[J].电网技术,2018,42(11):3684-3692.
HE Ruijiang, HU Zhijian, LI Yan, et al. Fault section location method for DG-DNs based on integer linear programming[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3684-3692.
- [14] JIANG Yazhou. Data-driven fault location of electric power distribution systems with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 129-137.
- [15] WANG Qiujie, JIN Tao, MOHAMED A, et al. A novel linear optimization method for section location of single-phase ground faults in neutral non-effectively grounded systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-10.

- [15] 周放歌,肖仕武. 基于零序电流分布的有源配电网接地故障定位[J]. 电网技术,2022,46(5):1820-1832.
ZHOU Fangge, XIAO Shiwu. Grounding fault location of active distribution network based on zero sequence current distribution[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1820-1832.
- [16] 吴勇军,薛禹胜,谢云云,等. 台风及暴雨对电网故障率的时空影响[J]. 电力系统自动化,2016,40(2):20-29,83.
WU Yongjun, XUE Yusheng, XIE Yunyun, et al. Space-time impact of typhoon and rainstorm on power grid fault probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 20-29, 83.
- [17] 王永明,殷自力,李琳,等. 台风灾害场景下考虑运行状态的配电网风险评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2018,30(12):60-65.
WANG Yongming, YIN Zili, LI Lin, et al. Risk assessment method for distribution network considering operation state in the scene of typhoon disaster[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(12): 60-65.
- [18] 张健磊,高湛军,王志远,等. 基于有限 μ PMU的主动配电网故障定位方法[J]. 电网技术,2020,44(7):2722-2730.
ZHANG Jianlei, GAO Zhanjun, WANG Zhiyuan, et al. Fault location method for active distribution based on finite μ PMU[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2722-2730.
- [19] 杨睿,高红均,刘俊勇. 基于有限PMU配置的配电网故障定位[J]. 电力自动化设备,2022,42(4):138-145.
YANG Rui, GAO Hongjun, LIU Junyong. Distribution network fault location based on limited PMU configuration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 138-145.
- [20] 吴悦华,高厚磊,徐彬,等. 有源配电网分布式故障自愈方案与实现[J]. 电力系统自动化,2019,43(9):140-146.
WU Yuehua, GAO Houlei, XU Bin, et al. Distributed fault self-healing scheme and its implementation for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 140-146.
- [21] 马静,张涌新,项晓强,等. 基于保护动作信号的配电网区域保护方案[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):34-41.
MA Jing, ZHANG Yongxin, XIANG Xiaoqiang, et al. Regional protection scheme of distribution network based on operating signal of protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 34-41.
- [22] 顾本硕,林湘宁,李正天,等. 基于负序量排序及5G通信的主动配电网有界面保护原理[J]. 电力系统保护与控制,2024,52(18):12-23.
GU Benshuo, LIN Xiangning, LI Zhengtian, et al. The principle of bounded area-protection for an active distribution network based on negative sequence quantity sorting and 5G communication[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 12-23.
- [23] 高锋阳,李昭君,袁成,等. 量子计算和免疫优化算法相结合的有源配电网故障定位[J]. 高电压技术,2021,47(2):396-405.
GAO Fengyang, LI Zhaojun, YUAN Cheng, et al. Fault location for active distribution network based on quantum computing and immune optimization algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 396-405.

作者简介:

王秋杰(1988—),男,副教授,博士,主要研究方向为综合能源系统优化运行与规划、弹性配电网等(**E-mail**: wangqiujie@ctgu.edu.cn);

姬晨旭(2000—),女,硕士研究生,主要研究方向为弹性配电网(**E-mail**: jichenxu@ctgu.edu.cn);

谭洪(1991—),男,讲师,博士,通信作者,主要研究方向为综合能源系统优化运行与规划、电力市场等(**E-mail**: tanhong@ctgu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Improved switch-function based fault section location method for resilient distribution network under complex and multiple faults

WANG Qiujie^{1,2}, JI Chenxu^{1,2}, TAN Hong^{1,2}, LI Zhenxing^{1,2}, WENG Hanli^{1,2}, TAN Kunqiao³

(1. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

3. Enshi Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Enshi 445000, China)

Abstract: When complex and multiple faults occur in the distribution network during extreme disasters, the existing switch functions are difficult to fully describe the directional characteristics of the multiple fault currents, resulting in poor accuracy and fault tolerance of the fault section location method for distribution network. Therefore, a method for locating complex multiple fault sections in resilient distribution network based on the improved switch function is proposed. The shortcomings of existing switch functions are analyzed, and based on the logic constructed by the switch function, a switch function that fully describes the directional characteristics of multiple fault currents is proposed. Fault information from micro-synchro phasor measurement unit and action information from zone protection circuit breakers are incorporated into the fault section location to construct a multi-source information-based fault section location model for distribution network. Black-winged kite algorithm is utilized to solve the fault section location model for distribution network, and a fault section location process is provided. Simulation experiments on the IEEE 33-bus distribution system demonstrate that the proposed method for locating fault sections in the distribution network has significantly improved the accuracy and fault tolerance under complex and multiple faults.

Key words: resilience; distribution network; fault section location; complex and multiple faults; improved switch function; black-winged kite algorithm