

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250073

# 考虑 $\mu$ PMU 节点优化配置的含 DG 配电网故障分层定位方法

高峰阳<sup>1</sup>, 李龙<sup>1</sup>, 裴淑萍<sup>1</sup>, 葛磊蛟<sup>1,2</sup>, 杨栋<sup>1</sup>, 查鹏堂<sup>1</sup>

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 针对分布式电源(distributed generation, DG)接入配电网后潮流分布波动性强、故障信息特征微弱以及节点量测信息有限等因素导致配电网故障定位难度增大的问题, 提出一种考虑微型同步相量测量装置(micro phasor measurement unit,  $\mu$ PMU)节点优化配置的含 DG 配电网故障分层定位方法。首先, 在故障信息提取环节引入数据预处理模块, 增强故障定位模型所需数据质量。其次, 针对故障定位模型的适应度函数与算法寻优能力进行改进, 提升故障定位容错性能及算法全局收敛速度。再次, 针对配电网分支众多及拓扑复杂导致算法搜索空间维度大的问题, 建立基于  $\mu$ PMU 节点最优配置的自适应分层降维模型, 实现“区域-区段”故障层级定位。仿真验证结果表明, 在含 DG 的 IEEE33 节点配电网中, 所提方法可使寻优节点维度降低 54.5%, 故障定位准确率达到 95%左右, 且定位耗时短、抗噪声干扰及耐接地电阻能力强, 在多重故障及信息畸变存在情况下故障定位能力及容错性能优异。  
**关键词:** 有源配电网; 故障定位; PMU 优化配置; 免疫算法; 信息畸变

## Hierarchical fault location for distribution networks with DG considering optimal $\mu$ PMU node configuration

GAO Fengyang<sup>1</sup>, LI Long<sup>1</sup>, PEI Shuping<sup>1</sup>, GE Leijiao<sup>1,2</sup>, YANG Dong<sup>1</sup>, ZHA Pengtang<sup>1</sup>

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;  
2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** To address the challenges of fault location in distribution networks with distributed generation (DG), caused by strong power flow fluctuations, weak fault characteristic signals, and limited node measurement information, a hierarchical fault location method considering optimal micro phasor measurement unit ( $\mu$ PMU) node configuration is proposed. First, a data preprocessing module is introduced in the fault information extraction stage to enhance the quality of data required by the fault location model. Second, the fitness function and optimization ability of the fault location model are improved to enhance fault-tolerant performance and global convergence speed. Third, to address the high-dimensional search space resulting from numerous branches and complex topology in the distribution network, an adaptive hierarchical model based on optimal  $\mu$ PMU node configuration is established to achieve “regional-sectional” hierarchical fault location. Simulation results based on the IEEE 33-node distribution network with DG demonstrates that the proposed method reduces the optimization node dimensionality by 54.5%, achieves a fault location accuracy of about 95%, and features short processing time, strong noise immunity, and robustness against grounding resistance. Moreover, it exhibits excellent fault location capability and fault-tolerance performance even under multiple faults and information distortion conditions.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Gansu Province (No. 23JRRA905).

**Key words:** active distribution network; fault location; PMU optimal configuration; immune algorithm; information distortion

## 0 引言

随着分布式电源(distributed generation, DG)规模

化接入, 配电网结构由单电源辐射状转变为多电源复杂网络。中性点不接地系统发生单相接地故障时, 故障特征量呈现暂态性强、幅值微弱的特点, 导致故障态数据快速捕获困难<sup>[1-2]</sup>。多分支复杂馈线、异构设备及恶劣运行环境使传统故障定位方法存在灵敏度不足、可靠性下降等问题, 导致故障定位准确率明显降低<sup>[3]</sup>。DG 投切的动态特性、接入位置不确

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目资助(23JRRA905); 甘肃省重点研发计划项目资助(23YFFA0059); 兰州交通大学-西南交通大学联合创新基金项目资助(LH2024027)

定性、故障信息畸变及量测节点有限性等因素进一步加剧了故障定位复杂度<sup>[4]</sup>。

配电网故障定位通常通过采集单元获取故障电流信息,经主站分析后快速定位并排除故障。现有方法主要分为两类:一种是基于机理驱动进行故障定位<sup>[5-8]</sup>,但存在机理模型依赖性强、参数假设理想化等问题,实际应用中面临复杂网络适应性差、量测覆盖要求高等局限,且易受过渡电阻、噪声干扰等实际工况影响;另一种是通过人工智能算法进行故障定位。文献[9]利用矩阵算法进行故障定位,但其存在模型构建复杂、信息维度单一等问题。文献[10]考虑了告警信息畸变情况,改进了矩阵算法判据,但未考虑 DG 动态影响。文献[11]利用线性整数规划法进行故障区段定位,但未验证多点畸变下的定位效率。文献[12]通过改进多元宇宙算法进行故障定位,但主站处理畸变信息原则不完善,容错性能不足。文献[13]基于支路关系构建分支节点双层模型,并采用改进免疫算法对模型进行求解,但收敛速度慢,定位时间较长。文献[14]在二端口分层定位的基础上提出了智能校验机制,但在高渗透率大型配电网中定位效率不高、耗时较长。上述故障定位算法存在可靠性差、DG 动态特性考虑不足、信息畸变鲁棒性差以及空间搜索效率低等问题。

另外,复杂多分支配电网故障定位问题求解过程中存在解空间维度较大问题,导致定位速度慢,准确率低。基于网络拓扑的故障定位分层模型对故障解空间进行分层降维,可有效提升算法性能,提高定位准确性。文献[15]采用首末端相量量测装置(phasor measurement unit, PMU)配置的子系统划分策略进行分层,但注入电流法存在信号重叠干扰与设备复杂度高的缺陷,影响故障检测精度与时效性。文献[16]基于对外等效原则构建多分支二端口网络模型,但难以规避正常支路异常误判风险。文献[17]应用最短路理论进行区域分层,其故障信息捕获效率易受拓扑复杂度制约。上述分层降维方法易出现正常支路状态异常、故障信息获取缓慢、故障信息畸变等问题,容错性较差,动态信息处理能力不足。

微型同步相量测量装置(micro phasor measurement unit,  $\mu$ PMU)同步性强,响应速度快,信息采集精度较高,可完成故障暂态-稳态全过程相量数据采集任务<sup>[18-19]</sup>。然而,在节点规模不断扩大的现代配电网中, $\mu$ PMU 高密度部署仍面临严峻的经济性约束。研究表明,基于系统可观性的最优配置模型需在最小化设备投资成本与最大化监测可靠性间实现动态平衡<sup>[20]</sup>。现有研究主要有两类技术路径:机理驱动型方法和数据驱动型方法,机理驱动型方法通

过拓扑可观性分析实现配置优化。文献[21]构建了故障位置可观度指标驱动的双层规划模型,但受限于局部可观性判据,其方案覆盖率低,监测能力有限。文献[22]引入零注入节点补偿机制,使配置数量有所降低,但其稳态校验模型在动态拓扑网络中容错失效概率较高。数据驱动型方法则聚焦智能算法创新,文献[23-24]采用数学算法及人工智能算法进行多目标优化,但仍存在算法收敛性差、易陷入局部最优以及多目标优化能力不足等问题。

综上,为了有效解决含 DG 配电网中性点不接地系统故障定位存在的运算维度大、定位效率低、容错性差、信息畸变高及故障特征微弱等问题,提出一种基于  $\mu$ PMU 节点优化配置的故障分层定位方法。首先,引入噪声抑制策略及故障特征增强两种数据预处理模块,增强故障定位模型在极端工况下的适应性。然后,构建含漏报及误报畸变变量的适应度函数,并通过量子态叠加机制与变异策略改进量子免疫算法(improved quantum immune algorithm, IQIA)的全局搜索能力。其次,利用算法对配电网节点进行  $\mu$ PMU 节点最优化配置,获得配置最优解方案。最后,利用算法对含 DG 配电网进行故障分层定位。通过搭建 IEEE33 节点配电网进行测试验证,利用算例结果验证所提方法在单一、多重、信息畸变故障定位以及不同算法、不同工况下的性能优势。

## 1 故障定位模型构建

### 1.1 数据预处理

故障发生时,各节点配置的  $\mu$ PMU 同步高精度采集节点相量数据,但数据可能受到噪声干扰等环境因素影响导致数据失真,且中性点不接地系统发生故障时故障信息特征相对微弱,可能导致故障位置的错误定位。因此需要进一步加强故障数据质量,提升故障定位准确度。

#### 1.1.1 噪声抑制策略

为提升故障定位模型在噪声环境下的鲁棒性,提出一种轻量级噪声抑制策略。该方法通过动态分位数识别异常噪声点,并基于邻近信号特征进行残差修正。

残差分位数计算方法为

$$Q_z = Q \left[ \left| I_0(j_1) - \frac{1}{s} \sum_{j_1=s-2S+1}^s I_0(j_1) \right|, q \right] \quad (1)$$

式中:  $Q_z$  为残差值;  $q$  为分位数,取 0.95;  $I_0(j_1)$  为  $\mu$ PMU 采集的节点原始故障电流时域信号;  $j_1$  为索引值;  $s$  为离散时间序列号;  $S$  为数据采样点数,  $S = \Delta T \cdot f_s$ ,  $\Delta T$  为对应时间窗口,  $f_s$  为数据采样

频率, 取 5 kHz。

若当前点残差超过阈值, 对于每一个故障电流数据点, 以其为中心构建一个半径 5 个采样点的圆形邻域窗口, 计算该窗口内所有正常点的电流中位值, 并以此值替换原故障值, 否则故障电流值保持不变。通过修正的输入信号在保留突变特征的同时抑制离群噪声, 可在一定程度上提升故障定位模型的抗噪声干扰能力。

### 1.1.2 故障特征增强机制

为进一步提升故障电流可检测性与抗接地电阻能力, 增强故障电流特征辨识度, 引入时变能量梯度策略, 提升进化算法对微弱故障特征的敏感性。

定义故障电流时变能量梯度为单位时间内能量的变化率, 其多尺度离散化梯度计算方法为

$$G_E(s) = \frac{1}{\Delta T} \left[ \sum_{j=s-S+1}^s |I_{0L}(j)|^2 - \sum_{j=s-2S+1}^{s-S} |I_{0L}(j)|^2 \right] \quad (2)$$

$$G_{EM}(s) = AG_{E1}(s) + BG_{E2}(s) \quad (3)$$

式中:  $G_E(s)$  为  $\Delta T$  时间窗口下的梯度;  $G_{EM}(s)$  为总梯度;  $G_{E1}(s)$  与  $G_{E2}(s)$  分别为  $\Delta T_1$  及  $\Delta T_2$  时间窗口下的梯度, 为捕捉不同时间尺度的故障特征, 采用双窗口梯度计算,  $\Delta T_1$  取 2 ms,  $\Delta T_2$  取 20 ms;  $I_{0L}(j)$  为  $\mu$ PMU 采集的节点原始信号经过噪声抑制后的故障电流时域信号;  $A$ 、 $B$  为权重系数, 由于故障初期暂态特征明显, 为提高特征敏感度, 取  $A=0.7$ 、 $B=0.3$ 。

经过数据预处理的故障信息质量较高, 可以有效提高故障定位速度, 降低故障发生区段误判率。

### 1.2 故障电流方向判据与编码方式建立

当配电网发生故障时, 配置于配电网拓扑关键节点的  $\mu$ PMU 数据采集装置实时捕获故障暂态过电流特征量, 并依托通信网络形成多源数据通道上送至主站系统。

DG 接入配电网后潮流分布呈双向流动趋势, 传统 0-1 编码方式已不再适用于含 DG 配电网故障定位问题<sup>[25]</sup>。图 1 为简单系统网络发生单相接地故障的情景。其中, 黑色节点表示节点已配置  $\mu$ PMU。规定节点  $\mu$ PMU 检测到的节点故障电流正方向为: 由系统电源到负载或 DG 方向。

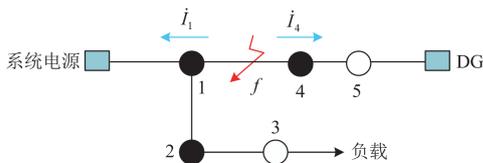


图 1 单区段发生单相接地故障网络

Fig. 1 Distribution network diagram when single-phase fault occurs in a single section

通过推导分析故障点  $f$  两侧  $\mu$ PMU 采集到的故障电流相量  $\Delta \dot{I}_1$  与  $\Delta \dot{I}_4$ , 可得正反向故障电流相位角差  $\Delta \vartheta_{正向}$  及  $\Delta \vartheta_{反向}$ , 如式(4)所示。

$$\begin{cases} \Delta \vartheta_{正向} = \arg \Delta \dot{I}_{1.ref} - \arg \Delta \dot{I}_1 = +\frac{\pi}{2} \\ \Delta \vartheta_{反向} = \arg \Delta \dot{I}_{4.ref} - \arg \Delta \dot{I}_4 = -\frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\Delta \dot{I}_1$ 、 $\Delta \dot{I}_4$  分别为节点 1 和节点 4 处的故障分量;  $\Delta \dot{I}_{1.ref}$ 、 $\Delta \dot{I}_{4.ref}$  分别为基于  $\Delta \dot{I}_1$  和  $\Delta \dot{I}_4$  建立的参考相量, 幅值为对应故障分量导数值, 相位角较故障分量超前或滞后  $90^\circ$ 。

考虑到故障分量提取存在一定误差, 导致  $\Delta \vartheta$  值发生微小波动, 为提高判据鲁棒性, 对判据进行误差修正, 其正反向相位角差允许误差区间为

$$\begin{cases} \Delta \vartheta_{正向} \in \left[ \frac{\pi}{2} - \nu, \frac{\pi}{2} + \nu \right] \\ \Delta \vartheta_{反向} \in \left[ -\frac{\pi}{2} - \nu, -\frac{\pi}{2} + \nu \right] \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\nu$  为相角误差值, 取  $5^\circ$ 。

通过计算节点  $\Delta \vartheta$  值, 即可确定节点故障电流方向信息。故障电流编码方式如表 1 所示。

表 1 故障电流编码方式

Table 1 Coding mode for fault currents

故障电流信息	节点 $i$ 处故障电流 $I_i$ 编码状态
无故障电流或无法检测到	0
存在故障电流且与规定方向相同	1
存在故障电流且与规定方向相反	-1

### 1.3 适应度函数构建

开关函数用来描述电力系统开关操作或电网拓扑变化, 可表示为

$$I_i(L)^* = \prod_{j_2=1}^{n_1} L_{j_2} - \prod_{j_3=1}^{n_{DG}} K_{j_3} \cdot (1 - \prod_{j_2=1}^{n_2} L_{j_2}) \cdot \prod_{j_2=1}^{n_1} L_{j_2} \quad (6)$$

式中:  $n_1$  为第  $i$  个节点上游的馈线区段数;  $n_2$  为第  $i$  个节点下游的馈线区段数;  $n_{DG}$  为下游分布式电源的总数;  $L_{j_2}$  为上游或下游区段中第  $j_2$  个馈线区段故障编码状态;  $K_{j_3}$  为下游第  $j_3$  个 DG 开关投切系数, 取值 0 或 1, 0 表示 DG 处于孤岛运行状态, 1 表示 DG 处于并网运行状态。

适应度函数用于引导算法搜索最优解。当区段发生故障时, 构建适应度函数如式(7)所示。

$$E(L) = W - \left[ \sum_{i=1}^N |I_i - I_i(L)^*| + \lambda \cdot \sum_{i=1}^N |L_i| \right] \quad (7)$$

式中:  $W$  为一个极大数, 取 100, 将最小值问题转

化为最大值问题;  $N$  为网络开关节点数;  $I_i$  为  $\mu$ PMU 检测到的第  $i$  个开关节点实际故障电流方向信息;  $\lambda$  为权重系数, 取 0.5。

当配电网发生故障时, 开关节点因受设备采样精度与通信延时耦合等影响, 发生故障信息漏报或误报风险的概率较高, 致使  $\mu$ PMU 量测数据存在信息畸变, 使故障定位结果准确度降低。为避免信息畸变影响, 提高故障定位容错性, 将故障误报变量  $m_i^1$ 、 $m_i^2$ 、 $m_i^3$ 、 $m_i^4$  以及故障漏报变量  $u_i^1$ 、 $u_i^2$  6 种畸变类型引入适应度函数。畸变关系如图 2 所示。

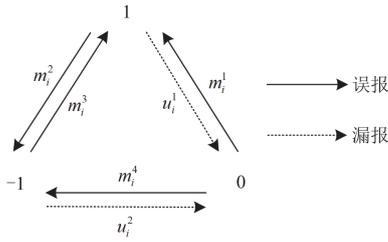


图 2 畸变类型关系示意图

Fig. 2 Distortion type relationship diagram

根据各畸变节点状态与  $I_i(L)^*$  的逻辑关系, 通过逻辑非门对畸变节点进行修正, 构建新开关函数如式(8)所示。

$$I_i'(L)^* = \text{sign} \left[ p_1 \cdot \overline{u_i^1 u_i^2 m_i^2 m_i^4} + p_2 \cdot \overline{m_i^1 m_i^2 m_i^3 m_i^4} + p_3 \cdot \overline{u_i^1 u_i^2 m_i^1 m_i^3} \right] \quad (8)$$

其中

$$\begin{cases} p_1 = I_i(L)^* \overline{m_i^1 m_i^3} + \overline{I_i(L)^* m_i^1 m_i^3} - I_i(L)^* \overline{m_i^1 m_i^3} \\ p_2 = I_i(L)^* \overline{u_i^1 u_i^2} + \overline{I_i(L)^* u_i^1 u_i^2} + I_i(L)^* \overline{u_i^1 u_i^2} \\ p_3 = I_i(L)^* \overline{m_i^2 m_i^4} - \overline{I_i(L)^* m_i^2 m_i^4} - I_i(L)^* \overline{m_i^2 m_i^4} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$  均为辅助变量;  $\text{sign}$  为符号函数, 正值为 1, 负值为 -1, 零值为 0; 畸变变量上方的“—”表示逻辑非运算。

由式(8)及畸变变量关系可构建具有高容错性的适应度函数, 如式(10)所示。

$$E'(L) = W - \left( \chi_1 \sum_{i=1}^N |I_i - I_i'(L)^*| + \chi_2 \sum_{i=1}^N |L_i| + \chi_3 \sum_{i=1}^N \sum_{e_1=1}^4 |m_i^{e_1}| + \chi_4 \sum_{i=1}^N \sum_{e_2=1}^2 |u_i^{e_2}| \right) \quad (10)$$

式中:  $e_1$ 、 $e_2$  分别为误报变量及漏报变量类型索引;  $\chi_1$ 、 $\chi_2$ 、 $\chi_3$ 、 $\chi_4$  均为权重系数, 设置其值  $\chi_1 = \chi_2 = 0.5$ ,  $\chi_3 = \chi_4 = 1$  [26-27]。

#### 1.4 量子免疫算法改进

限于篇幅, 本文仅介绍所提 IQIA 算法的改进

部分, 已有量子算法参见文献[28]。

1) 利用三态  $H_3$  门(three states Hadamard gate, THG)完成克隆扩增操作。一般量子比特状态  $|\psi\rangle$  以二态编码表示, 见式(11)。

$$\begin{cases} |\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \\ |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $|0\rangle$  和  $|1\rangle$  为量子比特的两个基态;  $\alpha$  与  $\beta$  为复系数;  $|\alpha|^2$  与  $|\beta|^2$  为量子态概率幅值, 表示量子比特相应状态概率, 最大值对应基态即为节点状态值。

针对二态编码缺陷, 对量子比特编码进行扩展, 即将问题变量映射到 0、1、-1 三种状态。每种状态通过量子态线性组合表示, 构建如式(12)所示的基态。

$$\begin{cases} |0\rangle = [1 \ 0 \ 0] \\ |1\rangle = [0 \ 1 \ 0] \\ |-1\rangle = [0 \ 0 \ 1] \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $|-1\rangle$  为新增基态。

在此三态系统中, 任意量子态可以表示为

$$\begin{cases} |\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle + \gamma|-1\rangle \\ |\alpha|^2 + |\beta|^2 + |\gamma|^2 = 1 \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\gamma$  为新增复系数。

为初始化种群时充分覆盖解空间  $[-1, 0, 1]$ , 提出扩展 THG, 将一基态均匀分布到三态空间, 生成叠加态, 从而增强种群的多样性。相应矩阵形式为

$$H_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{i(2\pi/3)} & e^{i(4\pi/3)} \\ 1 & e^{i(4\pi/3)} & e^{i(2\pi/3)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中:  $e^{i(2\pi/3)}$ 、 $e^{i(4\pi/3)}$  为相位旋转系数, 确保均匀分布的同时保留不同状态差异。

为避免过均匀分布, 引入自适应参数使 THG 动态调整叠加态概率幅值分布, 使其更倾向于分布在关键区域。改进后的 THG 如式(15)所示。

$$H_3' = \frac{\begin{bmatrix} \omega_0 & \omega_1 & \omega_{-1} \\ \omega_0 & \omega_1 e^{i(2\pi/3)} & \omega_{-1} e^{i(4\pi/3)} \\ \omega_0 & \omega_1 e^{i(4\pi/3)} & \omega_{-1} e^{i(2\pi/3)} \end{bmatrix}}{\sqrt{\omega_0^2 + \omega_1^2 + \omega_{-1}^2}} \quad (15)$$

式中:  $H_3'$  即为改进后的量子操作门;  $\omega_0$ 、 $\omega_1$ 、 $\omega_{-1}$  分别为状态 0、1、-1 的权重, 用于控制叠加态中不同状态的分布比例。当三者均为 1 时, 恢复为均匀分布的 THG, 当  $\omega_0 > \omega_1 > \omega_{-1}$  时, 量子态更倾向于状态 0。

THG 通过式(16)所示的方式进行更新。

$$[\alpha_k^* \ \beta_k^*]^T = \mathbf{H}_3' [\alpha_k \ \beta_k]^T \quad (16)$$

式中:  $\alpha_k$ 、 $\beta_k$  为染色体基因中更新前基因量子概率幅值;  $\alpha_k^*$ 、 $\beta_k^*$  为通过  $\mathbf{H}_3'$  门更新后的新量子概率幅值。

THG 通过生成均匀叠加态, 有效增强了全局搜索的多样性, 避免频繁陷入局部最优的问题。

2) 引入柯西-高斯变异策略(Cauchy-Gauss variation strategy, CGVS)更新最优基因位。将 CGVS 引入算法变异操作环节, 通过对最优基因位进行随机扰动, 提高迭代后期算法全局寻优能力。其扰动公式可表示为

$$I'(k) = I(k) + \rho_1 \text{Cauchy}(0,1) + \rho_2 \text{Gauss}(0,1) \quad (17)$$

$$\begin{cases} \rho_1 = 1 - \frac{k^2}{D^2} \\ \rho_2 = \frac{k^2}{D^2} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $I'(k)$  为第  $k$  次迭代后对最优基因位进行随机扰动后的基因位;  $I(k)$  为第  $k$  次迭代后的最优基因位;  $\text{Cauchy}(0,1)$  表示中位数为 0、尺度参数为 1 的柯西分布;  $\text{Causs}(0,1)$  表示数学期望为 0、方差为 1 的高斯正态分布;  $\rho_1$  和  $\rho_2$  为辅助变量;  $D$  为算法最大迭代次数。

## 2 基于 $\mu$ PMU 优化配置的分层降维方法

考虑到含 DG 多支配电网节点众多, 拓扑复杂, 量测信息数据量大。当采用群体智能算法进行全域求解时, 算法计算规模大, 收敛速度较慢。为此提出一种基于  $\mu$ PMU 优化配置的分层降维模型, 以简化配电网故障定位拓扑节点结构, 并进一步提高所提改进算法的迭代寻优效率与故障定位准确率。

### 2.1 $\mu$ PMU 最优配置方案

要解决  $\mu$ PMU 最优配置问题, 首先需要构建满足完全可观测性约束条件的目标函数, 表示为

$$F(x) = w_1 N_{\mu\text{PMU}}(x) + w_2 C(x) + P_{\text{penalty}}(x) = w_1 \sum_{i=1}^N x_i + w_2 \sum_{i=1}^N x_i c_i + \eta(N - |O(x)|) \quad (19)$$

式中:  $x = [x_1, x_2, \dots, x_N]$  为当前解, 其为二进制数组, 长度为网络节点数  $N$ , 取 1 表示配置  $\mu$ PMU, 取 0 则表示未配置;  $N_{\mu\text{PMU}}(x)$  为当前解中  $\mu$ PMU 安装总量;  $C(x)$  为  $\mu$ PMU 安装与维护成本;  $c_i$  为节点  $\mu$ PMU 安装成本, 一般为常数;  $w_1$ 、 $w_2$  分别为数量和成本权重系数;  $P_{\text{penalty}}(x)$  为惩罚函数, 惩罚不满足网络完全可观测性或其他约束解;  $\eta$  为不可观

测性惩罚系数, 其值越大, 惩罚力度越大;  $O(x)$  为  $\mu$ PMU 直接或间接覆盖的节点集合, 以保证系统具有完全可观测性, 构建形式如式(20)所示。若  $O(x) < N$ , 说明当前解不满足完全可观测性要求。

$$O(x) = \bigcup_{X \in \{Y|x_Y=1\}} \{X_{\mu\text{PMU}}\} \cup \{X_{\text{邻接}}\} \quad (20)$$

式中:  $Y$  为当前已配置  $\mu$ PMU 节点集合;  $X_{\mu\text{PMU}}$  为  $Y$  中已配置  $\mu$ PMU 的节点;  $X_{\text{邻接}}$  为  $X_{\mu\text{PMU}}$  的邻接节点集合;  $x_Y = 1$  表示  $Y$  中元素值均为 1。

利用算法对上述模型进行迭代寻优, 即可得到节点  $\mu$ PMU 配置的最优解。

### 2.2 基于 $\mu$ PMU 最优化配置的自适应分层模型

本文提出一种分层降维模型, 基于  $\mu$ PMU 节点最优配置方案结果, 将配电网拓扑结构划分为若干个二端口监测域(monitring area, MA), 其划分规则如下。

1) MA 两端节点须配置  $\mu$ PMU, 两端节点直接量测可观后, 对应内部节点即可间接全部可观。

2) 若 MA 内未配置  $\mu$ PMU 节点达 3 个及以上时, 为在网络中实现更均匀的覆盖, 减少观测盲区, 只考虑图 3 所示的 3 种 MA 类型, 尽可能减少量测误差, 提高信息提取精度与故障定位准确率。

3) 电源/DG 侧与负荷侧需配置  $\mu$ PMU, 确保电网源端和负荷端直接被  $\mu$ PMU 覆盖。

4) 分支节点是关键电流或电压交汇点, 必须安装  $\mu$ PMU, 以减少量测误差。

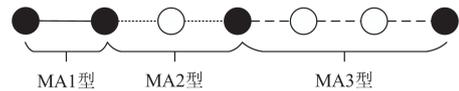


图 3 监测域类型

Fig. 3 Monitoring area type

基于上述划分规则需构建以下两个约束函数。

$$P_{\text{must}}(x) = \delta \sum_{i \in R} (1 - x_i) \quad (21)$$

$$P_{\text{distance}}(x) = \sigma \sum_{i,i+r} \max(0, Z_{i(i+r)} - 2) \quad (22)$$

式中:  $P_{\text{must}}(x)$  为强制安装约束函数;  $P_{\text{distance}}(x)$  为节点间距约束函数;  $\delta$  为强制安装系数;  $\sigma$  为节点间距系数;  $R$  为强制安装  $\mu$ PMU 节点集合;  $Z_{i(i+r)}$  为节点  $i$  与  $i+r$  ( $r=1,2,3$ ) 之间未配置  $\mu$ PMU 的节点数。

综上可得  $\mu$ PMU 配置目标函数如式(23)所示。

$$F(x) = w_1 \sum_{i=1}^N x_i + w_2 \sum_{i=1}^N x_i c_i + P_{\text{penalty}}(x) + P_{\text{must}}(x) + P_{\text{distance}}(x) \quad (23)$$

利用所提 IQIA 算法对上述函数模型进行求解,

使得目标函数值达到最小值, 即可得到节点  $\mu$ PMU 配置最优解。

不同最优配置方案下呈现差异化节点  $\mu$ PMU 配置格局, 但均可达到分层降维目标, 体现了所提  $\mu$ PMU 配置节点分层分区的自适应能力。

### 3 故障定位流程

故障分层定位流程如图 4 所示。

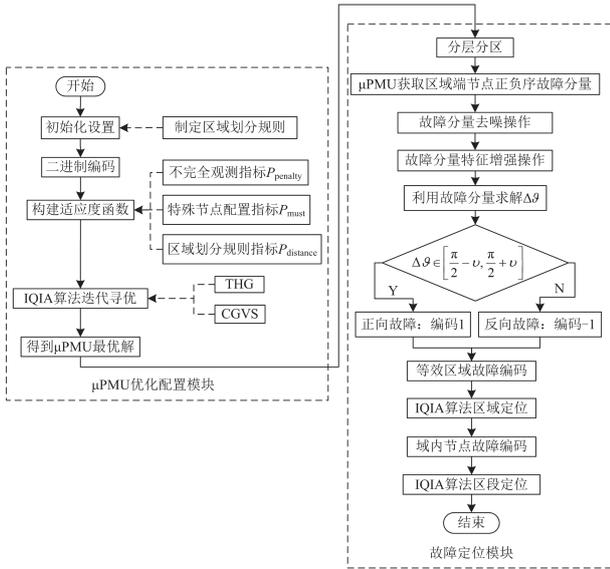


图 4 故障定位流程

Fig. 4 Fault location flow chart

基于  $\mu$ PMU 节点优化配置的故障分层定位方法步骤如下。

步骤 1: 利用  $\mu$ PMU 优化配置数学模型与所提算法完成网络节点  $\mu$ PMU 最优化配置, 然后通过 MA 划分规则进行分层分区, 构建基于一种  $\mu$ PMU 优化配置的分层降维模型。

步骤 2: 发生故障时, 通过节点已配置的  $\mu$ PMU 采集对应节点故障电流信息, 并经过数据预处理环节对其进行去噪处理及特征增强, 之后再通过已知故障信息计算未配置  $\mu$ PMU 节点故障电流。

步骤 3: 基于 MA 划分后的等效网络, 利用 IQIA 算法模型将故障定位至某一监测域范围内。

步骤 4: 通过步骤 1—步骤 3 即可确定故障监测域 MA。然后根据区域端口节点  $\mu$ PMU 采集并处理故障信息, 基于电力系统可观性机理计算故障监测域内各节点故障电流信息, 生成节点故障编码, 利用所提算法进行区段定位, 确定故障区段位置。

### 4 算例验证

在 MATLAB/Simulink 中搭建接入若干 DG 的

IEEE33 节点标准系统模型进行配电网单相接地故障定位测试仿真实验验证。

中性点不接地系统电压等级设为 35 kV, 频率为 50 Hz, 基准容量为 500 MVA, 基准功率为 100 MW, 负荷总有功功率为 3.715 MW。DG<sub>1</sub>、DG<sub>2</sub>、DG<sub>3</sub> 均采用逆变型 DG, 其总有功功率为 2.643 MW, 正常运行条件下 DG 渗透率约为 71.14%, 3 个 DG 的有功输出分别为 900 kW、870 kW、873 kW, DG 出力以 40% 计算。接地电阻设为 0.1  $\Omega$ 。线路阻抗及节点负荷均依照标准 IEEE33 节点模型参数设定。

在  $\mu$ PMU 优化配置过程中, 设置种群规模为 100, 交叉率为 0.05, 变异率前期为 0.3, 后期为 0.05, 迭代次数为 200 次, 强制安装系数  $\delta = 100$ , 节点间距系数  $\sigma = 200$ , 不可观测性惩罚系数  $\eta = 50$ ,  $w_1 = w_2 = 1$ 。

在故障定位环节中, 种群数目设定为 100, 变量个数为 33, 每个种群含有 8 个量子位, 克隆规模为 100, 区域定位最大迭代次数取 100,  $W$  取 100; 交叉、变异概率分别为 0.85 和 0.05。

#### 4.1 IEEE33 节点网络 $\mu$ PMU 最优化配置方案

根据上述  $\mu$ PMU 优化配置模型, 利用 IQIA 算法可得到满足 MA 划分规则的  $\mu$ PMU 最优配置节点, 算法迭代结果如表 2 所示。

表 2 IEEE33 节点网络  $\mu$ PMU 优化配置方案

Table 2 Optimal  $\mu$ PMU configuration for the

IEEE33-node network	
序号	配置方案(配置 $\mu$ PMU 节点)
1	1、2、3、6、8、11、14、17、18、21、22、 25、28、31、33
2	1、2、3、6、7、11、13、17、18、21、22、 25、28、31、33
3	1、2、3、6、9、11、14、17、18、20、22、 25、28、31、33
4	1、2、3、6、10、11、15、17、18、21、22、 25、28、31、33
5	1、2、3、6、7、11、14、17、18、21、22、 25、27、30、33
6	1、2、3、6、7、11、14、17、18、21、22、 25、27、30、33
7	1、2、3、6、8、11、13、17、18、21、22、 25、28、30、33
⋮	⋮

从迭代结果可以看出,  $\mu$ PMU 最优配置方案不止一种。以第一种配置方案为例, 经过平均迭代 23 次, 得到  $\mu$ PMU 最优节点配置节点状态为 [1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1], 即配置  $\mu$ PMU 节点为 1、2、3、6、8、11、14、17、18、21、22、25、28、31、33, 对

应最优化配置目标函数收敛曲线如图 5 所示, 配置节点分布如表 3 和图 6 所示。其他配置方案同理。

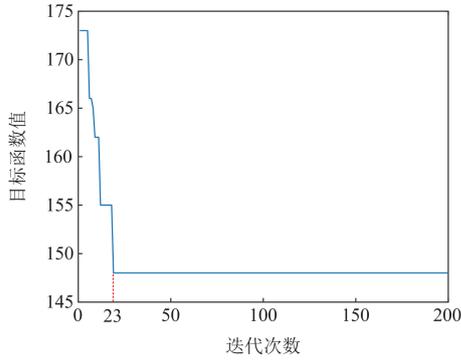


图 5 最优化配置目标函数收敛曲线

Fig. 5 Convergence curves of optimal configuration objective functions

表 3 分层划分后 MA 分布情况

Table 3 Distribution of MA after hierarchical partitioning

等效区域编号	MA 类型	包含节点序号	馈线区段序号
1	MA1	1, 2	1-2
2	MA1	2, 3	2-3
3	MA3	3, 4, 5, 6	3-4、4-5、5-6
4	MA2	6, 7, 8	6-7、7-8
5	MA3	8, 9, 10, 11	8-9、9-10、10-11
6	MA3	11, 12, 13, 14	11-12、12-13、13-14
7	MA3	14, 15, 16, 17	14-15、15-16、16-17
8	MA1	17, 18	17-18
9	MA3	2, 19, 20, 21	2-19、19-20、20-21
10	MA1	21, 22	21-22
11	MA3	3, 23, 24, 25	3-23、23-24、24-25
12	MA3	6, 26, 27, 28	6-26、26-27、27-28
13	MA3	28, 29, 30, 31	28-29、29-30、30-31
14	MA2	31, 32, 33	31-32、32-33

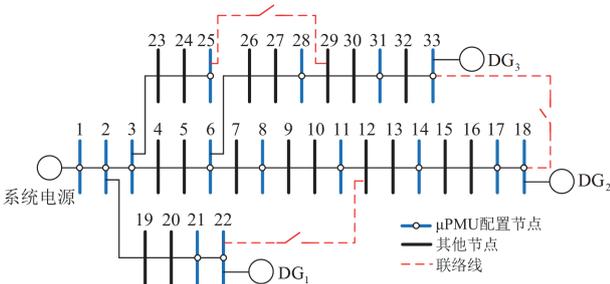


图 6 IEEE33 节点拓扑结构  $\mu$ PMU 配置与分层分区

Fig. 6  $\mu$ PMU configuration and hierarchical partitioning of IEEE33-node topology

通过 MA 划分, 可将 IEEE33 节点配电网拓扑结构等效为含有 15 个等效节点、14 个等效区段的二端口网络。通过  $\mu$ PMU 配置对 IEEE33 节点配

网进行分层降维, 使得迭代寻优节点从 33 节点降低到 15 节点, 故障节点维度降低了 54.5%。

#### 4.2 单一故障验证

基于  $\mu$ PMU 优化配置后的分层结果, 考虑 DG 投切情况对故障定位的影响, 针对附录 A 表 A1 算例进行故障定位验证。从表 A1 可以看到, 故障定位结果与假定故障位置相符, 故障定位准确可靠。

#### 4.3 多重故障验证

多重故障定位结果如附录 A 表 A2 所示。验证过程发现, 当二重或三重故障发生在未配置  $\mu$ PMU 节点和已配置  $\mu$ PMU 节点之间, 即单一 MA 中发生多重故障(见图 7)时, 通过可观性计算得到未配置  $\mu$ PMU 节点信息有误, 虽故障 MA 仍可确定, 但其内部多重故障所在区段无法进行准确定位, 其原因在于处于多重故障之间的未配置  $\mu$ PMU 节点不可观测, 难以获取故障信息, 无法完成区段故障定位。

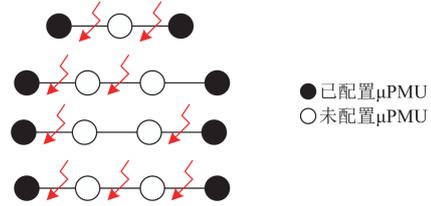


图 7 单一 MA 中发生多重故障种类

Fig. 7 Multiple fault types occurred in a single MA

#### 4.4 信息畸变影响分析

为说明所提方法具有较高容错性, 对存在故障的节点增加信息发生畸变情况。对应故障定位结果如附录 A 表 A3 所示, 可以看到定位结果与假定故障位置一致, 说明所提计及信息畸变的算法函数适用性较强, 容错性高。

#### 4.5 不同算法性能分析

为验证所提方法的性能优势, 采用未改进的量子免疫算法(quantum immune algorithm, QIA)、粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)以及传统免疫算法(immune algorithm, IA)进行性能对比测试。仍以单一故障验证环节、多重故障验证环节及信息畸变验证环节中共 12 组故障位置算例为对象, 另外假设 4 种 DG 投切工况(开关  $K_1K_2K_3 = 000, 001, 011, 111$ )以及 7 种畸变类型(包括未畸变情况及故障点所在馈线附近随机某节点发生畸变的 6 种畸变类型)分别进行仿真对比测试, 对共计 336 种算例进行整理与分析, 记录并计算平均迭代次数、故障定位准确次数以及故障定位准确率数据。验证过程中两种设定均已完成数据预处理工作。

1) 设定 PSO、IA 算法均采用单层模型, QIA 进行两种模型验证, 以分析所提分层模型的优势。

算法仿真对比结果如表 4 所示。以算例 4、6、10 为例,算法迭代曲线对比如附录 A 图 A1 上排所示。

表 4 设定 1)故障定位结果算法对比

Table 4 Comparison of fault location results of different algorithms before improvement (Setting 1)

算法类型	平均迭代次数	定位准确次数	定位准确率/%	平均耗时/s
QIA(分层)	10	321	95.5	0.772
QIA(单层)	27	271	80.7	1.685
PSO	48	200	59.5	1.792
IA	59	187	55.7	1.864

由表 4 可知,相较于传统单层模型算法存在的迭代收敛慢、易受局部最优解束缚等缺陷,所提分层降维模型通过拓扑结构简化,使故障定位准确率提升至 95%以上,同时实现运算耗时缩减至 1 s 以内,且采用 QIA 算法进行单双层定位时,分层定位准确率较单层提升了约 18.3%。

2) 设定 QIA、PSO、IA 算法均采用分层模型,以验证 IQIA 算法的优势。对应定位算法仿真结果对比如表 5 所示。同样以算例 4、6、10 为例,各算法对比迭代曲线如附录 A 图 A1 所示。

表 5 设定 2)故障定位结果算法对比

Table 5 Comparison of fault location results by different algorithms (Setting 2)

算法类型	平均迭代次数	定位准确次数	定位准确率/%	平均耗时/s
IQIA	9	330	98.2	0.402
QIA	16	319	94.9	0.696
PSO	25	308	91.7	0.710
IA	30	300	89.3	0.724

由表 5 可以看出,引入分层模型及畸变变量后,算法定位准确率均有所提高。IQIA 算法相较于未改进的 QIA 算法,故障定位准确率提升了约 3.5%,且改进前后故障定位准确率均高于其他算法,定位准确性和容错鲁棒性强,定位结果可靠性更高。

#### 4.6 噪声干扰抑制验证

为验证所提噪声抑制策略在故障定位中的抗干扰能力,添加信噪比步长为 5 dB 的 20 dB、25 dB、30 dB、35 dB、40 dB 的 5 种高斯噪声工况进行测试验证,以上述 336 个算例为对象,验证结果对比如图 8 所示。

由图 8 可以看出,所提 IQIA 故障定位模型通过噪声抑制策略减小了故障定位误差,相较于 QIA 故障定位准确率平均提高了约 4.3%,整体故障定位准确度为 96%~98%。但当信噪比低于 25 dB 时,所

有算法的误判风险均会显著增大。

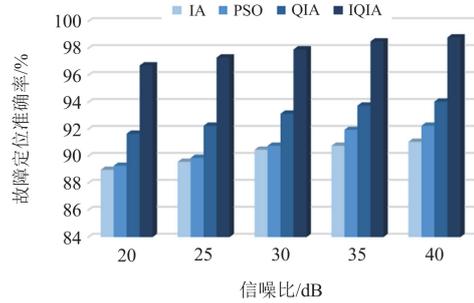


图 8 不同噪声干扰工况下故障定位准确率对比

Fig. 8 Comparison of fault location accuracy under different noise interference conditions

#### 4.7 耐接地电阻能力验证分析

为验证所提故障特征增强机制在故障定位中的耐接地电阻能力,设置 0.1 Ω、10 Ω、100 Ω、500 Ω、1000 Ω 5 种接地电阻工况。仍以上述算例为对象,验证所提方法故障定位准确率,结果如表 6 所示。

表 6 不同接地电阻工况下故障定位准确率对比

Table 6 Comparison of fault location accuracy under different ground resistance conditions

接地电阻/Ω	IA/%	PSO/%	QIA/%	IQIA/%
0.1	90.2	91.7	93.2	98.2
10	86.3	87.5	89.3	97.9
100	85.7	85.4	88.1	95.8
500	84.2	85.0	87.2	95.5
1000	82.4	83.8	87.2	95.2

由表 6 可知,相较其他算法,所提引入故障特征增强机制的故障定位模型泛化性能较强,即使在高阻故障(100 Ω、500 Ω、1000 Ω)特征极其微弱的场景下,故障定位准确率最低仍可达到 95%,说明所提方法在高阻故障场景下的耐受特性较好。

#### 4.8 不同故障类型影响分析

本节分析相间故障(AB)及两相接地故障(ABg)对所提故障定位方法的影响。以上述 336 个算例为对象,验证各类故障类型对故障定位准确率的影响,测试结果如表 7 所示。

表 7 不同故障类型工况下故障定位结果对比

Table 7 Comparison of fault location results under different fault types

故障类型	平均迭代次数	定位准确次数	定位准确率/%	平均耗时/s
Ag	12	331	98.5	0.497
ABg	13	330	98.2	0.503
AB	10	334	99.4	0.474

由表 7 可知,三者平均定位耗时均在 0.5 s 左右,两相接地故障的定位准确率与单相接地故障相近,均为 98%左右,而相间故障定位速度有大幅提升,原因在于在中性点不接地系统中发生相间故障时,故障正序电流显著增大,加之引入的故障特征增强机制,故障定位整体效率得到极大提升。

#### 4.9 DG 影响分析

针对 DG 接入导致系统运行方式发生改变的问题,不考虑影响较小的 DG 控制策略与短路电流水平影响,只针对 DG 出力、DG 接入数量和位置进行分析验证。

1) 不同 DG 出力影响分析。为验证 DG 不同出力比例对所提方法的准确性影响,设置了 4 种出力情形验证 336 个算例的定位准确率与不同算法性能对比,结果如图 9 所示。

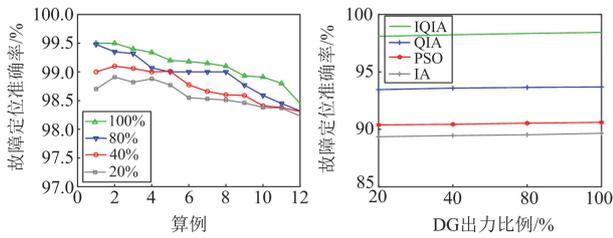


图 9 不同 DG 出力比例下故障定位准确率比较

Fig. 9 Comparison of fault location accuracy under different percentage of DG output

由图 9 可以看出,在不同 DG 出力工况下,整体故障定位准确率均能保持稳定,表明该算法对 DG 出力的鲁棒性较强。

2) DG 的接入点数量及位置影响。假定在序号为 2、3、6、12、25、29 的 6 个联络或分支节点接入 DG, DG 参数设定同上,验证不同接入数量的故障定位结果。以上述 336 个算例为对象,故障平均定位准确率如图 10 所示。

由图 10 可以看出,随着 DG 数量的增加,故障定位准确度存在小幅度降低,但故障平均定位准确率均稳定在 95%以上,表明所提方法在多 DG 接入下的故障定位适应性较强。

#### 4.10 不同拓扑结构下 $\mu$ PMU 优化配置方法验证

假定 IEEE119 节点网络发生单相接地故障的位置与前文 336 个算例的故障位置序号相同,比较分层降维模型优势,对比结果如表 8 所示。

由表 8 可以看出,随着网络拓扑节点增加,分层降维效率显著提高。分层降维后两种拓扑结构故障定位准确率分别提升约 2.8%、8.5%,整体定位准确率均高于 90%,平均定位耗时在 1 s 以内。

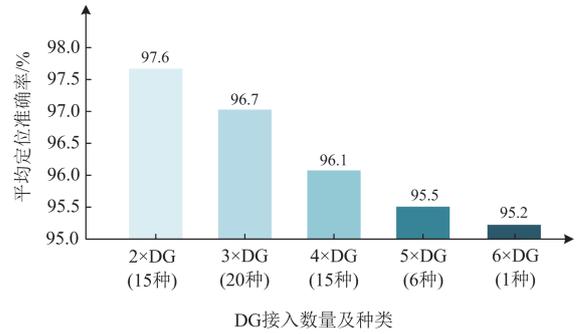


图 10 不同 DG 接入位置故障定位平均准确率比较

Fig. 10 Comparison of fault location accuracy under different DG access locations

表 8 不同拓扑结构工况下故障定位结果对比

Table 8 Comparison of fault location results under different topology conditions

拓扑节点	降维节点	降维效率/%	降维前后定位准确率/%	降维前后平均耗时/s
33	15	54.5	95.5→98.2	0.787→0.497
119	25	79.0	90.2→97.9	1.089→0.863

## 5 结论

本文提出了一种考虑  $\mu$ PMU 节点优化配置的含 DG 配电网故障分层定位方法,并针对故障定位模型进行各类工况下的算例测试验证,得到以下结论。

1) 引入噪声抑制策略及故障特征增强机制两种数据预处理模块,使故障定位模型在噪声干扰下的故障定位准确率提升了 4.3%。在发生高阻接地故障时,故障定位准确率为 95%左右,故障定位效率得到较大提升。

2) 引入三态  $H_3$  门及以 CGVS 来优化所提 IQIA 算法,避免算法频繁陷入局部最优解。另外构建了计及畸变变量的适应度函数,以增强算法容错性能。所提算法针对多重故障及畸变故障均可准确定位,算法收敛速度较快。

3) 构建了一种基于  $\mu$ PMU 节点优化配置的自适应分层降维模型。所提分层模型在减少  $\mu$ PMU 安装成本的同时,使 IEEE33 节点网络故障搜索维度降低了 54.5%,故障定位模型得到简化,间接提升了故障定位算法的收敛速度。

本文只考虑了 DG 潮流影响及中性点不接地系统下的故障定位问题,为解决故障定位测试中面临的挑战,后续工作将围绕不可观区段辨识、误判机理、谐振接地系统影响及分布式电源控制等关键问题展开深入研究。



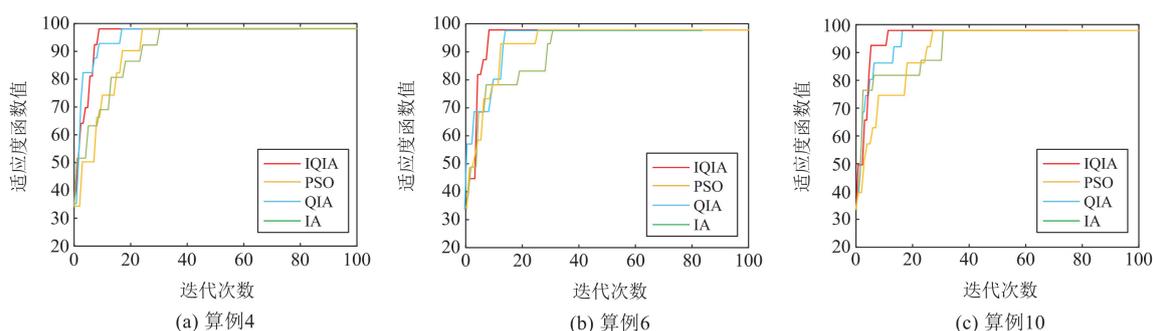


图 A1 两种设定条件下各算法定位结果迭代曲线对比

Fig. A1 Iterative curve comparison of fault location results of different algorithms under two conditions

### 参考文献

- [1] 李纳纳, 王宾. 小电流接地配电网馈线单相接地故障零序阻抗特性分析[J]. 电测与仪表, 2024, 61(6): 58-64.  
LI Nana, WANG Bin. The analysis of zero-sequence impedance characteristics of feeder in distribution system with neutral point non-effective grounding[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(6): 58-64.
- [2] 刘健, 常小强, 张志华, 等. 基于零序电压的小电流接地系统高阻单相接地检测启动性能分析及其应[J]. 供用电, 2023, 40(9): 27-35, 73.  
LIU Jian, CHANG Xiaoqiang, ZHANG Zhihua, et al. Analysis and applications of startup performance based on zero-sequence-voltage for single phase grounding fault detection of small current grounding systems[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(9): 27-35, 73.
- [3] CHENG Liang, WANG Tao, WANG Yi. A novel fault location method for distribution networks with distributed generations based on the time matrix of traveling-waves[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(4): 698-708.
- [4] BANSAL Y, SODHI R. PMUs enabled Tellegen's theorem-based fault identification method for unbalanced active distribution network using RTDS[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(3): 4567-4578.
- [5] LUO Jian, LIU Yao, CUI Qiushi, et al. Single-ended time domain fault location based on transient signal measurements of transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(2): 61-74.
- [6] 谢李为, 李勇, 罗隆福, 等. 基于节点电压差值的配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 106-116.  
XIE Liwei, LI Yong, LUO Longfu, et al. Distribution network fault location method based on node voltage difference[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 106-116.
- [7] 李梓玮, 许丽娟. 基于概率神经网络的直流滤波器电容器开路故障定位方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(1): 48-56.  
LI Ziwei, XU Lijuan. Open-circuit fault location method of DC filter capacitor based on probabilistic neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(1): 48-56.
- [8] 李佳宇, 王光临, 罗建华, 等. 基于多元变分模态分解与峭度的配电网故障定位方法[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(3): 92-98.  
LI Jiayu, WANG Guanglin, LUO Jianhua, et al. A cable fault location method of distribution networks based on MVMD and kurtosis calculation[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(3): 92-98.
- [9] 梁英达, 田书, 刘明杭. 基于相量校正的含 DG 配电网故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 33-42.  
LIANG Yingda, TIAN Shu, LIU Minghang. Fault section location of multi-source distribution network based on phasor correction[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 33-42.
- [10] 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. Distribution network fault location based on combination of matrix algorithm and optimization algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 152-158.
- [11] 宫璇, 任欣旭, 王秋杰, 等. 具有高容错稳定性的含 DG 配电网区段定位方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(11): 3992-4006.  
GONG Xuan, REN Xinxu, WANG Qiuji, et al. Distribution network segment location method with DG with high fault tolerance stability[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 3992-4006.
- [12] 郑聪, 周海峰, 郑东强, 等. 基于改进多元宇宙算法的主动配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 169-179.  
ZHENG Cong, ZHOU Haifeng, ZHENG Dongqiang, et al. Research on fault location method of active distribution network based on improved multiverse algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 169-179.
- [13] 李卫彬, 童欣, 黄超, 等. 基于分层定位模型的含 DG 配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 33-42.

- 2022, 50(24): 160-166.
- LI Weibin, TONG Xin, HUANG Chao, et al. Research on fault location method of distribution network with DG based on hierarchical location model[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 160-166.
- [14] 李浩, 张禄亮, 栾云飞, 等. 基于子系统划分和注入电流比的配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8): 63-72.
- LI Hao, ZHANG Luliang, LUAN Yunfei, et al. Distribution network fault location method based on sub-system division and injection current ratio[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 63-72.
- [15] 李明阳, 张沈习, 程浩忠, 等. 含分布式电源的主动配电网分层故障定位方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(8): 79-87.
- LI Mingyang, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Hierarchical fault location method for active distribution network with distributed power source[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(8): 79-87.
- [16] 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): 1820-1829.
- ZHOU Fangge, XIAO Shiwu. Ground fault location of active distribution network based on zero sequence current distribution[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1820-1829.
- [17] 王秋杰, 金涛, 谭洪, 等. 基于分层模型和智能校验算法的配电网故障定位技术[J]. 电工技术学报, 2018, 33(22): 5327-5337.
- WANG Qiujie, JIN Tao, TAN Hong, et al. Fault location technology of distribution network based on hierarchical model and intelligent calibration algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(22): 5327-5337.
- [18] BU S, MEEGAHAPOLA L G, WADDUWAGE D P, et al. Stability and dynamics of active distribution networks with D-PMU technology: a review[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(3): 2791-2804.
- [19] 李欣桐, 俞小勇, 阳国燕, 等. 基于微型 PMU 数据挖掘的智能配电网态势感知方法研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7): 34-40.
- LI Xintong, YU Xiaoyong, YANG Guoyan, et al. Research on situation awareness method of smart distribution network based on micro PMU data mining[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7): 34-40.
- [20] 曹鹏, 刘敏. 基于改进的整数规划法结合零注入节点的 PMU 优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 143-150.
- CAO Peng, LIU Min. PMU placement method based on improved integer programming method combined with zero injection buses[J]. Power system Protection and Control, 2021, 49(16): 143-150.
- [21] JIA Ke, YANG Bin, BI Tianshu, et al. An improved sparse-measurement-based fault location technology for distribution networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(3): 1712-1720.
- [22] CHEN Xuebing, WEI Feng, CAO Shuyu, et al. PMU placement for measurement redundancy distribution considering zero injection bus and contingencies[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(4): 5396-5406.
- [23] 王澍, 严正, 孔祥瑞, 等. 主动配电网多目标 PMU 最优配置[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 833-840.
- WANG Shu, YAN Zheng, KONG Xiangrui, et al. Multi-objective optimal placement of pmu in active distribution network[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 833-840.
- [24] 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(04): 138-145.
- [25] 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.
- [26] 刘道兵, 顾雪平, 梁海平, 等. 电网故障诊断完全解析模型的解集评价与最优解求取[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5668-5676.
- LIU Daobing, GU Xueping, LIANG Haiping, et al. Solution evaluation and optimal solution discrimination of a complete analytical model for power system fault diagnosis[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5668-5676.
- [27] 江雪晨, 王大志, 张翠玲, 等. 利用模型诊断降维的电网故障诊断完全解析方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(23): 6371-6378.
- JIANG Xuechen, WANG Dazhi, ZHANG Cuiling, et al. A complete analytic method for fault diagnosis of power systems based on model-based diagnosis for dimensionality reduction[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23): 6371-6378.
- [28] SHAFIQUE M A, MUNIR A, LATIF I. Quantum computing: circuits, algorithms, and applications[J]. IEEE Access, 2024, 12: 22296-22314.

收稿日期: 2025-01-18; 修回日期: 2025-06-13

作者简介:

高锋阳(1970—), 男, 通信作者, 博导, 研究方向为电力系统安全可靠运行及配电网健康评估; E-mail: ljdgaofy@mail.lzjtu.cn

李 龙(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为有源配电网故障识别与定位技术。E-mail: 2587023723@qq.com

(编辑 许 威)