

含特殊负荷的配电网故障定位与识别

高峰阳^{1,2}, 李昭君¹, 袁成¹, 齐晓东¹, 李晓峰¹, 庄圣贤³, 李浩武²

(1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃交达工程检测科技有限公司, 甘肃 兰州 730070;
3. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:特殊负荷接入配电网造成原配电网潮流分布灵活多变,故障过电流方向不唯一,导致传统配电网故障定位与识别方法不具备自适应性,因此提出一种适用于含特殊负荷的配电网故障定位与识别方法。将配电网划分为多个双端无分支的区域网络进行分层降维,从区域端口的微型相量测量单元测量数据中挖掘故障电流信息,对基于正序电流故障分量的故障方向判据进行修正;然后在故障方向编码的基础上,将量子免疫优化算法用于实现配电网分层定位;最后在故障区域内,利用故障相与节点零序电流对故障类型进行快速有效判别。算例仿真结果表明,所提方法能够准确定位与识别含特殊负荷配电网故障区段,同时能有效避免非故障状态下的电力系统扰动对故障定位的影响。

关键词:特殊负荷;配电网;故障定位;微型相量测量单元;量子免疫优化算法

中图分类号:TM 727.2

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202008034

0 引言

特殊负荷是具有自变性的负荷,这类负荷可以在极短的时间(秒级乃至毫秒级)内从电网汲取或释放几十兆瓦乃至百兆瓦的功率,主要包含带有发电特性的负荷和具有强波动性与冲击性的负荷^[1-2]。特殊负荷大量分散地接入会对配电网健康状态产生一系列的影响。特殊负荷中高渗透率分布式电源DG(Distributed Generation)使单源辐射状配电网潮流方向转变为非单向流动;强波动性、冲击性负荷易引发电力系统强迫功率振荡,使原本确定的潮流分布呈现随机性。上述情况增加了配电网故障定位与识别难度,因此考虑含特殊负荷的配电网故障定位与识别对提高配电网经济效益、降低运行风险具有现实意义。

目前关于配电网故障定位的研究可分为2类:①基于馈线终端单元FTU(Feeder Terminal Unit)融合多节点的测量信息来确定故障位置^[3];②基于同步相量测量单元PMU(Phasor Measurement Unit)的配电网故障定位技术^[4]。如何利用微型PMU采集的广域信息降低基于FTU的配电网区段定位的误差是近年来研究的热点。在广域信息定位中,基于故障分量的定位方法凭借独立于负荷分量、不受负荷电流和潮流方向影响的优势在含特殊负荷配电网故障

定位中得到了广泛应用^[5-6]。在DG渗透率高的多分支节点的配电网,利用节点正序电流故障分量的相角差判定故障方向、利用智能算法通过编码的故障方向进行故障定位^[7-8]的方法会因负荷电流的扰动、过渡电阻较大出现误判,难以快速有效地实现故障隔离。针对多分支节点配电网,文献[9]提出基于故障方向测度的配电网区段定位方法,通过构建故障电流方向判据对每个节点终端状态编码,通过0-1整数规划算法迭代寻优区段状态编码,该方法只需FTU测量节点的基波零序电流,但没有对配电网进行分层定位识别,导致故障定位时间长。文献[10-11]将分层分区的思想引入故障定位中,提高了故障定位的效率,但其附加网络分析只将DG等效为虚拟同步发电机,没有考虑发生故障时含逆变型DG的母线压降较大,导致DG输出较大的无功功率影响故障方向判定的情况。文献[12-13]计及逆变型DG低电压穿越控制策略对故障分量的影响,提出基于正序电流和故障前电压相位比较的保护方法,该方法不受负荷潮流方向、DG投切位置的影响,但是在配电网非健全故障信息下,不能对多重畸变进行有效识别,容错性能低。

以上文献的研究仅限于含DG配电网的故障定位技术,没有考虑强波动性、冲击性的负荷接入对配电网故障定位的影响,而考虑含特殊负荷的配电网故障定位与识别则需重点解决两方面的问题:①故障定位与识别的正确性和可靠性受潮流随机性和故障条件改变影响的问题;②高性能计算系统进行故障定位与识别时的复杂度高和实时性差问题。

基于以上研究的不足,本文提出一种含特殊负荷的配电网故障定位与识别方法。首先将配电网划分为多个等效区域,进行分层降维;然后在分层定位

收稿日期:2019-12-24;修回日期:2020-06-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51767013);甘肃省重点研发计划资助项目(18YF1FA058);兰州市人才计划项目(2017-RC-95)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51767013), the Provincial Key R&D Program of Gansu(18YF1FA058) and the Talent Plan Project of Lanzhou (2017-RC-95)

模型中,利用第 1 层区域端节点的正序电流故障分量对故障电流方向进行判别和编码,通过量子免疫优化算法 QIOA(Quantum Immune Optimization Algorithm)迭代寻优区域状态,利用区域定位的结果进行第 2 层故障定位,将故障定位到具体区段;最后综合微型 PMU 测量的故障区域两端节点零序电流进行故障识别。本文方法基于分层分布式定位思想实现,有效地降低了系统计算的复杂度;利用节点电流正序故障分量相位差的故障方向判别不受潮流方向和负荷电流的影响,且适用于任何类型的故障。算例仿真结果表明,本文方法能够快速准确地定位与识别故障区段,适用于含特殊负荷的配电网。

1 含特殊负荷配电网分层建模

将分层思想引入配电网故障定位中,构建故障定位分层模型可减小种群规模,降低配电网节点搜索维度,使算法加快收敛,避免算法对辨识结果的不稳定性问题。

1.1 模型分层降维理论

以图 1 所示的含特殊负荷配电网为例,分析各个支路节点开关期望状态函数。图 1 中,LD₁和 LD₃为三相平衡负荷;功率时变负荷 LD₂等效为特殊负荷中的冲击性负荷;电机型 DG(DG₁、DG₂)和逆变型 DG(DG₃)等效为特殊负荷中带有发电特性的负荷。

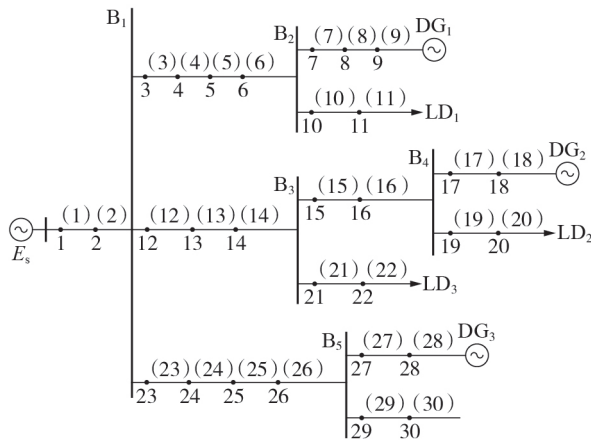


图 1 含特殊负荷的配电网

Fig.1 Distribution network with special loads

构建配电网节点 i 的开关函数如式(1)所示,在开关期望函数中引入 DG 系数表示 DG 投切状态^[14]。

$$I_i^*(s) = \left(- \prod_{u=1}^{M_1} s_{iu} \right) \prod_{l=1}^{N_1} K_{DG_l} + \prod_{d=1}^{M_2} s_{id} \quad (1)$$

其中, K_{DG_l} 为第 l 个 DG 的投切系数,其值为 0 和 1 分别表示 DG 单独运行状态和并网运行状态; N_1 为 DG 数量; s_{iu} 为节点 i 上游馈线区段 u 的状态; s_{id} 为节点 i 下游馈线区段 d 的状态; M_1 、 M_2 分别为节点 i 上游馈线区段的数量和下游馈线区段的数量。

为了降低计算复杂度,假定只有 DG₁、DG₂ 并网运行,LD₁、LD₂ 接入配电网,设置区段(15)发生故障,根据式(1)得到所有节点开关期望状态函数。假定以系统电源指向负荷的方向为故障电流正方向。

主电源支路节点的开关期望函数为:

$$I_1^*(s) = I_2^*(s) = 1 \quad (2)$$

含特殊负荷支路节点的开关期望函数为:

$$I_7^*(s) = I_8^*(s) = I_9^*(s) = I_{10}^*(s) = I_{11}^*(s) = I_{17}^*(s) = I_{18}^*(s) = I_{19}^*(s) = I_{20}^*(s) = -1 \quad (3)$$

多分支节点支路开关期望函数为:

$$I_3^*(s) = I_4^*(s) = I_5^*(s) = I_6^*(s) = -1 \quad (4)$$

$$I_{12}^*(s) = I_{13}^*(s) = I_{14}^*(s) = 1 \quad (5)$$

假定线路 B₃-B₄ 内任意区段发生单重故障和多重故障,各个非故障支路节点的开关函数依然满足式(2)~(5)。由此得出结论:故障支路对非故障支路开关函数构建无影响。根据对外等效定则,无论线路 B₃-B₄ 发生何种故障,可将含有 DG、负荷和多分支节点支路等效为一个单端输入、单端输出的区域网络,将其支路各个节点等效为一个区域节点 j ,如图 2 所示。等效区域包含 1 条区域等效线路和 2 个区域节点 k_j 和 k_{j+1} ,其中 k_j 为靠近主电源侧的区域端口节点。

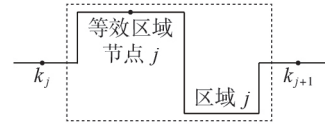


图 2 支路的等效二端网络

Fig.2 Equivalent two-terminal network of branch

1.2 含特殊负荷配电网分层降维

对图 1 所示的含特殊负荷配电网进行分层降维,得到如附录 A 中图 A1 所示的 12 个区域按潮流流向依次相连形成的网络,从而组成第 1 层定位模型,第 2 层定位模型由单个二端网络组成。

2 故障电流方向判定

2.1 故障方向判定原理

含特殊负荷配电网多为大电流接地系统,即中性点接地系统。假定系统发生单相接地故障,三相对地通路的对称性遭到破坏,中性点电压发生偏移,此时故障电流包含正序、负序和零序电流。在图 3 所示的系统单相故障网络中,假定各分支线路的正方向为由电源指向负荷侧,构建基于正序电流故障分量的节点故障方向判据。

假设在含 DG 支路发生单相接地故障,靠近母线处的节点 6 到故障点处的正序阻抗为 $Z_{n1}^{(1)}$,其相角 $\theta_1 \in [0, \pi/2]$,靠近 DG 处的节点 7 到故障点处的阻抗为 $Z_{n2}^{(1)}$,其相角 $\theta_2 \in [0, \pi/2]$ 。忽略节点线路对地电

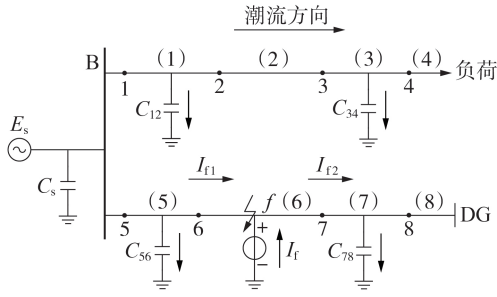


图3 系统单相故障网络

Fig.3 Single-phase fault network of system

容的影响。

(1) 正向故障电流判定。

假设节点5、6正方向点 f 发生故障,节点6处正序电压故障分量 $\Delta U_{s1}^{(1)}$ 的相角为 φ_1 ,此时流经节点6的电流故障分量为:

$$\Delta I_{n1}^{(1)} = \frac{\Delta U_{s1}^{(1)}}{Z_n^{(1)}} = \frac{|\Delta U_{s1}^{(1)}| \angle \varphi_1}{|Z_n^{(1)}| \angle \theta_1} = |\Delta I_{n1}^{(1)}| \angle (\varphi_1 - \theta_1) = |\Delta I_{n1}^{(1)}| [\cos(\varphi_1 - \theta_1) + j \sin(\varphi_1 - \theta_1)] \quad (6)$$

考虑正序电流故障分量是余弦函数,对正序电流故障分量 $\Delta I_{n1}^{(1)}$ 求解正、负导数,使其相位增加或减少 $\pi/2$,从而将故障分量的电气量相角统一到 $[-\pi, \pi]$ 范围内。建立检测故障电流方向的参考相量 $\Delta I_{n1}^{(1)*}$ 为:

$$\Delta I_{n1}^{(1)*} = |\Delta I_{n1}^{(1)*}| \angle \left(\frac{\arg \Delta I_{n1+}^{(1)*} + \arg \Delta I_{n1-}^{(1)*}}{2} + \frac{\pi}{2} \right) \quad (7)$$

$$\Delta I_{n1+}^{(1)*} = |\Delta I_{n1+}^{(1)*}| [-\sin(\varphi_1 - \theta_1) + j \cos(\varphi_1 - \theta_1)] = |\Delta I_{n1+}^{(1)*}| \angle \left(\varphi_1 - \theta_1 + \frac{\pi}{2} \right) \quad (8)$$

$$\Delta I_{n1-}^{(1)*} = -\Delta I_{n1+}^{(1)*} = |\Delta I_{n1-}^{(1)*}| \angle \left(\varphi_1 - \theta_1 - \frac{\pi}{2} \right) \quad (9)$$

其中, $\Delta I_{n1+}^{(1)*}$ 、 $\Delta I_{n1-}^{(1)*}$ 、 $\Delta I_{n1}^{(1)*}$ 分别为节点6处故障电流分量的导数、正导数、负导数。

结合式(7)、(9),可得参考相量为:

$$\Delta I_{n1}^{(1)*} = |\Delta I_{n1}^{(1)*}| \angle \left(\varphi_1 - \theta_1 + \frac{\pi}{2} \right) \quad (10)$$

设置正向故障电流判据如式(11)所示。

$$\Delta \theta = \arg \Delta I_{n1}^{(1)*} - \arg \Delta I_{n1}^{(1)} = \frac{\pi}{2} \quad (11)$$

(2) 反向故障电流判定。

节点7、8反方向点 f 发生故障,其中节点7处电压正序故障分量 $\Delta U_{s2}^{(1)}$ 的相角为 φ_2 ,设置反向故障电流判据如式(12)所示(推导详见附录B)。

$$\Delta \theta = \arg \Delta I_{n2}^{(1)*} - \arg \Delta I_{n2}^{(1)} = -\frac{\pi}{2} \quad (12)$$

2.2 修正故障电流方向判据

传统基于正序电流故障方向判据只是将故障电

流正、反方向分别限定于 $\pi/2$ 、 $-\pi/2$,若故障分量的提取存在误差,则相角差 $\Delta \theta$ 将与计算结果存在偏差,降低了判据的鲁棒性。为此,修正上述判据,假定一个相角差的变化范围 $[-\sigma, \sigma]$ 。

$$\sigma \geq \sigma_e + \sigma_w \quad (13)$$

其中, σ_e 为相角测量误差; σ_w 为判据裕角。

修正后的故障电流方向判据为:

$$\begin{cases} \frac{\pi}{2} - \sigma \leq \Delta \theta \leq \frac{\pi}{2} + \sigma & \text{正向故障电流} \\ -\frac{\pi}{2} - \sigma \leq \Delta \theta \leq -\frac{\pi}{2} + \sigma & \text{反向故障电流} \end{cases} \quad (14)$$

2.3 节点故障电流方向判定流程

(1) 选择测量点。

考虑含特殊负荷配电网结构特点,为消除传统基于双端信息故障定位方法由信息不同步而产生的误差,在主电源 E_s 出线、DG入线、大型感性特殊负荷入线节点处设置微型PMU测量点,其他节点处设置FTU测量点。

(2) 计算故障电流方向判定相角。

首先在节点测量点处获得正序电流信息;然后经周波延迟法^[15]计算节点的正序电流故障分量(计算过程如附录C中图C1所示);利用时域计算 t 时刻正序电流故障分量的正、负一次导数,如式(15)所示;最后计算参考相量并得到故障电流方向判定相角。

$$\begin{cases} \Delta I_{f+}^{(1)*}(t) = \frac{1}{2\Delta T} (\Delta I_f^{(1)}(t + \Delta T) - \Delta I_f^{(1)}(t - \Delta T)) \\ \Delta I_{f-}^{(1)*}(t) = \frac{1}{2\Delta T} (\Delta I_f^{(1)}(t - \Delta T) - \Delta I_f^{(1)}(t + \Delta T)) \end{cases} \quad (15)$$

其中, $\Delta T = 1/(Nf_s)$,为时间间隔, N 为采样数目, f_s 为电源频率。

进行故障定位时,微型PMU每周期可采样256或512点,故其相角测量精度低于 0.01° 。裕角 σ_w 通常设为 5° 。综上所述,故障电流方向判据为:

$$\begin{cases} 85^\circ \leq \Delta \theta \leq 95^\circ & \text{正向故障电流} \\ -95^\circ \leq \Delta \theta \leq -85^\circ & \text{反向故障电流} \end{cases} \quad (16)$$

将上述简单配电网故障电流方向判据运用于含特殊负荷配电网分层模型中节点故障电流方向判定,可得到各个节点的故障电流方向编码。

2.4 故障电流编码

考虑特殊负荷接入配电网,使得配电网潮流方向发生改变,单源配电网0-1故障电流编码方式不再适用于含特殊负荷配电网。重新定义节点 i 的故障电流编码如式(17)所示,假定以系统电源指向负荷的方向为故障电流正方向。

$$I_i = \begin{cases} 1 & \text{故障电流正方向} \\ 0 & \text{无故障电流} \\ -1 & \text{故障电流反方向} \end{cases} \quad (17)$$

3 量子免疫优化算法实现分层定位

基于0-1整数规划思想,结合第2节中的故障电流方向判定原理,根据获取的配电网分层模型中节点的故障电流方向编码,提出基于量子免疫优化算法的配电网分层定位方法。

3.1 配电网故障区域定位

本文在传统量子免疫算法(QIA)的基础上,提出具有全局收敛特性的量子免疫优化算法运用于配电网区域定位中。量子免疫优化算法结合了量子计算和免疫算法的机理,主要包含量子抗体编码、适应度评估或亲和度建立、量子位克隆扩增、操作变异^[16]。

(1)量子编码。

在QIA中,使用基于量子比特的编码方式,即用一对复数定义一个量子比特位^[16-17]。一个量子位的状态可表示为:

$$\begin{cases} |\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \\ |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \end{cases} \quad (18)$$

其中, $|\psi\rangle$ 为在2维 Hilbert 空间中,量子位的一个量子比特 ψ 的状态基矢; $|0\rangle, |1\rangle$ 分别为2维 Hilbert 空间中,量子比特处于0、1状态的基矢; α, β 为复数, $|\alpha|^2, |\beta|^2$ 分别为量子比特处于0、1状态的概率。本文采用“0”和“1”来表示量子比特表达和存储的基因状态,在量子计算中,多个基因态的叠加可以由单个量子染色体表达。

(2)亲和度建立。

为实现智能算法在故障定位时同时进行全局搜索和局部寻优,提高故障辨识度,构建区域定位适应度函数。考虑算法寻优的目标就是使其亲和度函数最大化,亲和度的值一般在0~1之间^[16],因此构建亲和度函数如式(19)所示。

$$F^*(s) = \frac{1}{1 + F(s)} \quad (19)$$

$$F(s) = \sum_{i=1}^M |I_i - I_i^*(s)| + \eta \sum_{j=1}^M X_j \quad (20)$$

其中, M 为微型PMU测量的节点个数; X_j 为区域 j 的状态编码; η 为权系数,设为0.5。

(3)克隆扩增。

本文采用 H_e 旋转门来实现量子位的更新,以避免更新后的量子位概率幅值更加趋近于0或者1。

抗体中第 r 个量子位的更新过程为 $[\alpha'_r \ \beta'_r]^T = H_e[\alpha_r \ \beta_r]^T$,更新规则为若 $|\alpha_r| \leq \varepsilon$ 且 $|\beta_r| \geq 1 - \varepsilon$, 或 $|\alpha_r| \geq 1 - \varepsilon$ 且 $|\beta_r| \leq \varepsilon$, 则 $[\alpha'_r \ \beta'_r]^T = [\sqrt{\varepsilon} \ \sqrt{1 - \varepsilon}]$, 否则 $[\alpha'_r \ \beta'_r]^T = [\alpha_r \ \beta_r]^T$, 其中 $[\alpha'_r \ \beta'_r]^T$ 为通过 H_e 门更新后的新量子位; $0 \leq \varepsilon \leq 1$, 本文取 $\varepsilon = 0.04$ 。

不同于传统旋转门收敛于0或1, H_e 旋转门将改

变抗体更新时概率幅值的上限,使概率幅值收敛于 $\sqrt{1 - \varepsilon}$ 或 $\sqrt{\varepsilon}$, 实现算法在局部寻优时能达到全局收敛的目的。

(4)变异操作。

本文采用 Pauli 组合变异来增大变异搜索范围使算法在局部寻优时跳出“早熟收敛”。首先确定变异个体和个体中的变异位,然后等概率地随机选择一种 Pauli 算子,最后利用算子对基因位的双向搜索进行量子比特变异操作。Pauli 算子矩阵有以下3种:

$$X_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, Z_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, X_1 Z_1 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

配电网区域定位流程如附录D中的图D1所示,配电网分层模型中所有等效区域的故障状态信息为待求解,维数为配电网等效区域的数量。

3.2 配电网故障区段定位

在第2层故障定位模型中,故障区域等效为一个独立模型诊断子系统,利用第1层的故障定位结果,读取等效故障二端口内所有节点状态编码,根据式(19)、(20)和量子免疫优化算法将故障位置定位到区段。

4 基于节点零序电流的故障识别

目前,电力系统的故障识别方法主要有基于相电流差突变量的故障识别方法和基于暂态分量的故障识别方法。在含特殊负荷配电网中,基于相电流差突变量的故障识别方法易受非周期分量的影响,会将三相短路故障误判为两相短路故障;基于暂态分量的故障识别方法受负荷电流和外部干扰较大,稳定性不足。本文考虑含特殊负荷配电网多为大电流接地系统^[18],提出故障相判别和基于节点零序电流的故障类型识别方法。

4.1 故障选相

系统发生故障时,根据第3节所述故障定位方法将故障定位到具体区域。在故障区域内,首先识别故障区域端节点三相电压信息,根据式(21)判定故障是否为单相接地短路故障或三相短路故障:若只有单相电压满足式(21),则系统发生单相接地短路故障;若三相中每一相电压均满足式(21),则系统发生三相短路故障,否则系统发生两相故障。

$$\begin{cases} |U_{ki}| < |U_{th}| \\ |U_{th}| = \eta_z |U_z| \end{cases} \quad (21)$$

其中, $|U_{ki}|$ 为 i 相电压幅值, $i = A, B, C$; 考虑过渡电阻的影响,设置故障节点电压阈值 $|U_{th}|$; $|U_z|$ 为故障区域内正常运行时额定电压的5%; η_z 为安全系数,本文中 $\eta_z = 1.2$ 。

4.2 故障类型判别

当含特殊负荷配电网区段发生故障后,利用4.1节所述方法快速定位故障区域,同时得到相应的故障相。首先判定故障区域发生的是单相接地故障还是三相短路故障,若为两相故障,则须用分层定位模型中等效区域两端节点 k_j 、 k_{j+1} 处的零序电流有效值判定是两相接地短路故障或两相相间短路故障,两相故障判据如式(22)所示。

$$\begin{cases} I_{k_j}^{(0)} > I_{th}^{(0)} \text{ 或 } I_{k_{j+1}}^{(0)} > I_{th}^{(0)} & \text{两相接地短路故障} \\ I_{k_j}^{(0)} < I_{th}^{(0)} \text{ 且 } I_{k_{j+1}}^{(0)} < I_{th}^{(0)} & \text{两相相间短路故障} \end{cases} \quad (22)$$

其中, $I_{k_j}^{(0)}$ 、 $I_{k_{j+1}}^{(0)}$ 为分层模型中等效区域两端节点零序电流有效值; $I_{th}^{(0)}$ 为零序电流有效值阈值,其整定过程如式(22)所示。

$$I_{th}^{(0)} = \eta_z I_z \quad (23)$$

其中, I_z 为该等效区域内正常运行时最大相电流的10%。

利用上述故障选相与故障类型识别相结合的方法可快速识别10种故障类型:单相(A、B、C相)接地短路故障、两相(AB、AC、BC相)接地短路故障以及相间短路故障、三相短路故障。

5 故障分层定位与识别流程

含特殊负荷配电网故障定位与类型识别模块流程如附录E中的图E1所示,具体过程如下。

(1)构建含特殊负荷配电网分层等效模型对配电网进行分层降维,利用对外等效定则对配电网各支路二端口等效,确定等效二端口节点位置。

(2)根据周波延迟法获取节点的正序电流故障分量,计算故障分量正、负导数进而得到 $\Delta\theta$,利用正序故障电流方向判据式(16)判定分层模型节中点的故障电流方向,并对其进行故障方向编码。

(3)进行第1层故障区域定位,读取分层模型中所有端口节点的故障编码,利用量子免疫优化算法确定故障区域;进行第2层区段定位,从故障区域中读取区域全部节点状态信息,利用量子免疫优化算法确定故障区段。

(4)根据判据式(21),利用故障区域端节点三相电压幅值进行故障选相,根据判据式(22),利用故障区域两端节点零序电流有效值识别故障类型。

6 故障定位与识别适应性分析

本文所提故障定位与识别方法根据节点正序电流故障分量进行故障编码;利用量子免疫优化算法根据编码进行故障定位;利用区域两端节点零序电流有效值进行故障识别。为避免配电网复杂多分支线路对故障定位准确性和可靠性造成不利影响,建

立分层故障定位模型,同时减少故障定位时节点的搜索维度。为满足本文方法对同步测量的要求,在分层模型等效区域端节点处分别配置微型PMU,微型PMU每周最多可采样512个点,采样频率超过25 kHz^[19-20]。为保证本文方法在不同过渡电阻、故障类型和DG渗透率下的可靠性,构建正序电流故障分量的故障方向判据,根据实际情况调节裕角 σ_w 可有效避免不同扰动对故障定位的影响。

7 算例验证

结合附录A中图A1的分层定位模型,将图1所示的含特殊负荷配电网分为12个等效区域,如图4所示。图中微型PMU测量点为等效区域端节点1、3、7、10、12、15、17、19、21、23、27、29,其余节点为FTU测量点;系统采用Y型直接接地,考虑含特殊负荷配电网容量及电压等级,设置系统的基准容量为500 MV·A,系统的标称电压为35 kV,特殊负荷单元的容量及接入点如附录F中的表F1所示;所有区域的线路参数为 $x=2.7 \Omega/\text{km}$ 、 $r=2.7 \Omega/\text{km}$,阻抗角为 52° 。

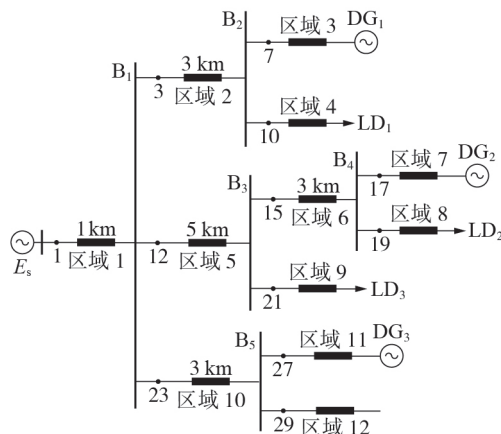


图4 系统仿真模型

Fig.4 Simulation model of system

仿真验证包含系统在并网树状运行方式下的单重故障和多重故障仿真验证,在单重故障下基于QIA、免疫算法(IA)的单层定位模型的对比较验证,在DG投切、频率波动等扰动情况下的仿真验证。

7.1 单重故障验证

在系统并网树状运行方式下,在配电网各区段设置单重故障,故障设置条件如表1所示。

表1 单重故障仿真算例设置

Table 1 Setting of single fault simulation

算例	故障类型	过渡电阻/ Ω	故障区域(区段)	故障位置
1	Ag	50	5(13)	距离B ₁ 2 km处
2	AB	100	6(16)	距离B ₃ 1 km处

首先利用微型PMU同步采样图4中区域端节点信息,通过周波延迟法获得正序电流故障分量,利用式(16)进行故障电流方向判定,对故障电流方向进行编码,得到如附录F中表F2所示的区域端节点故障状态。进行单重故障定位时,量子免疫优化算法读取表F2中区域端节点的故障电流方向编码进行故障区域定位,根据区域定位的结果读取区域内部节点故障信息,将故障定位到具体区段。故障定位仿真结果如图5、表2所示。

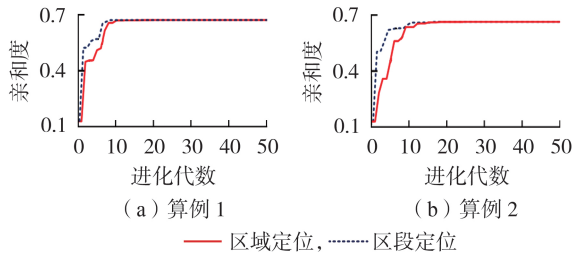


图5 单重故障下量子免疫优化算法故障定位仿真结果
Fig.5 Simulative results of fault location with QIOA under single fault

表2 量子免疫优化算法故障定位结果

Table 2 Fault location results of QIOA

算例	区域定位亲和度值	区域定位结果	区段定位亲和度值	区段定位结果
1	0.666 7	[0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0]	0.666 7	[0,1,0]
2	0.666 7	[0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0]	0.666 7	[0,1]

从表2中可知,区域和区段定位的亲和度最大值均为0.6667,算法输出的区域、区段定位结果与算例中设定的定位结果一致,在其他非故障区段没有发生误判。

在故障选相时,首先判定故障是否为单相故障和三相故障。根据表2所示的区域定位结果,检测区域端节点12、15三相电压幅值,根据式(21)可得 $|U_{th}| = 2.1 \text{ kV}$,判定算例1、2中的故障分别为单相接地短路、两相故障。故障选相结果如表3所示。

表3 单重故障选相结果

Table 3 Phase selection results of single fault

算例	故障区域端节点三相电压幅值/kV	故障选相
1	0.980 / 15.001 / 15.001	单相接地短路故障
2	1.764 / 1.626 / 0.788	两相故障

在判别两相故障类型时,根据区域定位结果,检测算例2中区域6两端节点的零序电流有效值为11.14、12.49 A,由式(23)可得 $I_{th}^{(0)} = 20.96 \text{ A}$,根据式(22)判定为两相相间短路故障。

综上,本文故障定位和识别方法能够准确快速地定位和识别含特殊负荷配电网中的单重故障。

7.2 多重故障验证

多重故障验证过程详见附录G。由附录G中表G3可知,量子免疫优化算法定位结果与假定故障位置一致。系统在并网树状运行状态下,可实现对多重故障准确、可靠的定位,且不会对非故障区段造成影响。故障选相与识别结果表明,本文方法能够在不同过渡电阻下准确识别多重故障类型。

7.3 对比验证基于QIA、IA的单层定位模型

为了验证基于量子免疫优化算法分层故障定位模型的优势,在7.1节算例1的单重故障条件下,利用配电网单层模型中所有节点的故障编码[1,1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,1,1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,0,0],基于QIA、IA进行故障定位,仿真条件(种群数目、迭代次数和亲和度函数)均与7.1节一致,仿真结果如附录H中的图H1所示。

在图4所示的配电网不同区段设置单相故障,每种故障在基于QIA、IA定位方法下运行30次,分别统计定位准确率、平均迭代次数如表4所示。由表4可知,本文所提基于量子免疫优化算法的分层故障定位方法故障搜索维度低、故障定位耗时短、准确率高。

表4 单层、分层定位模型性能对比

Table 4 Performance comparison among single-layer and hierarchical positioning models

方法	准确定位次数	平均迭代次数	定位准确率/%
IA(单层)	27	34	90
QIA(单层)	28	19	93.3
QIOA(分层)	30	13	100

7.4 扰动验证

为验证扰动对所提方法的影响,设置2类扰动方式:①DG₁的投切频率;②系统频率波动,在0.02—0.38 s时间段内加入的最大频率为 $\pm 0.6 \text{ Hz}$ 。加入的扰动如附录H中图H2所示。

设置区域5的区段14距离母线B₁ 3 km处发生单相接地故障,根据区域端节点正序电流故障分量进行12个区域故障编码,得到区域节点故障方法编码为[1,-1,-1,-1,1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,0],利用量子免疫优化算法进行故障区域、区段定位,得出的亲和度均为0.6667,算法输出的区域、区段故障状态分别为[0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0]和[0,1,0],检测得区域5端节点三相电压幅值为0.57、11.31、14.19 kV,根据式(21)可得 $|U_{th}| = 2.1 \text{ kV}$,判定故障类型为单相接地短路故障,与假定的故障位置与类型结果一致。因此本文方法在DG投切、系统电压频率波动的情况下均能够准确定位出故障区段和识别故障类型,具有良好的鲁棒性。

此外,通过区域和区段定位结果的一致性来检验故障定位的容错性,在区域状态编码出现误判、漏判情况下,量子免疫优化算法区域定位结果与区段定位结果不一致,此时利用第2层区段定位的结果,重新进行第1层故障区域定位,直到双层定位结果一致时算法停止运行,输出故障定位结果;本文方法在高阻故障下会导致基于正序故障分量的故障方向判据出现误差,使得故障定位灵敏度降低,可通过降低阈值中的 η_z 、增加 σ_w 来提高故障定位灵敏度。

8 结论

针对特殊负荷接入对配电网健康状态带来的影响,在配电网分层模型的基础上,基于分层分布式故障定位与识别的思想,提出一种适应于含特殊负荷配电网的故障区段定位与识别方法,并通过对不同算例仿真验证,得出如下结论:

(1)本文方法能够准确、快速地定位与识别出不同类型故障,且具有自适应性、容错性和鲁棒性,能够应用于功率时变、多种DG并存、并网树状运行的含特殊负荷配电网;

(2)通过构建配电网分层定位模型,将故障区域与故障区段有效连接起来,使得故障节点搜索维度大幅降低,减少了故障定位时间;

(3)所提方法不受故障类型、接地电阻、潮流方向的影响,提高了故障定位的可靠性。

本文所提的含特殊负荷的配电网故障定位方法仅利用节点的正序电流故障分量修正判据判定故障方向,适用范围更广。但是在配电网大面积通信故障下利用冗余信息或非健全信息进行故障定位与识别有待进一步研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 鞠平,王耀,项丽,等.考虑特殊负荷的宁夏电网负荷建模[J].电力自动化设备,2012,32(8):1-4,21.
JU Ping, WANG Yao, XIANG Li, et al. Load modeling for Ningxia Grid with special loads[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 1-4, 21.
- [2] 欧阳森,杨家豪,安晓华,等.基于时段解耦的含特殊负荷的配电网动态无功优化[J].华南理工大学学报(自然科学版),2016,44(2):97-106.
OUYANG Sen, YANG Jiahao, AN Xiaohua, et al. Dynamic reactive power optimization of distribution network containing special load based on time decoupling[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2016, 44(2): 97-106.
- [3] 宋伊宁,李天友,薛永端,等.基于配电自动化系统的分布式小电流接地故障定位方法[J].电力自动化设备,2018,38(4):102-109.
SONG Yining, LI Tianyou, XUE Yongduan, et al. Distributed small-current grounding fault locating method based on power distribution network automation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 102-109.
- [4] 施微,黄磊,徐箭,等.基于有限同步量测数据的电力系统故障检测、辨识与定位[J].电网技术,2015,39(4):1067-1074.
SHI Wei, HUANG Lei, XU Jian, et al. Fault detection, identification and location based on measurement data from finite synchronized phasor measurement[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1067-1074.
- [5] 马静,刘静.基于故障稳态分量的含DG配电网自适应方向电流保护方案[J].电力自动化设备,2018,38(1):1-9.
MA Jing, LIU Jing. Adaptive directional current protection scheme based on steady state component in distribution network with DG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 1-9.
- [6] 彭春华,张艳伟.基于电流正序分量相位比较的主动配电网保护方案[J].电力自动化设备,2016,36(6):163-169.
PENG Chunhua, ZHANG Yanwei. Protection scheme based on phase comparison of positive-sequence fault current for active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 163-169.
- [7] 朱玲玲,李长凯,张华中,等.含分布式电源的配电网方向过流保护[J].电网技术,2009,33(14):94-98.
ZHU Lingling, LI Changkai, ZHANG Huazhong, et al. Directional overcurrent protection for distribution systems containing distributed generation[J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 94-98.
- [8] 赵凤贤,孟镇,李永勤,等.基于故障分量的主动配电网纵联保护原理[J].高电压技术,2019,45(10):3092-3100.
ZHAO Fengxian, MENG Zhen, LI Yongqin, et al. Pilot protection scheme for active distribution network based on fault components[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3092-3100.
- [9] 贾清泉,郑旭然,刘楚,等.基于故障方向测度的配电网故障区段定位方法[J].中国电机工程学报,2017,37(20):5933-5941.
JIA Qingquan, ZHENG Xuran, LIU Chu, et al. A method of fault section location in distribution networks based on fault direction measures[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5933-5941.
- [10] 王秋杰,金涛,梅李鹏,等.基于模型分层的配电网故障诊断方法[J].电力自动化设备,2020,40(1):73-79.
WANG Qiujie, JIN Tao, MEI Lipeng, et al. Distribution model fault diagnosis method based on model layering[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 73-79.
- [11] 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.
- [12] 张润坤,王宝华.含低电压穿越型光伏电源配电网自适应正序电流速断保护[J].电力系统保护与控制,2017,45(18):137-142.
ZHANG Runkun, WANG Baohua. An adaptive positive-sequence current instantaneous trip protection for distribution network with PV[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 137-142.
- [13] 孙玲玲,王宁,贾清泉,等.计及分布式光伏发电低电压穿越能力的主动配电网保护方法[J].电力自动化设备,2018,38(6):79-86.
SUN Lingling, WANG Ning, JIA Qingquan, et al. Protection method of active distribution network considering low voltage ride-through of distributed PV generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 79-86.
- [14] 陈奎,张云,王洪寅,等.基于免疫算法的含分布式电源配电网

- 的故障定位[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(24):57-62.
CHEN Kui,ZHANG Yun,WANG Hongyin,et al. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on immune algorithm[J]. Power System Protection and Control,2017,45(24):57-62.
- [15] 李振兴,叶诗韵,王秋杰,等. 适用于主动配电网的电流方向元件[J]. 高压电器,2018,54(3):199-204.
LI Zhenxing,YE Shiyun,WANG Qiujie,et al. Directional element of current for active distribution network[J]. High Voltage Apparatus,2018,54(3):199-204.
- [16] 祝志慧,孙云莲. 量子免疫算法在电网故障诊断中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(10):22-25,30.
ZHU Zhihui,SUN Yunlian. Application of quantum immune algorithm in power system fault diagnosis[J]. Power System Protection and Control,2010,38(10):22-25,30.
- [17] BULGER D,BARITOMPA W P,WOOD G R. Implementing pure adaptive search with grover's quantum algorithm[J]. Journal of Optimization Theory and Applications,2003,116(3):517-529.
- [18] 李桂彬. 珠海地区大容量及特殊负荷用户接入电网电压等级选择探讨[D]. 广州:华南理工大学,2006.
LI Guibin. Discussion on voltage level selection of large capacity and special load users connected to the grid in Zhuhai area[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2006.
- [19] 李江,徐志临,李国庆,等. 配电网微型PMU与故障录波装置研究与开发[J]. 电力自动化设备,2016,36(9):54-59.
LI Jiang,XU Zhilin,LI Guoqing,et al. Research and development of micro PMU and fault wave recording device for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(9):54-59.
- [20] 谢潇磊,刘亚东,孙鹏,等. 新型配电网线路PMU装置的研制[J]. 电力系统自动化,2016,40(12):15-20,52.
XIE Xiaolei,LIU Yadong,SUN Peng,et al. Development of novel PMU device for distribution network lines[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(12):15-20,52.

作者简介:



高峰阳

高峰阳(1970—),男,甘肃兰州人,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统安全可靠运行、配电网健康评估(E-mail:329365048@qq.com);

李昭君(1995—),男,甘肃白银人,硕士研究生,主要研究方向为配电网故障定位技术(E-mail:1724596344@qq.com)。

(编辑 任思思)

Fault location and identification for distribution network with special loads

GAO Fengyang^{1,2},LI Zhaojun¹,YUAN Cheng¹,QI Xiaodong¹,LI Xiaofeng¹,ZHUANG Shengxian³,LI Haowu²

(1. School of Automation and Electrical Engineering,Lanzhou Jiaotong University,Lanzhou 730070,China;

2. Gansu Jiaoda Engineering Inspection Co.,Ltd.,Lanzhou 730070,China;

3. School of Electrical Engineering,Southwest Jiaotong University,Chengdu 610031,China)

Abstract: After the special loads are connected to the distribution network, the original distribution network's power flow become flexible and changeable, and the direction of fault overcurrent is not unique, which makes the traditional fault location and identification methods failed for lacking self-adaptive, so a fault location and identification method for distribution network with special loads is proposed. The system is divided into several two-terminal sections to reduce dimension, the fault current information is mined from the data measured by micro PMU (Phasor Measurement Unit) of terminal sections, and the fault direction criterion based on the positive-sequence fault current is modified. Then based on the coding of the fault direction, the quantum immune optimization algorithm is used to locate fault section of the distribution network. Finally, in each fault section, the fault type can be identified quickly and effectively by using fault phase and the node zero-sequence current. Case simulative results show that the proposed method can accurately locate and identify the fault section of distribution network with special loads and effectively avoid the influence of power system disturbance on fault location under non-fault condition.

Key words: special load; distribution network; electric fault location; micro PMU; quantum immune optimization algorithm

附录 A

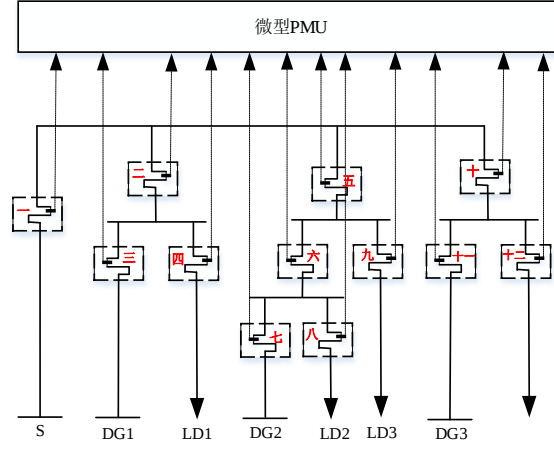


图 A1 含特殊负荷配电网分层降维

Fig.A1 Hierarchical dimensionality reduction of distribution network with special load

附录 B

流经节点 7 的电流故障分量为: $\Delta \mathbf{I}_{f2}^{(1)} = -\frac{\Delta \mathbf{U}_{s2}^{(1)}}{\mathbf{Z}_{f2}^{(1)}} = \left| \Delta \mathbf{I}_{f2}^{(1)} \right| \angle (\varphi_2 - \theta_2 + \pi)$

电 流 故 障 分 量 正 、 负 序 数 分 别 为 $\Delta \mathbf{I}_{f2+}^{(1)'} = \left| \Delta \mathbf{I}_{f2}^{(1)'} \right| \angle \left(\varphi_2 - \theta_2 - \frac{\pi}{2} \right)$ 、

$$\Delta \mathbf{I}_{f2-}^{(1)'} = \left| \Delta \mathbf{I}_{f2}^{(1)'} \right| \angle \left(\varphi_2 - \theta_2 + \frac{\pi}{2} \right)$$

参考相量为: $\Delta \mathbf{I}_{f2}^{(1)*} = \left| \Delta \mathbf{I}_{f2}^{(1)'} \right| \angle \left(\varphi_2 - \theta_2 + \frac{\pi}{2} \right)$

设置反向故障电流判据: $\Delta \theta = \arg \Delta \mathbf{I}_{f2}^{(1)*} - \arg \Delta \mathbf{I}_{f2}^{(1)} = -\frac{\pi}{2}$

附录 C

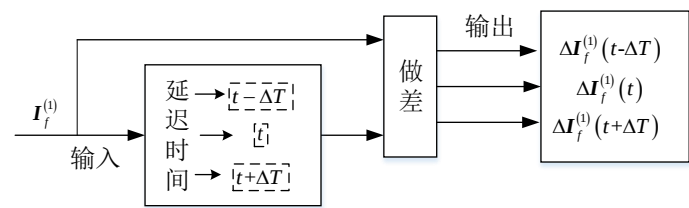


图 C1 正序电流故障分量计算

Fig.C1 Calculation of positive sequence current fault component

附录 D

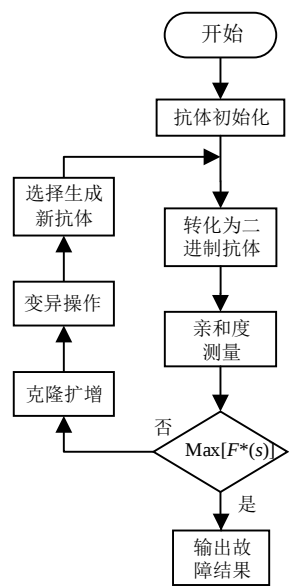


图 D1 配电网区域定位流程

Fig.D1 Locating process of distribution network regional

附录 E

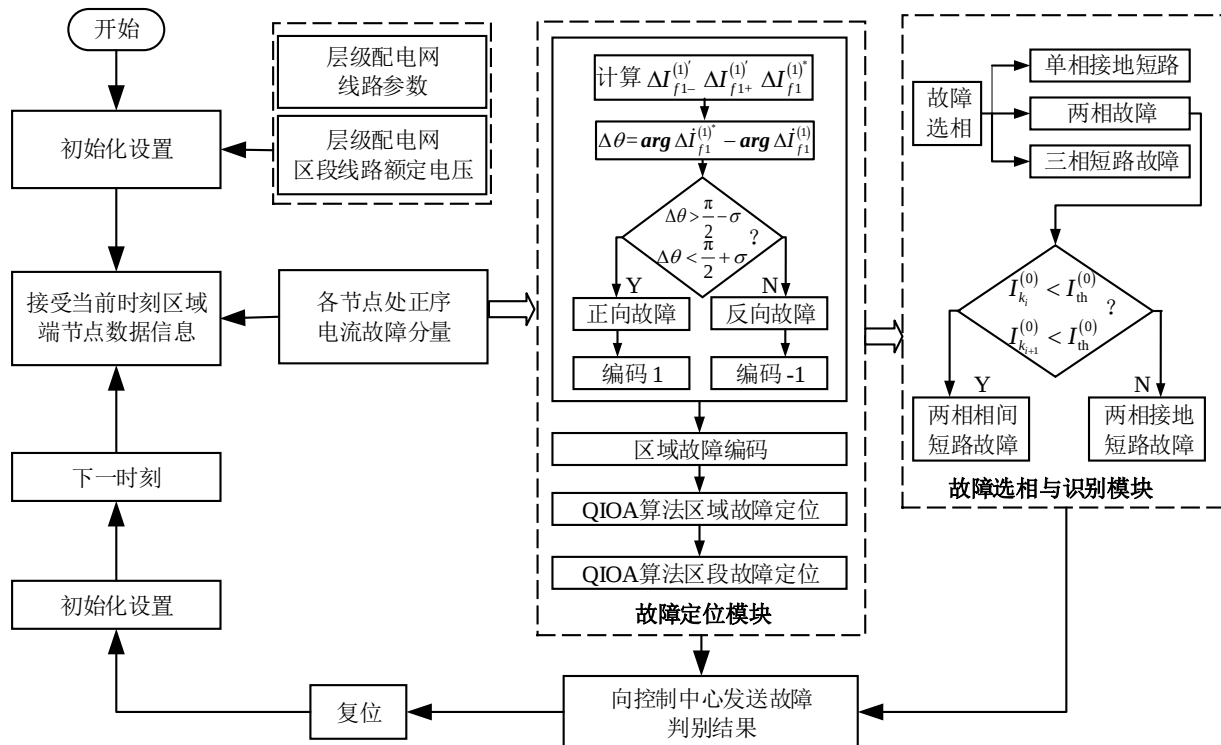


图 E1 故障定位与识别模块流程图

Fig.E1 Flowchart of online fault locating and identification module

附录 F

表 F1 特殊负荷单元容量及接入节点

TableF1 Capacity and connecting node of special loads

名称	接入节点	容量/ (MV·A)
电机型 DG ₁	9	10
电机型 DG ₂	18	8
逆变型 DG ₃	28	10
LD ₁	11	2.5+j2.2
LD ₃	20	1.5+j1.2

表 F2 单重故障下区域端节点故障状态

TableF2 Regional end node fault status under single fault

算例		微型 PMU 测量的区域端节点											
		1	3	7	10	12	15	17	19	21	23	27	29
1	$\Delta\theta$	91.4	-88.5	-91.5	-91.8	92.3	-93.1	-89.7	-87.3	-89.4	-89.2	-90.3	空载
	编码	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0
2	$\Delta\theta$	90.7	-91.4	-92.1	-91.3	89.6	90.2	-91.1	-89.2	-89.9	-89.3	-91.4	空载
	编码	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	0

附录 G：多重故障定位仿真验证

(1) 设置故障条件

表 G1 多重故障设置条件

TableG1 Multiple fault setting conditions

算例	故障 1 设置条件		故障 2 设置条件	
	故障区域 (区段)	故障类型与过渡电阻/ Ω	故障区域 (区段)	故障类型与过渡电阻/ Ω
1	2 (4)	Ag/200	7 (17)	ABg/100
2	5 (13)	Bg/100	10 (24)	ABC/200

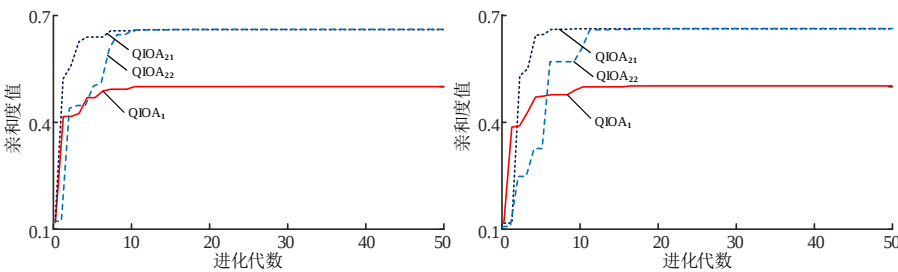
(2) 得到的等效区域端节点故障状态

表 G2 多重故障算列区域端节点故障状态

Table G2 Multiple Fault Arithmetic Area End Node Fault Status

算例		微型 PMU 测量的区域端节点											
		1	3	7	10	12	15	17	19	21	23	27	29
1	$\Delta\theta$	93.6	89.4	-90.3	-94.6	91.3	88.9	90.7	-88.3	-93.4	-89.9	-92.3	空载
	编码	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	0
2	$\Delta\theta$	87.4	-93.4	-90.9	-92.3	88.7	-89.2	-94.1	-88.2	-92.9	87.3	-92.5	空载
	编码	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	0

(3) 根据表 G24 节点编码完成配电网区域定位和区段定位



(a) 算例 1 故障定位仿真

(b) 算例 2 故障定位仿真

注：QIOA₂₁、QIOA₂₂分别为多重故障下配电网的 2 个故障区段定位。

图 G1 多重故障下 QIOA 故障定位仿真

Fig.G1 Simulation of QIOA fault location under multiple faults

表 G3 多重故障下 QIOA 算法定位结果

TableG3 QIOA algorithm positioning results under multiple faults

算例	区域定位亲和度值	区域定位结果	区段定位亲和度值	区段定位结果
1	0.50	[0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0]	0.6667	[0, 1, 0, 0]
		[0, 0, 0, 0, 0, 0]	0.6667	[1, 0]
2	0.50	[0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0]	0.6667	[0, 1, 0]
		[0, 0, 0, 0, 1, 0]	0.6667	[0, 1, 0, 0]

(4) 进行故障选相

表 G4 多重故障选相结果

Table G4 Multiple fault phase selection results

算例	故障 1		故障 2	
	节点三相电压幅值/kV	选相结果	节点三相电压幅值/kV	选相结果
1	0.72/11.7/16.9	单相故障	0.65/1.82/5.14	两相故障
2	14.3/0.68/18.4	单相故障	0.83/0.83/0.83	三相故障

(5) 故障类型识别

根据故障选相结果，判定两相故障类型，故障区域七两端节点零序电流有效值分别为 112.2A、137.6A，利用正文中式（22）判据，判定两相故障类型为两相接地短路故障。

附录 H

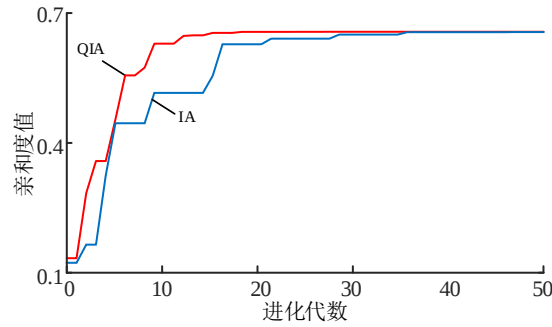


图 H1 单层配电网故障定位

Fig.H1 Fault location of single-layer distribution network

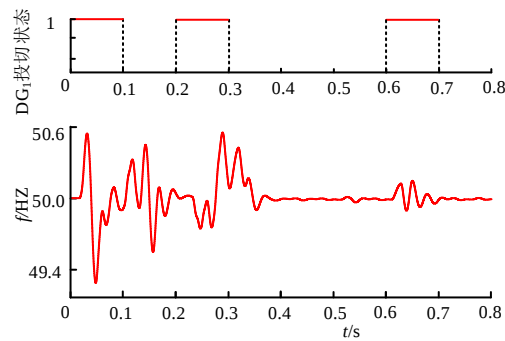


图 H2 接入配电网的扰动分布

Fig.H2 Disturbance distribution of access distribution network