

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231188

## 基于参数自修正的配电网故障定位数字孪生技术研究

席瑞翎<sup>1</sup>, 季亮<sup>1</sup>, 姜恩宇<sup>1</sup>, 宋耐超<sup>2</sup>, 洪启腾<sup>3</sup>, 李博通<sup>4</sup>, 李振坤<sup>1</sup>

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网河南驻马店供电公司, 河南 驻马店 463000;  
3. 英国思克莱德大学, 格拉斯哥 英国 G11XQ; 4. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 配电网参数受天气条件和负载条件等因素影响会发生变化。由于传感装置安装有限、数据延时传输等因素, 无法实时获得配电网准确参数, 进而给传统故障定位方法的精度带来影响。针对以上问题, 通过建立配电网数字孪生模型, 基于配电网数字孪生模型的参数自修正技术, 提出了一种定位模型随参数变化动态校正的配电网故障定位方法。同时, 搭建了基于数字孪生服务器和实时数字仿真系统(real time digital system, RTDS)的数字孪生平台, 实现了配电网实时的物理模型和数字孪生模型的同步运行。在算例仿真中, 利用该数字孪生平台, 验证了基于数字孪生技术的配电网故障定位方法。结果表明, 该方法可在各类系统运行条件下实时修正配电网参数, 显著提高配电网故障定位的速度和精度。

**关键词:** 数字孪生; 故障定位; 参数辨识; 最小二乘法; 正则化正交匹配追踪重构算法

### Digital twin of distribution network fault location based on parameter self-correction

XI Ruiling<sup>1</sup>, JI Liang<sup>1</sup>, JIANG Enyu<sup>1</sup>, SONG Naichao<sup>2</sup>, HONG Qiteng<sup>3</sup>, LI Botong<sup>4</sup>, LI Zhenkun<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric power, Shanghai 200090, China; 2. State Grid Zhumadian Power Supply Company, Zhumadian 463000, China; 3. University of Strathclyde, Glasgow G11XQ, United Kingdom;  
4. School of Electrical Automation and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Distribution network parameters are subject to change because of factors such as weather or load conditions. Then, because of factors such as limited installation of sensing devices and delayed data transmission, it is difficult to obtain accurate parameters of the distribution network, thereby affecting the accuracy of the traditional fault location method. Thus, establishing a digital twin model of the distribution network based on the model's parameter self-correction technology, this paper puts forward a fault localization method of the distribution network in which the localization model is dynamically corrected with the parameter changes. Meanwhile, this paper builds a platform based on a digital twin server and RTDS, and realizes synchronous communication between a real-time physical model of a distribution network and a digital twin model. In the case of simulation, the distribution network fault location method based on digital twin technology is verified using the proposed digital twin platform. The results of the simulation show that the method can correct distribution network parameters in real time and significantly improve the speed and accuracy of distribution network fault location.

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 52177098).

**Key words:** digital twin; fault location; parameter identification; least squares method; regularized orthogonal matching pursuit (ROMP) reconstruction algorithm

## 0 引言

随着工业 4.0 的到来, 智能化设备的引入改变了原有电网的运行模式。随着配电网自动化的发展, 电网拓扑结构逐渐复杂, 易受到设备故障、电网误

运行以及意外中断等因素的影响, 导致配电网故障。而复杂的故障机理导致难以获得准确的故障信息进行定位<sup>[1-2]</sup>。因此配电网的准确、快速故障定位对提高运行可靠性、缩小停电面积有重要意义。

常用的故障定位方法大致可以分为阻抗法<sup>[3-5]</sup>、行波法<sup>[6-7]</sup>和人工智能法<sup>[8-10]</sup>。阻抗法主要利用故障时测得的电压与电流来计算故障回路的阻抗, 通过线路阻抗与长度成正比的关系, 计算故障距离。行

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目资助(52177098); 国网河南省电力公司科技项目资助(5217H0220001)

波法根据故障发生时产生的行波到达母线的时差计算故障位置,广泛适用于结构简单、线路阻抗小的线路中。配电网结构复杂,行波在线路中传输时易发生折射和反射,因此行波法在配电网中并未得到广泛应用。人工智能算法目前主要包括神经网络算法、粒子算法、蚁群算法、决策树等,具有一定的容错能力。文献[11]提出了一种用于配电网故障定位的自动深度学习方法,通过光谱图分析模型输入信号,解决传统神经网络算法的局限性,提高故障定位的精度。

在配电网自动化技术和智能化水平发展的基础上,基于传感设备的故障定位方法可以实时评估配电网运行状态,为配电网的安全运行提供保证,因此成为当前研究的热点。一般利用数据采集与监视控制系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)和同步向量测量装置(phasor measurement unit, PMU)进行配电网运行数据收集和处理。文献[12]将配电网拓扑结构关系和智能设备中的相关电气信息结合生成故障判别矩阵,通过求解矩阵判断配电网故障发生点。文献[13-14]基于传感器数据将故障定位问题转化为迭代优化问题,利用卷积法等智能算法进行求解。综上所述,智能算法在设备信息上传有误或不足的情况下,求解速度和定位准确性都能得到保证。文献[15]提出了一种基于有限量测信息的多分支故障线路定位方法,采用深度学习搭建智能测距模型,建立一种智能定位实施方案。文献[16]利用 PMU 建立了架空线路参数无关故障定位算法,但需遍历求解各种故障情况,准确性可以得到保证但步骤多较为繁琐。总结近年来的研究成果,配电网故障定位在定位精度和速度上都有了较大突破,但由于配电网参数受天气条件和负载条件等因素的影响会发生实时变化,大多故障定位方法由于传感装置安装有限、数据传输延时等因素无法做到实时计算系统参数状态,进而会影响到故障定位的准确性。

数字孪生(digital twin, DT)是物理系统的数字映射,它能实现物理系统和虚拟模型间信息的实时交互,并对系统参数进行实时修正,是许多新兴技术的核心技术。文献[17-19]总结了数字孪生技术在电网运行、安全保证等多方面的框架设计,通过数字孪生技术和状态评估技术的深度融合,依托大数据分析、数据挖掘等技术构建输变电设备的数字孪生体,总结了数字孪生技术在电气设备中的应用。在电气背景下,数字孪生被更具体地定义为“基于软件的复杂物理系统,该系统将来自实际物理系统的连续数据流通过通信链路连接到真实对象”<sup>[20]</sup>。

一般通过基于物理的建模<sup>[21]</sup>、数据驱动的建模<sup>[22]</sup>或大数据控制论<sup>[23]</sup>实现数字孪生中的物理系统。目前数字孪生技术在电力系统中的应用主要集中在电网的故障诊断和实时在线分析上。文献[24]设计了一个数字孪生模型代表基于光伏特征输出的实时估计,并根据残差实现故障诊断。文献[25]通过实时更新参数,使数字孪生模型接近实际,减少复杂环境对系统观测的影响。

因此本文提出了一种基于数字孪生的配电网参数自修正的故障定位方法。该方法可以实时掌握电网运行状态变化,提高故障诊断的实时性和准确性。首先,建立数字孪生配电网模型实现数字端电网信息的实时计算和传递,在数字端对配电网运行状态进行监控;当故障发生时,配电网故障状态测量数据和数字孪生模型中估计数值产生差值,利用正则化正交匹配追踪(regularized orthogonal matching pursuit, ROMP)重构算法注入电流判断故障区段。然后,根据电网特征进行故障定位;将所建立的数字孪生模型上传至服务器,通过用户数据报协议(user datagram protocol, UDP)实现数字孪生模型和物理模型之间的连接和通信。最后,根据实时数字仿真系统(real time digital system, RTDS)算例分析验证了数字孪生模型的有效性和准确性。

## 1 配电网数字孪生模型

搭建数字孪生模型是配电网故障定位的第一步,它是物理模型的数学仿真,分析计算实时可测量的特征输出。

### 1.1 故障前配电网数字孪生模型

本文忽略分布参数对参数辨识的影响,采用集中参数线路模型。配电网中广泛存在双端线路和 T 型线路。一般将双端线路的集中参数线路模型等效为  $\pi$  型线路,如图 1 所示。由于配电网各类故障都包含正序网络,正序网络建模比负序和零序的运用范围更广泛,因此本文均基于正序网络进行建模。

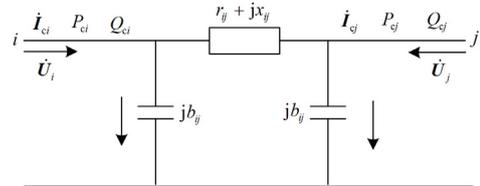


图 1  $\pi$ 型集中参数线路模型

Fig. 1 The  $\pi$ -type centralized parametric line model

根据  $\pi$  型线路两端电流和电压、线路两端功率搭建模型,则故障前数字孪生模型如式(1)所示。

$$\mathbf{z}[r, x, b] = \begin{bmatrix} \dot{I}_c[r, x, b] \\ P_c[r, x, b] \\ Q_c[r, x, b] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{ci} = (\dot{U}_i - \dot{U}_j)/(r_{ij} + x_{ij}) + jb_{ij}\dot{U}_i \\ \dot{I}_{cj} = (\dot{U}_i - \dot{U}_j)/(r_{ij} + x_{ij}) - jb_{ij}\dot{U}_j \\ P_{ci} = \text{real}(\dot{U}_i \dot{I}_{ci}^*) \\ P_{cj} = \text{real}(\dot{U}_j \dot{I}_{cj}^*) \\ Q_{ci} = \text{imag}(\dot{U}_i \dot{I}_{ci}^*) \\ Q_{cj} = \text{imag}(\dot{U}_j \dot{I}_{cj}^*) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{z}[r, x, b]$  为  $\pi$  型线路故障前数字孪生模型的特征估计输出向量,  $r$ 、 $x$ 、 $b$  分别为线路正序电阻、电抗和电纳;  $\dot{I}_c[r, x, b]$  为线路两端在配电网正常运行下的正序估计电流, 下文中的电气量无特殊说明均为正序分量;  $P_c[r, x, b]$  为线路两端在配电网正常运行下的有功功率估计;  $Q_c[r, x, b]$  为线路两端在配电网正常运行下的无功功率估计;  $\dot{I}_{ci}$  和  $\dot{I}_{cj}$  分别为线路  $i$ 、 $j$  两端流入线路的电流向量;  $\dot{I}_{ci}^*$  和  $\dot{I}_{cj}^*$  分别为  $\dot{I}_{ci}$  和  $\dot{I}_{cj}$  的共轭形式;  $\dot{U}_i$  和  $\dot{U}_j$  分别为线路  $i$ 、 $j$  两端电压向量;  $r_{ij}$ 、 $x_{ij}$  和  $b_{ij}$  分别为线路的电阻、电抗和电纳;  $P_{ci}$  和  $P_{cj}$  分别为线路  $i$ 、 $j$  两端有功功率;  $Q_{ci}$  和  $Q_{cj}$  分别为线路  $i$ 、 $j$  两端无功功率。

式(1)中的  $\dot{I}_c$  代表正常运行时配电网中某段线路两端的电流, 如式(2)所示。式(1)中有功功率  $P_{ci}$ 、 $P_{cj}$  和无功功率  $Q_{ci}$ 、 $Q_{cj}$  中的电流  $\dot{I}_{ci}$ 、 $\dot{I}_{cj}$  可以用式(2)替代。

$$\dot{I}_c[r, x, b] = \begin{bmatrix} \dot{I}_{ci} = (\dot{U}_i - \dot{U}_j)/(r_{ij} + x_{ij}) + jb_{ij}\dot{U}_i \\ \dot{I}_{cj} = (\dot{U}_i - \dot{U}_j)/(r_{ij} + x_{ij}) - jb_{ij}\dot{U}_j \end{bmatrix} \quad (2)$$

对于 T 型线路, 其线路模型如图 2 所示。由于分支连接点  $t$  点没有量测信息, 因此可以假设  $t$  点电压为  $\dot{U}_t$ , 由此线路  $i$  端到  $t$  节点可以列出方程如式(3)所示。式(3)中电流化简形式和式(2)相似。

$$\begin{cases} \dot{I}_{ci} = \dot{I}_{ti} + jb_i\dot{U}_i \\ \dot{I}_{ti} = jb_t\dot{U}_t - \dot{I}_{ti} \\ P_{ci} = \text{real}(\dot{U}_i \dot{I}_{ci}^*) \\ Q_{ci} = \text{imag}(\dot{U}_i \dot{I}_{ci}^*) \\ P_{ti} = \text{real}(\dot{U}_t \dot{I}_{ti}^*) \\ Q_{ti} = \text{imag}(\dot{U}_t \dot{I}_{ti}^*) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\dot{I}_{ti}$  为  $i$  端流入  $t$  节点的电流向量;  $\dot{I}_{ti}$  为  $t$  节点流入  $i$  端电流向量;  $\dot{I}_{ti}^*$  为  $\dot{I}_{ti}$  电流向量的共轭形式;  $P_{ti}$  和  $Q_{ti}$  分别为  $t$  节点  $i$  端线路提供的有功和无

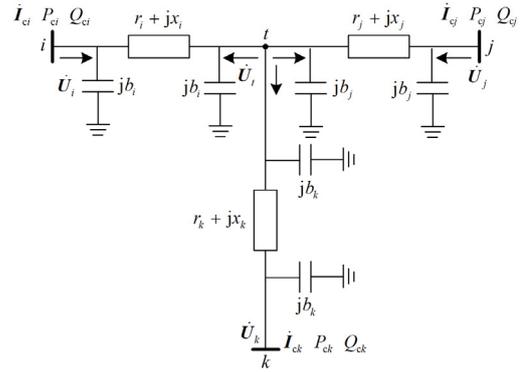


图 2 T 型集中参数线路模型

Fig. 2 The T-type centralized parametric line model

功功率;  $b_t$  为  $i$  端至节点  $t$  的线路电纳。同理,  $j$  端和  $k$  端到 T 型线路可以列出相似方程, 因此可以得到对于 T 型线路的数字孪生模型如式(4)所示。

$$\mathbf{z}[r_i, x_i, b_i, r_j, x_j, b_j, r_k, x_k, b_k] = \begin{bmatrix} \dot{I}_{ci} = \dot{I}_{ti} + jb_i\dot{U}_i \\ P_{ci} = \text{real}(\dot{U}_i \dot{I}_{ci}^*) \\ Q_{ci} = \text{imag}(\dot{U}_i \dot{I}_{ci}^*) \\ \dot{I}_{cj} = \dot{I}_{jt} + jb_j\dot{U}_j \\ P_{cj} = \text{real}(\dot{U}_j \dot{I}_{cj}^*) \\ Q_{cj} = \text{imag}(\dot{U}_j \dot{I}_{cj}^*) \\ \dot{I}_{ck} = \dot{I}_{kt} + jb_k\dot{U}_k \\ P_{ck} = \text{real}(\dot{U}_k \dot{I}_{ck}^*) \\ Q_{ck} = \text{imag}(\dot{U}_k \dot{I}_{ck}^*) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{z}[r_i, x_i, b_i, r_j, x_j, b_j, r_k, x_k, b_k]$  为 T 型线路故障前数字孪生模型的特征估计输出向量;  $r_i$  和  $x_i$  分别为  $i$  端至节点  $t$  的线路电阻、电抗;  $r_j$ 、 $x_j$  和  $b_j$  分别为  $j$  端至节点  $t$  的线路电阻、电抗和电纳;  $r_k$ 、 $x_k$  和  $b_k$  分别为  $k$  端至节点  $t$  的电路电阻、电抗和电纳;  $\dot{I}_{ck}$  为线路  $k$  端流入线路的电流向量;  $\dot{I}_{ck}^*$  为  $\dot{I}_{ck}$  的共轭形式;  $\dot{I}_{jt}$  为  $j$  端流入  $t$  节点的电流向量;  $\dot{I}_{kt}$  为  $k$  端流入  $t$  节点的电流向量;  $\dot{U}_k$  为线路  $k$  端电压向量;  $P_{ck}$  和  $Q_{ck}$  分别为线路  $k$  端的有功和无功功率。

对于式(4)有约束如式(5)所示。

$$\begin{cases} \dot{I}_t = \dot{I}_{ti} + \dot{I}_{tj} + \dot{I}_{tk} = 0 \\ P_s = P_{ti} + P_{tj} + P_{tk} = 0 \\ Q_s = Q_{ti} + Q_{tj} + Q_{tk} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\dot{I}_t$  为  $t$  点电流向量和;  $P_{tj}$  和  $Q_{tj}$  分别为  $t$  节点  $j$  端线路提供的有功和无功功率;  $P_{tk}$  和  $Q_{tk}$  分别为  $t$  节点  $k$  端线路提供的有功和无功功率;  $P_s$  和  $Q_s$  分别

为  $t$  点有功、无功功率和。它们在配电网中不能直接量测，但是其值均为 0，因此可以作为量测值进行相应计算。

在配电网运行状态上传至数字孪生模型时，由于传感设备误传、漏传，某些节点存在无法得知准确运行状态的情况。使用上一时刻的配电网状态和该时刻相邻节点的电流和电压计算未知节点的电流和电压，获取未知节点运行信息。

以  $\pi$  型线路为例建立阻抗矩阵，进而可以推导某一时刻  $m$  的线路首末端电压和电流的关系，如式(6)所示。

$$\mathbf{z}_i(m) = \begin{bmatrix} \dot{U}_i \\ \dot{I}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & -b \\ -c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_j \\ \dot{I}_j \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中： $\mathbf{z}_i(m)$  为  $m$  时刻线路首端状态量，包括线路  $i$  端电压电流相量  $\dot{U}_i$  和  $\dot{I}_i$ ； $\dot{U}_j$  和  $\dot{I}_j$  分别为线路  $j$  端电压、电流相量。

式(6)中  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  具体如式(7)所示。

$$\begin{cases} a = d = \mathbf{E} + 0.5L^2 \mathbf{Z}_{abc} \mathbf{Y}_{abc} \\ b = L \mathbf{Z}_{abc} \\ c = L \mathbf{Y}_{abc} + 0.25L^3 \mathbf{Y}_{abc} \mathbf{Z}_{abc} \mathbf{Y}_{abc} \end{cases} \quad (7)$$

式中： $\mathbf{Z}_{abc}$  为线路单位阻抗矩阵； $\mathbf{Y}_{abc}$  为线路对地导纳矩阵； $\mathbf{E}$  为三阶单位矩阵； $L$  为线路全长。

## 1.2 故障后数字孪生模型

由于配电网线路较短，故障线路电流电压关系如图3所示。对系统的故障稳态过程进行分析，根据对称分量法和配电网故障前数字孪生模型，在计算得知正序阻抗的前提下，可在故障时实现故障定位。

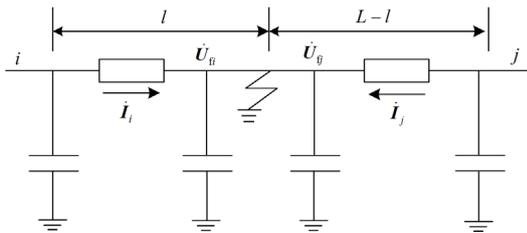


图3 故障线路电流电压关系图

Fig. 3 Fault line current-voltage relationship diagram

根据线路两端正序电压、正序电流及线路正序参数建立各区段发生故障时的测距方程以及两端功率的平衡方程，如式(8)所示。

$$\mathbf{z}(l) = \begin{bmatrix} \dot{U}_{fi} = \dot{U}_i - z_l l \cdot \dot{I}_i \\ \dot{U}_{fj} = \dot{U}_j + z_l (L-l) \cdot \dot{I}_j \\ \Delta P_{ij} = P_i - P_j = r_l l \cdot \dot{I}_i^2 + r_l (L-l) \cdot \dot{I}_j^2 + P_{ij}^* \\ \Delta Q_{ij} = Q_i - Q_j = x_l l \cdot \dot{I}_i^2 + x_l (L-l) \cdot \dot{I}_j^2 + Q_{ij}^* \end{bmatrix} \quad (8)$$

其模型约束如式(9)所示。

$$\dot{U}_{fi} - \dot{U}_{fj} = 0 \quad (9)$$

式中： $\dot{U}_{fi}$  为从线路  $i$  端推导至故障点的电压； $\dot{U}_{fj}$  为从线路  $j$  端推导至故障点的电压； $z_l$  为线路单位阻抗， $z_l = r_l + jx_l$ ； $r_l$  和  $x_l$  分别为线路单位电阻和电抗； $l$  为  $i$  端到故障点的距离； $P_i$ 、 $P_j$  和  $Q_i$ 、 $Q_j$  分别为线路两端的有功和无功功率； $P_{ij}^*$ 、 $Q_{ij}^*$  分别为故障等效有功和无功功率； $\Delta P_{ij}$ 、 $\Delta Q_{ij}$  分别为线路两端有功和无功功率的差值。

式(9)为故障后数字孪生模型的核心，利用线路两端推导至故障点电压相同的原理，为故障后数字孪生模型计算提供约束。由于式(9)中  $\dot{U}_{fi}$ 、 $\dot{U}_{fj}$  相减抵消了故障点对地电压的作用，因此故障后数字孪生模型不考虑接地故障时过渡电阻对系统的影响。

## 2 配电网故障测距的数字孪生技术

### 2.1 基于数字孪生技术的参数识别

本文配电网参数自修正通过故障前配电网数字孪生模型进行迭代计算，计算得到的参数可以用于证明数字孪生模型的实时性，并服务于后续的配电网故障定位。式(1)是非线性方程组，考虑到数字孪生模型的实时性、计算速度、收敛性以及非线性方程组的适应程度，在最小二乘法的基础上进行改进以适应实时在线的模型估计。

已知实际值与估计值之间的关系如式(10)所示。

$$z = h(v) + \varepsilon \quad (10)$$

式中： $z$  为实际量测值； $h(v)$  为由数字孪生模型计算所得的量测量估计值； $\varepsilon$  为实际量测值与估计值之差，也就是残差。

根据最小二乘法搭建  $\pi$  型线路模型的目标函数  $r_\pi$  为

$$r_\pi = \sqrt{\frac{1}{6} \sum_{n=1}^6 \left( \frac{\varepsilon_n}{z_n} \right)^2} \quad (11)$$

式中： $\varepsilon_n$  为第  $n$  个残差元素； $z_n$  为第  $n$  个实际量测值。

同理对于 T 型线路，根据最小二乘法可以得到 T 型线路的目标函数  $r_T$  为

$$r_T = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{n=1}^{12} \left( \frac{\varepsilon_n}{z_n} \right)^2} \quad (12)$$

当式(11)和式(12)最小时，即可求解数字孪生模型的最优估计值。

牛顿-拉夫逊法具有较好的非线性方程组计算能力和收敛性，其核心是将非线性方程组转化为对应的线性方程组再进行迭代求解，求解的过程视为方程组线性化过程。因此采用该方法求解非线性方

程。对于故障前的数字孪生模型, 其非线性方程组如式(13)所示。

$$Y = F(x) \quad (13)$$

其中  $x$  是待求解值,  $Y$  为  $F(x)$  的函数表达, 将  $F(x)$  在  $x^k$  处线性展开, 一般可以忽略二阶以上的高阶项, 可得到式(14)。

$$F(x) \approx F(x^k) + F'(x^k)(x - x^k) = Y \quad (14)$$

其中:

$$F'(x^k) = \left. \frac{\partial F(x)}{\partial x} \right|_{x=x^k} \quad (15)$$

当  $F(x)$  满足非奇异条件时, 可得到非线性方程组迭代一次的修正量为

$$\Delta x^k = F'(x^k)^{-1}(Y - F(x^k)) \quad (16)$$

由此可以得到方程组某次迭代的求解值为:  $x^{k+1} = x^k + \Delta x^k$ , 并循环迭代直至接近真实值。

当式(11)和式(12)的目标函数最小或满足式(17)任意一项时, 求出该非线性方程组的解。

$$\begin{cases} \max(|\Delta x^k|) < e^{-10} \\ k > K_{\max} \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $K_{\max}$  为最大迭代次数。

## 2.2 基于数字孪生技术的配电网故障区段定位

假设配电网中某一线路 F 点发生单相接地故障时, 故障 F 点因与大地相连电压几乎为 0。根据故障叠加原理可以得到, 配电网线路故障时相当于在故障点处附加了一个电源  $-U_f$ , 其幅值和故障前一刻该故障点电压相同, 如图 4 所示。

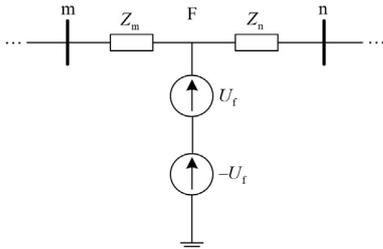


图 4 故障线路状态示意图  
Fig. 4 Fault line status diagram

由此可以得到仅由故障附加电源作用的状态为故障线路附加状态, 其示意图如图 5 所示。

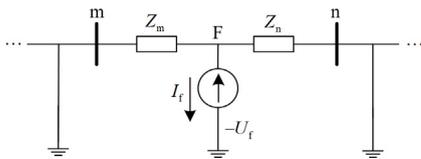


图 5 故障线路附加状态示意图  
Fig. 5 Fault line additional status diagram

图 5 中各非故障节点注入电流为 0, 故障节点电流为  $I_f$ ; 附加故障节点电压是故障后节点电压  $\hat{U}_c(t)$  减去故障前电压  $U_c(t)$  的差值, 如式(18)中  $\mu(t)$  所示。

$$\mu(t) = z(t) - y(t) = \hat{U}_c(t) - U_c(t) \quad (18)$$

式中:  $z(t)$  为配电网实际故障后量测值;  $y(t)$  为数字孪生模型上一时刻正常运行的估计值。

考虑系统发生任何故障时都存在正序分量, 可得故障附加状态下的正序分量  $N+1$  节点电压方程, 如式(19)所示。

$$\begin{bmatrix} \mu_1^+ \\ \mu_2^+ \\ \vdots \\ \mu_i^+ \\ \vdots \\ \mu_N^+ \\ \mu_f^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1j} & \cdots & Z_{1N} & Z_{1f} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2j} & \cdots & Z_{2N} & Z_{2f} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ Z_{i1} & Z_{i2} & \cdots & Z_{ij} & \cdots & Z_{iN} & Z_{if} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \cdots & Z_{Nj} & \cdots & Z_{NN} & Z_{Nf} \\ Z_{f1} & Z_{f2} & \cdots & Z_{fj} & \cdots & Z_{fN} & Z_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ I_f \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中,  $Z_{ij}$  为节点阻抗。由于故障点电气量无法监测, 因此将故障点电流等效至故障点相邻的节点, 化简后得到的正序网络节点电压方程为

$$\begin{bmatrix} \mu_1^+ \\ \vdots \\ \mu_m^+ \\ \vdots \\ \mu_i^+ \\ \vdots \\ \mu_n^+ \\ \vdots \\ \mu_N^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z'_{11} & Z'_{12} & \cdots & Z'_{1j} & \cdots & Z'_{1N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z'_{m1} & Z'_{m2} & \cdots & Z'_{mj} & \cdots & Z'_{mN} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z'_{i1} & Z'_{i2} & \cdots & Z'_{ij} & \cdots & Z'_{iN} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z'_{n1} & Z'_{n2} & \cdots & Z'_{nj} & \cdots & Z'_{nN} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z'_{N1} & Z'_{N2} & \cdots & Z'_{Nj} & \cdots & Z'_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ (1-\alpha)I_f \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ \alpha I_f \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中:  $Z'_{ij}$  为消去故障点后的节点阻抗;  $\alpha$  为故障距离占线路全长的百分比。由于故障点未知, 相当于注入电流矩阵是未知的。式(20)中节点电压可以通过数字孪生模型和配电网量测计算得到, 也可通过数字孪生监控节点矩阵的变化。根据节点电压矩阵非线性、稀疏性的特点, 可以利用 ROMP 重构算法求解故障注入电流矩阵。

重构算法是压缩感知理论中的信号恢复环节, 其表达式为  $y = \Phi x$ , 其中  $y$  代表正序电压故障分量矩阵,  $\Phi$  为观测矩阵,  $x$  为正序注入电流矩阵。  $x$  在变换域  $\Psi$  中是稀疏的,  $\theta$  代表稀疏度,  $A$  代表观测矩阵, 也就是  $y = A\theta = \Phi\Psi\theta$ , 其中  $x = \Psi\theta$ 。通过 ROMP 算法每次选取与残差最相关的索引值进

行迭代，最后得到稀疏矩阵重构向量  $\hat{\theta}$ ，根据  $\hat{x} = \Psi\hat{\theta}$  获得重构后的故障注入电流。

根据式(20)，重构后的注入电流矩阵中仅故障点相邻节点注入电流不为零，其余都为零。考虑到故障时过渡电阻和非金属性接地的影响，非故障节点重构注入电流不一定为零，但数值较小，一般选取幅值最大的节点和其相邻区域作为故障区段。

### 2.3 基于数字孪生技术的配电网故障测距

根据 2.2 节确定故障区段后，在已知线路参数的前提下，可以实现配电网故障定位。

故障后数字孪生模型是非线性方程，因此可以用牛拉法进行求解。根据最小二乘法得到故障后数字孪生模型的目标函数  $r_f$  为

$$r_f = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{n=1}^4 \left(\frac{\varepsilon_n}{z_n}\right)^2} \quad (21)$$

对故障后数字孪生模型进行迭代求解，得到配电网故障精确定位。

通过求解故障时配电网模型可得到未知数  $l$  在迭代过程中可能遇到多根的情况，由于实际故障距离必定为  $0 \sim L$  之内的实数，在考虑实际量测和傅里叶转换间的误差条件下，真实解的判别公式为

$$\begin{cases} -L \cdot \varepsilon \leq \text{re}(l) \leq L \cdot (1 + \varepsilon) \\ |\text{im}(l)| < L \cdot \varepsilon \end{cases} \quad (22)$$

式中： $\varepsilon$  为故障距离允许的最大相对误差，该误差可以根据实际故障量测情况进行调整； $\text{re}(l)$  为故障距离  $l$  的实部； $\text{im}(l)$  为故障距离  $l$  的虚部。

## 3 数字孪生的实现流程

建立数字孪生模型和电力仿真模型之间的联系，需要采用一些特定的技术。正如第 1 节所讨论的，建立数字孪生模型一般可以通过物理或者数字驱动来实现。在实际中，由于配电网拓扑结构复杂，基于物理的方法比较困难，因此本文采用数据驱动的方式捕捉配电网运行参数实现数字孪生的运行。本文采用基于 UDP 协议的数据收发和传递函数来实现数字孪生模型与配电网的连接，其实现过程如图 6 所示。

将上文所述的数字孪生模型上传至服务器，并在服务器中使用 Visual Studio 创建工程。通过工程与配电网间的数据收发建立数字孪生模型与配电网之间的联系。基于 UDP 协议实现数据传输的方式来完成数字孪生模型和配电网之间的数据交换。通过这种方式，还可将数字孪生模型中的数据发送至配电网实现两者之间的数据共享。

同时，这种基于 UDP 协议的数据收发方式，也使得数字孪生模型和 RTDS 之间的数据传输更加高

效，减小了数据传输过程中数据丢失和延迟的概率，提高了数据传输效率和数据传输的准确性。

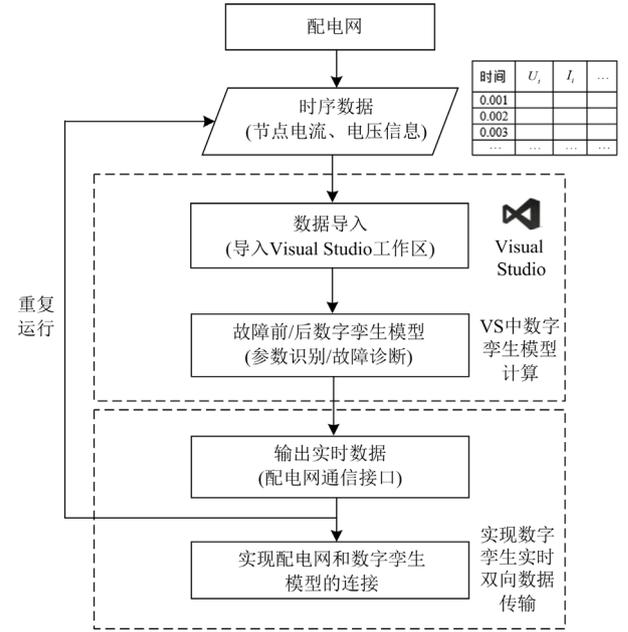


图 6 配电网的数字孪生实现流程

Fig. 6 Digital twin realization process of distribution network

## 4 算例仿真

本文在 RTDS/RSCAD 搭建 IEEE33 节点的配电网仿真模型，额定电压为 35 kV。图 7 给出了基于数字孪生实现故障定位的硬件连接情况。在 RTDS 电网仿真模型中添加了 GTNET-SKT 模块。同时运行 RTDS 电网仿真模型和服务器中的数字孪生模型可以实现数字孪生模型与 RTDS 电网仿真模型之间的交互，具有一定的稳定性和可靠性。

### 4.1 基于数字孪生的参数识别

根据故障前数字孪生模型，已知电流电压可以对线路参数进行计算。对线路通过随机改变负荷获取仿真数据，在主干线和分支线共选 5 条双端线路 ( $L_{4-5}$ 、 $L_{11-12}$ 、 $L_{19-20}$ 、 $L_{23-24}$  和  $L_{31-32}$ ) 和 2 条 T 型线路 ( $T_1$ 、 $T_2$ ) 进行参数辨识。每条线路分别选取 10 组不同参数状态运行场景下的数据进行识别，将线路辨识参数相对误差平均值作为参数辨识准确性的评判标准，相对误差平均值的计算公式如式(23)所示。

$$\xi_z = \frac{1}{a} \sum_{a=1}^n \left| \frac{z_{\text{actual}} - z_{\text{estimate}}}{z_{\text{actual}}} \right| \times 100\% \quad (23)$$

式中： $\xi_z$  为线路参数相对误差平均值，包括电阻  $\xi_r$ 、电抗  $\xi_x$ 、电纳  $\xi_b$  的误差平均值； $z_{\text{actual}}$  为线路参数实际值； $z_{\text{estimate}}$  为线路参数估计值； $a$  为线路运行场景数。

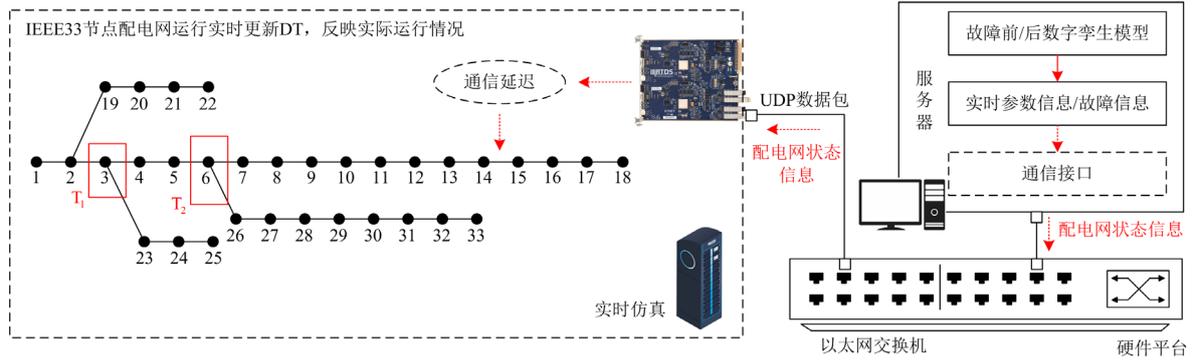


图7 基于数字孪生的硬件连接图

Fig. 7 Hardware connection based on digital twin

配电网 $\pi$ 型线路双端线路参数辨识的相对误差平均值如表1所示。

表1 配电网 $\pi$ 型线路参数辨识相对误差Table 1 Relative error of distribution network  $\pi$ -type line parameter identification

线路	相对误差均值/%		
	$\xi_r$	$\xi_x$	$\xi_b$
L <sub>4-5</sub>	1.5710	1.5001	1.5244
L <sub>11-12</sub>	0.7215	0.6819	0.7003
L <sub>19-20</sub>	1.3861	1.3455	1.3289
L <sub>23-24</sub>	1.2068	1.2245	1.2671
L <sub>31-32</sub>	0.8949	0.8615	0.8843

接着对T型线路进行分析,选取图7中T型线路 $T_1$ 和 $T_2$ 进行参数辨识验证,分析辨识结果的相对误差平均值,其结果如表2所示。

表2 配电网T型线路参数辨识相对误差

Table 2 Relative error of distribution network T-type line parameter identification

T型线路	线路	相对误差均值/%		
		$\xi_r$	$\xi_x$	$\xi_b$
$T_1$	L <sub>2-3</sub>	0.8655	0.8219	0.8463
	L <sub>3-4</sub>	1.2568	1.2245	1.2841
	L <sub>3-23</sub>	1.3543	1.3846	1.2997
$T_2$	L <sub>5-6</sub>	0.7493	0.7714	0.7369
	L <sub>6-7</sub>	1.4968	1.4359	1.4876
	L <sub>6-26</sub>	1.3785	1.3526	1.3189

由上述结果可知,故障前数字孪生模型可以准确地有效地辨识出 $\pi$ 型和T型线路参数。

#### 4.2 故障前数字孪生模型校正

线路在量测有限的情况下,假设节点4、7、12、20、23、31信息未知,验证所提出的配电网模型校正的能力。利用1.1节的方法计算各节点的电流电压数据,利用上一时间点的参数状态,可计算未知

节点的电流电压,其误差可表示为

$$e = \left| \frac{Z_{\text{actual}} - Z_{\text{estimate}}}{Z_{\text{actual}}} \right| \times 100\% \quad (24)$$

式中: $Z_{\text{actual}}$ 表示电流、电压实际值; $Z_{\text{estimate}}$ 表示电流、电压估计值; $e$ 为电流、电压误差。计算未知节点的电流电压,并根据式(24)获得节点电流电压校正误差,各节点的校正误差如图8所示。通过验证可以得到:当有多个节点运行状态未知时,通过1.1节的校正方法计算得到的节点电流电压与真实节点电流电压间的最大误差不超过1.0%,因此本文提出的校正方法可以较为准确地计算出未知节点的电流电压信息。

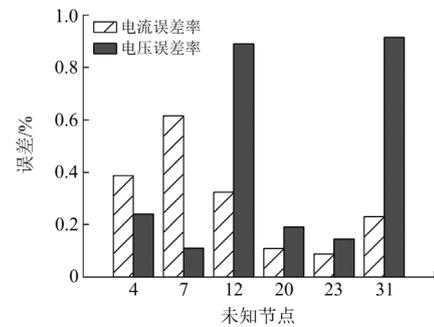


图8 基于数字孪生的配电网校正误差

Fig. 8 Error correction of distribution network based on digital twin

#### 4.3 基于数字孪生的故障区段定位

为了展示所提出方法的故障区段定位能力,本文在线路 $L_{7-8}$ 和 $L_{30-31}$ 分别设置过渡电阻为 $10\Omega$ 的单相接地故障,其故障后ROMP算法重构注入电流故障分量如图9和图10所示。

如图9和图10所示,节点7和8、节点30和31的注入电流故障分量幅值明显高出其余分量的8~10倍,故可以确定故障区段为 $L_{7-8}$ 和 $L_{30-31}$ 。

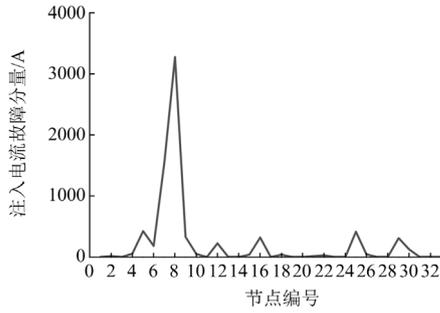


图9 线路 L<sub>7-8</sub> 基于数字孪生的重构注入电流故障分量  
Fig. 9 Line L<sub>7-8</sub> reconstruction of injected current fault components based on digital twin

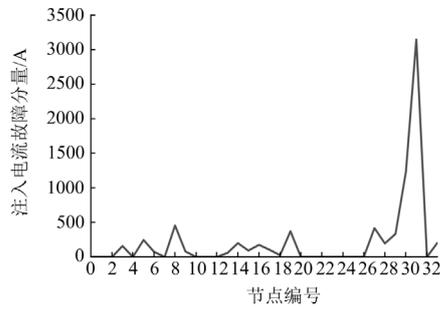


图10 线路 L<sub>30-31</sub> 基于数字孪生的重构注入电流故障分量  
Fig. 10 Line L<sub>30-31</sub> reconstruction of injected current fault components based on digital twin

#### 4.4 基于数字孪生的故障精确定位

##### 4.4.1 不同故障类型下的定位结果

为了验证不同故障类型下定位方法的功能，本文在多个区域进行了测试，将测距误差  $\Delta d\%$  作为判别不同故障类型、故障位置和过渡电阻情况下故障定位精度的依据，其表达式为

$$\Delta d = \frac{|d_{\text{actual}} - d_{\text{estimate}}|}{d_{\text{actual}}} \times 100\% \quad (25)$$

式中： $d_{\text{actual}}$  为线路首端到实际故障位置的距离； $d_{\text{estimate}}$  为线路首端到估计故障位置的距离； $\Delta d$  为测距误差。

表3 测试了不同线路、不同故障类型在不同故障位置的测距误差，故障过渡电阻设为  $10 \Omega$ 。

仿真结果表明，对于单相接地、两相接地、两相短路和三相短路故障，系统均存在正序分量，可以利用正序分量准确定位出故障位置，且不需要提前判断故障类型和故障相。

##### 4.4.2 不同故障位置下的定位结果

在线路 L<sub>7-8</sub> 设置不同的故障位置，验证线路不同位置的单相接地故障的测距结果。图11 展示了测距误差和故障位置之间的关系。

表3 不同故障类型下的故障定位误差

故障线路	故障类型	不同故障位置测距误差/%	
		50%	80%
L <sub>3-4</sub>	LG	0.320	0.200
	LL	0.060	0.140
	LLG	0.320	0.200
	LLL	0.320	0.200
L <sub>7-8</sub>	LG	0.300	0.350
	LL	0.040	0.025
	LLG	0.300	0.350
	LLL	0.300	0.350
L <sub>21-22</sub>	LG	0.600	0.140
	LL	0.200	0.500
	LLG	0.600	0.140
L <sub>31-32</sub>	LLG	0.600	0.140
	LL	0.140	0.275
	LLL	0.140	0.275

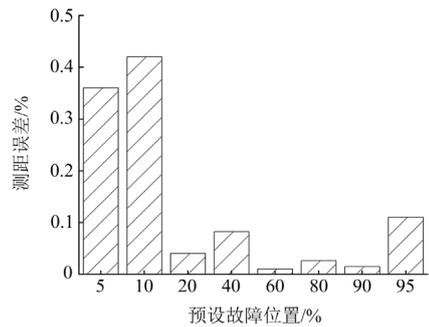


图11 线路 L<sub>7-8</sub> 基于数字孪生不同故障位置的测距误差  
Fig. 11 Line L<sub>7-8</sub> ranging errors for different fault locations based on digital twin

仿真结果表明测距误差较小，所提方法可以较为准确地计算出故障位置，受故障位置的影响较小。

##### 4.4.3 不同过渡电阻下的定位结果

为了分析故障电阻对本文提出的故障测距算法的影响，在线路 L<sub>11-12</sub> 和 L<sub>31-32</sub> 选取了6个故障位置，过渡电阻分别为  $1 \Omega$ 、 $10 \Omega$ 、 $100 \Omega$ 、 $1000 \Omega$ ，验证单相接地故障时不同过渡电阻对故障定位的影响。

由图12和图13可知，过渡电阻的变化对故障测量误差的影响不大，且测距误差均小于  $0.6\%$ ，测距误差较小，在可控制的范围内。因此可以推断出本文提出的故障定位方法受过渡电阻影响较小。

##### 4.4.4 配电网参数变化对故障定位的影响

本文在故障定位时考虑了配电网参数自修正对配电网故障定位准确性的影响，图14 测试了线路

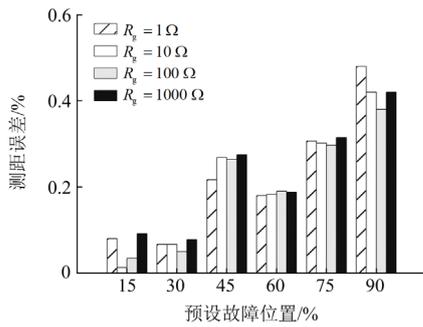


图 12 线路 L<sub>11-12</sub> 基于数字孪生不同过渡电阻下的测距误差  
Fig. 12 Line L<sub>11-12</sub> ranging errors under different transition resistances based on digital twin

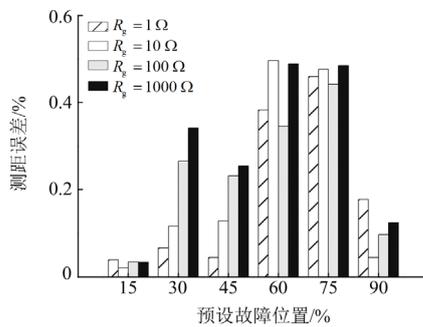


图 13 线路 L<sub>31-32</sub> 基于数字孪生不同过渡电阻下的测距误差  
Fig. 13 Line L<sub>31-32</sub> ranging errors under different transition resistances based on digital twin

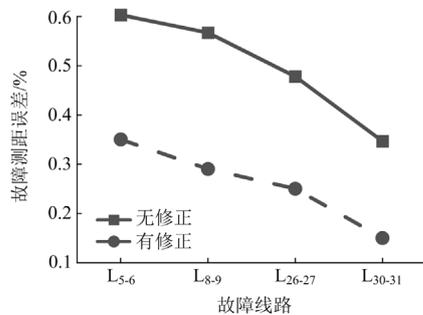


图 14 线路有无参数修正的单相接地故障定位测距误差  
Fig. 14 Single-phase ground fault location and ranging error with or without parameter correction on the line

L<sub>5-6</sub>、L<sub>8-9</sub>、L<sub>26-27</sub> 和 L<sub>30-31</sub> 有无参数自修正对故障定位精度的影响。设置选取的线路发生单相接地故障, 过渡电阻为 10 Ω。假设线路参数发生 5% 的偏移, 在线路预设故障 50% 处进行测距误差的对比。

如图 14 所示, 线路参数无修正的故障定位测距误差明显大于线路参数有修正的故障定位测距误差, 因此可以证明本文所提出的基于参数自修正的故障定位方法可以显著提高故障定位精度。

## 5 结论

针对配电网参数动态变化的问题, 将数字孪生引入配电网故障定位研究, 提出了基于参数自修正的配电网故障定位数字孪生技术。本文不仅实现了实时配电网动态掌握, 还充分利用动态参数信息进行配电网故障定位。通过 RTDS 和服务器的连接验证了数字孪生技术在配电网应用的可行性和实时性。相比不考虑参数变化的故障定位来说, 本文所提出的方法考虑配电网动态变化, 在实用性、实时性上有一定的提升。

## 参考文献

- [1] 孔祥轩, 郑楚韬, 仇志成, 等. 基于广义深度学习的含 DG 配网故障诊断方法[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(11): 53-57.  
KONG Xiangxuan, ZHENG Chutao, QIU Zhicheng, et al. Fault location of distribution network with DG based on GDL[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(11): 53-57.
- [2] 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. A novel fault location method employing node voltage difference value for a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 106-116.
- [3] 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 generations[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2021, 33(8): 79-87.
- [4] 齐郑, 黄朝晖, 陈艳波. 基于零序分量的阻抗法配电网故障定位技术[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 54-62.  
QI Zheng, HUANG Zhaohui, CHEN Yanbo. Impedance fault location technology for a distribution network based on a zero-sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 54-62.
- [5] 戴志辉, 王旭. 基于改进阻抗法的有源配电网故障测距算法[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 2027-2034.  
DAI Zhihui, WANG Xu. Impedance method based fault location algorithm for active distribution system[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 2027-2034.
- [6] 李练兵, 孙腾达, 曾四鸣, 等. 基于多端行波时差的配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 140-147.  
LI Lianbing, SUN Tengda, ZENG Siming, et al. Fault location method for distribution networks based on traveling wave time difference[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 140-147.

- [7] 吴佳享, 孙云莲, 陈楚昭. 微弱行波下多分支配电网故障定位[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(5): 20-27.  
WU Jiaxiang, SUN Yunlian, CHEN Chuzhao. Fault location of multiple branches distribution network under weak traveling waves[J]. Electric Machines and Controls, 2023, 27(5): 20-27.
- [8] 王巍璋, 王淳, 敖鑫. 基于果蝇优化算法的配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 108-114.  
WANG Weizhang, WANG Chun, AO Xin. Fault location of power distribution network based on fruit fly optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 108-114.
- [9] 杨国华, 冯骥, 柳萱, 等. 基于改进秃鹰搜索算法的含分布式电源配电网分区故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(18): 1-9.  
YANG Guohua, FENG Ji, LIU Xuan, et al. Fault location of a distribution network hierarchical model with a distribution generator based on IBES[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(18): 1-9.
- [10] HUANG X, XIE Z, HUANG X. Fault location of distribution network base on improved cuckoo search algorithm[J]. IEEE Access, 2019, 8: 2272-2283.
- [11] MIRSHEKALI H, KESHAVARZ A, DASHTI R, et al. Deep learning-based fault location framework in power distribution grids employing convolutional neural network based on capsule network[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 223: 109529.
- [12] 李振钊, 王增平, 张玉玺. 基于多源信息融合的有源配电网故障测距新方法[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3448-3459.  
LI Zhenzhao, WANG Zengping, ZHANG Yuxi. A new method of fault location for active distribution network fault based on multi-source information fusion[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3448-3459.
- [13] LIU Xue, JIA Jun, WANG Jian. Research on fault location of low voltage distribution network based on improved ant colony algorithm[C]// 7th International Forum on Electrical Engineering and Automation, 2020, Hefei, China: 759-762.
- [14] 赵乔, 王增平, 董文娜, 等. 基于免疫二进制粒子群优化算法的配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 83-89.  
ZHAO Qiao, WANG Zengping, DONG Wenna, et al. Research on fault location in a distribution network based on an immune binary particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 83-89.
- [15] 尚博阳, 罗国敏, 茹嘉昕, 等. 基于有限量测信息的多分支配电网故障定位方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2308-2319.  
SHANG Boyang, LUO Guomin, RU Jiaxin, et al. Fault location method of multi-branch distribution lines based on limited measurement information[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2308-2319.
- [16] 王成斌. 基于微型 PMU 的配电网架空线路参数无关故障定位算法[D]. 济南: 山东大学, 2020.  
WANG Chengbin. Parameter-free fault location algorithm for overhead transmission line of distribution network based on  $\mu$ PMU[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [17] 齐波, 张鹏, 张书琦, 等. 数字孪生技术在输变电设备状态评估中的应用现状与发展展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1522-1538.  
QI Bo, ZHANG Peng, ZHANG Shuqi, et al. Application status and development prospects of digital twin technology in condition assessment of power transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1522-1538.
- [18] 蒲天骄, 陈盛, 赵琦, 等. 能源互联网数字孪生系统框架设计及应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2012-2029.  
PU Tianjiao, CHEN Sheng, ZHAO Qi, et al. Framework design and application prospect for digital twins system of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2012-2029.
- [19] WÖRMANN J, URBAN M, GRUBINGER D, et al. Neural network and correlation based earth-fault localization utilizing a digital twin of a medium-voltage grid[C]// Proceedings of the Twelfth ACM International Conference on Future Energy Systems, 2021: 249-253.
- [20] BROSINSKY C, WESTERMANN D, KREBS R. Recent and prospective developments in power system control centers: adapting the digital twin technology for application in power system control centers[C]// IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), June 3-7, 2018, Limassol, Cyprus: 1-6.
- [21] MUKESH K, TROND K, KJETIL J, et al. Simple a posteriori error estimators in adaptive ISO geometric analysis[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2015, 70: 1555-1582.
- [22] ROCCHETTA R, BELLANI L, COMPARE M, et al. A reinforcement learning framework for optimal operation and maintenance of power grids[J]. Applied Energy, 2019, 241: 291-301.
- [23] BAZMOHAMMADI N, MADARY A, VASQUEZ J C, et al. Microgrid digital twins: concepts, applications, and future trends[J]. IEEE Access, 2022, 10: 2284-2302.
- [24] JAIN P, POON J, SINGH J P, et al. A digital twin approach for fault diagnosis in distributed photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 940-956.
- [25] MILTON M, CASTULO DE LA O GINN H L, et al. Controller-embeddable probabilistic real-time digital twins for power electronic converter diagnostics[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 9850-9864.

收稿日期: 2023-09-11; 修回日期: 2023-11-07

作者简介:

席瑞翎(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网故障定位; E-mail: Ruilingx\_all@qq.com

季亮(1985—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: jihome2002@sina.cn

(编辑 魏小丽)