

DOI: 10.7667/PSPC171749

# 基于状态估计的含分布式电源树状配电网故障测距算法

王艳松<sup>1</sup>, 刘珊<sup>1</sup>, 衣京波<sup>2</sup>, 薛永端<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东)信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580;

2. 胜利石油管理局胜利发电厂, 山东 东营 257087)

**摘要:** 多电源配电网的故障定位和测距对快速排除故障、提高供电可靠性具有重要意义。以含分布式电源(DG)树状配电网的区间定位为基础, 按区间特性将配电网分为两电源区段和单电源区段, 建立故障等值回路与其相应的微分方程和最优估计离散模型。以电源端口电压电流、各 FTU 电流为输出量, 以故障距离为状态量, 利用强跟踪的卡尔曼滤波器算法求解最优估计离散模型, 跟踪相间短路故障测距。通过搭建含 DG 的树状配电网, 分析负载、故障点过渡电阻对故障测距结果的影响。算例分析表明, 该算法跟踪速度快, 受初值的影响小, 不受 DG 接入位置和数量的影响, 不受故障点过渡电阻的影响, 受负载和树状分支结构影响较少, 测距精度满足工程精度要求。

**关键词:** 分布式电源; 配电网; 故障测距; 最优估计离散模型; 时变增益矩阵

## Fault location algorithm based on state estimation in tree distribution network with distributed generation

WANG Yansong<sup>1</sup>, LIU Shan<sup>1</sup>, YI Jingbo<sup>2</sup>, XUE Yongduan<sup>1</sup>

(1. College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. Shengli Petroleum Administration, Shengli Power Plant, Dongying 257087, China)

**Abstract:** Fault location of distribution network with multi-generation is of great significance to exclude the fault and improve the power supply reliability. The research in this paper is based on interval location of tree distribution network with distributed generation. The distribution network is divided into two power sections and single power sections according to the interval characteristics, the fault equivalent circuit with its corresponding differential equation and optimal estimation of discrete model are established. The method takes voltage and current of the power supply port and FTU current as output quantity, and the fault distance as state quantity. A strongly tracking Kalman filter algorithm is used to solve the optimal estimation of discrete model and track the fault location of interphase short circuit. By building a tree distribution network with DG, the effect of load and transition resistance on fault location is analyzed. The simulation results show that the tracking speed of algorithm is fast and less affected by the initial value. It is not affected by the location or quantity of DG and transition resistance. It is also less affected by the load and tree topology. The location accuracy can meet the engineering accuracy requirements.

This work is supported by Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2012EEL20), National Natural Science Foundation of China (No. 51477184) and National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904800).

**Key words:** distributed generation; distribution network; fault location; optimal estimation of discrete model; time-varying gain matrix

## 0 引言

城市树状配电网一般为 10 kV 电压等级, 长度

在 5~20 km。通常在主干线和分支线出口配置分段开关和 FTU, 其中主干线上分段开关和 FTU 的数量为 3~5 个。配电网故障区间定位能快速隔离故障区段, 而故障测距可指导检修人员迅速查找故障点。

分布式电源(DG)的接入使单电源树状网络变成了多电源树状网络, 改变了传统配电网的潮流和短路电流的分布特征<sup>[1-3]</sup>。目前含 DG 配电网故障定

**基金项目:** 山东省自然科学基金项目资助(ZR2012EEL20); 国家自然科学基金项目资助(51477184); 国家重点研发计划(2018YFB0904800)

位研究分为故障区间的定位<sup>[4-12]</sup>和故障测距<sup>[13-19]</sup>。含 DG 配电网故障区间定位方法主要有改进的矩阵算法<sup>[4-5]</sup>、改进的传统保护<sup>[6-7]</sup>、优化算法<sup>[8-10]</sup>、故障匹配法<sup>[11-12]</sup>等。其中文献[4]基于电流综合幅值判定故障搜索方向、文献[5]基于故障过流及方向信息,修订网络关联描述矩阵,得到故障判别矩阵;文献[6]基于有向节点配置方法和方向过流保护的動作信息、文献[7]基于馈线首端到 DG 接入点的限时电流速断保护与 DG 接入点到馈线末端的定时限过流保护的動作信息,结合通信系统确定故障线路;文献[8-10]基于 FTU 的正、反向过流信息,应用优化算法求解适应度函数,定位故障区段;文献[11]基于各电源电压变化量的测量值与计算值的差值向量最小 2-范数作为故障特征值、文献[12]基于故障区段两端电流幅值不等构造特性方程,实现故障区段定位。含 DG 配电网的故障测距方法主要有行波法<sup>[13]</sup>、智能算法<sup>[14-15]</sup>、故障匹配法<sup>[16]</sup>、改进的阻抗法<sup>[17-19]</sup>等。文献[13]利用行波中线模分量与零模分量的第一个波头到达的时间差,计算故障距离,用于含分支的树状网络故障测距时需要加装大量高精度的数据采集装置。文献[14-15]应用神经网络进行故障测距,需要收集大量的训练样本和测试样本集。文献[16]基于各电源的电压量测值与计算值相等的特征,搜索故障点实现特征匹配,由于故障条件的随机性,存在匹配工作量大和故障定位不确定等缺点。文献[17-19]利用量测点的电压、电流,基于基尔霍夫电压、电流定律推导阻抗法测距模型,给定初始条件,其中文献[17-18]通过迭代、文献[19]通过优化得到满足相应的判别条件的故障距离。

本文以含 DG 的树状配电网故障区间定位为前提,以电源端口电压电流、各 FTU 电流为量测量,设故障距离为估计量,建立与故障等值电路相应的最优估计离散模型,利用强跟踪的卡尔曼滤波器算法求解最优估计离散模型,跟踪相间短路故障测距。

## 1 强跟踪的卡尔曼滤波器

最优估计问题是对受到随机干扰和随机测量误差作用的物理系统,按照某种性能指标为最优的原则,从具有随机误差的测量数据中提取信息,估计出系统当前时刻的某些参数和状态变量,实现最优估计的算法称为最优滤波器。

### 1.1 卡尔曼滤波器

在最优估计理论中,卡尔曼滤波器是一种线性、无偏,且误差方差最小的随机系统最优估计算法。卡尔曼滤波器是在已知系统和量测的数学模型、量测噪声统计特性及系统初始状态的情况下,利用输

出信号的量测数据和系统数学模型,实现系统参数和状态变量的最优估计。

任何一个动态系统都可以由状态方程和测量方程描述其内部规律,离散系统的数学模型一般形式为

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{U}(k+1) + \mathbf{w}(k+1) \\ \mathbf{z}(k+1) = \mathbf{H}(k+1)\mathbf{x}(k+1) + \mathbf{v}(k+1) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{x}(k+1)$  是  $k+1$  时刻的系统状态量;  $\mathbf{U}(k+1)$  是  $k+1$  时刻的系统控制量;  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{B}$  是系统参数矩阵;  $\mathbf{z}(k+1)$  是  $k+1$  时刻的输出量;  $\mathbf{H}(k+1)$  是  $k+1$  时刻的测量系统参数矩阵;  $\mathbf{w}(k+1)$  和  $\mathbf{v}(k+1)$  分别表示过程和量测的噪声。假设为高斯白噪声,它们的协方差分别为  $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{R}$ (设两者不随系统状态变化而变化)。

卡尔曼滤波器对离散系统模型式(1)的求解过程是一个预测和滤波修正的循环递推过程。

#### (1) 预测

根据系统的模型,由系统  $k$  时刻的状态得到现在  $k+1$  时刻的预测状态量  $\mathbf{x}(k+1|k)$ 。

$$\mathbf{x}(k+1|k) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k|k) + \mathbf{B}\mathbf{U}(k+1) + \mathbf{w}(k+1) \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{x}(k|k)$  是上一时刻  $k$  对应的最优估计状态量;如果没有控制量,  $\mathbf{U}(k+1)$  可以为零矩阵。

预测误差的协方差  $\mathbf{P}(k+1|k)$  为

$$\mathbf{P}(k+1|k) = \mathbf{A}\mathbf{P}(k|k)\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{P}(k|k)$  是  $k$  时刻对应的估计误差的协方差;  $\mathbf{A}^T$  表示  $\mathbf{A}$  的转置矩阵。

#### (2) 滤波

结合预测状态量  $\mathbf{x}(k+1|k)$  和实际输出量  $\mathbf{z}(k+1)$ ,得到现在  $k+1$  时刻的最优估计状态值  $\mathbf{x}(k+1|k+1)$ ,即

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1|k+1) &= \mathbf{x}(k+1|k) + \mathbf{K}(k+1) \cdot \\ &\quad (\mathbf{z}(k+1) - \mathbf{H}(k+1)\mathbf{x}(k+1|k)) \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{K}(k+1)$  为  $k+1$  时刻的卡尔曼增益阵,可由预测误差的协方差求得,即

$$\begin{aligned} \mathbf{K}(k+1) &= \\ \mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T(k+1)[\mathbf{H}(k+1)\mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T(k+1) + \mathbf{R}]^{-1} \end{aligned} \quad (5)$$

更新  $k+1$  时刻下估计误差的协方差  $\mathbf{P}(k+1|k+1)$  为

$$\mathbf{P}(k+1|k+1) = (\mathbf{I} - \mathbf{K}(k+1)\mathbf{H}(k+1))\mathbf{P}(k+1|k) \quad (6)$$

式中,  $\mathbf{I}$  为单位矩阵。当系统进入  $k+2$  时刻时,  $\mathbf{P}(k+1|k+1)$  就是式(3)的  $\mathbf{P}(k|k)$ ,算法就可以循环

上述递推过程。

### 1.2 改进的时变增益矩阵

卡尔曼增益阵不会随滤波效果自我调整以快速准确跟踪系统状态，强跟踪的卡尔曼滤波器引入次优渐消因子在线确定时变增益阵  $\mathbf{K}(k+1)$ ，能自发快速精确地校正估计偏差和迅速跟踪系统状态。时变增益矩阵的具体计算方法如下。

#### ① 计算预测残差

根据预测状态量  $\mathbf{x}(k+1|k)$ ，可以得到  $k+1$  时刻的预测输出量  $\mathbf{z}(k+1|k)$  为

$$\mathbf{z}(k+1|k) = \mathbf{H}(k+1)\mathbf{x}(k+1|k) \quad (7)$$

在得到  $k+1$  时刻的实际输出量  $\mathbf{z}(k+1)$  后，计算它与预测输出量之差，称之为预测残差  $\boldsymbol{\gamma}(k+1)$ ，即

$$\boldsymbol{\gamma}(k+1) = \mathbf{z}(k+1) - \mathbf{z}(k+1|k) \quad (8)$$

产生这一残差的原因是：预测输出值和实际输出值都可能存在偏差。因此为了得到  $k+1$  时刻的最优估算状态量  $\mathbf{x}(k+1|k+1)$ ，可以利用预测残差  $\boldsymbol{\gamma}(k+1)$  和待定的时变增益矩阵  $\mathbf{K}(k+1)$  修正  $\mathbf{x}(k+1|k+1)$ ，即

$$\mathbf{x}(k+1|k+1) = \mathbf{x}(k+1|k) + \mathbf{K}(k+1)\boldsymbol{\gamma}(k+1) \quad (9)$$

#### ② 计算残差的协方差误差阵 $\mathbf{V}_0(k+1)$

$$\mathbf{V}_0(k+1) = \begin{cases} \boldsymbol{\gamma}(1)\boldsymbol{\gamma}^T(1) & k=0 \\ \frac{[\rho\mathbf{V}_0(k) + \boldsymbol{\gamma}(k+1)\boldsymbol{\gamma}^T(k+1)]}{1+\rho} & k \geq 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中， $\rho$  为遗忘因子，一般选为 0.95。

#### ③ 计算次优渐消因子 $\lambda(k+1)$

$$\lambda(k+1) = \begin{cases} \lambda_0, & \lambda_0 \geq 1 \\ 1, & \lambda_0 < 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中，

$$\lambda_0 = \frac{\text{tr}[N(k+1)]}{\text{tr}[M(k+1)]} \quad (12)$$

$\mathbf{N}(k+1)$ 、 $\mathbf{M}(k+1)$  按下式计算：

$$\begin{cases} \mathbf{N}(k+1) = \mathbf{V}_0(k+1) - \mathbf{H}(k+1)\mathbf{Q}\mathbf{H}^T(k+1) - \beta\mathbf{R} \\ \mathbf{M}(k+1) = \mathbf{H}(k+1)\mathbf{A}\mathbf{P}(k|k)\mathbf{A}^T\mathbf{H}^T(k+1) \end{cases} \quad (13)$$

$\beta$  为弱化因子，本文中取 1。

④ 引入渐消因子计算预报误差的协方差阵  $\mathbf{P}(k+1|k)$

$$\mathbf{P}(k+1|k) = \lambda(k+1)\mathbf{A}\mathbf{P}(k|k)\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \quad (14)$$

⑤ 计算时变增益阵

将由式 (14) 得到的预测误差的协方差阵  $\mathbf{P}(k+1|k)$  以及参数矩阵  $\mathbf{H}(k+1)$  代入式 (5)，即可得到  $\mathbf{K}(k+1)$ 。

## 2 相间故障测距的最优估计数学模型

在实际电力系统中不是所有的变量都可以量测，某些需要研究的变量往往无法直接量测。例如，配电网发生短路故障时，故障距离和故障过渡电阻就无法直接测量，而只能测量和它们有函数关系的一些状态变量(电流、电压)。因此，通过建立含 DG 的树状配电网的短路等值电路和最优估计数学模型，可以通过强跟踪的滤波器算法估计故障距离。

在图 1 中，S1、S2、S3 配置电源出口开关和电压、电流量测单元；1~8 配置分段开关及 FTU，可量测电流。按区间特性将配电网分为两电源区段和单电源区段，其中两电源区段，其首末端具有双端电流量测量；单电源区段，其首端具有电流量测量。

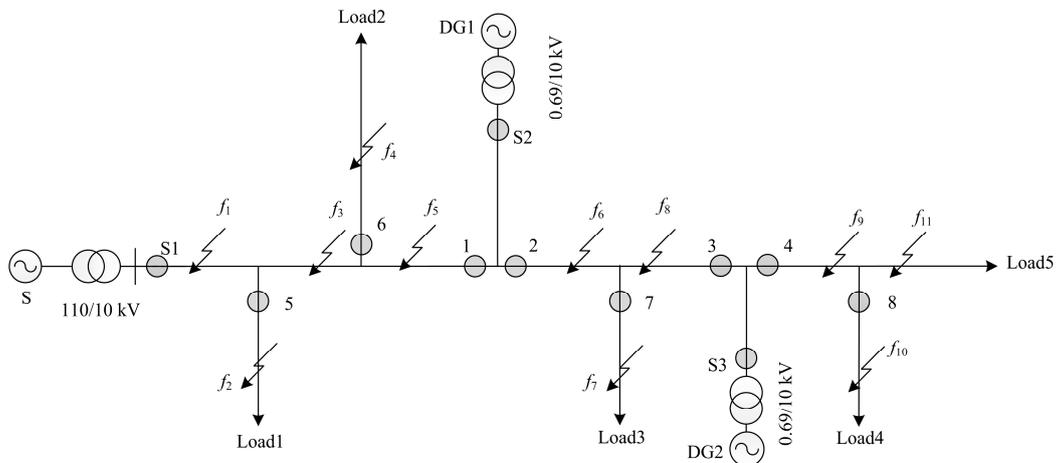


图 1 含 DG 的配电系统结构

Fig. 1 Topology of distribution network with DG

任意区段内发生故障, 从区段端口看进去的短路等值回路如图 2。

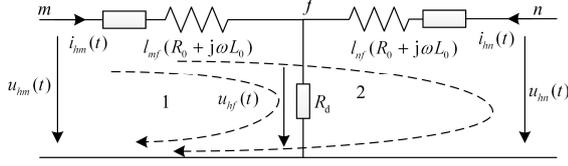


图 2 短路等值回路

Fig. 2 Fault equivalent circuit

在图 2 中,  $m$ 、 $n$  为区段首、末节点;  $u_{hm}(t)$ 、 $i_{hm}(t)$  为  $t$  时刻区段首端  $m$  处监测得到的电压、电流; 下标  $h$  代表故障类型, 对于三相短路,  $u_{hm}(t) = u_{ma}(t)$  为故障相电压,  $i_{hm}(t) = i_{ma}(t)$  为故障相电流; 对于不对称两相 BC 短路,  $u_{hm}(t) = u_{mb}(t) - u_{mc}(t)$  为故障线电压,  $i_{hm}(t) = i_{mb}(t) - i_{mc}(t)$  为故障相电流的差值, 同理可得  $t$  时刻区段末端  $n$  处监测得到的电压  $u_{hn}(t)$ 、电流  $i_{hn}(t)$ ;  $u_{hf}(t)$  为  $t$  时刻故障点  $f$  处的电压;  $l_{mf}$  为节点  $m$  到故障点  $f$  的距离;  $l_{nf}$  为节点  $n$  到故障点  $f$  的距离;  $R_0$ 、 $L_0$  分别为线路的单位电阻、电感;  $R_d$  为故障点过渡电阻。

分析图 2 短路等值电路, 如果区段  $m$ 、 $n$  为两电源区段, 则对应等值电路的回路 2, 其两端电压可直接量测或通过主电源、DG 出口的电压量测量计算得到, 其端口注入电流可直接量测, 建立相应的短路等值回路微分方程为

$$u_{hm}(t) - u_{hn}(t) = R_0(l_{mf}i_{hm}(t) - l_{nf}i_{hn}(t)) + L_0(l_{mf}\frac{di_{hm}(t)}{dt} - l_{nf}\frac{di_{hn}(t)}{dt}) \quad (15)$$

如果区段  $m$ 、 $n$  为单电源区段, 则对应短路等值电路的回路 1, 其端口  $m$  处注入的电流可直接量测, 其端口电压可通过电源出口的电压量测量计算得到, 建立相应的短路等值回路微分方程为

$$u_{hm}(t) = R_0l_{mf}i_{hm}(t) + L_0l_{mf}\frac{di_{hm}(t)}{dt} + u_{hf}(t) \quad (16)$$

以故障区段首端  $m$  到故障点  $f$  的距离  $l_{mf}$  为状态量之一, 以电流  $i_{hm}(t)$ 、 $i_{hn}(t)$  的离散采样值为量测量, 以电压  $u_{hm}(t)$ 、 $u_{hn}(t)$  的离散采样值或计算值为输出量, 此时  $\mathbf{z}$  由矩阵变为单变量  $z$ , 考虑系统误差  $\mathbf{w}$  和量测误差  $v$ , 将短路等值回路微分方程转化为离散数学模型的通用形式为

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{w}(k+1) \\ z(k+1) = \mathbf{H}(k+1)\mathbf{x}(k+1) + C + v(k+1) \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $\mathbf{x}(k+1)$ 、 $\mathbf{x}(k)$  分别为  $k+1$ 、 $k$  时刻的系统状

态量; 系统参数矩阵  $\mathbf{A}$  此时为单位阵;  $z(k+1)$  为  $k+1$  时刻输出量, 与电压量测量(或计算值)有关; 矩阵  $\mathbf{H}(k+1)$  与 FTU 处的离散量测量  $i_{hm}(t)$ 、 $i_{hn}(t)$  有关;  $C$  为常数项, 与区段量测配置有关。下面具体分析最优估计离散数学模型的各项具体形式。

## 2.1 两电源区段相间短路最优估计离散模型的建立

如图 1, 当在节点 S1、1 之间的主干线  $f_1$  点发生故障, 应用文献[20]中基于小波分析的区间定位法得到的故障区段为[S1, 1]。图 2 中  $m$ 、 $n$  首末端节点分别对应为图 1 中故障区段首末端节点 S1、1。

以区段首端到故障点的距离  $l_{mf}$ 、区段首末端到故障点的线路电阻  $R_{mf}$  与  $R_{nf}$  为状态量, 以区段首、末端电压之差  $u_{hm}(t) - u_{hn}(t)$  为输出量, 建立与式(15)等效的离散系统差分方程为

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = [l_{mf}(k+1) R_{mf}(k+1) R_{nf}(k+1)]^T \\ z(k+1) = u_{hm}(k+1) - u_{hn}(k+1) \\ \mathbf{H}(k+1) = \begin{bmatrix} L_0 \sum_{x=m,n} (i_{hx}(k+1) - i_{hx}(k)) \\ T_s \\ i_{hm}(k+1) \\ -i_{hn}(k+1) \end{bmatrix}^T \\ C = -l_{mn} \frac{L_0(i_{hn}(k+1) - i_{hn}(k))}{T_s} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $u_{hm}(k+1)$ 、 $u_{hn}(k+1)$  分别为  $k+1$  时刻节点  $m$ 、 $n$  的电压采样值;  $i_{hm}(k+1)$ 、 $i_{hn}(k+1)$  分别为  $k+1$  时刻节点  $m$ 、 $n$  的电流采样值;  $i_{hm}(k)$ 、 $i_{hn}(k)$  分别为  $k$  时刻节点  $m$ 、 $n$  的电流采样值;  $T_s$  为采样周期;  $l_{mf}(k+1)$ 、 $R_{mf}(k+1)$ 、 $R_{nf}(k+1)$  分别为  $k+1$  时刻区段首端到故障点的距离及区段首、末端到故障点的线路电阻;  $l_{mn}$  为节点  $m$ 、 $n$  之间的距离。

对于位于其他两电源区段内的故障测距, 最优估计离散模型的建立过程同上, 此处不再赘述。

## 2.2 单电源区段相间短路最优估计离散模型的建立

如图 1, 当在节点 5 所在分支线  $f_2$  点发生故障, 应用文献[20]中基于小波分析的区间定位法得到的故障区段为节点 5 所在分支线。图 2 中  $m$  端节点对应为图 1 中故障区段首端节点 5。

以区段首端到故障点的距离  $l_{mf}$ 、区段首末端到故障点的线路电阻  $R_{mf}$ 、故障点电压  $u_f$  为状态量, 以区段首端电压  $u_{hm}(t)$  为输出量, 建立与式(16)等效的离散系统差分方程为

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = [l_{mf}(k+1) R_{mf}(k+1) u_{hf}(k+1)]^T \\ z(k+1) = u_{hm}(k+1) \\ \mathbf{H}(k+1) = \begin{bmatrix} \frac{L_0 i_{hm}(k+1) - L_0 i_{hm}(k)}{T_s} \\ i_{hm}(k+1) \\ 1 \end{bmatrix} \\ C = 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $u_{hf}(k+1)$  为  $k+1$  时刻故障点  $f$  的故障相电压; 其他物理量同上式。

对于位于其他单电源区段内的故障测距, 最优估计离散模型的建立过程同上, 此处不再赘述。

### 2.3 计算故障距离

当故障发生后, 应用文献[20]所提算法进行故障区段定位, 根据区间性质, 建立相应的最优估计离散模型, 利用强跟踪算法求解状态量  $l_{mf}$ , 得到馈线首端到故障点的距离为

$$l_{sf} = l_{sm} + l_{mf} \quad (20)$$

式中,  $l_{sm}$  为馈线首端  $s$  点到区段首节点  $m$  的距离。

分析 2.1、2.2 小节中推导得到的两电源区段、单电源区段对应的相间短路最优估计离散模型, 输出量  $z(k+1)$  可直接量测或由 DG 出口的电压、电流推导得到, 在参数矩阵  $\mathbf{H}(k+1)$  中, FTU 处的离散量测量  $i_{hm}(t)$ 、 $i_{hn}(t)$  已包含有 DG 提供的短路电流分量, 说明最优估计离散模型中考虑了 DG 接入对测距的影响。且在状态量  $\mathbf{x}(k+1)$  中不包含 DG 出口处的电压、电流量, 避免了对 DG 状态进行估计, 表明了算法理论上不受 DG 接入的影响。

## 3 算例分析

搭建如图 1 所示的 10 kV 配电网的 Simulink 仿真模型, 主干线长度为 20 km。分布式电源模型 DG 采用旋转型模型, 网络所接负载数据见表 1。采样频率  $T_s$  取为 5 000 Hz; 状态量  $\mathbf{x}(k+1)$  的初始值设为  $[0, 0, 0]^T$ 。

表 1 网络负荷数据(负载率 100%)

Table 1 Access load of network (the load ratio is 100%)

负荷编号	Load1	Load2	Load3	Load4	Load5
有功功率/kW	190	475	237.5	237.5	150
无功功率/kvar	62.4	156	78.1	78.1	50.5

设置故障发生时刻为 6 s, 系统仿真时间 8 s。取各监测点的数据分析窗口为故障后的 20 个周期, 对于相间短路故障, 故障点过渡电阻一般不会很

大<sup>[19]</sup>, 设置过渡电阻的变化范围为  $[0.001 \sim 5] \Omega$ 。

### 3.1 故障过渡电阻、故障类型、DG 接入对测距精度的影响

对于含 DG 树状配电网而言, 故障点过渡电阻与 DG 的接入均会造成系统负荷电流的变化, 为了研究两者对测距精度的影响, 选择系统空载的情况, 以消除负荷电流与其他两个因素之间的耦合关系。

1) 为研究故障过渡电阻、故障类型对算法的影响, 空载下经不同故障点过渡电阻(0.001~5)  $\Omega$ 、不同故障位置( $f_1$ — $f_{11}$  点)相间故障, 应用本文提出的状态估计方法计算各种短路组合情况下的故障测距结果, 统计分析不同故障点的故障测距平均误差, 如表 2。

表 2 故障点过渡电阻、故障类型变化时测距平均误差

Table 2 Average error under different fault resistances and fault types

故障过渡电阻/ $\Omega$	平均误差距离/km					
	两电源区段			单电源区段		
	$f^{(3)}$	$f^{(2)}$	$f^{(1)}$	$f^{(3)}$	$f^{(2)}$	$f^{(1)}$
0.001	0.003	0.003	0.003	0.008	0.008	0.008
1	0.005	0.005	0.005	0.008	0.008	0.008
3	0.007	0.007	0.007	0.008	0.008	0.008
5	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007

由表 2 可知, 在没有负荷电流的影响下, 故障测距结果基本不受故障过渡电阻、故障类型变化的影响, 测距精度满足指导配电线路故障检修迅速的要求。

2) 为研究 DG 接入对算法的影响, 改变 DG 接入位置与接入数量, 3 种 DG 接入方案如表 3 所示。

表 3 DG 接入方案

Table 3 DG access scheme

节点号	方案 1	方案 2	方案 3
S2	DG1	DG1	DG1
S3	DG2	—	DG2
S4	—	—	DG3

注: S4 距离主干线末端 2.5 km。

设置故障点过渡电阻为 5  $\Omega$ , 选取故障点  $f_1$ — $f_{11}$ , 应用本文提出的状态估计方法计算不同 DG 接入方案下的故障测距结果, 统计分析不同故障点的测距平均误差, 如表 4。

表 4 DG 接入情况变化时测距平均误差

Table 4 Average error with different DG numbers

DG 接入情况	平均误差距离/km	
	两电源区段	单电源区段
方案 1	0.007	0.007
方案 2	0.005	0.009
方案 3	0.007	0.008

由表 4 数据可得, 随着 DG 接入位置、接入数量的变化, 测距误差保持不变且结果近似等于实际故障距离, 表明算法不受 DG 接入位置与接入数量的影响, 验证了理论分析的正确性。

### 3.2 树状分支结构对测距精度的影响

#### (1) 不带分支的干线式配电网

取图 1 中含 DG 配电网的主干线路进行分析, DG 接入位置不变, 只在末端接有负荷。设置故障过渡电阻为  $5 \Omega$ , 针对负载率变化的情况, 应用本文提出的状态估计方法计算不同故障点( $f_1$ 、 $f_3$ 、 $f_5$ 、 $f_6$ 、 $f_8$ 、 $f_9$ 、 $f_{11}$  点)相间故障测距结果, 统计分析得到平均测距误差、最大测距误差如表 5 所示。

表 5 负载率变化时干线式配电网的测距误差

负载率/ %	平均误差距离/km		最大误差距离/km	
	两电源区段	单电源区段	两电源区段	单电源区段
100	0.004	0.036	0.005	0.036
50	0.005	0.017	0.005	0.017
20	0.004	0.007	0.008	0.007
0	0.004	0.001	0.008	0.001

由表 5 分析可知, 当在两电源区段( $f_1$ 、 $f_3$ 、 $f_5$ 、 $f_6$ 、 $f_8$ )发生故障时, 区段末端量测电流的引入消除了末端负荷电流对测距的影响, 故障测距误差很小。对于单电源区段( $f_9$ 、 $f_{11}$ )发生故障时, 残压作用下的馈线末端负荷电流分量会叠加在短路电流中, 造成单电源区段的测距误差增大, 但总体误差变化范围较小, 绝对误差在 36 m 以内, 满足测距精度要求。

#### (2) 带分支的树状配电网

如图 1 所示带分支的含 DG 树状配电网, 设置故障点过渡电阻为  $5 \Omega$ , 针对负载率变化的情况, 应用本文提出的状态估计方法计算不同故障距离( $f_1$ — $f_{11}$ )相间故障测距结果, 统计分析得到平均测距误差、最大测距误差如表 6 所示。

表 6 负载率变化时带分支的树状配电网的测距误差

负载率/ %	平均误差距离/km		最大误差距离/km	
	两电源区段	单电源区段	两电源区段	单电源区段
100	0.040	0.061	0.077	0.098
50	0.021	0.032	0.042	0.051
20	0.009	0.013	0.019	0.022
0	0.004	0.002	0.008	0.004

由于树状配电网的负荷分散, 发生短路故障时, 在残压作用产生的分支负荷电流分量会叠加在短路电流中而引起误差, 随着负载率的增大, 残压

下的分支负荷电流分量增大, 故障测距误差随之增大。10 kV 线路的杆距通常为 50~60 m, 表 6 中测距绝对误差最大为 98 m, 测距误差虽超过两杆距离, 但仍在允许的范围内, 满足指导检修人员快速到达故障点的要求。

### 3.3 状态跟踪速度的分析

以图 1 所示的  $f_9$  点(距离节点 4 的 1 km 处)发生三相短路、故障点过渡电阻为  $5 \Omega$  为例, 分别设定状态量  $I_{mf}$  的初始值为 0 km、10 km 时, 得到的测距结果如图 3 所示。

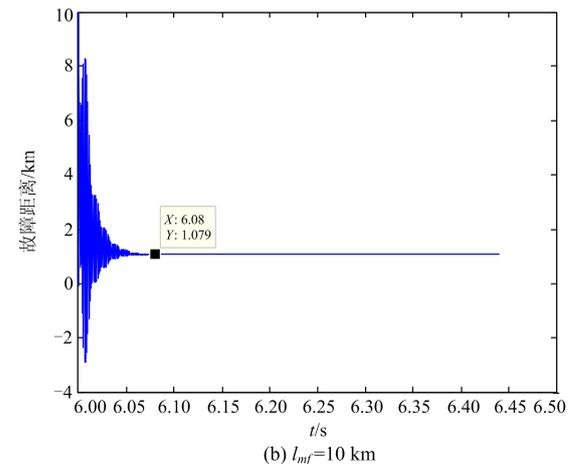
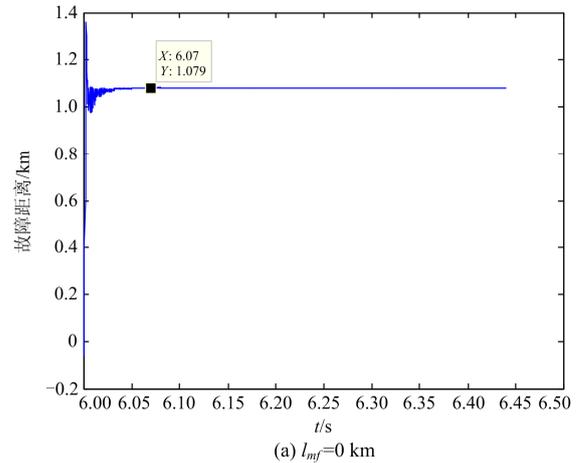


图 3 跟踪过程

Fig. 3 Tracking process

由图 3(a)、图 3(b)中的测距结果可以看出, 在经过 4 个周波后, 得到的故障距离稳定不变。且测距速度与  $I_{mf}$  状态初始值的选择关系不大。

通过大量的仿真分析可知, 利用故障发生后 2~4 个周波(0.04~0.08 s)内的数据, 即可稳定跟踪故障状态, 且受状态量  $I_{mf}$  初值的影响小。

### 3.4 算法比较

在相同的前提下, 即不考虑负荷电流的影响、

FTU 配置情况相同的前提下,对于图 1 所示带分支的含 DG 树状配电网,设置负载率分别为 100%、50%、20%、0,故障点过渡电阻为  $5 \Omega$ ,应用文献[17]所提的测距方程计算得到相间短路故障时的测距结果,统计分析得到平均测距误差、最大测距误差如表 7 所示。

表 7 测距结果  
Table 7 Location results

负载率/ %	平均误差距离/km		最大误差距离/km	
	两电源区段	单电源区段	两电源区段	单电源区段
100	0.089	0.066	0.159	0.103
50	0.047	0.037	0.084	0.056
20	0.021	0.019	0.036	0.027
0	0.006	0.007	0.013	0.009

比较表 6、表 7 中的数据可得,单电源区段发生故障时,两种测距模型得到的测距结果基本一致;在非空载情况下两电源区段发生故障时,与文献[17]中的模型相比,本文所提的方法在加入两端电流测量的同时,由于增加了对端的电压量测量作为输出量,更加精确地校正估计偏差,并迅速跟踪系统状态,相较于文献[17]的测距模型而言,可以得到更好的测距结果。且本文所提的算法,无需进行数据处理,可直接利用各监测点的采样值作为输出量,选择相应的最优估计离散模型进行状态估计,测距速度快。

## 4 结论

以含分布式电源(DG)树状配电网的区间定位为前提,提出应用状态估计法进行故障测距,将配电网的故障测距问题转化为最优估计问题。

(1) 以馈线首端及 DG 出口的电流、电压、FTU 的电流为量测量,以区段首端到故障点的距离作为状态量之一,树状配电网的故障等值回路电压微分方程便可转化为最优估计离散系统模型。

(2) 基于状态估计的故障测距算法适用于含 DG 树状配电网,测距速度快,受初值影响小,故障测距结果不受故障点过渡电阻、故障类型、故障位置的影响,不受 DG 接入位置和数量的影响。

(3) 由于负荷的分散,残压下的负荷电流大小对测距结果有影响,但在故障点过渡电阻较小时,测距误差在允许的范围内,满足工程测距精度要求。

## 参考文献

[1] 黄大为,潘波.考虑 DG 接入位置和容量的配电网保护综合改进方案[J].电力系统保护与控制,2016,44(17):64-70.

- HUANG Dawei, PAN Bo. Improved methods of distribution network protection scheme considering connection locations and capacity of DG[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 64-70.
- [2] 祁欢欢,荆平,戴朝波,等.分布式电源对配电网保护的影响及保护配置分析[J].智能电网,2015,3(1):8-16.
- QI Huanhuan, JING Ping, DAI Chaobo, et al. Impact of distributed generation upon distribution systems protection and analysis of protection configuration[J]. Smart Grid, 2015, 3(1): 8-16.
- [3] 周龙,齐智平.微电网保护研究综述[J].电力系统保护与控制,2015,43(13):147-154.
- ZHOU Long, QI Zhiping. A review of the research on microgrid protection development[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 147-154.
- [4] 田果,黄小莉.含光伏电源配电网的改进矩阵保护算法[J].电力系统保护与控制,2014,42(17):79-83.
- TIAN Guo, HUANG Xiaoli. An improved matrix protection algorithm with distribution network including photovoltaic power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 79-83.
- [5] 马腾飞,高亮.含多微网的主动配电网故障区段定位算法[J].电力系统保护与控制,2017,45(7):64-68.
- MA Tengfei, GAO Liang. Fault location algorithm for active network with multi-grids[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 64-68.
- [6] 唐成虹,杨志宏,宋斌,等.有源配电网的智能分布式馈线自动化实现方法[J].电力系统自动化,2015,39(9):101-106.
- TANG Chenghong, YANG Zhihong, SONG Bin, et al. A method of intelligent distributed feeder automation for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 101-106.
- [7] 孙景钉,陈荣柱,蔡轼,等.含分布式电源配电网的故障定位新方案[J].电网技术,2013,37(6):1645-1650.
- SUN Jingdiao, CHEN Rongzhu, CAI Shi, et al. A new fault location scheme for distribution system with distributed generations[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1645-1650.
- [8] 周淦,郑柏林,廖瑞金,等.基于粒子群和差分进化算法的含分布式电源配电网故障区段定位[J].电力系统保护与控制,2013,41(4):33-37.
- ZHOU Quan, ZHENG Bolin, LIAO Ruijin, et al. Fault-section location for distribution networks with DG based on a hybrid algorithm of particle swarm optimization and differential evolution[J]. Power System Protection and

- Control, 2013, 41(4): 33-37.
- [9] 刘鹏程, 李新利. 基于多种群遗传算法的含分布式电源的配电网故障区段定位算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 36-41.  
LIU Pengcheng, LI Xinli. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on the multiple-population genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 36-41.
- [10] KONG Tao, JIA Mingna, SUN Guihua. Application of bacterial foraging algorithm for fault location in distribution networks with DG[C] // China International Conference on Electricity Distribution (CICED), August 10-13, 2016, Xi'an, China: 1-4.
- [11] 戴志辉, 崇志强, 李川, 等. 基于电压偏差向量 2-范数主动配电网故障定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 96-102.  
DAI Zhihui, CHONG Zhiqiang, LI Chuan, et al. Fault location method of active distribution networks based on 2-norm of voltage deviation vectors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 96-102.
- [12] 许偲轩, 陆于平. 含 DG 配网电流幅值差异化保护方案[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 164-170.  
XU Sixuan, LU Yuping. Current amplitude differential protection for distribution system with DG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 164-170.
- [13] CHEN Xu, YIN Xianggen, YIN Xin, et al. A novel traveling wave based fault location scheme for power distribution grids with distributed generations[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 26-30, 2015, Denver, America: 1-5.
- [14] ZAYANDEHROODI H, MOHAMED A, SHAREEF H, et al. Determining exact fault location in a distribution network in presence of DGs using RBF neural networks[C] // IEEE International Conference on Information Reuse & Integration, August 3-5, 2011, Las Vegas, America: 434-438.
- [15] ZAYANDEHROODI H, MOHAMED A, FARHOODNEA M, et al. New training strategies for RBF neural networks to determine fault location in a distribution network with DG units[C] // IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), June 3-4, 2013, Langkawi, Malaysia, 2013: 450-454.
- [16] BRAHMA S M. Fault location in power distribution system with penetration of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 1545-1553.
- [17] 贾浩帅, 郑涛, 赵萍, 等. 基于故障区域搜索的配电网故障定位算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 62-66.  
JIA Haoshuai, ZHENG Tao, ZHAO Ping, et al. Fault location algorithm for distribution system based on fault region searching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 62-66.
- [18] NAIDU O, GORE R, GEORGE N, et al. A new approach for fault location on modern distribution systems with integrated DER[C] // Biennial International Conference on Power and Energy Systems Towards Sustainable Energy (PESTSE), January 21-23, 2016, Bangalore, India: 1-6.
- [19] SOUTO L, MANASSERO G, SANTO S.G.D. Fault location in distribution feeders with distributed generation[C] // Clemson University Power Systems Conference (PSC), March 8-11, 2016, Clemson, America: 1-6.
- [20] 徐子华, 王艳松. 含分布式电源的配电网故障区间定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 22-27, 34.  
XU Zihua, WANG Yansong. Study of fault region locating method for distribution networks with distributed generators[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 22-27, 34.

收稿日期: 2017-12-01; 修回日期: 2018-04-10

作者简介:

王艳松(1965—), 女, 博士, 教授, 研究方向为配电网故障诊断, 配电网优化规划和电能质量分析治理; E-mail: wys91517@163.com

刘珊(1993—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网故障诊断; E-mail: liushan199310@163.com

衣京波(1966—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: dcyjb@sina.com

(编辑 魏小丽)