

基于状态估计的含DG配电网故障定位

DG的接入使得配电网故障定位更加复杂。提出了一种基于状态估计的配电网故障定位方法。首先分析了状态估计在配电网故障定位的方程，提出了故障定位的伪量测方法，即固定某些量测量不变，从而减小状态变量的计算量。其次分析了配电网中接入DG后其对短路电流的影响，并给出了相应的表达式，建立了基于状态估计DG伪量测数学模型，该模型利用量测误差对故障进行定位，误差最小的节点确定为故障节点。最后利用含DG的IEEE 34节点对系统进行了仿真，分析了系统正常运行时、发生三相平衡故障时和发生相间短路时的故障定位情况，说明了所提方法的准确性和可行性。

祁永福 胡 微/海南电网有限责任公司系统运行部
张 凯 吴海勇 韩珊珊/东方电子股份有限公司

0 引言

现阶段分布式电源（Distributed Generation, DG）越来越多地接入电网中，包括风电、光伏等多元电源和负荷给电网故障定位带来了挑战^[1]。故障定位在输电网中较为成熟，但对于含有DG的配电网故障定位目前研究还不太成熟。

在DG对配电网故障的影响方面，文献[2]分析了DG介入后对系统结构的影响以及定位模型的改变。文献[3]分析了DG在不同故障类型下故障电流的变化规律。文献[4]分析了DG在故障定位中的遥测信息和遥测数据，建立了故障定位的双层模型。由此可见，DG的接入对于配电网故障产生了一定影响。

在配电网故障定位方法的研究中，文献[5]提出一种不借助于电压量信息的故障定位新方案。文献[6]分析了DG接入电网后对电网故障定位的影响。文献[7]提出了一种较简洁的基于矩阵算法的DG

配电网多重故障定位方法。文献[8]利用改进矩阵法对环网故障进行定位。以上方法从不同的角度对配电网故障进行了建模，但是没有充分利用配电网中状态量测量表计的信息。也有学者利用基频分量和高频分量进行定位。

在故障定位求解算法方面，大多利用了启发式算法。文献[9]利用改进遗传算法提高求解速度；文献[10]利用粒子群算法求解故障定位问题；文献[11]利用具有混沌搜索策略的二进制蝙蝠算法，具有较高的实时性和容错性；文献[12-14]也提出利用纵横交叉算法、基于ARM的方法等进行计算。这类方法虽然在求解时间上有一定优势，但是有可能过度依赖初始值，使得故障定位解陷入局部最优。

本文充分利用配电网中丰富的量测仪表提供的信息，使用状态估计方法对配电网故障进行定位。首先分析了状态估计的量测方程，为了提高求解速度，又提出了伪量测方法。接着分析了DG对系统的影响，尤其是对短路电流的贡献值，并将DG整合到状态估计方程中，利用误差最小原则确定故障点，从而准确定位。

1 故障定位方程

1.1 状态估计基本方程

状态估计在电力系统中应用广泛，在输电网中应用较为成熟，近年配电网系统也逐渐发展，该方法的基本思想是寻找系统中每个可能状态的一准确回归。该方法是基于最小二乘法的一种优化方法。



祁永福/工程师

关键词/Keywords

状态估计 ·
分布式电源 ·
伪量测 ·
配电网故障定位 ·

状态估计的基本方程如下

$$z = A\hat{x} \quad (1)$$

式中, 变量 z 为 m 维实测向量; 矩阵 A 为系统特征矩阵, 常为非方形矩阵; 向量 $\hat{x}$ 为给定时刻决定系统状态的状态变量。符号 $(\wedge)$ 为状态变量。

量测值与实测值之间的误差为

$$e = \tilde{z} - z = \tilde{z} - A\hat{x} \quad (2)$$

式中, $\tilde{z}$ 为 m 维量测向量。

状态估计中, 最小二乘法的目标函数就是使 e 的二次方最小, 即

$$|e|^2 = e^T e = \sum_{i=1}^m \left[\tilde{z}_i - \sum_{j=1}^m a_{ij} x_{ij} \right]^2 \quad (3)$$

用 $U(x)$ 表示误差二次方函数, 即

$$\begin{aligned} U(x) &= e^T e = (\tilde{z} - A\hat{x})^T (\tilde{z} - A\hat{x}) \\ &= (\tilde{z}^T - \hat{x}^T A^T) (\tilde{z} - A\hat{x}) \end{aligned} \quad (4)$$

进一步有

$$U(x) = \tilde{z}^T \tilde{z} - \tilde{z}^T A\hat{x} - \hat{x}^T A^T \tilde{z} + \hat{x}^T A^T A\hat{x} \quad (5)$$

由于 $\tilde{z}^T A\hat{x}$ 为一标量, 则 $U(x)$ 为

$$U(x) = \tilde{z}^T \tilde{z} - 2\hat{x}^T A^T \tilde{z} + \hat{x}^T A^T A\hat{x} \quad (6)$$

$U(x)$ 的最小值为

$$\frac{\partial U(x)}{\partial x} = 0 = -2A^T \tilde{z} + 2A^T A\hat{x} \quad (7)$$

得到

$$A^T \tilde{z} = A^T A\hat{x} \quad (8)$$

令 $b = A^T \tilde{z}$, $H = A^T A$, 有

$$H\hat{x} = b \quad (9)$$

该式用来求解状态变量 $\hat{x}$ 。该向量便是量测量 $\tilde{z}$ 量测的系统最佳估计。量测误差越小, 估计结果越准确。

1.2 配电网状态估计

状态估计可以用来估计系统节点电压。设配电系统有 n 个节点, 令 $\tilde{z}$ 表示含有 p 个电压量测量和 n 个电流量测量的向量, 即

$$\tilde{z} = [\tilde{v}_{abc}^1 \quad \tilde{v}_{abc}^2 \quad \cdots \quad \tilde{v}_{abc}^p \quad \tilde{I}_{abc}^1 \quad \tilde{I}_{abc}^2 \quad \cdots \quad \tilde{I}_{abc}^n]^T \quad (10)$$

其中每个量测量都是三相值。

状态变量定义为

$$\hat{x} = [\tilde{v}_{abc}^1 \quad \tilde{v}_{abc}^2 \quad \cdots \quad \tilde{v}_{abc}^n]^T \quad (11)$$

式中, 矩阵 $\hat{x}$ 为配电网内各节点电压。

特征矩阵由两个子矩阵构成: 第一个是 $p \times n$ 的 Φ 阵; 第二个是 $n \times n$ 的导纳阵 Y_{abc}^{bus} 。因此, A 阵为

$$A = \begin{pmatrix} \Phi \\ Y_{abc}^{bus} \end{pmatrix} \quad (12)$$

由此, 得到误差方程为

$$e = [\tilde{v}_{abc}^1 \quad \tilde{v}_{abc}^2 \quad \cdots \quad \tilde{v}_{abc}^p \quad \tilde{I}_{abc}^1 \quad \tilde{I}_{abc}^2 \quad \cdots \quad \tilde{I}_{abc}^n]^T - \begin{pmatrix} \Phi \\ Y_{abc}^{bus} \end{pmatrix} [\tilde{v}_{abc}^1 \quad \tilde{v}_{abc}^2 \quad \cdots \quad \tilde{v}_{abc}^n]^T \quad (13)$$

误差向量的取值对于基于状态估计的故障定位十分重要, 量测值和估计值之间的误差决定了定位的准确度。

1.3 故障状态下配电网伪量测

状态估计利用少于系统内总的变量数目的量测点对系统状态进行估计, 其中一些量测量可以设为固定值来减少状态变量的计算, 该方法需假设系统在一定状态, 利用固定量测值分析的方法叫作伪量测法。

故障状态下的配电网系统有

$$A^T \begin{pmatrix} \tilde{v}_{abc}^1(F) \\ \vdots \\ \tilde{v}_{abc}^p(F) \\ \tilde{I}_{abc}^1(F) \\ \vdots \\ \tilde{I}_{abc}^n(F) \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} \hat{v}_{abc}^1(F) \\ \vdots \\ \hat{v}_{abc}^i(F) \\ \vdots \\ \hat{v}_{abc}^n(F) \end{pmatrix} \quad (14)$$

在配电网中, 在变电站的断路器出口仅可获得电流的量测量, 因此, 伪量测电流应设为固定值。配电网故障时, 有如下假设: ①相较故障电流, 负荷电流忽略; ②接地故障中, 故障点电流等于变电站电流, 其方向从大地流入变电站; ③相间故障中, 故障点电流等于变电站电流, 其方向从其他故障线路流入变电站。

基于以上假设, 状态估计方程见式(15)。

从式(15)可看出, 仅真实量测量位于节点1, 即系统电站。以后, 节点1被认为是电网变电站; $\tilde{I}_{abc}^i(F)$ 为流回故障点 i 的故障电流。

由于假设①, 有

$$A^T \begin{pmatrix} \tilde{v}_{abc}^1(F) \\ \vdots \\ \tilde{v}_{abc}^p(F) \\ \tilde{I}_{abc}^1(F) \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ \tilde{I}_{abc}^f(F) \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} \hat{v}_{abc}^1(F) \\ \vdots \\ \hat{v}_{abc}^i(F) \\ \vdots \\ \hat{v}_{abc}^n(F) \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\tilde{I}_{abc}^f(F) = -\tilde{I}_{abc}^{\text{grid}}(F) \quad (16)$$

式中, $\tilde{I}_{abc}^{\text{grid}}(F)$ 为从故障点看去的故障时变电站电流。该式表明, 流入电源的电流与电站断路器量测的电流值大小相等、方向相反。该伪量测方法成立的条件是系统仅有一个电源。

进一步有

$$A^T \begin{pmatrix} \tilde{v}_{abc}^1(F) \\ \vdots \\ \tilde{v}_{abc}^p(F) \\ \tilde{I}_{abc}^{\text{grid}}(F) \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ -\tilde{I}_{abc}^{\text{grid}}(F) \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} \hat{v}_{abc}^1(F) \\ \vdots \\ \hat{v}_{abc}^i(F) \\ \vdots \\ \hat{v}_{abc}^n(F) \end{pmatrix} \quad (17)$$

式 (17) 可用于故障时电压量的估计, 其余电流量设定为伪电流分析值。该线性方程用来求解系统状态变量。一旦状态变量求解出, 估计误差便可确定, 如式 (18) 所示。

$$e = \begin{pmatrix} \tilde{v}_{abc}^1(F) \\ \vdots \\ \tilde{v}_{abc}^p(F) \\ \tilde{I}_{abc}^{\text{grid}}(F) \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ -\tilde{I}_{abc}^{\text{grid}}(F) \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \Phi \\ Y_{abc}^{\text{bus}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{v}_{abc}^1(F) \\ \vdots \\ \hat{v}_{abc}^i(F) \\ \vdots \\ \hat{v}_{abc}^n(F) \end{pmatrix} \quad (18)$$

式 (18) 仅利用节点信息和伪量测值, 相较于式 (13) 利用网络内所有节点电流有不小改进。但是该式可能会导致误差放大, 在伪量测值减少网络内监测节点的数量对于状态估计非常实用。

2 含DG电网故障定位

2.1 DG对故障电流的影响

配电网辐射状结构随着DG的接入而发生改变, DG使电网内电源数目大量增加, 同时使配电网故障时的特性与传统电网有所区别, 其主要影响是带来双向故障电流。传统二次设备不能够量测这种类型的电流。这种双向电流对于配电网故障定位又十分关键。

由于逆变型DG的故障响应不依赖物理参数而取决于控制系统, 该类型的DG对故障电流的贡献值相比同容量的旋转设备要小得多, 但是也不能够忽略不计^[15]。

在含有DG的配电网故障分析中, 每种DG都应当考虑。故障电流几乎全部由对网络有贡献的电流源电流构成, 因此在忽略负荷电流的情况下, 给定节点*i*的故障电流为

$$I_i^f(F) = - \left[I_{\text{grid}}(F) + \sum_{k=1}^M I_{\text{DGk}}(F) \right] \quad (19)$$

式中, $I_{\text{DGk}}(F)$ 为DG对故障电流的贡献值。

需要指出的是, 为了准确地对故障进行定位, 需要得到故障电流的幅值和相角。

2.2 含DG的故障状态伪量测

根据式 (17) 和式 (19), 得到

$$A^T \begin{pmatrix} \tilde{v}_{abc}^{\text{grid}}(F) \\ \vdots \\ \tilde{v}_{abc}^p(F) \\ \tilde{I}_{abc}^{\text{grid}}(F) \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ \tilde{I}_{abc}^{\text{DG},1}(F) \\ \vdots \\ \tilde{I}_{abc}^{\text{DG},k}(F) \\ \vdots \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} \hat{v}_{abc}^1(F) \\ \vdots \\ \hat{v}_{abc}^i(F) \\ \vdots \\ \hat{v}_{abc}^n(F) \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ \tilde{I}_{abc}^f(F) \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

式(20)用来求解网络电压,同时可以求得误差计算公式

$$e = \begin{pmatrix} \tilde{v}_{abc}^{\text{grid}}(F) \\ \vdots \\ \tilde{v}_{abc}^p(F) \\ \tilde{I}_{abc}^{\text{grid}}(F) \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ \tilde{I}_{abc}^{\text{DG},1}(F) \\ \vdots \\ \tilde{I}_{abc}^{\text{DG},k}(F) \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ \tilde{I}_{abc}^f(F) \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} - \left(\Phi \right)_{\text{bus}} \begin{pmatrix} \hat{v}_{abc}^1(F) \\ \vdots \\ \hat{v}_{abc}^i(F) \\ \vdots \\ \hat{v}_{abc}^n(F) \end{pmatrix} \quad (21)$$

3 基于状态估计的含DG配电网故障定位算法

故障时,故障节点注入电流假设等于主网电流,基于状态估计的配电网故障定位算法正是利用这一假设进行计算的。

算法首先根据式(20)设定电压读数和伪电流集,此时DG提供的电流也包含在伪电流集中。同时建立系统特征矩阵 A ,其中的两个子矩阵表明了网络拓扑,在网络结构不变时,该矩阵也不改变。

假设网络中共有 M 个DG,含有DG的节点用向量 p 表示如下

$$p = p_1, p_2, \dots, p_j, \dots, p_M \quad (22)$$

则故障时从各个DG索取的故障电流为

$$I_{abc}^1(F), I_{abc}^2(F), \dots, I_{abc}^{p_M}(F) \quad (23)$$

假设该网络仅有一个电源在节点1,即 $I_{abc}^{\text{grid}}(F)$ 。在第 k 次迭代中,假定故障节点的电流值 $\tilde{I}_{abc}^f(F)$ 根据 $-\tilde{I}_{abc}^{\text{grid}}(F)$ 得到。忽略所有其他节点电流量,对于节点 i ,电流向量为

$$f(n) = \begin{cases} \tilde{I}_{abc}^{p_j}(F) & i = p_j \\ \tilde{I}_{abc}^f(F) & i = k \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (24)$$

可以看出,电网电流和DG电流的贡献值为固定的伪量测值,并且忽略了负荷电流。在第 k 次迭代后,假设节点 k 的故障电流 $\tilde{I}_{abc}^f(F)$ 计算出后便可根据式(20)计算其余状态变量。

根据式(21)计算假定故障点的状态变量估计值 $\hat{x}$ 和估计误差。第 k 次迭代的误差计算式为

$$e^{[k]} = \|e^{[k]}\| = \|\hat{z}^{[k]} - A\hat{x}^{[k]}\| \quad (25)$$

式中, $\|\cdot\|$ 为欧式范数;向量 $\hat{z}^{[k]}$ 为伪量测电流假设在 k 节点时的量测向量,该迭代方法遍历系统内全部 n 个节点。

设定了可能的故障点注入电流,得到的结果是含有所有 n 次迭代的欧式范数的误差向量 e ,具体如下

$$e = [e^{[1]} \quad e^{[2]} \quad \dots \quad e^{[n]}]^T \quad (26)$$

基于状态估计故障定位流程如图1所示,故障位置可以由误差最小的假设故障电流值的节点确定。这是因为利用伪量测法得到的最小误差使得节点状态估计值最接近真实情况。

4 算例分析

4.1 系统说明

本文采用简化IEEE 34节点系统进行仿真。假设系统内DG为太阳能发电设备,经变压器(图中未画出)接入在系统某些节点,如图2所示。其类型为逆变型分布式电源(Inverter Interfaced Distribution Generator, IIDG)。逆变型电源的保护控制技术能够使故障电流限制在(1.2~1.4)(pu)。故障时逆变型PV设备可等效为一电流源,利用OpenDSS对系统进行仿真。

在DG节点装有状态量测的表计,量测电压相量和电流相量,具体如表1所示。

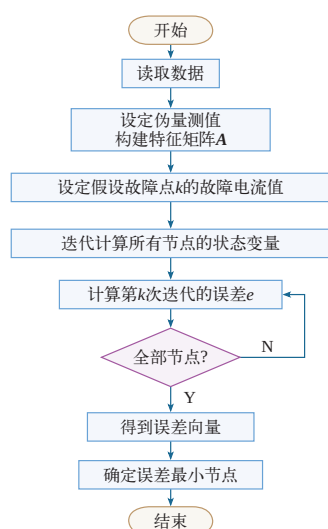


图1 基于状态估计故障定位流程

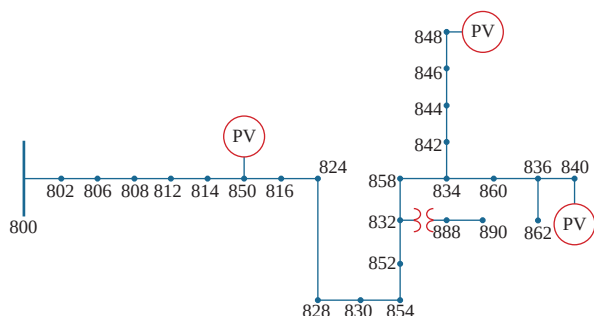


图2 含PV的IEEE 34节点系统

表1 量测仪表位置

量测量		
电压与电流		电压
节点	800, 848, 850, 840	其余节点

本文分析三个场景：①系统正常时；②发生三相短路接地时；③两相相间短路时。

4.2 计算与分析

(1) 系统特征矩阵

系统特征矩阵由各子阵构建而成， Φ 阵是包含量测表计位置的01阵；导纳阵 Y_{abc}^{bus} 根据系统的线路参数构建。

(2) 系统正常运行时

仿真时，源节点表示主电站变压器一次侧，正常时800节点电流值低于1(pu)，反映出PV向网络提供功率，即潮流的路径不唯一，这也说明了故障时，PV会作为有源器件向网络注入电流。正常运行时节点电压与节点电流如表2、表3所示。

表2 正常运行时节点电压

节点	A相	B相	C相
源节点	0.999 9 $\angle 0$	0.999 9 $\angle -120$	0.999 9 $\angle 120$
800	0.933 5 $\angle -0.9$	0.957 3 $\angle -120$	0.958 7 $\angle 118.3$
802	1.048 6 $\angle 4.2$	0.948 6 $\angle -119.5$	1.050 3 $\angle 114.8$
806	1.045 4 $\angle 4.1$	0.947 4 $\angle -119.2$	1.048 6 $\angle 114.3$
808	1.055 9 $\angle 3.7$	0.952 5 $\angle -119.9$	1.054 6 $\angle 114.6$
812	1.052 6 $\angle 3.9$	0.950 6 $\angle -119.7$	1.051 4 $\angle 114.3$
814	1.046 1 $\angle 4.1$	0.947 7 $\angle -119.3$	1.048 8 $\angle 114.7$
816	1.054 2 $\angle 4.0$	0.950 8 $\angle -119.2$	1.051 2 $\angle 114.9$
824	1.051 7 $\angle 3.9$	0.948 9 $\angle -119.8$	1.049 3 $\angle 114.8$
828	1.051 4 $\angle 3.9$	0.094 9 $\angle -119.7$	1.049 5 $\angle 114.7$
830	1.054 8 $\angle 4.1$	0.949 8 $\angle -119.7$	1.048 5 $\angle 115$
832	1.054 8 $\angle 4.1$	0.949 6 $\angle -119.7$	1.048 2 $\angle 115$
834	1.054 3 $\angle 4.1$	0.945 9 $\angle -119.8$	1.044 7 $\angle 115.1$
836	1.054 3 $\angle 4.1$	0.945 1 $\angle -119.8$	1.044 1 $\angle 115.1$
842	1.054 3 $\angle 4.1$	0.945 1 $\angle -119.8$	1.044 1 $\angle 115.1$
844	1.054 2 $\angle 4.2$	0.945 5 $\angle -119.8$	1.044 3 $\angle 115.1$
846	1.043 2 $\angle 4.1$	0.946 5 $\angle -119.3$	1.044 7 $\angle 114.7$
852	1.046 8 $\angle 4.1$	0.948 1 $\angle -119.3$	1.049 1 $\angle 114.9$
854	1.038 4 $\angle 4.2$	0.944 2 $\angle -119.1$	1.044 9 $\angle 114.7$
858	1.038 3 $\angle 4.2$	0.942 8 $\angle -119.2$	1.044 1 $\angle 114.7$
860	1.037 3 $\angle 4.2$	0.945 2 $\angle -118.9$	1.047 5 $\angle 114.7$
862	1.055 5 $\angle 4$	0.952 6 $\angle -119.6$	1.053 1 $\angle 115$
888	1.039 2 $\angle 4.1$	0.944 7 $\angle -119.1$	1.046 8 $\angle 114.7$
890	1.046 8 $\angle 4$	0.948 5 $\angle -119.5$	1.050 3 $\angle 114.8$
PV-840	1.016 6 $\angle 2.2$	1.041 6 $\angle -118.4$	1.022 3 $\angle 120.6$
PV-848	1.008 6 $\angle 2.2$	1.039 6 $\angle -118.1$	1.02 $\angle 120.5$
PV-850	1.017 4 $\angle 2.1$	1.043 6 $\angle -118.3$	1.024 2 $\angle 120.6$

表3 正常运行时节点电流

节点	A相	B相	C相
源节点	0.826 68 $\angle -63.34$	0.516 31 $\angle 164.17$	0.611 24 $\angle 78.18$
800	0.827 28 $\angle 116.66$	0.516 68 $\angle -15.83$	0.611 68 $\angle -101.82$
PV-840	0.136 47 $\angle -178.56$	0.136 43 $\angle 61.46$	0.136 48 $\angle -58.53$
PV-848	0.136 89 $\angle -178.51$	0.136 86 $\angle 61.52$	0.136 97 $\angle -58.49$
PV-850	0.136 15 $\angle -178.57$	0.136 12 $\angle 61.46$	0.136 17 $\angle -58.54$

(3) 三相平衡故障

假设824节点发生三相平衡故障，可以看出，该节点以及附近的816和828节点三相电压有明显跌落。此时PV的电压也低于0.8(pu)，因此PV控制器开始限制注入电流值，但是此时PV的故障电流也为额定电流的1.25倍。部分824节点三相平衡故障电压值、故障电流值如表4、表5所示。

表4 部分824节点三相平衡故障电压值

节点	A相	B相	C相
源节点	0.999 8∠0	0.999 8∠-120	0.999 9∠120
800	0.336 4∠-53	0.275 2∠179.7	0.348 6∠73.9
816	8.9614e-05∠-88.9	9.6047e-05∠147.5	8.7919e-05∠25.6
828	8.9585e-05∠-88.9	9.6114e-05∠147.5	8.7929e-05∠25.5
PV-840	0.131 59∠-50.2	0.131 6∠-175.4	0.120 7∠67.2
PV-848	0.132 5∠-48.2	0.131 9∠-173.3	0.121 8∠69.5
PV-850	0.132 7∠-50.5	0.132 6∠-175.6	0.122 2∠67

表5 部分824节点三相平衡故障电流值

节点	A相	B相	C相
源节点	8.974 3∠-63.81	8.862 7∠171.09	8.223 6∠54.33
800	8.528 6∠86.76	9.145 2∠-36.55	8.408 6∠-158.61
PV-840	0.177 53∠128.53	0.177 36∠5.71	0.169 82∠-112.83
PV-848	0.177 54∠130.66	0.177 18∠7.94	0.170 11∠-110.99
PV-850	0.177 35∠128.35	0.177 33∠5.64	0.170 04∠-113

利用基于状态估计的故障定位算法定位，将网络中节点依次假设为故障节点，逐次对故障节点进行估计。可以看到第一次估计的准确率很高，第一次的状态估计误差最小。PV数量越多，定位估计越准确。三相故障定位结果如表6所示。

表6 三相故障定位结果

故障节点	第一次定位	估计误差	第二次定位	估计误差
802	802	24.821 6	816	24.872 3
806	806	22.384 9	816	22.425 7
808	808	20.218 1	816	20.249 5
812	812	20.583 2	808	20.634 3
814	814	21.227	808	21.276 5
816	816	17.758 7	860	17.771 9
824	824	16.392	806	16.451 5
828	828	18.582	852	18.606 2
830	830	19.214 1	860	19.280 4
832	832	15.765 9	824	15.813 4
834	834	14.979 6	824	14.988 9
836	836	20.318 7	842	20.368 7
840	840	21.706 6	852	21.769
842	842	18.663 6	858	18.717 7
844	844	18.894	836	18.950 1
846	846	16.113 6	862	16.173 4
848	848	14.792 1	816	14.853 2
850	850	17.020 2	842	17.079 9
852	852	20.102 3	854	20.145 6
854	854	18.869 6	808	18.916 5
858	858	18.645 7	854	18.691 2

(续)

故障节点	第一次定位	估计误差	第二次定位	估计误差
860	860	19.620 2	854	19.669 9
862	862	18.057	854	18.096 3
888	888	17.644 4	858	17.663 4
890	890	19.503 5	854	19.547 8

(4) 相间故障

假设824节点发生相间故障，由此可以看出，该节点以及附近的816和828节点故障相电压有明显跌落。部分节点电压和电流结果如表7、表8所示。

表7 部分824节点相间故障电压值

节点	A相	B相	C相
源节点	0.999 8∠0	0.999 8∠-120	0.999 9∠120
800	0.659 7∠-38	0.457 5∠-89.7	0.911 4∠118.7
816	0.506 2∠-62.9	0.506 6∠-62.9	1.010 9∠117
828	0.506 6∠-62.9	0.506 2∠-62.9	1.010 8∠117
PV-840	0.574 6∠-51.2	0.467 4∠-71.7	1.025 5∠119.7
PV-848	0.568 5∠-50.8	0.473 7∠-71.5	1.025 6∠119.8
PV-850	0.576 7∠-51.2	0.470 2∠-71.7	1.030 3∠119.6

表8 部分824节点相间故障电流值

节点	A相	B相	C相
源节点	7.774 3∠-63.77	7.763 7∠171.14	0.686 1∠54.33
800	7.730 7∠85.65	7.758 6∠-35.6	0.686 9∠-158.5
PV-840	0.166 8∠128.64	0.101 9∠5.85	0.181 5∠-112.8
PV-848	0.164 6∠130.77	0.106 3∠8.08	0.181 5∠-110.56
PV-850	0.166 2∠128.44	0.102 1∠5.78	0.180 7∠-112.97

表9给出了故障定位的结果，其中有两次定位失败（F），一次定位最优点出现在第二次定位（S），其余全部在第一次准确定位，也就是说相间故障的定位准确率达到85%以上，证明了利用基于状态估计方法的故障定位的可行性。

(5) 情景分析

配电网中DG的接入增加了量测量，同时量测量越多，故障定位越准确，这是因为状态估计获得的数据更加全面。

不同类型的故障对于配电网故障定位的准确度不同，本文提出的算法在三相平衡故障和两相短路故障时进行了测试，第一次定位的正确率都很高；尽管在两相短路中出现第二次定位是故障点的情况，但也说明该方法可以降低搜寻区域。

表9 相间故障定位结果

故障节点	第一次定位	估计误差	第二次定位	估计误差
802	802	15.014 97	812	15.146 94
806	806	13.893 02	812	13.937 75
808	808	13.516 93	802	13.643 4
812	812	12.689 83	806	12.800 15
814	814	20.254 04	806	20.258 97
816	816	13.718 12	802	13.719 96
824	824	12.808 24	828	12.835 08
828	828	11.551 96	816	11.571 8
830	830	12.016 19	828	12.065 15
832	832	12.387 19	828	12.414 59
834	834	11.125 91	830	11.177 52
836	836	15.386 07	814	15.402 3
840	840	13.459 03	816	13.598 3
842	840 (F)	11.824 24	852	11.856 78
844	844	11.634 23	828	11.745 36
846	846	12.629 77	860	12.652 82
848	848	11.775 03	840	11.795 29
850	850	13.250 7	836	13.257 65
852	852	12.635 08	846	12.773 54
854	854	14.444 24	850	14.444 38
858	854 (S)	12.256 78	858	12.273 1
860	860	12.220 42	852	12.401 97
862	862	11.646 68	858	11.647 72
888	860 (F)	13.598 28	846	13.622 86
890	890	11.185 94	862	11.274 88

5 结束语

本文利用状态估计对配电网故障定位进行了建模,同时利用伪量测提高计算速度,考虑DG对短路电流的贡献值,利用算例分析了不同故障类型下本文提出方法的有效性。由于DG种类丰富,不同类型的DG模型不同,给短路问题带来的影响也不同。结论指出,本文提出的方法能够提高定位的准确度。

参考文献

- [1] 刘健,张小庆,同向前,等.含分布式电源配电网的故障定位[J].电力系统自动化,2013(2):36-42.
- [2] 张晟,于立涛,撒奥洋,等.基于Petri网的含分布式电源配电网故障定位研究[J].青岛大学学报:工程技术版,2016(4):62-67.
- [3] 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(24):22-27.

- [4] 张勇,董明,张岩,等.含分布式电源配电系统中计及警报错误的故障定位[J].电力系统自动化,2012(15):57-62.
- [5] 孙景钉,陈荣柱,蔡弼,等.含分布式电源配电网的故障定位新方案[J].电网技术,2013(6):1645-1650.
- [6] 刘健,张志华,黄炜,等.分布式电源接入对配电网故障定位及电压质量的影响分析[J].电力建设,2015(1):115-121.
- [7] 王玉梅,郭浩,王恩.含分布式电源配电网多重故障定位的研究[J].电源技术,2010(12):1280-1282.
- [8] 李开文,袁荣湘,邓翔天,等.含分布式电源的环网故障定位的改进矩阵算法[J].电力系统及其自动化学报,2014(12):62-68.
- [9] 王迪,吴鑫强,王振浩.基于改进遗传算法的含分布式电源配电网故障定位[J].东北电力大学学报,2016(1):1-7.
- [10] 赵金宪,涂展,谢阳.粒子群改进算法在配电网故障定位中的应用[J].黑龙江科技大学学报,2014(3):277-281.
- [11] 李贺,靳庆路,高善波.基于蝙蝠算法的含分布式电源配电网故障定位[J].电气技术,2017(1):34-38.
- [12] 李彩林,胡成,李春泉.基于EEMD的含分布式电源配电网故障定位[J].计算机仿真,2015(1):132-136.
- [13] 殷豪,李德强,孟安波,等.基于纵横交叉算法在含分布式电源的配电网故障定位[J].电网与清洁能源,2016(9):128-134.
- [14] 池永胜.基于ARM的含分布式电源配电网故障定位的研究[J].电源技术,2016(1):207-208.
- [15] Plet C A, Green T C. Fault response of inverter interfaced distributed generators in grid-connected applications[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 106(1):21-28.

(收稿日期:2017-02-10) EA