



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107238779 A

(43)申请公布日 2017.10.10

(21)申请号 201710353758.7

(74)专利代理机构 济南诚智商标专利事务所有  
限公司 37105

(22)申请日 2017.05.18

代理人 李修杰

(71)申请人 国网山东省电力公司电力科学研究  
院

(51)Int.Cl.

地址 250002 山东省济南市市中区望岳路  
2000号

G01R 31/08(2006.01)

申请人 国网山东省电力公司济宁供电公司  
国家电网公司

(72)发明人 张林利 李立生 苏建军 刘洪正  
蒋斌 孙勇 邵志敏 张世栋  
李建修 任志刚 雍军 文艳  
房牧 董啸 刘合金 樊迪 刘洋  
刘明林 刘文华 王彦良 刘宗杰  
陈晓红 袁冰

权利要求书3页 说明书7页 附图2页

(54)发明名称

一种有源配电网的故障测距方法

(57)摘要

本发明公开了一种有源配电网的故障测距方法,它包括以下步骤:首先获得有源配电网的数据,其次对每个供电区段进行判断以确认故障区段,然后利用前推回代法计算故障点下游对故障点的注入电流,再者计算故障区段下游端的电压相量和电流相量,并计算故障点的标称位置,最后计算故障点到变电站的距离。本发明考虑分布式电源多点接入,只须通过使用局部电压电流相量以及分布式电源的同步电流相量就能进行有源配电网的故障测距,而且通过比较区段两段的电流就可实现对于故障区段的定位,通过计算故障电流和来自故障点下游电流对故障电流的贡献度实现了对于故障的定位测距,适用于多点分布式电源接入的情况下的故障测距。



1. 一种有源配电网的故障测距方法,其特征是,包括以下步骤:首先获得有源配电网的数据,其次对每个供电区段进行判断以确认故障区段,然后利用前推回代法计算故障点下游对故障点的注入电流,再者计算故障区段下游端的电压相量和电流相量,并计算故障点的标称位置,最后计算故障点到变电站的距离。

2. 如权利要求1所述的一种有源配电网的故障测距方法,其特征是,所述源配电网的数据包括拓扑、负荷和线路的电气参数,以及变电站在故障时的电压电流相量和分布式电源的同步电流相量。

3. 一种有源配电网的故障测距方法,其特征是,包括以下步骤:

步骤1,获得有源配电网的数据;

所述有源配电网的数据至少包括以下数据:拓扑、负荷和线路的电气参数、变电站在故障时的电压电流相量和分布式电源的同步电流相量;

设故障发生在节点k和k+1之间,则故障点处的电压表示为:

$$\mathbf{V}_f = (\Phi + 0.5m^2 \mathbf{Z}_{k,k+1} \mathbf{Y}_k) \mathbf{V}_f^k - m \mathbf{Z}_{k,k+1} \mathbf{I}_f^k \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{V}_f$  为故障点处的电压,  $\mathbf{I}_f$  为故障点处的电流,  $\Phi$  为三阶单位矩阵,  $m$  为故障距离,  $\mathbf{Z}_{k,k+1}$  为线路的串联阻抗矩阵,  $\mathbf{Y}_k$  为线路的并联导纳矩阵,  $\mathbf{V}_f^k$  为故障区段起始端k的电压,  $\mathbf{I}_f^k$  为故障区段起始端k的电流;

故障点处的电流表示为:

$$\mathbf{I}_f = \mathbf{I}_f^U + \mathbf{I}_f^D \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{I}_f^U$  为故障点上游注入故障点的电流,  $\mathbf{I}_f^D$  为故障点下游注入故障点的电流;

故障点上游注入电流为:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_f^U = & -(m \mathbf{Y}_k + 0.25m^3 \mathbf{Y}_k \mathbf{Z}_{k,k+1} \mathbf{Y}_k) \mathbf{V}_f^k \\ & + (\Phi + 0.5m^2 \mathbf{Z}_{k,k+1} \mathbf{Y}_k) \mathbf{I}_f^k \end{aligned} \quad (3)$$

由式(1)和式(2)得到如下故障点处的电阻:

$$x_f = \frac{\lambda_i \mathbf{V}_{f_i} - \lambda_j \mathbf{V}_{f_j}}{\lambda_i \mathbf{I}_{f_i}} \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{V}_{f_i}$  和  $\mathbf{V}_{f_j}$  分别表示故障点处第i相和第j相的电压,  $\lambda_i$  和  $\lambda_j$  分别表示故障点处各相的状态,即该相故障则为1,否则为0;

步骤2,对供电区段进行判断确认故障区段,设  $\mathbf{I}_f^D = -\mathbf{I}_k$ ,则  $\mathbf{I}_k$  为故障前故障区段上游端k处的电流相量;

步骤3,如果供电区段的故障区段上游端的电流与下游端电流之比  $\eta$  小于等于参考值  $\varepsilon$  时则转到步骤4,否则转到步骤2进行判断下一个供电区段;

步骤4,利用前推回代法计算故障点下游对故障点的注入电流;

根据潮流计算中的前推回代方法,利用斐波那契搜索算法计算得到故障点下游对故障点的注入电流  $\mathbf{I}_f^D$ ,

在回代过程中,第k+1端的电压表示为:

$$\mathbf{V}_f^{k+1} = \mathbf{AV}_f^k - \mathbf{BI}_f^{k+1} \quad (5)$$

其中,  $\mathbf{V}_f^{k+1}$  和  $\mathbf{V}_f^k$  分别表示第  $k+1$  端和第  $k$  端的三相电压矢量,  $\mathbf{I}_f^{k+1}$  表示第  $k+1$  端的三相电流矢量,  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{B}$  为阻抗矩阵;

在回代过程中, 第  $k$  端与第  $k+1$  端的电压、电流相量的关系表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_f^{k+1} &= \mathbf{AV}_f^k - \mathbf{BI}_f^{k+1} \\ \mathbf{I}_f^k &= c\mathbf{V}_f^{k+1} + d\mathbf{I}_f^{k+1} \end{aligned} \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{I}_f^k$  表示第  $k$  端的三相电流矢量,  $c$  和  $d$  为阻抗矩阵;

当故障区段接分布式电源时, 如果在分布式电源处的智能电子设备所测得的同步电流相量为  $\mathbf{I}_{IED}$ , 则第  $k+1$  端的电流矢量表示为:

$$\mathbf{I}_f^{k+1} = -\mathbf{I}_f^{IED} \quad (7)$$

前推回代过程执行到参考端电压误差小于参考值  $\epsilon$  时, 得到  $\mathbf{I}_f^D$ ;

步骤5, 计算故障区段下游端的电压电流相量, 并使用斐波那契搜索算法计算故障区段中第  $q$  段下游注入电流;

在多分段多联络的情况下, 故障区段第  $k+1$  端的状态通过式(8)计算并更新, 即

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_f^{k+1} \\ \mathbf{I}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_i & -b_i \\ -c_i & a_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_f^k \\ \mathbf{I}_f^k \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{I}_f^{k+1} = \bar{\mathbf{I}}_{k+1} - \mathbf{I}_{\Sigma,f}^{k+1} \quad (9)$$

其中,  $\bar{\mathbf{I}}_{k+1}$  为第  $k+1$  端的三相电流相量,  $\mathbf{I}_{\Sigma,f}^{k+1}$  为故障时汇集到第  $k+1$  端所有其他段电流相量之和;

当有分布式电源时, 式(9)改写为:

$$\mathbf{I}_f^{k+1} = \bar{\mathbf{I}}_{k+1} - \mathbf{I}_{\Sigma,f}^{k+1} + \mathbf{I}_f^{DG} \quad (10)$$

式中,  $\mathbf{I}_f^{DG}$  是故障时由分布式电源提供的故障电流;

由于  $\mathbf{I}_f^D$  是关于故障区段内故障距离  $m$  的函数, 因此将确定的故障区段平均分为  $n$  段, 则每段下游注入电流表示为  $\mathbf{I}_{f,q}^D$  利用斐波那契搜索算法计算每个故障区段的下游注入电流;

步骤6, 如果供电区段的故障区段上游端的电流与下游端电流之比  $\eta$  小于等于参考值  $\epsilon$  时则转到步骤7, 否则转到转到第4步计算下一个故障区段的下游注入电流;

步骤7, 计算故障发生的位置;

当满足

$$|\mathbf{I}_{f,q}^D - \mathbf{I}_{f,q-1}^D| = \eta \leq \epsilon \text{ 且 } q \leq n \quad (11)$$

时, 则故障在区段中的标称位置为:

$$m^{nt} = \frac{m_{q-1} + m_q}{2} \quad (12)$$

式中,  $m^{nt}$  为使得式(4)值最小时的区段标称长度, 即  $0 \leq m^{nt} \leq 1$ ,  $m_q$  和  $m_{q-1}$  分别表示为故障区段第  $q$  段和第  $q-1$  段到区段上游端点的标称距离;

故障点到变电站的距离为：

$$L = \sum_{i=1}^{k-1} d_i + m^{\eta i} d_k \quad (13)$$

其中， $d_i$  为第  $i$  段馈线的长度， $d_k$  表示故障区段馈线的长度。

4. 如权利要求3所述的一种有源配电网的故障测距方法，其特征是，在供电区段的故障区段上游端的电流与下游端电流之比  $\eta$  与参考值  $\varepsilon$  的判据如下：

$$\eta \leq \varepsilon \quad (14)$$

其中， $\varepsilon \in [0.3, 0.5]$  且为定值。

## 一种有源配电网的故障测距方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种有源配电网的故障测距方法，属于配电网自动化技术领域。

### 背景技术

[0002] 各种分布式电源不断接入配电网，分布式电源的渗透率也不断提升，这都使的有源配电网的故障定位技术成为保障供电可靠性和供电质量的关键技术之一。在常规配电网中，利用故障点上游开关处能够检测到故障电流而故障点下游开关处检测不到故障电流的现象实现故障区段的定位。而在分布式电源高度渗透的有源配电网中，分布式电源提供的短路电流可能使流过故障点下游开关的故障电流大于过电流整定值，导致常规的故障定位方法失效。

[0003] 国内外针对分布式电源对有源配电网故障定位的影响及相应解决方案的研究成果主要是集中在利用阻抗法、同步机近似模型法、或使用同步电压电流相量的方法进行故障定位，目前上述基于同步相量定位方法，需要在开关处加装同步相量测量装置和高速数据采集系统，通过比较线路两段的相量差和智能终端之间的相互通信来实现故障区段定位，但无法确定故障发生的位置，这些方法增加了计算工作量，并且只考虑系统中只接入一个分布式电源的情况，没有考虑分布式电源多点接入情况。

### 发明内容

[0004] 针对上述多目标优化算法的不足，本发明提出了一种适用于分布式电源多点接入情况下的有源配电网的故障测距方法，其能够实现有源配电网的故障测距。

[0005] 本发明解决其技术问题采取的技术方案是：

[0006] 本发明提供的一种有源配电网的故障测距方法，其特征是，包括以下步骤：首先获得有源配电网的数据，其次对每个供电区段进行判断以确认故障区段，然后利用前推回代法计算故障点下游对故障点的注入电流，再者计算故障区段下游端的电压相量和电流相量，并计算故障点的标称位置，最后计算故障点到变电站的距离。

[0007] 优选地，所述源配电网的数据包括拓扑、负荷和线路的电气参数，以及变电站在故障时的电压电流相量和分布式电源的同步电流相量。

[0008] 本发明提供的另一种有源配电网的故障测距方法，其特征是，包括以下步骤：

[0009] 步骤1，获得有源配电网的数据；

[0010] 所述有源配电网的数据至少包括以下数据：拓扑、负荷和线路的电气参数、变电站在故障时的电压电流相量和分布式电源的同步电流相量；

[0011] 设故障发生在节点k和k+1之间，则故障点处的电压表示为：

$$[0012] \mathbf{V}_f = (\Phi + 0.5m^2 \mathbf{Z}_{k,k+1} \mathbf{Y}_k) \mathbf{V}_f^k - m \mathbf{Z}_{k,k+1} \mathbf{I}_f^k \quad (1)$$

[0013] 其中， $\mathbf{V}_f$ 为故障点处的电压， $\mathbf{I}_f$ 为故障点处的电流， $\Phi$ 为三阶单位矩阵， $m$ 为故障距离， $\mathbf{Z}_{k,k+1}$ 为线路的串联阻抗矩阵， $\mathbf{Y}_k$ 为线路的并联导纳矩阵， $\mathbf{V}_f^k$ 为故障区段起始端k的电压，

$\mathbf{I}_f^k$ 为故障区段起始端k的电流；

[0014] 故障点处的电流表示为：

$$[0015] \quad \mathbf{I}_f = \mathbf{I}_f^U + \mathbf{I}_f^D \quad (2)$$

[0016] 其中,  $\mathbf{I}_f^U$ 为故障点上游注入故障点的电流,  $\mathbf{I}_f^D$ 为故障点下游注入故障点的电流；

[0017] 故障点上游注入电流为：

$$[0018] \quad \mathbf{I}_f^U = -(m\mathbf{Y}_k + 0.25m^3\mathbf{Y}_k\mathbf{Z}_{k,k+1}\mathbf{Y}_k)\mathbf{V}_f^k + (\Phi + 0.5m^2\mathbf{Z}_{k,k+1}\mathbf{Y}_k)\mathbf{I}_f^k \quad (3)$$

[0019] 由式(1)和式(2)得到如下故障点处的电阻为：

$$[0020] \quad x_f = \frac{\lambda_i \mathbf{V}_{f_i} - \lambda_j \mathbf{V}_{f_j}}{\lambda_i \mathbf{I}_{f_i}} \quad (4)$$

[0021] 其中,  $\mathbf{V}_{f_i}$ 和 $\mathbf{V}_{f_j}$ 分别表示故障点处第i相和第j相的电压,  $\lambda_i$ 和 $\lambda_j$ 分别表示故障点处各相的状态, 即该相故障则为1, 否则为0；

[0022] 步骤2, 对供电区段进行判断确认故障区段, 设 $\mathbf{I}_f^D = -\mathbf{I}_k$ , 则 $\mathbf{I}_k$ 为故障前故障区段上游端k处的电流相量；

[0023] 步骤3, 如果供电区段的故障区段上游端的电流与下游端电流之比n小于等于参考值 $\varepsilon$ 时则转到步骤4, 否则转到步骤2进行判断下一个供电区段；

[0024] 步骤4, 利用前推回代法计算故障点下游对故障点的注入电流；

[0025] 根据潮流计算中的前推回代方法, 利用斐波那契搜索算法计算得到故障点下游对故障点的注入电流 $\mathbf{I}_f^D$ ,

[0026] 在回代过程中, 第k+1端的电压表示为:

$$[0027] \quad \mathbf{V}_f^{k+1} = \mathbf{AV}_f^k - \mathbf{BI}_f^{k+1} \quad (5)$$

[0028] 其中,  $\mathbf{V}_f^{k+1}$ 和 $\mathbf{V}_f^k$ 分别表示第k+1端和第k端的三相电压矢量,  $\mathbf{I}_f^{k+1}$ 表示第k+1端的三相电流矢量, A和B为阻抗矩阵；

[0029] 在回代过程中, 第k端与第k+1端的电压、电流相量的关系表示为:

$$[0030] \quad \begin{aligned} \mathbf{V}_f^{k+1} &= \mathbf{AV}_f^k - \mathbf{BI}_f^{k+1} \\ \mathbf{I}_f^k &= c\mathbf{V}_f^{k+1} + d\mathbf{I}_f^{k+1} \end{aligned} \quad (6)$$

[0031] 其中,  $\mathbf{I}_f^k$ 表示第k端的三相电流矢量, c和d为阻抗矩阵；

[0032] 当故障区段接分布式电源时, 如果在分布式电源处的智能电子设备所测得的同步电流相量为 $\mathbf{I}_{IED}$ , 则第k+1端的电流矢量表示为:

$$[0033] \quad \mathbf{I}_f^{k+1} = -\mathbf{I}_f^{IED} \quad (7)$$

[0034] 前推回代过程执行到参考端电压误差小于参考值 $\varepsilon$ 时, 得到 $\mathbf{I}_f^D$ ；

[0035] 步骤5, 计算故障区段下游端的电压电流相量, 并使用斐波那契搜索算法计算故障区段中第q段下游注入电流；

[0036] 在多分段多联络的情况下, 故障区段第k+1端的状态通过式(8)计算并更新, 即

$$[0037] \quad \begin{bmatrix} \mathbf{V}_f^{k+1} \\ \bar{\mathbf{I}}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_t & -b_t \\ -c_t & a_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_f^k \\ \mathbf{I}_f^k \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[0038] \quad \bar{\mathbf{I}}_f^{k+1} = \bar{\mathbf{I}}_{k+1} - \mathbf{I}_{\Sigma,f}^{k+1} \quad (9)$$

[0039] 其中,  $\bar{\mathbf{I}}_{k+1}$  为第  $k+1$  端的三相电流相量,  $\mathbf{I}_{\Sigma,f}^{k+1}$  为故障时汇集到第  $k+1$  端所有其他段电流相量之和;

[0040] 当有分布式电源时, 式(9)改写为:

$$[0041] \quad \bar{\mathbf{I}}_f^{k+1} = \bar{\mathbf{I}}_{k+1} - \mathbf{I}_{\Sigma,f}^{k+1} + \mathbf{I}_f^{DG} \quad (10)$$

[0042] 式中,  $\mathbf{I}_f^{DG}$  是故障时由分布式电源提供的故障电流;

[0043] 由于  $\mathbf{I}_f^D$  是关于故障区段内故障距离  $m$  的函数, 因此将确定的故障区段平均分为  $n$  段, 则每段下游注入电流表示为  $\mathbf{I}_{f,q}^D$ , 利用斐波那契搜索算法计算每个故障区段的下游注入电流;

[0044] 步骤6, 如果供电区段的故障区段上游端的电流与下游端电流之比  $\eta$  小于等于参考值  $\varepsilon$  时则转到步骤7, 否则转到第4步计算下一个故障区段的下游注入电流;

[0045] 步骤7, 计算故障发生的位置;

[0046] 当满足

$$[0047] \quad |\mathbf{I}_{f,q}^D - \mathbf{I}_{f,q-1}^D| = \eta \leq \varepsilon \text{ 且 } q \leq n \quad (11) \text{ 时,}$$

则故障在区段中的标称位置为:

$$[0048] \quad m^{\text{nt}} = \frac{m_{q-1} + m_q}{2} \quad (12)$$

[0049] 式中,  $m^{\text{nt}}$  为使得式(4)值最小时的区段标称长度, 即  $0 \leq m^{\text{nt}} \leq 1$ ,  $m_q$  和  $m_{q-1}$  分别表示为故障区段第  $q$  段和第  $q-1$  段到区段上游端点的标称距离;

[0050] 故障点到变电站的距离为:

$$[0051] \quad L = \sum_{i=1}^{k-1} d_i + m^{\text{nt}} d_k \quad (13)$$

[0052] 其中,  $d_i$  为第  $i$  段馈线的长度,  $d_k$  表示故障区段馈线的长度。

[0053] 优选地, 在供电区段的故障区段上游端的电流与下游端电流之比  $\eta$  与参考值  $\varepsilon$  的判断如下:

$$[0054] \quad \eta \leq \varepsilon \quad (14)$$

[0055] 其中,  $\varepsilon \in [0.3, 0.5]$  且为定值。

[0056] 本发明的有益效果如下:

[0057] 本发明考虑分布式电源多点接入, 只须通过使用局部电压电流相量以及分布式电源的同步电流相量就能进行有源配电网的故障测距, 而且通过比较区段两段的电流就可实现对于故障区段的定位; 它通过在线路上每个分布式电源处均装设智能终端设备IED监测同步电流相量, 通过计算故障电流和来自故障点下游电流对故障电流的贡献度实现了对于故障的定位测距, 适用于多点分布式电源接入的情况下的故障测距。

[0058] 与现有技术相比较, 本发明具有以下的优点:

- [0059] 1、充分考虑分布式电源多点接入的情况，而不是局限于分布式电源单点接入的情况；
- [0060] 2、须通过使用局部电压、电流相量以及分布式电源的同步电流相量就能进行有源配电网故障测距；
- [0061] 3、只需通过比较区段上下游电流就可确定故障区段；
- [0062] 4、主站只参与故障区段确定后的故障点定位，故障区段定位不需主站参与
- [0063] 5、不需要额外增加设备的投资。

## 附图说明

- [0064] 图1为本发明实施例1的方法流程图；
- [0065] 图2为本发明实施例2的故障线路模型示意图；
- [0066] 图3为本发明实施例2的方法流程图。

## 具体实施方式

[0067] 为能清楚说明本方案的技术特点，下面通过具体实施方式，并结合其附图，对本发明进行详细阐述。下文的公开提供了许多不同的实施例或例子用来实现本发明的不同结构。为了简化本发明的公开，下文中对特定例子的部件和设置进行描述。此外，本发明可以在不同例子中重复参考数字和/或字母。这种重复是为了简化和清楚的目的，其本身不指示所讨论各种实施例和/或设置之间的关系。应当注意，在附图中所图示的部件不一定按比例绘制。本发明省略了对公知组件和处理技术及工艺的描述以避免不必要的限制本发明。

[0068] 为了克服现有技术的不足，本发明通过计算线路上的分布电源对故障电流的贡献度来实现在有源配电网的故障测距，其适用于分布式电源多点接入情况下的有源配电网故障测距。

### 【0069】 实施例1

[0070] 如图1所示，本发明的一种有源配电网的故障测距方法，它包括以下步骤：首先获得有源配电网的数据，其次对每个供电区段进行判断以确认故障区段，然后利用前推回代法计算故障点下游对故障点的注入电流，再者计算故障区段下游端的电压相量和电流相量，并计算故障点的标称位置，最后计算故障点到变电站的距离。

[0071] 优选地，所述源配电网的数据包括拓扑、负荷和线路的电气参数，以及变电站在故障时的电压电流相量和分布式电源的同步电流相量。

### 【0072】 实施例2

[0073] 如图2和图3所示，本发明的另一种有源配电网的故障测距方法，它包括以下步骤：

[0074] 步骤1，获得有源配电网的数据；

[0075] 步骤2，对供电区段进行判断确认故障区段，设 $\mathbf{I}_f^D = -\mathbf{I}_k$ ，则 $\mathbf{I}_k$ 为故障前故障区段上游端k处的电流相量；

[0076] 步骤3，如果供电区段的故障区段上游端的电流与下游端电流之比 $\eta$ 小于等于参考值 $\varepsilon$ 时则转到步骤4，否则转到步骤2进行判断下一个供电区段；

[0077] 步骤4，利用前推回代法计算故障点下游对故障点的注入电流；

[0078] 步骤5，计算故障区段下游端的电压电流相量，并使用斐波那契搜索算法计算故障

区段中第q段下游注入电流；

[0079] 步骤6,如果供电区段的故障区段上游端的电流与下游端电流之比η小于等于参考值ε时则转到步骤7,否则转到转到第4步计算下一个故障区段的下游注入电流；

[0080] 步骤7,计算故障发生的位置。

[0081] 实施例2的具体实现方案如下：

[0082] 若故障发生在节点k和k+1之间,那么故障点处的电压可以表示为:

$$[0083] \mathbf{V}_f = (\Phi + 0.5m^2 \mathbf{Z}_{k,k+1} \mathbf{Y}_k) \mathbf{V}_f^k - m \mathbf{Z}_{k,k+1} \mathbf{I}_f^k \quad (1)$$

[0084] 其中,V<sub>f</sub>为故障点处的电压,I<sub>f</sub>为故障点处的电流,Φ为三阶单位矩阵,m为故障距离,Z<sub>k,k+1</sub>为线路的串联阻抗矩阵,Y<sub>k</sub>为线路的并联导纳矩阵,V<sub>f</sub><sup>k</sup>为故障区段起始端k的电压,

I<sub>f</sub><sup>k</sup>为故障区段起始端k的电流。而故障点处的电流可以表示为:

$$[0085] \mathbf{I}_f = \mathbf{I}_f^U + \mathbf{I}_f^D \quad (2)$$

[0086] 其中,I<sub>f</sub><sup>U</sup>为故障点上游注入故障点的电流,I<sub>f</sub><sup>D</sup>为故障点下游注入故障点的电流。

[0087] 故障的线路模型如图2所示。

[0088] 故障点上游注入电流为:

$$[0089] \mathbf{I}_f^U = -(m \mathbf{Y}_k + 0.25m^3 \mathbf{Y}_k \mathbf{Z}_{k,k+1} \mathbf{Y}_k) \mathbf{V}_f^k + (\Phi + 0.5m^2 \mathbf{Z}_{k,k+1} \mathbf{Y}_k) \mathbf{I}_f^k \quad (3)$$

[0090] 由式(1)和式(2)可以得到如下故障点处的电阻为:

$$[0091] x_f = \frac{\lambda_i \mathbf{V}_{f,i} - \lambda_j \mathbf{V}_{f,j}}{\lambda_i \mathbf{I}_{f,i}} \quad (4)$$

[0092] 其中V<sub>f,i</sub>和V<sub>f,j</sub>分别表示故障点处第i相和第j相的电压,λ<sub>i</sub>和λ<sub>j</sub>分别表示故障点处各相的状态,即该相故障则为1,否则为0。

[0093] 根据潮流计算中的前推回代方法,利用斐波那契搜索算法可以计算得到故障点下游对故障点的注入电流I<sub>f</sub><sup>D</sup>,在实际故障发生时,所有的负荷均可等效为电阻,而所有的分布式电源均可等效为电流源,因此在分布式电源处的STU通过测量可以得到其同步电流相量。根据前推回代法过程中,第k+1端的电压可表示为:

$$[0094] \mathbf{V}_f^{k+1} = \mathbf{AV}_f^k - \mathbf{BI}_f^{k+1} \quad (5)$$

[0095] 其中V<sub>f</sub><sup>k+1</sup>和V<sub>f</sub><sup>k</sup>分别表示第k+1端和第k端的三相电压矢量,I<sub>f</sub><sup>k+1</sup>表示第k+1端的三相电流矢量,A和B为阻抗矩阵。在回代过程中,第k端与第k+1端的电压电流相量的关系可以表示为:

$$[0096] \begin{aligned} \mathbf{V}_f^{k+1} &= \mathbf{AV}_f^k - \mathbf{BI}_f^{k+1} \\ \mathbf{I}_f^k &= c \mathbf{V}_f^{k+1} + d \mathbf{I}_f^{k+1} \end{aligned} \quad (6)$$

[0097] 其中I<sub>f</sub><sup>k</sup>表示第k端的三相电流矢量,c和d为阻抗矩阵。若故障区段接分布式电源,如果在分布式电源处的智能电子设备(IED)所测得的同步电流相量为I<sub>IED</sub>,那么第k+1端的电流矢量可表示为

[0098]  $\mathbf{I}_f^{k+1} = -\mathbf{I}_f^{IED}$  (7)

[0099] 当前推回代过程执行到参考端电压误差小于 $\epsilon$ 时,就可得到 $\mathbf{I}_f^D$ 。

[0100] 在多分段多联络的情况下,故障区段第k+1端的状态可以通过式(8)计算并更新,即

[0101] 
$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_f^{k+1} \\ \bar{\mathbf{I}}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_i & -b_i \\ -c_i & a_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_f^k \\ \mathbf{I}_f^k \end{bmatrix}$$
 (8)

[0102]  $\mathbf{I}_f^{k+1} = \bar{\mathbf{I}}_{k+1} - \mathbf{I}_{\Sigma,f}^{k+1}$  (9)

[0103] 其中,  $\bar{\mathbf{I}}_{k+1}$  为只考虑本段时在第k+1端的三相电流相量,  $\mathbf{I}_{\Sigma,f}^{k+1}$  为故障时汇集到第k+1端所有其他段电流相量之和。有分布式电源,则式(9)可以改写为

[0104]  $\mathbf{I}_f^{k+1} = \bar{\mathbf{I}}_{k+1} - \mathbf{I}_{\Sigma,f}^{k+1} + \mathbf{I}_f^{DG}$  (10)

[0105] 式中  $\mathbf{I}_f^{DG}$  是故障时由分布式电源提供的故障电流。

[0106] 由于  $\mathbf{I}_f^D$  是关于故障区段内故障距离m的函数,因此将确定的故障区段平均分为n段,则每段下游注入电流表示为  $\mathbf{I}_{f,q}^D$  利用斐波那契搜索算法计算每段下游注入电流,当满足

[0107]  $|\mathbf{I}_{f,q}^D - \mathbf{I}_{f,q-1}^D| = \eta \leq \epsilon, q \leq n$  (11)

[0108] 时,则故障在区段中的标称位置为:

[0109]  $m^{nt} = \frac{m_{q-1} + m_q}{2}$  (12)

[0110] 式中  $m^{nt}$  为使得式(4)值最小时的区段标称长度,即  $0 \leq m^{nt} \leq 1$   $m_q, m_{q-1}$  分别表示为故障区段第q段和第q-1段到区段上游端点的标称距离。因此可以得到故障距变电站的距离为:

[0111]  $L = \sum_{i=1}^{k-1} d_i + m^{nt} d_k$  (13)

[0112] 其中,  $d_i$  为第i段馈线的长度,  $d_k$  表示故障区段馈线的长度。

[0113] 在现有技术的电力系统中,分布式电源接入后引起的供电线路的电压变化量不应超过供电线路的5%,即分布式电源的额定电流与并网点短路时系统短路电流之比小于5%,同时分布式电源短路电流不会大于其额定电流的6倍,因此可以得出结论:在实际有源配电网中,分布式电源提供的短路电流不会超过系统提供的短路电流的30%。也就意味着故障区段上游端的电流与下游端电流之比不大于0.3。考虑到负荷电流及电流互感器测量误差等因素的影响,对故障定位判据通常留有一定的裕度,所以设置识别故障区段判据如下:

[0114]  $\eta \leq \epsilon$  (14)

[0115] 其中  $\epsilon \in [0.3, 0.5]$  且为定值,该值也可判断故障区段内故障点所在区间。

[0116] 本发明进行故障定位测距的具体流程如图3所示,该有源配电网故障测距步骤为:

[0117] 1) 获得有源配电网的数据,例如拓扑、负荷和线路的电气参数、变电站在故障时的电压电流相量和分布式电源的同步电流相量;

[0118] 2) 对每个供电区段进行判断,以确认故障区段,其中设 $I_f^D = -I_k$ ,而 $I_k$ 为故障前故障区段上游端k处的电流相量;

[0119] 3) 若满足式(14)式,转到第4步进行故障区段中故障点位置判断,否则转到第2步判断下个区段;

[0120] 4) 利用前推回代法计算故障点下游对故障点的注入电流;

[0121] 5) 计算故障区段下游端的电压电流相量,并使用斐波那契搜索算法计算故障区段中第q段下游注入电流;

[0122] 6) 若满足式(14),则转到第7步计算故障点的标称位置,否则转到第4步计算故障区段下一段的下游注入电流;

[0123] 7) 根据式(12)和(13)计算故障发生距离,即得到故障点到变电站的距离。

[0124] 通过在线路上每个分布式电源处均装设智能终端设备IED监测同步电流相量,利用本发明的测距方法通过计算故障电流和来自故障点下游电流对故障电流的贡献度实现了对于故障的定位测距。

[0125] 本发明充分考虑了分布式电源多点接入的情况,只须通过使用局部电压电流相量以及分布式电源的同步电流相量就能进行有源配电网故障测距的方法,而且通过比较区段两段的电流就可实现对于故障区段的定位。

[0126] 以上所述只是本发明的优选实施方式,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明原理的前提下,还可以做出若干改进和润饰,这些改进和润饰也被视为本发明的保护范围。

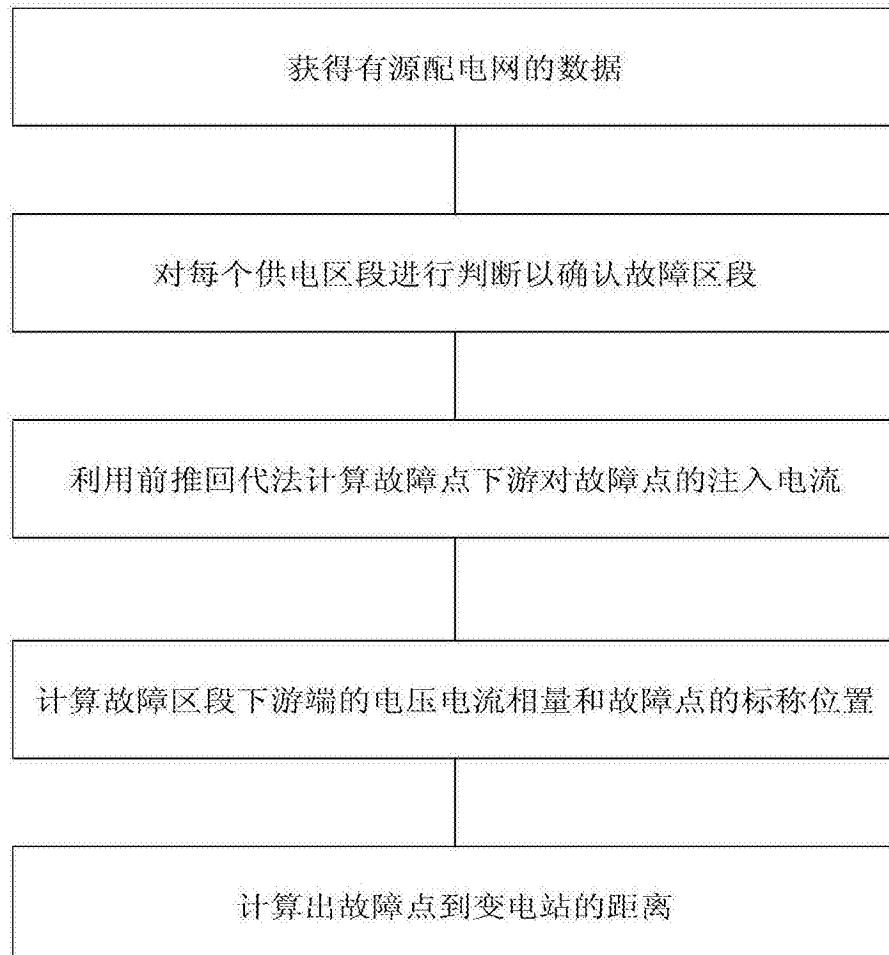


图1

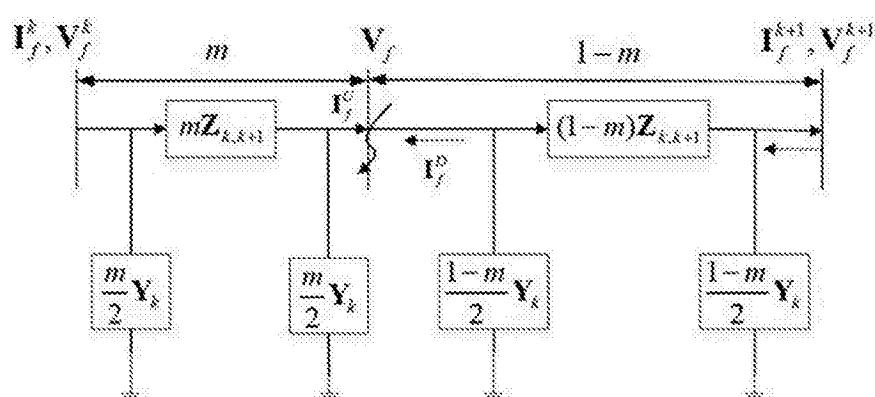


图2

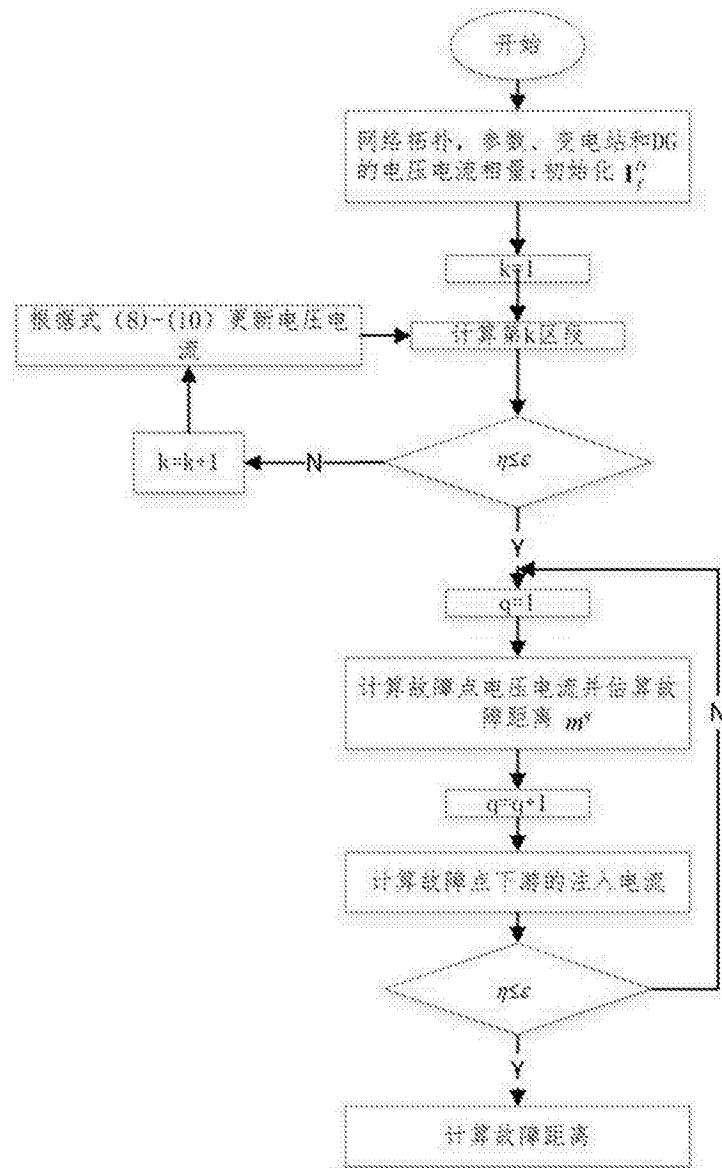


图3