

DOI: 10.7667/PSPC171437

一种含分布式电源的中低压配电网状态估计方法研究

怀全¹, 侯小虎², 何良策³, 卢志刚³

(1. 神华黄骅港务有限责任公司, 河北 沧州 061110; 2. 国网山西招标有限公司, 山西 太原 030001;
3. 河北省电力电子节能与传动控制重点实验室(燕山大学), 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 为解决含分布式电源的中低压配电网中三相不平衡的状态估计问题, 提出一种含分布式电源的中低压配电网状态估计方法。在包含分布式电源的中低压配电网中引入变压器等值模型, 以节点注入电流方程为基础, 建立了可同时处理三相三线制和三相四线制量测量的量测方程, 扩大了其实用范围并提高了对系统的估计精度。其次, 将直角坐标下线性零注入约束作为等式约束条件加入中低压配网状态估计模型中, 使节点注入功率严格为零, 并使计算过程得到简化。最后, 采用细菌群体趋药性算法(BCC)对该模型进行状态估计。IEEE13节点修正系统算例的仿真结果验证了所提方法的有效性, 且表明该方法具有良好的估计精度和收敛性。

关键词: 分布式电源; 中低压配电网; 三相不平衡; 状态估计; 零注入; BCC算法

A method of state estimation for middle voltage and low voltage distribution network with distributed generations

HUAI Quan¹, HOU Xiaohu², HE Liangce³, LU Zhigang³

(1. Shenhua Huanghua Harbour Administration Corp, Cangzhou 061110, China; 2. State Grid Shanxi Tendering Co., Ltd., Taiyuan 030001, China; 3. Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province (Yanshan University), Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: To solve the state estimation issue of middle/low voltage distribution network with Distributed Generations (DGs), this paper proposes a state estimation method for the middle/low voltage distribution network with DGs. The equivalent model of transformers is introduced in the middle/low voltage distribution network with DGs. Based on the node current injection equations, the measurement equations are established, which can solve the three-phase three wire system and three-phase four wire system and obtain better application scope and estimation accuracy. Besides, the linear zero injection constraint under the rectangular coordinate is adopted as an equality constraint in the proposed model. It can limit the node injection power to be zero strictly and simplify the calculation process. Finally, Bacteria Colony Chemotaxis (BCC) algorithm is applied to solve the state estimation of the proposed model. The effectiveness of the proposed method has been validated by the modified IEEE 13-bus test system, which demonstrates better estimation accuracy and convergence of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61374098).

Key words: distributed generations (DGs); middle/low voltage distribution network; three-phase unbalance; state estimation; zero injection; bacteria colony chemotaxis (BCC) algorithm

0 引言

中低压配电网状态估计是利用冗余的量测数据来实现系统运行状态的估计, 对电网运行状态的分析与控制具有重要的作用^[1]。随着当前电力系统中

分布式电源的大量接入, 传统被动配电网正逐步转变为含多类型分布式电源(Distributed Generations, DGs)的主动配电网。配电网不同于输电网, 其自动化水平较为低下, 同时具有三相不平衡、网络呈辐射状等特点, 节点负荷量测量通常采用负荷预测功率的预测值作为伪量测, 数据精度差。文献[2]针对配电网首端量测不仅有较大冗余并且有较高的准确

度，而其他端点的量测冗余度较低甚至缺乏量测量的特点，提出一种基于准实时数据的智能配电网状态估计方法。该方法在准实时数据的基础上建立目标函数，可以实现在线状态估计。高级量测体系(Advanced Metering Infrastructure, AMI)的出现使获取高精度负荷实时量测成为可能，当前电网中所安装的大量智能电表作为 AMI 数据采集计量的核心设备可提供低压配网中用户的实时精确量测^[3-4]，这是传统配电网信息测量系统所没有的优势，给当前配电网的状态估计带来新的机遇。随着配电自动化水平的不断提高，配电网状态估计有望更为快速准确地掌握实时系统的运行状态。

中低压配电网中分布式电源的接入以及线路负荷的三相不平衡均会导致潮流的三相不平衡，因此状态估计必须考虑三相不平衡问题从而选取合适的分布式电源模型。文献[5]分析并总结了各种类型分布式电源在前推回代潮流计算中的数学模型，提出了适合于多种分布式电源的灵活节点编号方法并给出改进前推回代潮流算法的计算过程。为了解决在分布式电源接入点处配电网量测配置较少的问题，文献[6]基于风电和光伏发电系统的功率预测，建立带等式约束的加权最小二乘法状态估计模型，该模型将分布式电源有功和“虚拟”无功功率的出力预测当作伪量测处理。文献[7]为了解决大规模风电接入而出现的残差污染现象，提出了一种精细化的快速抗差最小二乘法状态估计方法。文献[8]首先建立了配网中常见分布式电源的状态估计模型，然后提出了一种基于改进节点法的配电网多相别状态估计方法。文献[9]建立了详细的适用于配电网并可以做到较为容易处理三相下的不对称注入功率的分布式电源三相模型，从而提出了一种含多类型 DG 的主动配电网分布式三相状态估计方法。不对称配网状态估计根据结构的不同可分为三相三线制和三相四线制两种，三相三线制主要针对 10 kV 电压等级的中压配电网，三相四线制主要针对 380 V / 220 V 电压等级的低压配电网。对三相三线制状态估计问题，一般均采用最小二乘法进行建模求解^[10-12]。当前中低压配电网自动化水平还比较低，只有少量的节点处安装了量测装置，因此量测量的冗余度较低，收敛性较差。文献[13]充分利用零注入虚拟量测，提出了零注入功率方程同时作为虚拟量测方程和等式约束的方法，有效提高了状态估计的收敛性。文献[14]以节点注入电流方程为基础，采用文献[13]中对零注入虚拟量测的处理方式，并充分考虑 AMI 中智能电表所测实时数据为各相相对中性点的量测特点，从而得到更契合实际的状态估计结果。

在电力系统状态估计结果中，如何保证零注入节点的注入功率严格为零，是电力系统状态估计研究中的重要问题。传统意义上采用较多的是大权重法，顾名思义就是运用基尔霍夫定律将零注入节点的注入功率处理为虚拟量测并赋予相当的权重来进行状态估计，从而做到零注入节点近似零注入^[15-16]。另一种处理零注入的方法是采用拉格朗日乘法来保证严格的零注入^[17-18]，但由于配网中零注入节点数量较大导致其计算量过大。文献[19]以既约牛顿法为基础，推导出了一种既约的拟牛顿法。该方法的计算速度、收敛性都与常规的大权重法相当，且能够保证零注入约束严格满足。

配电网规模庞大带来的状态估计计算压力对现有一系列算法在精度、速度、可靠性、收敛性等方面提出了更苛刻的要求。国内外学者在已有算法的基础上不断深入拓展研究，以粒子群算法为代表的人工智能算法在状态估计方面的研究涌现出来^[20]。文献[21]考虑到加权最小二乘法常导致状态估计结果出现发散的情况，提出将改进的粒子群算法与加权最小二乘法结合来进行状态估计，从而使状态估计的整体结果获得较好的收敛性。BCC 算法是一种通过研究生物的行为而衍生出来的优化算法，利用细菌本身的趋化过程和感知过程来进行信息的交互并得到优化效果。该算法除了收敛速度快的优点外，个体也具有一定的寻优能力，是实现配电网状态估计较好的求解方法^[22]。

本文基于加权最小二乘法，以节点注入电流方程为基础，引入变压器等值电路建立含分布式电源的三相三线制和三相四线制中低压配电网的统一模型，在满足严格零注入的条件下简化其计算过程，采用 BCC 算法对其进行建模求解。最后基于 IEEE13 节点修正系统的仿真对比分析验证本文所提模型的有效性和准确性。

1 中低压配电网的状态估计模型

1.1 变压器建模

当不考虑变压器绕组联结情况和非标准变比时，变压器的等值电路如图 1 所示^[23]。

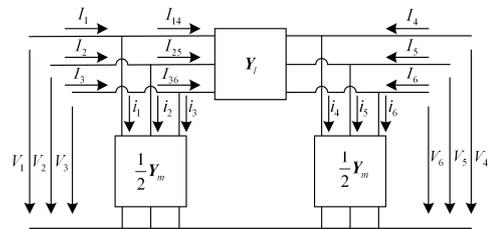


图 1 变压器等值电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of transformer

由变压器铭牌参数可求得变压器漏导纳和激磁导纳矩阵为

$$\mathbf{Y}_l = \mathbf{A} \begin{bmatrix} y_{l0} & 0 & 0 \\ 0 & y_{l1} & 0 \\ 0 & 0 & y_{l2} \end{bmatrix} \mathbf{A}^{-1}, \mathbf{Y}_m = \mathbf{A} \begin{bmatrix} y_{m0} & 0 & 0 \\ 0 & y_{m1} & 0 \\ 0 & 0 & y_{m2} \end{bmatrix} \mathbf{A}^{-1} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$, $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$; y_{l0} 、 y_{l1} 、 y_{l2} 分

别为零序、正序、负序漏导纳分量; y_{m0} 、 y_{m1} 、 y_{m2} 分别为零序、正序、负序激磁导纳分量。

由图 1 可得变压器内部电流 $I_1 \sim I_6$ 与内部电压 $V_1 \sim V_6$ 的关系为

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_l + \frac{1}{2}\mathbf{Y}_m & -\mathbf{Y}_l \\ -\mathbf{Y}_l & \mathbf{Y}_l + \frac{1}{2}\mathbf{Y}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_6 \end{bmatrix} = \mathbf{Y}_{\pi s} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_6 \end{bmatrix} \quad (2)$$

当考虑变压器绕组联结情况和非标准变比时, 设变压器原边和二次的抽头系数分别为 α 、 β , 原边无中性点, 二次侧有中性点, 可以得到内部电压和外部电压的关系如式(3)。

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_p/\alpha & -1/\alpha & 0 & 0 \\ -1/\alpha & -1/\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_s/\beta & -1/\beta \\ 0 & 0 & -1/\beta & -1/\beta \end{bmatrix}_{(6 \times 8)} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} = \mathbf{N} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, \mathbf{N} 为该变压器的联结矩阵, 联结矩阵子块 N_p 、 N_s 均为 3×3 阶矩阵, 分别描述了变压器原边和副边的联结方式, 其中元素与理想变压器的联结组别直接相关, 可由变压器绕组联结矩阵抽取表^[23]中抽取得到。

由式(2)、式(3)可得变压器支路电压电流关系:

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} = \mathbf{N}^T \mathbf{Y}_{\pi s} \mathbf{N} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} = \mathbf{Y}_T \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} \quad (4)$$

由此可得变压器导纳矩阵为

$$\mathbf{Y}_T = \mathbf{N}^T \mathbf{Y}_{\pi s} \mathbf{N} = \begin{bmatrix} Y_{T(ii)}^{dt} & Y_{T(ij)}^{dt} \\ Y_{T(ji)}^{dt} & Y_{T(jj)}^{dt} \end{bmatrix} \quad (5)$$

1.2 中低压配电网的等值电路模型

三相四线制配网端点注入电流方程是本文所提中低压配电网状态估计的建模基础, 三相四线制配

网的等值电路模型如图 2 所示。

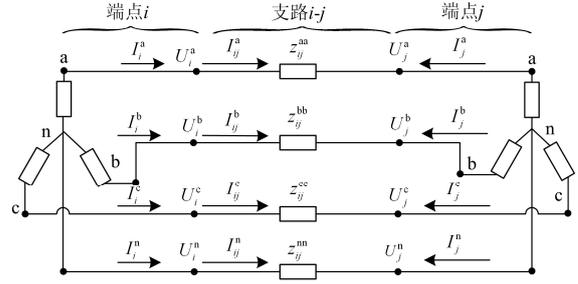


图 2 三相四线制配电网等值电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of three-phase four-wire distribution system

图中包括三相线和中性线, 其中 i 和 j 为端点编号; I_i^t 、 I_j^t 、 U_i^t 、 U_j^t 分别是端点 i 、 j 中电气节点 t 的注入电流相量和电压相量; I_{ij}^t 是端点 i 和 j 间 t 相支路的电流相量; Z_{ij}^{dt} 和 Z_{ij}^{dt} 为端点 i 和 j 间线路串联支路的自阻抗和互阻抗; $B_1 = \{a, b, c, n\}$ 表示端点包含中性点的电气节点组合, $B_p = \{a, b, c\}$ 表示端点不包含中性点的电气节点组合 $d \in B_p$, $t \in B_1$, $d \neq t$ 。

1.3 端点注入电流方程

在中低压配网中, 当端点 i 为三相四线制端点时, 其三相节点和中性点的注入电流方程为

$$\begin{cases} I_i^d = \sum_{k \in \varphi_i} \sum_{t \in B_1} Y_{ik}^{dt} U_k^t = \sum_{j \in \varphi_i} I_{ij}^d + \sum_{t \in B_1, t \neq d} I_i^{dt} = \\ \sum_{j \in \varphi_i, t \in B_1} \sum y_{ij}^{dt} (U_i^t - U_j^t) + \sum_{t \in B_1, t \neq d} y_i^{dt} (U_i^d - U_i^t) \\ I_i^n = \sum_{k \in \varphi_i} \sum_{t \in B_1} Y_{ik}^{nt} U_k^t = - \sum_{d \in B_p} \left[\sum_{j \in \varphi_i} I_{ij}^d + \sum_{t \in B_1, t \neq d} I_i^{dt} \right] = \\ - \sum_{d \in B_p} \left[\sum_{j \in \varphi_i, t \in B_1} \sum y_{ij}^{dt} (U_i^t - U_j^t) + \sum_{t \in B_1, t \neq d} y_i^{dt} (U_i^d - U_i^t) \right] \end{cases} \quad (6)$$

式中: φ_i 为包括端点 i 且与端点 i 直接相联端点的集合; I_{ij}^d 为 i - j 支路 d 相的电流相量; y_{ij}^{dt} 为 i - j 支路不包含端点 i 节点间并联支路导纳 y_{ij}^{dt} 的支路互导纳元素, 且 $y_{ij}^{dt} = 1/z_{ij}^{dt}$; Y_{ik}^{dt} 为包含变压器的节点导纳矩阵元素, 具体表达式为

$$Y_{ik}^{dt} = \begin{cases} \sum_{x \in B_1, x \neq d} y_i^{dx} + \sum_{j \in \varphi_i} y_{ij}^{dt} + Y_{T(ii)}^{dt} & k = i, t = d \\ -y_i^{dt} + \sum_{j \in \varphi_i} y_{ij}^{dt} + Y_{T(ii)}^{dt} & k = i, t \neq d \\ -y_{ij}^{dt} + Y_{T(ij)}^{dt} & k \neq i \end{cases} \quad (7)$$

式中: ϕ 为不包括端点 i 且与端点 i 直接相联端点的集合(不包含与之相连的变压器端点), 自导纳 Y_{ii}^{dd} 表示与端点 i 节点 d 直接相连的所有支路导纳之和, 当连有变压器时, 则需叠加变压器导纳矩阵中与该端点相对应的分块矩阵 $Y_{T(i)}^{dd}$ 或 $Y_{T(j)}^{dd}$ 中元素; 互导纳 $Y_{it}^{dt} (t \neq d)$ 表示端点 i 中节点 d 和 t 之间支路导纳的相反数与端点 i 且与 i 直接相连端点节点 d 和 t 之间所有支路导纳之和, 当连有变压器时, 则需叠加变压器导纳矩阵中与该端点相对应的分块矩阵 $Y_{T(i)}^{dt}$ 或 $Y_{T(j)}^{dt}$ 中元素; 互导纳 $Y_{ik}^{dt} (k \neq i)$ 则表示端点 i 和 k 中节点 d 和 t 之间支路导纳的相反数, 当连有变压器时, 则需叠加变压器导纳矩阵中与该端点相对应的分块矩阵 $Y_{T(i)}^{dt}$ 或 $Y_{T(j)}^{dt}$ 中的元素。

当端点 i 为三相三线制端点时, 将式(6)、式(7)中中性点 n 所对应的电气量(包括中性点电压、电流、导纳矩阵中 n 所对应的行和列)置零。

1.4 分布式电源建模

在对含分布式电源的配电网进行状态估计时, 需根据不同的分布式电源建立不同的计算模型, 根据分布式电源与配电网的 3 种接口形式以及各种分布式电源的潮流计算模型, 可以将分布式电源分为 4 种节点类型, 即 PQ 节点、PQ(V)节点、PV 节点及 PI 节点^[9]。本文采用等效为 PQ 节点的计算模型。

2 含分布式电源的中低压配电网状态估计

2.1 状态估计数学模型

状态估计是提升估计量与量测量接近程度的优化过程, 基于加权最小二乘法, 优化目标的数学描述如式(8)。

$$\begin{cases} \min f(x) = \sum_{i=1}^m w_i [z_i - h_i(x)]^2 \\ \text{s.t. } g(x) \leq 0 \\ c(x) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: x 为 n 维系统状态变量, 包括节点电压的幅值和相角; $h_i(x)$ 为第 i 个量测的量测函数; z_i 为第 i 个量测的量测值; w_i 为第 i 个量测的权重; m 为系统量测数; $g(x)$ 为系统不等式约束函数; $c(x)$ 为 l 维零注入功率等式约束函数, 通常 $l \ll n$ 。

2.2 量测配置

考虑中低压配电网量测数据包括电源端点的三相总注入有功功率 P_i^Σ 、总注入无功功率 Q_i^Σ 、各相电流幅值 I_i^a 、 I_i^b 、 I_i^c 及各相电压幅值 U_i^a 、 U_i^b 、 U_i^c

和负荷端点的各相注入有功功率 P_j^a 、 P_j^b 、 P_j^c 、各相注入无功功率 Q_j^a 、 Q_j^b 、 Q_j^c 及各相电压幅值 U_j^a 、 U_j^b 、 U_j^c , 取各节点的三相及中性点电压的实部和虚部为状态变量建立直角坐标下的中低压配电网状态估计量测方程。而对于电源端点 i , 只有三相电压的实部 e_i^a 、 e_i^b 、 e_i^c 为状态变量, 并且三相电压的实部和虚部满足 $f_i^a = 0$ 、 $f_i^b = \sqrt{3}e_i^b$ 、 $f_i^c = -\sqrt{3}e_i^c$ 、 $e_i^n = f_i^n = 0$, 对于三相三线制节点满足 $e_k^n = f_k^n = 0$, 建立中低压配电网的量测方程。

2.2.1 相节点的量测方程

中低压配电网中, 电源和负荷端点的实际量测量有所不同, 相应的相节点量测方程亦不相同, 具体情况如下。

1) 电源端点

对电源端点, 实际量测量包含各相电流幅值、三相总有功功率、三相总无功功率。因此, 相应的电源端点 i 的量测方程为

$$I_i^d = \left| \sum_{k \in \phi_i} \sum_{t \in B_1} Y_{ik}^{dt} \dot{U}_k^t \right| \quad (9)$$

$$P_i^\Sigma = \text{Re} \left(\sum_{d \in B_p} (U_i^d - U_i^n) I_i^{d*} \right) \quad (10)$$

$$Q_i^\Sigma = \text{Im} \left(\sum_{d \in B_p} (U_i^d - U_i^n) I_i^{d*} \right) \quad (11)$$

2) 负荷端点

对负荷端点, 实际量测量包含各相有功和无功功率, 其相应的量测方程为

$$P_i^d = \text{Re} \left\{ (\dot{U}_i^d - \dot{U}_i^n)^* \sum_{k \in \phi_i} \sum_{t \in B_1} Y_{ik}^{dt} \dot{U}_k^t \right\} \quad (12)$$

$$Q_i^d = -\text{Im} \left\{ (\dot{U}_i^d - \dot{U}_i^n)^* \sum_{k \in \phi_i} \sum_{t \in B_1} Y_{ik}^{dt} \dot{U}_k^t \right\}$$

2.2.2 中性点的虚拟量测方程

对中性点, 其虚拟量测方程是根据基尔霍夫电流定律和三相节点的注入电流方程推导建立^[14], 可表示为

$$\begin{cases} \text{Re} \left\{ \sum_{d \in B_p} \left[\frac{P_i^d - jQ_i^d}{(\dot{U}_i^d - \dot{U}_i^n)^*} \right] + \sum_{k \in \phi_i} \sum_{t \in B_1} Y_{ik}^{dt} \dot{U}_k^t \right\} = 0 \\ \text{Im} \left\{ \sum_{d \in B_p} \left[\frac{P_i^d - jQ_i^d}{(\dot{U}_i^d - \dot{U}_i^n)^*} \right] + \sum_{k \in \phi_i} \sum_{t \in B_1} Y_{ik}^{dt} \dot{U}_k^t \right\} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

2.2.3 相电压幅值量测方程

当端点为三相四线制端点时, 节点电压量测为相对中性点电压, 因此相电压幅值量测方程为

$$(\dot{U}_i^d)^2 = (e_i^d - e_n^d)^2 + (f_i^d - f_n^d)^2 \quad (14)$$

2.3 约束条件

2.3.1 等式约束

实际电力系统中存在许多零注入节点, 在电力系统状态估计模型中, 应加入等式约束来保证零注入节点的注入功率在状态估计结果中严格为零, 即要求零注入节点的注入电流为零, 因此三相下的电力系统网络方程复数形式可表达为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{BB}^{dt} & \mathbf{Y}_{BN}^{dt} \\ \mathbf{Y}_{NB}^{dt} & \mathbf{Y}_{NN}^{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_B^d \\ \mathbf{U}_N^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I}_N^d \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: \mathbf{Y} 为系统导纳矩阵, 下标 B 表示零注入节点相关电气量, 下标 N 表示非零注入节点相关电气量; \mathbf{U}_B^d 、 \mathbf{U}_N^d 分别为零注入节点和非零注入节点三相复电压; \mathbf{I}_N^d 为非零注入节点三相注入复电流, 零注入节点复电流为零。

式(15)中零注入节点复电流可表示为

$$\mathbf{Y}_{BB}^{dt} \mathbf{U}_B^d + \mathbf{Y}_{BN}^{dt} \mathbf{U}_N^d = \mathbf{0} \quad (16)$$

将其转化为三相四线制直角坐标下的实数方程, 可得

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B}_{BB}^{dt} & \mathbf{G}_{BB}^{dt} \\ \mathbf{G}_{BB}^{dt} & -\mathbf{B}_{BB}^{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_B^d \\ \mathbf{f}_B^d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{BN}^{dt} & \mathbf{G}_{BN}^{dt} \\ \mathbf{G}_{BN}^{dt} & -\mathbf{B}_{BN}^{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_N^d \\ \mathbf{f}_N^d \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (17)$$

上式即为零注入约束在三相四线制直角坐标下的表达式, 容易看出, 零注入约束在三相四线制直角坐标下为线性约束。

设 \mathbf{x} 为系统状态变量, $\mathbf{x}_B = [\mathbf{e}_B^d \quad \mathbf{f}_B^d]^T$,

$\mathbf{x}_N = [\mathbf{e}_N^d \quad \mathbf{f}_N^d]^T$ 。可以得到 \mathbf{x}_B 关于 \mathbf{x}_N 的表达式:

$$\mathbf{x}_B = - \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{BB}^{dt} & \mathbf{G}_{BB}^{dt} \\ \mathbf{G}_{BB}^{dt} & -\mathbf{B}_{BB}^{dt} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{BN}^{dt} & \mathbf{G}_{BN}^{dt} \\ \mathbf{G}_{BN}^{dt} & -\mathbf{B}_{BN}^{dt} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x}_N = \mathbf{F} \cdot \mathbf{x}_N \quad (18)$$

因此加权最小二乘法的目标函数可以表示为

$$\min f(\mathbf{x}_N) = \sum_{i=1}^m w_i [z_i - h_i(\mathbf{x}_N, \mathbf{F}\mathbf{x}_N)]^2 \quad (19)$$

2.3.2 不等式约束

含分布式电源的中低压配电网中不等式约束条件主要有: 分布式电源有功约束、节点电压约束和线路电流约束, 分别如式(20)所示。

$$\begin{cases} P_{DG,\min}^i \leq P_{DG}^i \leq P_{DG,\max}^i \\ V_{ND,\min}^i \leq V_{ND}^i \leq V_{ND,\max}^i \\ I_L^i \leq I_{L,\max}^i \end{cases} \quad (20)$$

式中: P_{DG}^i 表示分布式电源的有功出力; V_{ND}^i 表示节点电压; I_L^i 表示线路电流。

3 基于 BCC 算法的中低压配电网状态估计

本文考虑三相四线制下不平衡中低压配电网在直角坐标下每个节点对应的状态变量较多, 直接导致状态估计的维数较大, 故若采用传统的牛顿法或基于牛顿法改进的算法, 需要求解目标函数对状态变量的一阶导甚至二阶导, 求解困难且编程不易实现。因此本文运用细菌群体趋药性算法(Bacteria Colony Chemotaxis, BCC)来求解含分布式电源的中低压配电网状态估计问题, 可以略去求导且编程易于实现。

BCC 算法是一种从生物习性中获取灵感的智能优化算法, 该算法收敛速度快, 单个细菌具备独自寻找最优解的能力。同时, 与其他智能算法相比, 局部搜索能力更强, 且占用的系统资源更少^[24]。基于 BCC 算法的中低压配电网状态估计的具体流程如图 3 所示。

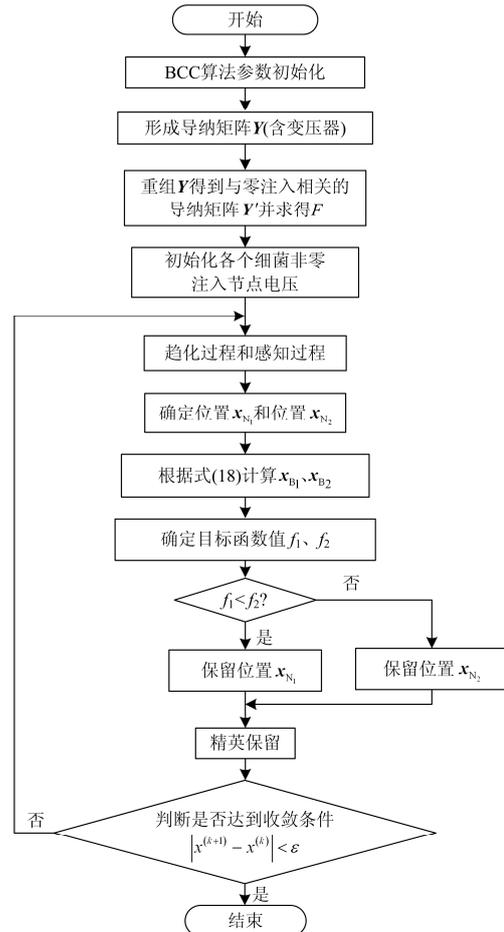


图 3 基于 BCC 算法的状态估计具体流程图

Fig. 3 Concrete flow chart of state estimation based on the BCC algorithm

4 算例分析

4.1 仿真数据

为了验证本文所提中低压配网状态估计模型的有效性, 本文采用 IEEE13 节点修正系统进行仿真分析。对原系统的修正如下: 1) 将系统的 7、11、12 节点设置为低压节点, 其余节点为中压节点, 配电变压器放置在系统的 4、7 端点之间, 参数设置采用文献[23]仿真算例中变压器参数; 2) 低压侧三相四线制线路型号参数均取 501, 中压侧三相三线制线路型号均取 601, 相与相之间的设置都一致; 3) 不考虑原系统中的并联电容和电压调节器; 4) 系统中接入分布式电源, 其中风电接入中压侧, 光伏接入低压侧, 均等效为 PQ 节点进行状态估计处理。分布式电源的位置、功率和偏差如表 1 所示。

表 1 IEEE13 节点修正系统中 DG 配置信息

Table 1 Specifications of DG units in modified IEEE 13 node test system

节点	类型	电压偏差/%	有功功率/kW	有功偏差/%	功率因数
3	风电	1	[150,150,150]	15	0.95
11	光伏	1	[0,100,0]	15	0.95

系统 5、8 和 9 号端点为零注入端点, 满足严格的零注入, 端点 1 为系统等值电源点, 其余均为负荷端点。网络拓扑关系如图 4 所示。

利用以下所述方法得到量测数据: 量测真值由电流注入型牛顿法计算此修正系统潮流所得, 在潮流计算所得真值上叠加服从正态分布的误差得到相应的量测值, 其中节点电压幅值量测和端点的有功、无功功率量测误差的标准差设置为 0.001 和 0.01, 本文量测权重均取为 1, 收敛精度设置为 10^{-5} 。

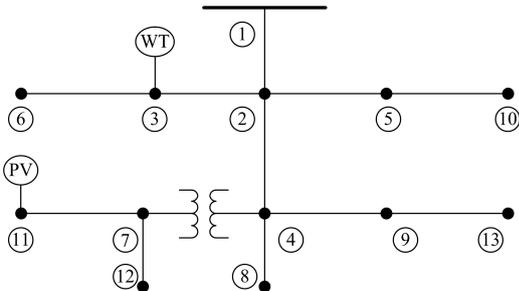


图 4 IEEE13 节点修正系统

Fig. 4 Modified IEEE 13 node test system

4.2 仿真结果

4.2.1 分布式电源出力估计有效性验证

为验证本文所用算法及模型可有效估计分布式

电源的出力, 对此修正系统进行了仿真分析。表 2 为分布式电源出力估计结果, 由于本文分布式电源功率因数为已知量, 所以无需对无功进行估计。

表 2 分布式电源的实际值与估计值

Table 2 Actual and estimation values of DG units

位置	有功功率	
	实际值/kW	估计值/kW
3	[150,150,150]	[149.58,149.58,149.58]
11	[0,100,0]	[0,100,22,0]

对比表 1 和表 2 的结果可以发现, 基于本文所提中低压配网状态估计的模型, 采用 BCC 算法对分布式电源进行出力估计所得结果与实际值之间的差别小于 0.5%, 说明了本文方法可以有效估计出分布式电源的出力。

4.2.2 状态估计模型有效性和准确性验证

为了分析加入变压器后建立的统一模型对状态估计结果的影响, 本文形成以下算例。

1) 算例 1: 在 3.1 节的修正系统和仿真数据的基础上采用本文量测处理方法和模型进行状态估计。

2) 算例 2: 采用 3.1 节的修正系统和仿真数据, 但不考虑变压器导纳对系统导纳矩阵的影响, 并将三相四线制数据近似为三相三线制数据(即假设所有中性点直接接地且其电压都等于 0, 所有数据不再为相对中性线的数据而是相对地的数据)进行处理, 然后利用 BCC 算法对其进行状态估计。

为验证本文所提状态估计模型的有效性和准确性, 采用 BCC 算法分别对以上两个算例进行状态估计。表 3 和表 4 给出了电源端点(端点 1)、三相三线制负荷端点(端点 2)、三相四线制负荷端点(端点 11)、零注入端点(端点 5)分别在两算例下的注入有功和无功功率的估计值, 并与真值进行了对比。表中数据均为有名值(有功功率单位为 kW, 无功功率单位为 kvar); 对于零注入端点(5、8、9 端点)没有对应的功率的量测值, 但可以通过状态估计得到其估计值, 在收敛精度和量测误差已知的情况下状态估计迭代收敛。

由表 3 和表 4 的功率估计结果可以看出, 算例 1 的状态估计结果与基于电流注入型牛顿法计算此修正系统潮流所得的真值较为接近; 而对于零注入节点, 由于在状态估计模型等式约束中已经将其严格约束, 故所得零注入端点的状态估计值严格为 0, 与潮流真值一致, 因此满足了严格的零注入。所得结果说明了此模型对三相不平衡中低压配网状态估计的有效性。

表 3 IEEE13 修正系统部分端点有功功率状态估计值
Table 3 Estimation results of active power for modified IEEE 13 node system

节点号	a相			b相			c相		
	真值	估计值		真值	估计值		真值	估计值	
		算例 1	算例 2		算例 1	算例 2		算例 1	算例 2
1	1 567.249	1 567.237	1 566.721	1 093.665	1 093.672	1 093.827	1 419.253	1 419.259	1 420.629
2	-17.625	-17.638	-17.692	-66.43	-66.428	-66.539	-117.529	-117.531	-117.991
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	-0.019	0.201	-230.792	-230.799	-232.962	0	0.012	0.172

表 4 IEEE13 修正系统部分端点无功功率状态估计值
Table 4 Estimation results of reactive power for modified IEEE 13 node system

节点号	a相			b相			c相		
	真值	估计值		真值	估计值		真值	估计值	
		算例 1	算例 2		算例 1	算例 2		算例 1	算例 2
1	1 214.312	1 214.336	1 215.093	868.279	868.281	869.842	1 086.215	1 086.202	1 084.967
2	-10.359	-10.325	-10.017	-38.192	-38.172	-37.628	-58.723	-58.731	-59.961
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	-0.028	-0.721	-132.173	-132.199	-138.263	0	0.015	2.153

为定量分析状态估计模型的准确性, 本文采用文献[25]中两个评价指标即系统估计误差 S_1 和最大估计误差 S_2 。

$$S_1^d = \sum_{i=1}^n |x_i^{*d} - x_i^d| \quad (21)$$

$$S_2^d = \max |x_i^{*d} - x_i^d| \quad (22)$$

式中: x_i^{*d} 是第 i 个节点三相功率状态估计值; x_i^d 为第 i 个节点三相功率潮流计算真值; $i = 1, 2, \dots, n$; $d \in (a, b, c)$ 。

根据两指标计算所得功率状态估计误差如表 5 所示, 其中 $S_{1(P)}^d$ 、 $S_{1(Q)}^d$ 分别为有功功率和无功功率的系统估计误差, $S_{2(P)}^d$ 、 $S_{2(Q)}^d$ 分别为有功功率和无功功率的最大估计误差。

表 5 IEEE13 修正系统算例的状态估计误差

Table 5 Estimation errors for modified IEEE 13 node system						
算例	$S_{1(P)}^a$	$S_{1(P)}^b$	$S_{1(P)}^c$	$S_{2(P)}^a$	$S_{2(P)}^b$	$S_{2(P)}^c$
1	0.194	0.114	0.087	0.062	0.049	0.021
2	4.367	4.440	6.851	2.194 ₍₁₂₎	2.170 ₍₁₁₎	1.459 ₍₇₎
算例	$S_{1(Q)}^a$	$S_{1(Q)}^b$	$S_{1(Q)}^c$	$S_{2(Q)}^a$	$S_{2(Q)}^b$	$S_{2(Q)}^c$
1	0.438	0.306	0.223	0.193	0.082	0.061
2	11.855	16.671	18.562	2.372 ₍₁₂₎	6.090 ₍₁₁₎	2.677 ₍₇₎

由表 5 可以发现, 算例 1 估计结果的系统估计误差较算例 2 更小即更接近真值, 算例 2 中由于节点 7、11、12 的量测处理采用了中性点电压为 0 的近似处理, 导致其状态估计结果误差变大,

体现为表 5 中最大估计误差的节点出现在 7、11、12, 而算例 1 并没有此近似处理, 其状态估计误差明显小于算例 2 的估计结果, 因此具有较高的估计精度。

综上所述, 本文所提状态估计模型可以在有效处理三相三线 and 三相四线制量测量的基础上得到较高的估计精度。

4.2.3 状态估计模型收敛性分析

为分析不同零注入处理方式对状态估计收敛性的影响, 本文针对两种零注入的处理方式对算例 1 进行仿真计算, 对比结果如表 6 所示。

1) 采用本文所用方法, 将零注入作为等式约束加入到 BCC 算法的目标函数中。

2) 采用拉格朗日乘子法来处理零注入约束。

表 6 零注入处理方式对状态估计收敛性影响

Table 6 Influence on convergence of state estimation by different treatment ways of zero-injection

处理方式	迭代次数	收敛时间/s
1	6	1.02
2	9	1.37

与处理方式 2 相比, 处理方式 1 编程简单且易于实现, 由表 6 可以看出, 方式 2 由于采用了拉格朗日乘子法处理零注入约束, 所以增加了拉格朗日乘子变量, 量测冗余度相对较低, 导致迭代次数较多, 收敛时间较长, 收敛性较差。仿真结果表明本文方法(方式 1)能够更好地处理零注入约束, 可以在保证严格零注入的基础上获得更好的收敛性。

5 结论

分布式电源的接入以及线路和负荷的不平衡对中低压配电网的状态估计有很重要的影响。本文考虑了实际中低压配电网的不平衡特性以及量测量的特点,建立了一种含分布式电源的中低压配电网状态估计统一模型。算例结果表明该方法可以有效估计出系统中所含分布式电源的出力,且该方法具有如下特点:

1) 综合考虑中低压配电网的特点,引入变压器等值模型,在节点注入电流方程的基础上建立了可处理三相三线制和三相四线制量测量的量测方程,方法适用范围较广并且可获得较高的估计精度;

2) 状态估计过程中采用将零注入约束作为等式约束条件,在满足严格零注入的基础上简化计算过程并提高状态估计的收敛性。

参考文献

- [1] KHODAPARAST J, KHEDERZADEH M. Least square and Kalman based methods for dynamic phasor estimation: a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 1-18. DOI: 10.1186/s41601-016-0032-y.
- [2] 李滨, 杜孟远, 祝云, 等. 基于准实时数据的智能配电网状态估计[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 34-44.
LI Bin, DU Mengyuan, ZHU Yun, et al. A state estimator for smart distribution networks with quasi-real time data[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 34-44.
- [3] 侯雨伸, 白雪峰, 郭志忠. 计及 AMI 的配网分层状态估计及伪量测计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(8): 71-76.
HOU Yushen, BAI Xuefeng, GUO Zhizhong. Layered method for distribution system state estimation and pseudo measurement calculation considering AMI[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(8): 71-76.
- [4] ABDEL-MAJEED A, TENBOHLEN S, SCHOLLHORN D, et al. Development of state estimator for low voltage networks using smart meters measurement data[C] // Power Tech, 2013 IEEE Grenoble Conference, June 16-20, 2013, Grenoble, France: 1-6.
- [5] 张立梅, 唐巍. 计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 123-130.
ZHANG Limei, TANG Wei. Back forward sweep power flow calculation method of distribution networks with DGs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 123-130.
- [6] 王韶, 江卓翰, 朱姜峰, 等. 计及分布式电源接入的配电网状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 82-87.
WANG Shao, JIANG Zhuohan, ZHU Jiangfeng, et al. State estimation of distribution network involving distributed generation[J]. Power System protection and Control, 2013, 41(13): 82-87.
- [7] 李静, 罗雅迪, 赵昆, 等. 考虑大规模风电接入的快速抗差状态估计研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 113-118.
LI Jing, LUO Yadi, ZHAO Kun, et al. Research of fast and robust state estimation considering large-scale wind power integration[J]. Power System protection and Control, 2014, 42(22): 113-118.
- [8] 巨云涛, 林毅, 王晶, 等. 考虑分布式电源详细模型的配电网多相状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 147-152.
JU Yuntao, LIN Yi, WANG Jing, et al. Multi-phase distribution state estimation considering detailed models of distributed generators[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 147-152.
- [9] 卫志农, 陈胜, 孙国强, 等. 含多类型分布式电源的主动配电网分布式三相状态估计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 68-74.
WEI Zhinong, CHEN Sheng, SUN Guoqiang, et al. Distributed three-phase state estimation for active distribution network integrated with different types of distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 68-74.
- [10] 谢仕炜, 胡志坚, 吴方劼, 等. 基于递推最小二乘法的多端口外网静态等值参数辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 26-34.
XIE Shiwei, HU Zhijian, WU Fangjie, et al. Static equivalent parameter identification method of multi-port external network based on recursive least squares algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 26-34.
- [11] 王昕, 田猛, 赵艳峰, 等. 一种基于状态估计的新型窃电方法及对策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 141-146.
WANG Xin, TIAN Meng, ZHAO Yanfeng, et al. A new kind of electricity theft based on state estimation and countermeasure[J]. Power System protection and Control, 2016, 44(23): 141-146.
- [12] 胡春潮, 何杰, 马凯. 基于信息冗余的电力系统分布

- 式状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 111-115.
- HU Chunchao, HE Jie, MA Kai. Power system distributed state estimation based on information redundancy of secondary system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 111-115.
- [13] LIN W M, TENG J H. State estimation for distribution systems with zero-injection constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(1): 518-524.
- [14] 颜伟, 段磊, 杨焕燕, 等. 基于智能电表量测的三相四线制配网抗差估计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 60-67.
- YAN Wei, DUAN Lei, YANG Huanyan, et al. Robust state estimation for three-phase four-wire distribution system using smart meters measurement data[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 60-67.
- [15] GARCIA A, MONTICELLI A, ABREU P. Fast decoupled state estimation and bad data processing[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(5): 1645-1652.
- [16] HOLTEN L, GJELSVIK A, AAM S, et al. Comparison of different methods for state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(4): 1798-1806.
- [17] 杜正春, 牛振勇, 方万良. 基于 QR 分解的一种状态估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 50-55.
- DU Zhengchun, NIU Zhenyong, FANG Wanliang. A block QR based power system state estimation algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 50-55.
- [18] 倪小平, 张步涵. 一种带有等式约束的状态估计新算法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(21): 42-44.
- NI Xiaoping, ZHANG Buhan. New state estimation algorithm with equality constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(21): 42-44.
- [19] 郭焯, 张伯明, 吴文传, 等. 直角坐标下含零注入约束的电力系统状态估计修正牛顿法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 96-100.
- GUO Ye, ZHANG Boming, WU Wenchuan, et al. Power system state estimation solution with zero injection constraints using modified Newton method[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 96-100.
- [20] 刘科研, 何开元, 盛万兴. 基于协同粒子群优化算法的配电网三相不平衡状态估计[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 1026-1031.
- LIU Keyan, HE Kaiyuan, SHENG Wanxing. A cooperative particle swarm optimization based state estimation of unbalanced three-phase distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 1026-1031.
- [21] 闫丽梅, 张士元, 任伟建, 等. 基于粒子群进化算法的电力系统状态估计研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 86-90.
- YAN Limei, ZHANG Shiyuan, REN Weijian, et al. Power system state estimation based on particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 86-90.
- [22] 卢志刚, 程慧琳, 张静, 等. 基于改进离散 BCC 算法的电网开关信息错误辨识[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(12): 55-60.
- LU Zhigang, CHENG Huilin, ZHANG Jing, et al. A method for switch information error identification based on improved discrete bacterial colony chemotaxis algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(12): 55-60.
- [23] 黄锐峰, 李琳. 新的基于相分量的变压器模型及其在统一广义双侧消去法中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 188-193.
- HUANG Ruifeng, LI Lin. A novel phase-coordinate transformer model and its application to uniform generalized double-sided elimination method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 188-193.
- [24] 卢志刚, 隋玉珊, 冯涛, 等. 考虑储热装置与碳捕集设备的风电消纳低碳经济调度[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 41-51.
- LU Zhigang, SUI Yushan, FENG Tao, et al. Wind power accommodation low-carbon economic dispatch considering heat accumulator and carbon capture devices[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 41-51.
- [25] 李碧君, 薛禹胜, 顾锦汶, 等. 基于权函数的电力系统状态估计算法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(8): 32-34.
- LI Bijun, XUE Yusheng, GU Jinwen, et al. Power system state estimation method using weight function[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(8): 32-34.

收稿日期: 2017-09-25; 修回日期: 2017-12-25

作者简介:

怀全(1976—), 男, 高级工程师, 研究方向为电气工程应用自动化; E-mail: 11330114@shenhua.cc

侯小虎(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统配电网状态估计。E-mail: zhglu@ysu.edu.cn

(编辑 魏小丽)