

# 计及新能源时变性的新型配电网聚合电源建模

陈杉桐<sup>1</sup>, 陈谦<sup>1</sup>, 鞠平<sup>1</sup>, 陈巨龙<sup>2</sup>, 张政伟<sup>1</sup>

(1. 河海大学电气与动力工程学院, 江苏省南京市 211100;

2. 贵州电网有限责任公司电网规划研究中心, 贵州省贵阳市 550000)

**摘要:** 电源聚合模型对新型配电网的分析计算仍然至关重要。电力系统传统电源为机理明确、特性相近的发电机, 较易建立等值聚合模型。随着高比例的新能源电源接入配电网, 其时变性与非线性给电源等值建模带来了巨大挑战。首先, 构建了聚合电源的模型结构, 根据负荷小扰动且不考虑短时时变性, 辨识模型的6个参数。其次, 针对新能源电源时变性, 假定模型中传统发电机内电势不变, 利用Taylor公式展开功率平衡方程, 解算与时变性相关的4个模型参数。针对上述4个参数构造欧氏距离, 并据此判断电源侧内部是否发生时变, 若是则继续利用Taylor展开法解算; 若电源侧内部无时变且负荷满足小扰动要求, 则再次对6个模型参数进行辨识, 即适时校正电源侧时变带来的误差积累。后续可按此规则持续延展。最后, 通过算例验证了所提方法的可行性与有效性。采用上述规则即可得到计及时变性的、适用于含高比例新能源配电网相关的持续分析计算的等值电源模型。

**关键词:** 新能源; 新型配电网; 时变性; 等值电源模型; 参数辨识与跟踪; 适时校正

## 0 引言

新能源发电在电网中的容量与渗透率不断提高, 明显改变了配电网的电源特性与网络结构<sup>[1]</sup>。新能源电源天然具有较强的波动性、随机性, 并具有高度自主可控性。高比例新能源电源接入配电网后, 与只计及发电机电源的传统配电网相比, 发生扰动后的响应差异很大。因此, 针对相关的分析计算, 如短路电流计算<sup>[2-3]</sup>、电压稳定分析计算<sup>[4-5]</sup>等, 需建立适合的等值电源模型。

一方面, 新能源电源具有高度自主可控性, 其输出呈现非线性与时变性<sup>[6-7]</sup>, 而发电机电源是线性与时不变的; 另一方面, 发电机电源容量大且选址明确, 而新能源电源容量小且接入分散, 使得电源的构成呈现分散性与复杂性<sup>[8]</sup>。因此, 如何针对新能源电源进行等值建模, 并在计及新能源电源的非线性、时变性与分散性的同时, 又可以与传统发电机聚合模型统一使用, 是未来电源等值建模面临的难题。例如, 当电网发生短路时, 新能源电源需采用限流控制, 使其输出电流呈现明显非线性<sup>[9-11]</sup>, 故新能源电源与传统电源难以确定合适的等值模型结构。又

如, 新能源电源输出功率受一次能源影响很大, 其时变性使新能源电源与传统电源的等值模型参数难以确定。再如, 新能源电源分散接入信息不全, 制约了上述等值建模方法的采用。

综上, 面向传统发电机与新能源电源混合的场景, 计及高比例新能源电源的非线性、时变性、分散性, 构建统一的等值模型具有重要的应用价值与高度的困难性。鉴于相应建模的难度, 本文主要针对时变性问题开展了研究工作, 其成果可用于高比例新能源接入的配电网在小扰动下的相关分析与计算。可预见在未来相当长的时间内, 配电网的电源由新能源发电电源与传统发电机电源共同承担<sup>[12]</sup>。当前电源等值模型中, 并没有充分计及新能源电源输出的时变性<sup>[13-14]</sup>, 而这恰恰是未来新型电网的电源等值建模的关键点。

基于上述分析, 本文研究了一种针对高比例新能源电源时变性的配电网聚合电源模型建模方法。确定了合理的模型结构, 利用负荷侧的小扰动数据对电源模型在无扰动时的参数进行辨识, 而电源侧扰动时采用跟踪算法修正电源侧变化造成的参数偏差, 发生负荷小扰动时进行再次校正。根据上述步骤不断循环解算, 可在线得到相应的模型参数, 并可用于相关的分析计算。

收稿日期: 2023-08-14; 修回日期: 2024-01-26。

上网日期: 2024-03-18。

国家自然科学基金重点项目(51837004)。

## 1 含新能源电源的等值电源模型结构

### 1.1 电源等值建模的多样需求与可行方法

对于传统配电网而言,其戴维南等值模型理论最早可以追溯到20世纪90年代,Ohtsuka K开创性地提出了利用戴维南电路对电源侧进行等值聚合描述的方法<sup>[15]</sup>。近年来,随着相量同步测量单元等技术的发展,利用变电所的就地实测数据而无需系统整体信息就能实时进行戴维南等值,为这一研究领域提供了新的思路<sup>[16]</sup>。

传统配电网的等值模型辨识方法假设在较短的时间内电源侧参数恒定不变,可利用两个相邻时间点的量测数据辨识出戴维南参数。但在相邻时间点内,如果电源侧发生内部波动,辨识结果会出现很大误差<sup>[17]</sup>。文献[18]对测量数据进行预筛选,保证数据是在负荷扰动情况下量测得到的,但这会使数据的利用率大大降低。为解决计算过程中可能出现的参数缓变问题,文献[19]利用全微分方法对电源侧参数进行跟踪计算,从原理上较好地解决了等值电源侧发生内部波动所引起的参数计算不准确问题。进一步,文献[20]在此基础上提出了误差校正方法。相对而言,新能源电源具有更强的时变性,故上述建模方法对后续研究具有重要的参考意义。

另一方面,在对含新能源电源的新型配电网等值建模中,针对不同应用场景,国内外学者也提出了不同的方法,但多数是利用大扰动数据的动态等值方法。文献[21]总结了新型配电网框架下可控负载、分布式发电系统等多种新型负荷元件的模型,并回顾了以测辨法为重点的各种负荷建模方法。文献[22]对含光伏电源的综合负荷进行了戴维南-诺顿式的等效,进而在IEEE 13节点配电网中验证了模型的准确性。对于新能源电源的单独动态等值模型,文献[23]聚焦于风电场的次同步振荡,详细论述了目前风电场动态等值方法在风电并网系统振荡稳定性分析中的优势与不足;而文献[24]则以扰动的时尺度为依据,构建了不同的新能源电源等值模型。利用上述等值方法可以对系统电路甚至控制参数进行建模与辨识,但比较依赖于大扰动,参数较难获取。本文主要考虑在小扰动情况下辨识电源聚合模型的重点时变参数,既能在极小的运算量下得到相对可靠的结果,又能为动态模型提供实时稳态数据,以提高辨识精度。

### 1.2 小扰动下聚合电源模型结构

针对新能源电源,虽然类型与型号具有高度复杂性,但是在周期级至秒级的小扰动情况下,其输出响应具有相似的特性,故本文将各种类型的新能源

电源考虑为一种外特性相似的聚合电源。同时,考虑到负荷电力电子化的影响,可将电源侧的负荷和新能源电源合并处理,即视为与端口电压相关的受控电源。经过上述分析与假设,可建立含高比例新能源电源的配电网聚合电源总体架构,如图1所示。图中: $\dot{I}_s$ 为节点电源侧传统发电电源等值注入电流; $\dot{I}_v$ 为节点电源侧电力电子化电源等值注入电流; $\dot{U}_L$ 为节点电压; $P_L$ 、 $Q_L$ 分别为流往负荷侧的有功功率和无功功率; $\dot{E}_s$ 为戴维南等值电动势; $R_s$ 、 $X_s$ 分别为等值电阻和电抗; $P_v$ 、 $Q_v$ 分别为电力电子电源向负荷提供的有功功率和无功功率。

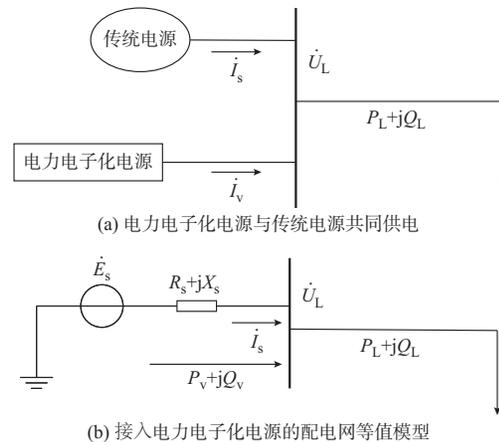


图1 配电网聚合电源总体架构  
Fig. 1 Overall architecture of aggregated generators in distribution networks

由图1(a)可见,对配电网某一等值节点而言,电源侧包含了传统发电电源、电源侧新能源电源、电源侧负荷。因此,流往负荷侧的功率由电源侧的传统发电电源(含远方集中的新能源电源)与配电网分散的新能源电源(含电源侧负荷)共同提供。进一步,可将配电网等值电源架构表示为如图1(b)所示的模型结构。

## 2 参数辨识与跟踪解算

### 2.1 基于粒子群的参数辨识

#### 2.1.1 参数可辨识性分析

对于图1所示的配电网等值模型,首先考虑电源侧不发生短时时变情况下,即电源侧完全稳态时,利用负荷的小扰动测量数据,对戴维南等值电动势的实部、虚部( $E_{s,x}$ 、 $E_{s,y}$ )、 $R_s$ 、 $X_s$ 、 $P_v$ 、 $Q_v$ 进行参数辨识,以明确电源侧的构成。首先,列写电路方程并将实部与虚部分开,记为式(1)与式(2)。

$$\begin{aligned} g_1 &= E_{s,x}U_{L,x} + E_{s,y}U_{L,y} + R_s(P_v - P_L) + \\ &X_s(Q_v - Q_L) - U_L^2 = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$g_2 = -E_{s,x}U_{L,y} + E_{s,y}U_{L,x} + X_s(P_v - P_L) - R_s(Q_v - Q_L) = 0 \quad (2)$$

式中： $U_{L,x}$ 、 $U_{L,y}$ 分别为负荷节点电压的实部、虚部； $U_L$ 为节点电压幅值。

接下来在  $T$  个测量组数内，需要寻找一组参数  $E_{s,x}$ 、 $E_{s,y}$ 、 $R_s$ 、 $X_s$ 、 $P_v$ 、 $Q_v$ ，使式(1)和式(2)在误差允许范围内成立，这是典型的最优化求解问题。在求解前需首先证明这6个参数是唯一可辨识的，分析如下。

由于有6个参数值未知，式(3)所示方程组至少需要3个测点共6组数据才能求解。

$$\begin{cases} g_{1,k}(E_{s,x}, E_{s,y}, R_s, X_s, P_v, Q_v) = 0 \\ g_{2,k}(E_{s,x}, E_{s,y}, R_s, X_s, P_v, Q_v) = 0 \\ g_{1,k+1}(E_{s,x}, E_{s,y}, R_s, X_s, P_v, Q_v) = 0 \\ g_{2,k+1}(E_{s,x}, E_{s,y}, R_s, X_s, P_v, Q_v) = 0 \\ g_{1,k+2}(E_{s,x}, E_{s,y}, R_s, X_s, P_v, Q_v) = 0 \\ g_{2,k+2}(E_{s,x}, E_{s,y}, R_s, X_s, P_v, Q_v) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $g_{1,k}(\bullet)$ 和 $g_{2,k}(\bullet)$ 表示第 $k$ 个测点处成立的功率平衡方程。

先将 $P_v$ 、 $Q_v$ 看成已知参数，显然关于 $E_{s,x}$ 、 $E_{s,y}$ 、 $R_s$ 、 $X_s$ 的方程式(式(3)前4行)是一组线性方程，从中可以解出关于 $P_v$ 、 $Q_v$ 的函数表达式。将函数表达式代入式(3)后2行得到关于 $P_v$ 、 $Q_v$ 的二元二次方程组，解的数目可能为0、1、2个。对于实际可运行的系统显然解存在，通过适当的范围选取可以将实际运行时不可能出现的解排除，则6个待求参数解此处是唯一的。

### 2.1.2 粒子群优化算法辨识参数

根据上述分析，此时参数求解可转换为式(4)所示的最优化问题求解。

$$\begin{cases} h_{\min}(E_{s,x}, E_{s,y}, R_s, X_s, P_v, Q_v) = \sum_{k=1}^T (g_{1,k}^2 + g_{2,k}^2) \\ \text{s.t. } E_{s,\min} < \sqrt{E_{s,x}^2 + E_{s,y}^2} < E_{s,\max} \\ R_{s,\min} < R_s < R_{s,\max} \\ X_{s,\min} < X_s < X_{s,\max} \\ P_{v,\min} < P_v < P_{v,\max} \\ Q_{v,\min} < Q_v < Q_{v,\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中：下标max、min分别表示对应参数的上、下限，本文中均为实际运行过程中可能出现的最大、最小值。

由于式(1)和式(2)是非线性方程，传统线性最小二乘法不再适用。同时，因为相邻测点间的数据变化很小，采用基于迭代策略的数值求解方法可能

会因为雅可比矩阵条件数太大，方程组病态而出现数值不稳定现象。为克服上述问题，本文选择采用启发式算法进行求解。粒子群优化算法具有原理简单、收敛速度快等优点，适合在线跟踪计算。同时，粒子所具有的飞跃性使得算法具有求解全局最优解的能力，具体应用方法如下。

对于粒子群优化算法初值的获取，可以先根据以往计算出的同一时刻典型值作为初值赋值给6个待辨识参数，然后利用粒子群优化算法进行计算。初值计算应当在新能源电源功率输出较为平稳时，根据一次能源运行经验选取。

首先，初始化维度为6的一群随机粒子，粒子的每个维度表示不同的待求参数，粒子的上下限应在合理范围内，每个粒子表示式(4)的一个可行解。所有粒子都有自己的“速度”与“位置”，在求解过程中粒子根据当前整个种群的最优解与自身最优解改变速度与位置。更新公式如式(5)所示。

$$\begin{cases} v_{sd}^{(\tau+1)} = \omega v_{sd}^{(\tau)} + c_1 r_1 (p_{\text{best}} - x_{sd}^{(\tau)}) + c_2 r_2 (g_{\text{best}} - x_{sd}^{(\tau)}) \\ x_{sd}^{(\tau+1)} = x_{sd}^{(\tau)} + \alpha v_{sd}^{(\tau)} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $v_{sd}^{(\tau)}$ 为第 $\tau$ 次迭代时第 $s$ 个粒子第 $d$ 个参数的速度； $x_{sd}^{(\tau)}$ 为第 $\tau$ 次迭代时第 $s$ 个粒子第 $d$ 个参数的位置； $\alpha$ 、 $\omega$ 、 $c_1$ 、 $c_2$ 、 $r_1$ 、 $r_2$ 表示算法的可变参数； $p_{\text{best}}$ 和 $g_{\text{best}}$ 分别为粒子历史最优值和种群最优值。

多次迭代后最终求得的种群最优解即为待求参数值。

## 2.2 参数跟踪解算原理与方法

### 2.2.1 建立递推方程基准式

新能源电源具有时变性，即图1模型中的 $P_v$ 、 $Q_v$ 可能处于缓慢的变化中，这就需要对变化的参数进行实时的跟踪才能明确电源的构成。同时，由于实际电网在运行方式上的缓变， $E_{s,x}$ 、 $E_{s,y}$ 、 $R_s$ 、 $X_s$ 也并非一直不变。

本节首先假设在解算过程中传统电源电动势近似不变，这样的假设并不总是成立，不满足假设情况下所产生的误差修正方案将在2.3节作出详细阐述。进一步，利用Taylor公式将联立的电路方程展开，拓展为一组关于任意两相邻时刻测量值与待求参数值的方程，对方程组求解即得下一时刻参数值。

不同新能源电源的拓扑结构与控制方式虽然各有差异，但在电力系统处于稳态工作的情况下，节点电压近似为额定电压，电力电子电源注入节点功率 $\dot{S}$ ，除以电压 $\dot{U}_L$ 可得到电流源电流 $\dot{I}$ ，即

$$\dot{I}_v = f(\dot{S}_v, \dot{U}_L) = \frac{P_v - jQ_v}{\dot{U}_L} \quad (6)$$

此时,系统等值模型结构如图2所示。

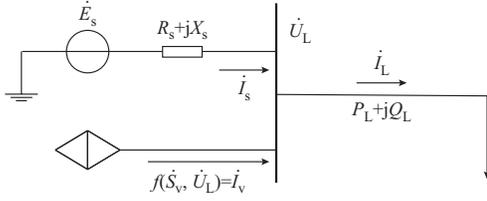


图2 接入电力电子化电源的配电网等值模型  
Fig. 2 Equivalent model of distribution network connected to electronicized generators

图2所示电路列回路方程有:

$$\dot{E}_s - (R_s + jX_s)\dot{I}_s = \dot{U}_L \quad (7)$$

$$\dot{I}_s + \dot{I}_v = \dot{I}_L \quad (8)$$

式中: $\dot{I}_L$ 为负荷电流。

将式(8)代入式(7)中,同时考虑到对负荷节点有式(9)成立:

$$\dot{S}_L = \dot{U}_L \dot{I}_L^* = P_L + jQ_L \quad (9)$$

式中: $\dot{S}_L$ 为负荷的复功率; $\dot{I}_L^*$ 为 $\dot{I}_L$ 的共轭。

将式(9)中复数的实部和虚部分开整理,得到式(10)和式(11)。

$$f_1 = E_{s,x}U_{L,x} + E_{s,y}U_{L,y} - (R_s P_L + X_s Q_L) - U_L^2 + (R_s U_{L,x} + X_s U_{L,y})I_{v,x} - (X_s U_{L,x} - R_s U_{L,y})I_{v,y} = 0 \quad (10)$$

$$f_2 = -E_{s,x}U_{L,y} + E_{s,y}U_{L,x} - (X_s P_L - R_s Q_L) + (R_s U_{L,x} + X_s U_{L,y})I_{v,y} + (X_s U_{L,x} - R_s U_{L,y})I_{v,x} = 0 \quad (11)$$

式中: $I_{v,x}$ 、 $I_{v,y}$ 分别为等效电流源的实部、虚部。

式(10)和式(11)实际上是关于负荷节点的功率平衡方程隐式表达形式,即关于 $P_L$ 与 $Q_L$ 的二阶线性方程组。为方便描述,将各复数分量的实部与虚部用向量形式表示,即

$$\begin{cases} U_L = [U_{L,x}, U_{L,y}] \\ S_L = [P_L, Q_L] \\ Z_s = [R_s, X_s] \\ I_v = [I_{v,x}, I_{v,y}] \end{cases} \quad (12)$$

在任意第 $k$ 个测点(对应测量时刻 $k$ ),功率平衡总是成立。由此可将式(10)与式(11)一般性地描述为:

$$f_1(U_{L,k}, S_{L,k}, Z_{s,k}, I_{v,k}) = 0 \quad (13)$$

$$f_2(U_{L,k}, S_{L,k}, Z_{s,k}, I_{v,k}) = 0 \quad (14)$$

式中:下标 $k$ 表示第 $k$ 个测点对应的值。

式(13)与式(14)即为由等值电路所建立起的递推方程基准式。

## 2.2.2 递推解算流程

进一步,建立后一时刻各参数的函数关系,即利用Taylor公式将式(13)与式(14)在第 $k+1$ 个测点处展开,有

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} f_1(U_{L,k+1}, S_{L,k+1}, Z_{s,k+1}, I_{v,k+1}) \\ f_2(U_{L,k+1}, S_{L,k+1}, Z_{s,k+1}, I_{v,k+1}) \end{bmatrix} = \\ & \begin{bmatrix} f_1(U_{L,k}, S_{L,k}, Z_{s,k}, I_{v,k}) \\ f_2(U_{L,k}, S_{L,k}, Z_{s,k}, I_{v,k}) \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial U_L} \right|_k, \left. \frac{\partial f_1}{\partial S_L} \right|_k, \left. \frac{\partial f_1}{\partial Z_s} \right|_k, \left. \frac{\partial f_1}{\partial I_v} \right|_k \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial U_L} \right|_k, \left. \frac{\partial f_2}{\partial S_L} \right|_k, \left. \frac{\partial f_2}{\partial Z_s} \right|_k, \left. \frac{\partial f_2}{\partial I_v} \right|_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_L \\ \Delta S_L \\ \Delta Z_s \\ \Delta I_v \end{bmatrix} + O(\Delta h^2) \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $\Delta U_L$ 、 $\Delta S_L$ 、 $\Delta Z_s$ 、 $\Delta I_v$ 为对应变量的误差项,具体表达式见式(16); $O(\Delta h^2)$ 为高阶项,其中, $\Delta h^2$ 为泰勒展开余项。

$$\begin{cases} \Delta U_L = U_{L,k+1} - U_{L,k} \\ \Delta S_L = S_{L,k+1} - S_{L,k} \\ \Delta Z_s = Z_{s,k+1} - Z_{s,k} \\ \Delta I_v = I_{v,k+1} - I_{v,k} \end{cases} \quad (16)$$

由于新能源发电功率变化相对缓慢,故对周期级采样而言满足节点两侧功率平衡,即式(15)等号左侧项与右侧第1项都等于0。另外,递推公式的高阶项可以忽略不计,即式(15)中的 $O(\Delta h^2)$ 为0。

利用测量装置可在母线测得 $U_L$ 与 $S_L$ 两个相邻测点的值,而对于待求的系统参数值 $Z_s$ 与 $I_v$ ,只需知道其初值就可按后文介绍的算法由前一测量时刻值递推得到后一测量时刻值,即认为测量时刻 $k$ 的参数值 $Z_{s,k}$ 与 $I_{v,k}$ 是已知的,可递推得出 $Z_{s,k+1}$ 与 $I_{v,k+1}$ 的值。

将式(16)代入式(15)中,整理写成矩阵形式有:

$$\begin{bmatrix} f_3(R_{s,k+1}, X_{s,k+1}, I_{v,x,k+1}, I_{v,y,k+1}) \\ f_4(R_{s,k+1}, X_{s,k+1}, I_{v,x,k+1}, I_{v,y,k+1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ -x_{12} & x_{11} & -x_{14} & x_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{s,k+1} \\ X_{s,k+1} \\ I_{v,x,k+1} \\ I_{v,y,k+1} \end{bmatrix} = 0 \quad (17)$$

$$\begin{cases} x_{11} = -P_{L,k+1} + U_{L,x,k+1}I_{v,x,k+1} + U_{L,y,k+1}I_{v,y,k+1} \\ x_{12} = -Q_{L,k+1} + U_{L,y,k+1}I_{v,x,k+1} - U_{L,x,k+1}I_{v,y,k+1} \\ x_{13} = R_{s,k+1}U_{L,x,k+1} + X_{s,k+1}U_{L,y,k+1} \\ x_{14} = -X_{s,k+1}U_{L,x,k+1} + R_{s,k+1}U_{L,y,k+1} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $f_3(\bullet)$ 和 $f_4(\bullet)$ 表示整理后构成的新方程式。

将测量时刻 $k+1$ 的式(13)、式(14)和式(17)共同组成4阶非线性方程组,如式(19)所示。

$$\begin{cases} f_1(R_{s,k}, X_{s,k}, I_{v,x,k}, I_{v,y,k})=0 \\ f_2(R_{s,k}, X_{s,k}, I_{v,x,k}, I_{v,y,k})=0 \\ f_3(R_{s,k+1}, X_{s,k+1}, I_{v,x,k+1}, I_{v,y,k+1})=0 \\ f_4(R_{s,k+1}, X_{s,k+1}, I_{v,x,k+1}, I_{v,y,k+1})=0 \end{cases} \quad (19)$$

在式(19)中,将相邻两测量时刻的计算值与前一时刻的参数值代入即可求得下一时刻的参数值,2.1节中的初值计算已经获取了初值,从而可以启动整个算法。因为实际需要辨识的是 $k+1$ 时刻电力电子电源注入功率 $P_{k+1}$ 与 $Q_{k+1}$ ,所以最后还应根据式(6)将辨识的 $I_{v,x,k+1}$ 与 $I_{v,y,k+1}$ 还原。

### 2.3 误差校正方法与流程设计

在跟踪计算过程中由于假定戴维南等值电动势不变,长时间的跟踪计算会带来一定的稳态误差积累,对稳态误差进行适时校正可以进一步提升算法的稳定性。误差校正方法实际上与初值计算采用的是相同的步骤,即2.1节所述。首先,应该定义判别式,用以判断电源侧是否发生了内部扰动。

#### 2.3.1 阈值计算判别

当负荷侧的扰动较大且电源侧内部波动(包括戴维南电动势、等值阻抗及电力电子化电源输出功率)较小时,可以近似认为电源侧各参数值不变。首先,定义阻抗波动系数 $\epsilon_s$ 与功率波动系数 $\epsilon_v$ 分别为:

$$\begin{cases} \epsilon_s = \sqrt{(R_{s,k} - R_{s,k+i})^2 + (X_{s,k} - X_{s,k+i})^2} \\ \epsilon_v = \sqrt{(P_{v,k} - P_{v,k+i})^2 + (Q_{v,k} - Q_{v,k+i})^2} \end{cases} \quad (20)$$

两个波动系数的数学意义为:取第 $k$ 个测点为基准测点,并依次计算基准测点处求得的参数值与第 $k+i$ 个测点所求得参数计算值的欧氏距离。显然,如果波动系数偏大,说明这一时段内电源侧波动较大,偏离初始值较远;如果波动系数一直保持较小的数值,说明此时电源侧波动很小。当波动系数在某时间段内均小于一个给定的很小阈值时,可以近似认为各个参数值在这一时间段内不变。即在计算过程中,如果连续 $i$ 个测点均满足判别式(21),且负荷侧发生小扰动,则认为电源侧波动远小于负荷侧扰动,可以对参数值进行重新计算。

$$\begin{cases} \epsilon_v < \epsilon_{v,\max} \\ \epsilon_s < \epsilon_{s,\max} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\epsilon_{v,\max}$ 和 $\epsilon_{s,\max}$ 表示判别阈值。

需要说明的是,虽然波动系数的计算式中未出现戴维南电动势 $\dot{E}_s$ ,但当 $\dot{E}_s$ 发生变化时,会引起其余各参数发生暂态变化,参数变化的大小取决于其对 $\dot{E}_s$ 的灵敏度,所以波动系数可用于刻画电源侧的

波动程度。

#### 2.3.2 误差修正算法流程

误差修正算法的流程为:

步骤1:确定基准测点,假设第 $k$ 个测点为基准测点,并取 $i$ 等于1,置式(21)成立次数 $N_u$ 为0。

步骤2:按照2.1节方法求解第 $k+i$ 个测点处的参数计算值。

步骤3:按照式(20)计算第 $k+i$ 个测点到第 $k$ 个测点参数计算值的波动系数,并判断式(21)是否成立。

步骤4:若式(21)成立, $N_u$ 值加1, $i$ 值加1,并转至步骤2继续执行。

步骤5:若式(21)不成立,假设此时为第 $j$ 个测点。判断 $N_u$ 是否大于预先所设置的负荷发生小扰动情况下的最小测量组数(本文取100组)。若大于,则采用粒子群优化算法计算并重新配置各个参数值,并按照2.2节方法从第 $j$ 个测点开始计算;若不大于,则说明测量数据不足,不能保证粒子群优化算法计算出的参数准确性。令第 $j$ 个测点为新的基准点,并将 $N_u$ 置0, $i$ 值置1。转步骤2继续执行。

需要注意,在粒子群优化算法计算期间,为了参数能实时调用,仍需进行2.2节所述的跟踪计算。这可以在编程中利用并发操作实现。参数递推计算与粒子群优化算法交接的流程如图3所示。

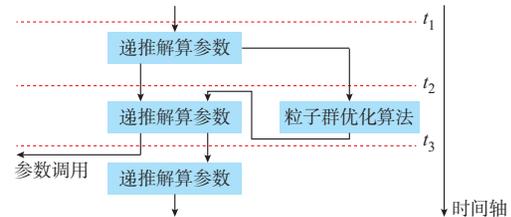


图3 算法交接策略  
Fig. 3 Algorithmic handoff strategy

从 $t_1$ 到 $t_2$ 时段,利用递推解算方法求解参数值。 $t_2$ 时刻满足参数重新计算的条件,在 $t_2$ 到 $t_3$ 时段采用粒子群优化算法进行计算,同时这一时段内仍需递推解算参数以备可能出现的参数调用操作。 $t_3$ 时刻粒子群优化算法计算结束后,实际上得到的是 $t_2$ 时刻的参数值。以粒子群优化算法求得的参数值为初值,从 $t_2$ 时刻重新进行参数递推解算,并将现有的 $t_2$ 到 $t_3$ 时段的参数解算值进行覆盖。综合2.1节与2.2节的参数解算方法,总体流程见图4。

## 3 算例与仿真

在PSCAD/EMTDC平台上搭建了如图5所示的6节点配电网,含两个传统电源供电,节点3和5

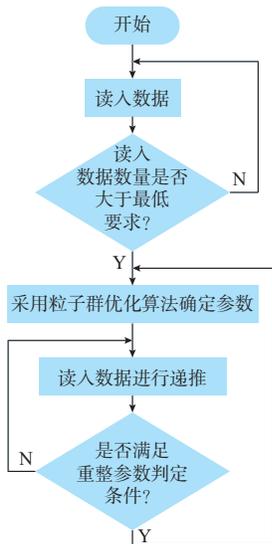


图4 算法总体流程图  
Fig. 4 Overall flow chart of algorithm

接入了光伏电源。在节点6母线处对其左侧系统进行等值建模,图5中虚线框部分为等值电源,虚线框右侧为负荷。在仿真过程中,光伏电源1的出力保持额定值不变,光伏电源2的出力随设置的光照强度的变化而改变。

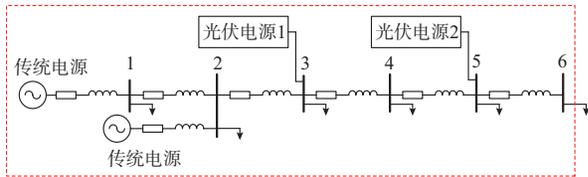


图5 6节点配电系统  
Fig. 5 6-bus power distribution system

仅存在负荷小扰动时,对电源侧参数进行粒子群优化算法辨识,耗时0.712 s,辨识参数与手动计算得到的参考值对比如表1所示。

表1 粒子群优化算法辨识值与参考值的对比  
Table 1 Comparison between identification values and reference values of particle swarm optimization algorithm

类型	$E_{s,x}/p.u.$	$E_{s,y}/p.u.$	$R_s/p.u.$	$X_s/p.u.$	$P_v/p.u.$	$Q_v/p.u.$
辨识值	1.078	0.312	0.814	0.585	0.405	0.127
参考值	1.080	0.315	0.824	0.580	0.400	0.122

在粒子群优化算法获取初值后,分别考虑以下3种情况以验证时变性下参数递推解算方法:

1)仅存在负荷侧扰动。负荷侧无功负荷增长0.3 p.u.,用以模拟新能源出力较平稳、内部拓扑结构近似不变、输电网侧等值电压近似不变的情况。由附录A图A1可知,此时的拟合效果较好,计算值与仿真值几乎相等。

2)仅存在电源侧波动。设置光伏电源输出从1.0 p.u.以斜坡形式逐步提升至1.4 p.u.,用以模拟实际天气变化导致新能源电源出力发生变化,负荷侧负荷有功功率与无功功率近似不变的情况。由附录A图A2所示的拟合结果可见,光伏出力与初始值偏差越大,拟合误差也越大,但总体趋势是相同的,且稳态偏差收敛。

3)同时存在电源侧波动与负荷侧扰动。设置负荷侧无功负荷增长0.3 p.u.,同时设置光伏电源的出力在1 s之内从1.0 p.u.以斜坡形式逐步提升至1.4 p.u.由附录A图A3所示的拟合结果可见,光伏出力与初始值偏差越大,拟合误差也越大,但总体趋势是相同的,且稳态偏差收敛。

4)进一步考虑功率倒送的情况。设置光伏电源输出从1.0 p.u.以斜坡形式逐步提升至2.0 p.u.,输送有功功率到传统电源,用以模拟可能出现新能源发电比例高于传统电源发电比例的情况。由附录A图A4所示的拟合结果可见,在功率倒送的情况下,本文所提的方法也能进行跟踪计算。

进一步考虑当解算过程不符合假设前提,即电动势在短时间内有较大变化时,算法所产生的误差以及相应阈值判别与粒子群优化算法重新计算参数。设置戴维南等值电压源在0.5 s内下降了0.055 p.u.。由附录A图A5所示的拟合结果可见,电动势在有较大变化时会对拟合效果产生很大影响。参数计算值与输出仿真值总体趋势相反,稳态误差相差较大。可见,电动势的变化会对参数解算结果产生较大误差。

附录A图A6所示为最大欧氏距离 $\epsilon_v, \epsilon_s$ 在计算过程中的变化情况,阈值设置为0.008 0、0.007 5。在0~0.5 s内,由于电动势变化导致电力电子电源有功输出发生变化, $\epsilon_v$ 超出阈值。在0.5~1.9 s内,设置仅存在负荷侧扰动,电源侧模型参数变化很小, $\epsilon_v$ 与 $\epsilon_s$ 均在阈值以内,并在2.0 s超出阈值,测量组数超过设定的最小测量组数(设定为100组),利用粒子群优化算法重新计算参数。

粒子群优化算法计算参数用时0.667 s,在此期间参数仍采用修正之前的数值。附录A图A7所示为粒子群优化算法的收敛曲线。由附录A图A8所示的拟合结果可见,计及电动势波动而重新计算参数值后(图中2.0 s以后),电力电子电源输出有功功率的仿真值与拟合值之间的误差得到了修正,确保了总体算法的精度。

最后,为了考察长时间尺度下本文所提算法的准确性与稳定性,研究了总时长为10.5 s的仿真算例,有功功率与等值阻抗的对比如图6所示。各时

段内的电源波动与负荷扰动设置如下:

时段1:0~0.5 s,仅存在负荷侧扰动,负荷侧负荷增长0.3 p.u.

时段2:0.5~4.5 s,仅存在电源侧波动,设置光照强度在4 s之内以正弦形式迅速下降又迅速提升0.2 p.u.,用以模拟实际天气变化导致新能源电源输出功率的波动性。

时段3:4.5~8.5 s,同时存在电源侧波动与负荷侧扰动,设置光照强度在4 s之内迅速下降又迅速提升0.1 p.u.,同时负荷侧负荷增长0.1 p.u.

时段4:8.5~9.0 s,同时存在电源侧波动与负荷侧扰动,输电网侧等效电压源在0.5 s内变化0.055 p.u.,且外部系统的负荷增长-0.3 p.u.

时段5:9~10 s,仅存在负荷侧扰动,负荷增长0.2 p.u.。此时段内,仿真值与计算值存在较大误差,但误差是有限的。

时段6:10.0~12.5 s,同时存在电源侧波动与负荷侧扰动。设置光照强度以斜坡形式上升,此时段引入了观察误差校正环节。实际拟合效果表明,计算值重新跟踪上了仿真值,且为了模拟功率倒送,电力电子电源有功输出一直上升,直到传统电源输出有功功率为负。由图6可知,本文所提算法仍然能跟踪上仿真值。

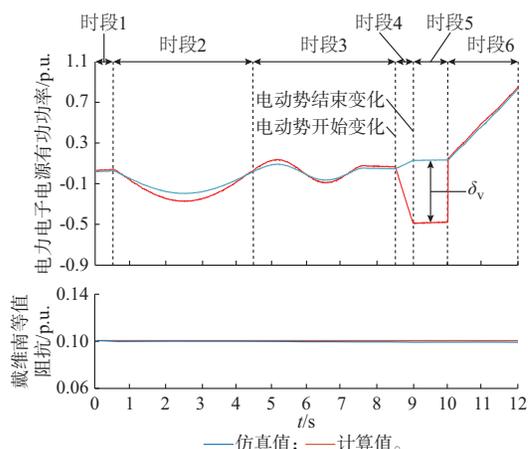


图6 仿真值与计算值对比

Fig. 6 Comparison of simulated and calculated values

对于等值阻抗,由于上述变化均不涉及网络拓扑结构及接线方式的改变,故等值阻抗理论值保持恒定,参数解算值基本恒定较好地说明了这一点。因此,本文所提算法具有较好的适用性。

#### 4 结语

本文建立了一种针对电源侧高比例新能源接入的配电网电源聚合模型,推导了模型的参数辨识方法,并设计了参数辨识流程。在实际工程中,利用变

电所馈线实测数据可以准确地求解该并网点等效电源模型的关键参数、含戴维南等值电动势、等值阻抗以及所含新能源电源的总体出力。

采用本文所提方法,在未来的新型电力系统中可以在线监视电源的时变性,有助于系统的机理性分析,结合电源侧各部分的动态分析后可用于短路电流的扫描计算。该方法具有计算速度快、可以实时跟踪等优点,具有较广阔的应用前景。但目前本文所用方法还存在如下不足之处:本文假设传统电机电源等值电动势不变,对于该假设产生的误差用粒子群优化算法进行适时校正,但在实际运行过程中,等值电动势的值是缓变的,这可能会对跟踪计算造成较大的累积误差。在后续研究中,应考虑将等值电动势变化也纳入跟踪计算中。

下一步,考虑结合本文所提出的稳态模型参数辨识方法与含新能源电源的配电网动态模型分析,即将实时的参数纳入动态等值的考虑范畴,以更好地应对新能源电源的时变性。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

#### 参考文献

- [1] 谢小荣,贺静波,毛航银,等.“双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J].中国电机工程学报,2021,41(2):461-475.  
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475.
- [2] 王守相,宋丽可,舒欣.分布式电源与多元负荷高渗透接入的主动配电网自适应过流保护方案[J].高电压技术,2019,45(6):1783-1794.  
WANG Shouxiang, SONG Like, SHU Xin. Adaptive overcurrent protection of active distribution network with high penetration of distributed generations and multiple loads[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1783-1794.
- [3] 晁晨翔,郑晓冬,高飘,等.含高比例光伏配电网的高频阻抗差动保护[J].中国电机工程学报,2021,41(20):6968-6978.  
CHAO Chenxu, ZHENG Xiaodong, GAO Piao, et al. High frequency impedance differential protection with high proportion of photovoltaic power distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 6968-6978.
- [4] 吴倩红,韩蓓,李国杰,等.极高光伏渗透率下基于潮流雅可比矩阵和卷积神经网络的静态电压稳定在线预测[J].中国电机工程学报,2021,41(12):4058-4067.  
WU Qianhong, HAN Bei, LI Guojie, et al. Power flow Jacobian matrix based static voltage stability forecast by CNN considering extremely high PV penetration[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4058-4067.
- [5] YAN R F, SAHA T K. Investigation of voltage stability for

- residential customers due to high photovoltaic penetrations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 651-662.
- [6] 葛平娟,肖凡,涂春鸣,等.考虑故障限流的下垂控制型逆变器暂态控制策略[J].电工技术学报,2022,37(14):3676-3687.  
GE Pingjuan, XIAO Fan, TU Chunming, et al. Transient control strategy of droop-controlled inverter considering fault current limitation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(14): 3676-3687.
- [7] 陈忠玉,徐晋,汪可友,等.计及跟随型和支撑型分布式光伏的广义综合负荷模型及两阶段参数聚合等效方法[J].电力自动化设备,2023,43(3):86-93.  
CHEN Zhongyu, XU Jin, WANG Keyou, et al. Generalized composite load model and two-stage parameter aggregation and equivalent method considering grid-following and grid-forming distributed photovoltaic [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(3): 86-93.
- [8] 王强强,姚良忠,盛万兴,等.基于机会约束规划的配电网分布式光伏承载力提升方法[J].电力系统自动化,2023,47(18):132-141.  
WANG Qiangqiang, YAO Liangzhong, SHENG Wanxing, et al. Enhancement method for distributed photovoltaic hosting capacity of distribution network based on chance-constrained programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 132-141.
- [9] 王晨晨,陈谦,邓晓璐,等.逆变器电源短路输出电流的等效机理模型[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(3):20-27.  
WANG Chensheng, CHEN Qian, DENG Xiaolu, et al. Equivalent mechanism model for short-circuit output current of inverter power supply [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(3): 20-27.
- [10] 吴成国,肖仕武,朱健.含负序电压支撑分布式电源的电网分区短路电流计算方法[J].电网技术,2023,47(3):329-339.  
WU Chengguo, XIAO Shiwu, ZHU Jian. Calculation method of power grid partition short-circuit current with negative sequence voltage supported distributed generation [J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 329-339.
- [11] 彭星,姜飞,涂春鸣,等.不对称故障下光伏逆变器的最优电压支撑策略[J].电网技术,2021,45(11):4259-4268.  
PENG Xing, JIANG Fei, TU Chunming, et al. Optimal voltage support strategy for photovoltaic inverters under asymmetric faults [J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4259-4268.
- [12] 唐巍,张起铭,张璐,等.新型配电系统多层级交直流互联理念、关键技术与发展方向[J].电力系统自动化,2023,47(6):2-17.  
TANG Wei, ZHANG Qiming, ZHANG Lu, et al. Concept, key technologies and development direction of multilevel AC/DC interconnection in new distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 2-17.
- [13] 李文立.含分布式电源配电网的故障特性分析与保护方案研究[D].北京:北京交通大学,2018.  
LI Wenli. The analysis of fault characteristics and protection scheme in distribution network with distributed generation [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [14] 冯爱成,王宝华,单馨.含光伏电源配电网的自适应距离保护[J].电力系统保护与控制,2018,46(16):141-147.  
FENG Aicheng, WANG Baohua, SHAN Xin. Photovoltaic power distribution network in adaptive distance protection [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 141-147.
- [15] OHTSUKA K, YOKOKAWA S, TANAKA H, et al. An equivalent of multi-machine power systems and its identification for on-line application to decentralized stabilizers [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(2): 687-693.
- [16] 罗建,徐馨,杨桦,等.微小扰动状况下的戴维南等值参数辨识方法[J].中国电机工程学报,2014,34(增刊1):61-66.  
LUO Jian, XU Xin, YANG Hua, et al. Identification method of Thevenin equivalent parameters under small disturbance [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(S1): 61-66.
- [17] 李卓艺,刘俊勇,刘友波,等.系统持续扰动下的电力系统戴维南等值参数在线识别[J].中国电机工程学报,2015,35(8):1900-1908.  
LI Zhuoyi, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. An on-line parameter identification of thevenin equivalent circuit for power systems with persistent disturbance [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 1900-1908.
- [18] 李来福,于继来,柳焯.戴维南等值跟踪的参数漂移问题研究[J].中国电机工程学报,2005,25(20):1-5.  
LI Laifu, YU Jilai, LIU Zhuo. Research on parameters drift problem in tracking thevenin equivalent [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 1-5.
- [19] 汤涌,孙华东,易俊,等.基于全微分的戴维南等值参数跟踪算法[J].中国电机工程学报,2009,29(13):48-53.  
TANG Yong, SUN Huadong, YI Jun, et al. Tracing algorithm for Thevenin equivalent parameters based on complete differential equation [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 48-53.
- [20] 李东东,尹睿,杨银台,等.考虑系统内部扰动的戴维南等值参数跟踪方法[J].电网技术,2017,41(8):2528-2536.  
LI Dongdong, YIN Rui, YANG Yintai, et al. Online tracking of Thevenin parameters considering system side changes [J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2528-2536.
- [21] 董坤,赵剑锋,孙睿晨,等.含新型负荷元件的电力负荷建模方法研究现状与展望[J].电力系统自动化,2023,47(23):70-83.  
DONG Kun, ZHAO Jianfeng, SUN Ruichen, et al. Research status and prospects of modeling methods for power loads with new load elements [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(23): 70-83.
- [22] 黑晨阳,关远鹏,谢运祥,等.基于戴维南-诺顿等效的含分布式光伏发电系统的配电网仿真分析[J].电力自动化设备,2017,37(10):71-78.  
HEI Chenyang, GUAN Yuanpeng, XIE Yunxiang, et al. Simulation analysis of distribution network with distributed photovoltaic generation system based on Thevenin-Norton equivalence [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 71-78.
- [23] 董文凯,任必兴,王海风,等.适用于系统次同步振荡分析的风电场等值建模方法综述[J].电力工程技术,2022,41(4):33-43.  
DONG Wenkai, REN Bixing, WANG Haifeng, et al. Small-signal equivalent modeling methods of the wind farm and its application in sub-synchronous oscillations analysis of grid-

connected wind power systems[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 33-43.

- [24] HE X Q, GENG H, YANG G. Dynamic equivalent modeling of wind power plants for various timescale small signal stability analyses[C]// 2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), August 4-8, 2019, Atlanta, USA: 1-5.

陈杉桐(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力系统的广义负荷建模与分析。E-mail:1061525824@qq.com

陈 谦(1972—),男,通信作者,博士,教授,主要研究方向:电力电子化电力系统建模与分析。E-mail:qchen@hhu.edu.cn

鞠 平(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:新能源电力系统建模、分析与控制等。E-mail:pju@hhu.edu.cn

(编辑 鲁尔姣)

## Modeling of Aggregated Generators for New Distribution Network Considering Time-varying Characteristic of Renewable Energy

CHEN Shantong<sup>1</sup>, CHEN Qian<sup>1</sup>, JU Ping<sup>1</sup>, CHEN Julong<sup>2</sup>, ZHANG Zhengwei<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Power Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Power Grid Planning & Research Center of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550000, China)

**Abstract:** Power aggregation model remains crucial for the analysis and calculation of new distribution networks. Traditional power sources in the power system are generators with clear mechanisms and similar characteristics, making it easier to establish equivalent aggregation models. As a high proportion of renewable energy sources are connected to the distribution network, their time-varying and non-linear characteristics pose a huge challenge to the equivalent modeling of power sources. First, the model structure of the aggregated generator is constructed, and six parameters of the model are identified based on small disturbances of loads without considering the short-term time-varying characteristic. Then, aiming at the time-varying characteristic of renewable energy sources, assuming that the internal voltage of the traditional generator in the model remains unchanged, the Taylor formula is used to expand the power balance equation and solve the four model parameters related to the time-varying characteristic. Euclidean distance for the above four parameters is constructed and the distance is used to determine whether there is time-varying characteristic inside the power source. If so, the Taylor expansion method will continue to be used for solving. If there is no time-varying characteristic inside the power source and the load meets the small disturbance requirements, six model parameters will be identified again, which can timely correct the error accumulation caused by the time-varying characteristic on the generator side. Subsequent extensions can be continued according to this rule. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed method are verified through numerical cases. By using the above rules, an equivalent power source model can be obtained, which takes into account time-varying characteristic and is suitable for continuous analysis and calculation of high proportion of renewable energy connected to distribution networks.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51837004).

**Key words:** renewable energy; new distribution network; time-varying characteristic; equivalent power source model; parameter identification and tracking; just-in-time correction

