

基于辅助因子两步求解算法的 孤岛微电网潮流计算

林立亨¹, 董树锋¹, 朱承治², 唐坤杰¹, 宋永华^{1,3}

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027;

2. 国网浙江省电力公司, 浙江省 杭州市 310007;

3. 智慧城市物联网国家重点实验室(澳门大学 电机及电脑工程系), 澳门特别行政区 999078)

Power Flow Calculation of Island Micro-grid Based on Auxiliary Factors Two-step Algorithm

LIN Liheng¹, DONG Shufeng¹, ZHU Chengzhi², TANG Kunjie¹, SONG Yonghua^{1,3}

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, Zhejiang Province, China;

3. State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City(Department of Electrical and Computer Engineering, University of Macau), Macau SAR 999078, China)

ABSTRACT: In islanded micro-grids with droop control, the system voltages and frequency are regulated by the droop nodes, so that the traditional power flow calculation is no longer applicable. Aiming at the characteristics of active power-frequency/reactive-voltage droop control strategy in islanded micro-grids, this paper constructed the power flow calculation model of islanded micro-grids and proposed an auxiliary factors two-step solution algorithm to solve the problem. The algorithm introduced two auxiliary factors, transforming the original power flow equation into a set of over-determined equations, a set of underdetermined equations and a set of functions between auxiliary factors, and iteratively solved them in two steps. In the first step, based on the transformed equation a least-squares problem was constructed to find a linearization point that was closer to the final solution than the current iteration values, so as to improve the robustness of the algorithm to the initial value. In the second step, the next iteration step variable values were directly solved to reduce the computational complexity. The comparison analysis of a large 115-nodes micro-grid case shows that the proposed algorithm has fast convergence and strong robustness.

KEY WORDS: islanded micro-grid; power flow; auxiliary factors two-step algorithm; droop control

摘要: 在下垂控制的孤岛微电网中, 由下垂节点对系统电压

和频率进行调控, 导致传统的潮流计算方法通常不适用于孤岛微电网。针对孤岛微电网常用有功-频率/无功-电压下垂控制策略, 构建了孤岛微电网潮流计算模型, 并提出辅助因子两步求解算法进行求解。该算法引入两个辅助因子, 把原潮流方程转化为一组超定方程、一组欠定方程与一组辅助因子间的关系函数, 分两步进行迭代求解。第一步基于变换后的方程, 构造一个最小二乘问题来寻找比当前迭代值更接近真实解的线性化点, 以提高算法对初值的鲁棒性; 第二步直接解出下一迭代步变量值以减少计算量。通过大型微电网115节点算例的对比分析, 验证了该算法具有收敛速度快、鲁棒性强的特点。

关键词: 孤岛微电网; 潮流计算; 辅助因子两步求解算法; 下垂控制

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1942

0 引言

微电网作为整合分布式电源(DG)、负荷和储能的可控系统, 在日常运行中有并网和孤岛两种运行模式^[1-3]。并网运行时, 微电网与常规电网联网运行, 向电网提供多余电力或由电网补充自身发电不足; 孤岛运行时, 与常规电网脱离, 由自身的发电单元和储能元件提供电能。孤岛模式下, 微电网的控制策略主要有主从和对等2种。主从模式下, 一个主控DG工作在电压模式, 给微电网提供基准的电压和频率, 但这种控制模式对主控DG的容量以及系统内的通信都有极高的要求, 降低了网络的可靠

基金项目: 国家电网公司科技项目(52110418000N)。

Project Supported by Project of Science and Technology of SGCC (52110418000N).

性^[4-7]。对等模式下，每个 DG 都根据接入系统点电压和频率的就地信息进行控制，无需借助于通信，完成“对等”和“即插即用”^[8-9]。

微电网潮流计算作为微电网稳定分析、优化配置的基础，是一个重要的研究领域。并网运行的微电网存在一个根节点，其潮流计算与配电网潮流计算相似。而孤岛运行的微电网在对等控制下，系统内不存在平衡节点，且存在下垂控制的 DG，需对系统频率进行求解，故传统的潮流计算方法不再适用。为研究这一问题，文献[10]把 DG 节点分类处理为 PQ、PV 和下垂节点，利用 Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS)信赖域算法进行计算；文献[11]建立了孤岛微电网三相潮流计算模型，并用牛顿信赖域法进行求解。上述 2 篇文献采用的信赖域方法具有良好的收敛性，但参数过多，调参复杂。文献[12]使用结合信赖域技术的 Levenberg-Marquardt(LM)算法；文献[13]提出一种改进的三步 LM 算法对潮流进行求解。这些基于 LM 算法的孤岛微电网潮流计算方法收敛域广，但同样存在参数过多、调参复杂的问题^[12-15]。文献[16]提出一种基于牛顿法的微电网潮流计算方法，文献[17]提出一种类奔德斯分解的潮流计算方法。上述 2 篇文献把原问题分为潮流计算和电压频率更新 2 个子问题，方法简单，但收敛速度较慢。文献[18]对传统高斯赛德尔法做出改进，用于计算微电网潮流，该方法对初值敏感度较低，但同样存在收敛速度较慢的问题。

辅助因子 2 步求解算法是学者 Antonio 提出的一种用于求解非线性方程的算法^[19]，文献[19]从数学上详细分析了该算法的收敛性并进行了测试，指出该算法在收敛次数上相比牛拉法更具优势。文献[20]在输电网潮流中测试了该算法，发现该算法鲁棒性强，具有较好的抗病态能力；文献[21]将该算法用于求解电网电压崩溃点，同样取得了良好的效果。孤岛微电网线路阻抗比较高，潮流计算中牛拉法容易出现不收敛、雅克比矩阵奇异等问题^[10]，而辅助因子两步求解算法具有鲁棒性强的特点，一定程度上可以弥补牛拉法的不足。

鉴于以上分析，本文提出基于辅助因子 2 步求解算法的孤岛微电网潮流算法。该算法针对孤岛微电网中具有下垂控制 DG 与系统频率变化的特点，引入 2 个辅助因子，将原非线性潮流方程分解为一组欠定线性方程、一组超定线性方程与一组辅助向量间的关系函数，分 2 步对变换后的方程进行迭代求解。通过对一大型 115 节点孤岛微电网进行潮流计算，对比验证了本文所提出的算法具有收敛速度

快，鲁棒性强的特点。

1 孤岛微电网潮流计算模型

在微电网孤岛运行的条件下，对其中 PQ 节点、PV 节点和下垂节点建立节点功率方程。

1.1 PQ 节点功率方程

PQ 节点的节点功率方程为

$$f_{PQ,i}^P = P_{Gi} - P_{Li} - P_i = 0, \quad i \in S_{PQ} \quad (1)$$

$$f_{PQ,i}^Q = Q_{Gi} - Q_{Li} - Q_i = 0, \quad i \in S_{PQ} \quad (2)$$

式中： $f_{PQ,i}^P$ 、 $f_{PQ,i}^Q$ 为 PQ 节点 i 的功率方程； P_{Gi} 、 Q_{Gi} 为节点 i 上 DG 输出的有功、无功功率，若节点 i 没有 DG 则为 0； P_{Li} 、 Q_{Li} 为节点 i 上负荷的有功、无功功率，其值随频率与节点电压变化，具体公式参照文献[13，22]，本文在此不再列出； P_i 、 Q_i 为节点 i 注入的有功、无功功率； S_{PQ} 为 PQ 节点的集合。

1.2 PV 节点功率方程

PV 节点的节点功率方程为

$$f_{PV,i}^P = P_{Gi} - P_{Li} - P_i = 0, \quad i \in S_{PV} \quad (3)$$

式中： $f_{PV,i}^P$ 为 PV 节点 i 的功率方程； S_{PV} 为 PV 节点的集合。

1.3 下垂节点功率方程

下垂节点利用下垂控制模拟传统电力系统中的有功-频率和无功-电压曲线，实现频率、电压和 DG 输出有功、无功的自主调节。本文采取 P - f / Q - U 的控制策略^[23]控制系统频率、电压和 DG 有功、无功输出，其下垂控制特性可由下式表示^[10]

$$\begin{cases} P_{Gi} = \frac{1}{m_{Pi}} (\omega_{0i} - \omega) \\ Q_{Gi} = \frac{1}{n_{Qi}} (U_{0i} - U_i) \end{cases} \quad (4)$$

式中： P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为下垂节点 i 实际输出的有功、无功功率； m_{Pi} 、 n_{Qi} 为下垂节点有功、无功功率控制系数； ω_{0i} 和 U_{0i} 为下垂节点 i 空载时的角频率和节点电压幅值； ω 为微电网运行的实际角频率； U_i 为下垂节点 i 实际的节点电压幅值。

结合式(4)，下垂节点功率方程为

$$f_{D,i}^P = \frac{1}{m_{Pi}} (\omega_0 - \omega) - P_{Li} - P_i = 0, \quad i \in S_D \quad (5)$$

$$f_{D,i}^Q = \frac{1}{n_{Qi}} (U_0 - U_i) - Q_{Li} - Q_i = 0, \quad i \in S_D \quad (6)$$

式中： $f_{D,i}^P$ 、 $f_{D,i}^Q$ 为下垂节点 i 的功率方程； S_D 为下垂节点的集合。

1.4 潮流方程

具体地,式(1)~(6)中,节点注入功率可表示为

$$P_i = \sum_{j=1}^n U_i U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (7)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n U_i U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (8)$$

式中: G_{ij} 、 B_{ij} 为支路 $i-j$ 的导纳; $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ 为节点 i 、 j 的电压相角差。

综合以上 PQ 节点、PV 节点和下垂节点的节点功率方程,潮流方程可抽象表示为

$$h(x) = 0 \quad (9)$$

设系统中共有 n 个节点,其中有 n_{PQ} 个 PQ 节点、 n_{PV} 个 PV 节点和 n_D 个下垂节点。每个 PQ 节点与下垂节点均对应 2 条潮流方程,每个 PV 节点对应一条潮流方程,则可推出式(9)中有 $2n_{PQ} + n_{PV} + 2n_D = n + n_{PQ} + n_D$ 个方程。其中,未知变量有系统角频率 ω 、节点相角 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ 、PQ 节点和下垂节点电压 $U_1, U_2, \dots, U_{n-PV}$, 选取任意 PQ 节点相角为系统参考角度,为下文说明方便,现选取节点 1 的相角为系统参考角度, $\delta_1=0$ 。则式(9)为一个含有 $1+(n-1)+(n_{PQ}+n_D)=n+n_{PQ}+n_D$ 个未知变量的 $n+n_{PQ}+n_D$ 维方程,需要选用适合的方法进行求解。

2 辅助因子两步求解算法

由式(9)可知,孤岛微电网潮流计算本质上是求解一组非线性方程。目前,求解非线性方程最常用的方法是牛顿拉夫逊法。但牛顿法对初值敏感,初值选取不当容易造成牛顿法不收敛,且在求解过程中若雅克比矩阵奇异,牛顿法将无法求解。因此,本文提出一种引入辅助因子、两步求解方程的算法。

2.1 基本形式

将式(9)改写为如下形式

$$h_1(x) = p \quad (10)$$

式中:

$$p = [P_{G1}, \dots, P_{Gn_{PQ}}, P_{G1}, \dots, P_{Gn_{PV}}, \frac{\omega_0}{m_{P1}}, \dots, \frac{\omega_0}{m_{Pn_D}}, Q_{G1}, \dots, Q_{Gn_{PQ}}, \frac{U_{01}}{n_{Q1}}, \dots, \frac{U_{0i}}{n_{Qn_D}}, U_1, \dots, U_{n_{PV}}]^T \quad (11)$$

$$x = [\delta_2, \dots, \delta_n, U_1, \dots, U_n, \omega]^T \quad (12)$$

p 为潮流方程中常数移项后组成的向量,其中第 $1 \sim n_{PQ}$ 项为 PQ 有功平衡式(1)中发电机有功出力 $P_{Gi,PQ}$; 第 $n_{PQ}+1 \sim n_{PQ}+n_{PV}$ 项为 PV 有功平衡式(3)中发电机有功出力 $P_{Gi,PV}$; 第 $n_{PQ}+n_{PV}+1 \sim n$ 项为下垂节点有功平衡式(5)中常数 (ω_0/m_{Pi}) ; 第 $n+1 \sim n+n_{PQ}$ 项为 PQ 节点无功平衡式(2)中发电机无功出力 $Q_{Gi,PQ}$; 第

$n+n_{PQ}+1 \sim n+n_{PQ}+n_D$ 项为下垂节点无功平衡式(6)中的常数 (U_0/n_{Qi}) ; 第 $2n-n_{PV} \sim 2n$ 项为 PV 节点电压幅值。虽然 PV 节点电压幅值 $U_1, \dots, U_{n_{PV}}$ 已知,但为后续方程变形方便,需要在未知变量 x 中引入 PV 节点电压幅值。为保持方程数量与未知数数量相等,故在 p 中同样保留 PV 节点电压幅值,使 p 与 x 均为 $2n$ 维向量。

2.2 引入辅助因子

为了引入辅助因子与后续方程变形方便,需要对向量 p 与 x 中部分元素进行替换。对于向量 p ,将其中电压项由其平方形式代替

$$p = [P_{G1}, \dots, P_{Gn_{PQ}}, P_{G1}, \dots, P_{Gn_{PV}}, \frac{\omega_0}{m_{P1}}, \dots, \frac{\omega_0}{m_{Pn_D}}, Q_{G1}, \dots, Q_{Gn_{PQ}}, \frac{U_{01}}{n_{Q1}}, \dots, \frac{U_{0i}}{n_{Qn_D}}, V_1, \dots, V_{n_{PV}}]^T \quad (13)$$

式中 $V_i = U_i^2$ 。

对于向量 x ,将其中电压项与系统频率由对数形式代替

$$x = [\delta_2, \dots, \delta_n, a_1, \dots, a_n, w]^T \quad (14)$$

式中: $a_i = \ln V_i = 2 \ln U_i$, $w = \ln \omega$ 。

将 p 与 x 替换后的潮流方程记作

$$h_2(x) = p \quad (15)$$

现引入辅助因子 y , y 由潮流方程(15)中所有的非线性项构成,目的在于将非线性潮流方程(15)线性化,具体表示如下

$$y = [V, K, L, U^\alpha, U^\alpha \omega, U^\beta, U^\beta \omega, U_D, \omega]^T \quad (16)$$

式中: $V=[V_1, V_2, \dots, V_{n-1}, V_n]$; 向量 K 为 b 维向量(b 为系统中支路数),其中每一项对应系统中一条支路,例如支路 $i-j$,其对应项表示为 $U_i U_j \cos \delta_{ij}$; 向量 L 与向量 K 相似,同样为 b 维向量,每一项对应系统中一条支路,例如支路 $i-j$,其对应项表示为 $U_i U_j \sin \delta_{ij}$; $U=[U_1, U_2, \dots, U_{n-1}, U_n]$; α, β 为负荷模型中有功、无功负荷指数^[24],故 $[U^\alpha, U^\alpha \omega, U^\beta, U^\beta \omega]$ 为一 $4n$ 维向量; $U_D=[U_{D1}, U_{D2}, \dots, U_{D(n-1)}, U_{Dn}]$ 为下垂节点电压幅值,共有 n_D 项。综上可知,辅助因子 y 维数 $m=n+2b+4n+n_D+1=5n+2b+n_D+1$ 。

y 与方程未知量 x 之间关系较为复杂,直接求其雅克比矩阵会对求解速度造成影响。故引入辅助因子 u , u 由 x 线性变化得到,在选取时尽量与 y 中元素一一对应,可以提高计算效率,具体表示如下

$$u = [A, S, T, \alpha \frac{A}{2}, \alpha \frac{A}{2} + W, \beta \frac{A}{2}, \beta \frac{A}{2} + W, \frac{A_D}{2}, w]^T \quad (17)$$

式中： $\mathbf{A}=[a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n]$ ，向量 $\mathbf{S}$ 为 b 维向量，其中每一项对应系统中一条支路，例如对于支路 $i-j$ ，具体表示为 (a_i+a_j) ，其中 a 的含义与式(14)相同；向量 $\mathbf{T}$ 同样为 b 维向量，其中每一项对应系统中每条支路两端的相角差，例如支路 $i-j$ ，具体表示为 $(\delta_i-\delta_j)$ ；向量 $\mathbf{W}$ 为 n 维向量，其中每一项值均为 w ； $\mathbf{A}_D=[a_{D1}, a_{D2}, \dots, a_{D(n-1)}, a_{Dn}]$ 由下垂节点构成，共有 n_D 项。与 $\mathbf{y}$ 相同，辅助因子 $\mathbf{u}$ 的维数 $m=n+2b+4n+n_D+1=5n+2b+n_D+1$ 。

利用辅助因子，可将式(15)变为如下形式

$$\begin{cases} \mathbf{E}\mathbf{y} = \mathbf{p} \\ \mathbf{u} = \mathbf{f}(\mathbf{y}) \\ \mathbf{C}\mathbf{x} = \mathbf{u} \end{cases} \quad (18)$$

式中： $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{C}$ 分别为 $2n \times m$ 和 $m \times 2n$ 矩阵； $\mathbf{f}(\cdot)$ 为辅助因子间可逆的非线性变换，根据上文引入的 $\mathbf{y}$ 与 $\mathbf{u}$ ，其逆变换 $\mathbf{y} = \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{u})$ 具体形式如下

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V} \\ \mathbf{K} \\ \mathbf{L} \\ \mathbf{U}^\alpha \\ \mathbf{U}^\alpha \omega \\ \mathbf{U}^\beta \\ \mathbf{U}^\beta \omega \\ \mathbf{U}_D \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{\mathbf{A}} \\ e^{0.5\mathbf{S}} \cos \mathbf{T} \\ e^{0.5\mathbf{S}} \sin \mathbf{T} \\ e^{0.5\mathbf{A}\alpha} \\ e^{0.5\mathbf{A}\alpha + \mathbf{W}} \\ e^{0.5\mathbf{A}\beta} \\ e^{0.5\mathbf{A}\beta + \mathbf{W}} \\ e^{0.5\mathbf{A}_D} \\ e^{\mathbf{W}} \end{bmatrix} \quad (19)$$

式(18)可以通过消去 $\mathbf{u}$ 改写为

$$\begin{cases} \mathbf{E}\mathbf{y} = \mathbf{p} \\ \mathbf{C}\mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{y}) \end{cases} \quad (20)$$

通过引入辅助因子，将原潮流方程(15)变换为式(20)，为后续的两步法求解提供了合适的方程形式。式(20)由一组欠定方程与一组超定方程构成，在欠定方程的无穷多解中，恰好满足超定方程的解为原潮流方程的解^[20-21]。

2.3 算法原理

式(20)可以被转化为如下最小二乘问题求解

$$\begin{aligned} \min & [\mathbf{y} - \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{C}\mathbf{x})]^T [\mathbf{y} - \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{C}\mathbf{x})] \\ \text{s.t.} & \mathbf{p} - \mathbf{E}\mathbf{y} = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (21)$$

可写出其拉格朗日函数为

$$L = \frac{1}{2} [\mathbf{y} - \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{C}\mathbf{x})]^T [\mathbf{y} - \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{C}\mathbf{x})] - \mu^T (\mathbf{p} - \mathbf{E}\mathbf{y}) \quad (22)$$

对变量 $\mathbf{y}$ ， $\mathbf{x}$ 以及乘子 μ 求偏导后可得

$$\begin{cases} \mathbf{y} - \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{C}\mathbf{x}) + \mathbf{E}^T \mu = \mathbf{0} \\ -\mathbf{C}^T \mathbf{F}^{-T} [\mathbf{y} - \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{C}\mathbf{x})] = \mathbf{0} \\ \mathbf{p} - \mathbf{E}\mathbf{y} = \mathbf{0} \end{cases} \quad (23)$$

式中： $\mathbf{F}$ 为 $\mathbf{u} = \mathbf{f}(\mathbf{y})$ 的雅克比矩阵； $\mathbf{F}^{-1}$ 即为 $\mathbf{y} = \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{u})$ 的雅克比矩阵。

设方程(20)当前迭代值为 $\mathbf{x}_k$ ，选取 $\mathbf{y}_k$ 满足 $\mathbf{y}_k = \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{C}\mathbf{x}_k)$ ，以 $\mathbf{x}_k$ 为线性化点线性化得

$$\mathbf{y} - \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{C}\mathbf{x}) \cong \Delta \mathbf{y}_k - \mathbf{F}_k^{-1} \mathbf{C} \Delta \mathbf{x}_k \quad (24)$$

将式(24)代入式(23)，写为增量形式

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & -\mathbf{F}_k^{-1} \mathbf{C} & \mathbf{E}^T \\ -\mathbf{C}^T \mathbf{F}_k^{-T} & \mathbf{C}^T \mathbf{D}_k \mathbf{C} & \mathbf{0} \\ \mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{y}_k \\ \Delta \mathbf{x}_k \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \Delta \mathbf{p}_k \end{bmatrix} \quad (25)$$

式中 $\mathbf{D}_k = \mathbf{F}_k^{-T} \mathbf{F}_k^{-1}$ 。

在上式中消去 $\Delta \mathbf{y}_k$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{C}^T \mathbf{F}_k^{-T} \mathbf{E}^T \\ \mathbf{E} \mathbf{F}_k^{-1} \mathbf{C} & -\mathbf{E} \mathbf{E}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_k \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \Delta \mathbf{p}_k \end{bmatrix} \quad (26)$$

若矩阵 $\mathbf{E} \mathbf{F}_k^{-1} \mathbf{C}$ 非奇异，在式(26)中可解得 $\mu = \mathbf{0}$ ， $\Delta \mathbf{x}_k$ 满足下式关系

$$[\mathbf{E} \mathbf{F}_k^{-1} \mathbf{C}] \Delta \mathbf{x}_k = \mathbf{p} - \mathbf{E} \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{C}\mathbf{x}_k) = \Delta \mathbf{p}_k \quad (27)$$

若在式(20)中进一步消去 $\mathbf{y}$ ，则原潮流方程(15)等价于

$$\mathbf{E} \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{C}\mathbf{x}) = \mathbf{p} \quad (28)$$

潮流方程(15)的牛顿法求解过程可表示为

$$[\mathbf{E} \mathbf{F}_k^{-1} \mathbf{C}] \Delta \mathbf{x}_k = \mathbf{p} - \mathbf{E} \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{C}\mathbf{x}_k) = \Delta \mathbf{p}_k \quad (29)$$

从式(27)与式(29)的对比中可以看出，到目前为止，仍与原潮流方程(15)的牛顿法迭代求解等价。在本文使用的两步求解算法中，希望能寻找一个更接近真实解的线性化点，因此构造一个新的最小二乘问题

$$\begin{aligned} \min & (\mathbf{y} - \mathbf{y}_k)^T (\mathbf{y} - \mathbf{y}_k) \\ \text{s.t.} & \mathbf{p} - \mathbf{E}\mathbf{y} = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (30)$$

其拉格朗日函数对各变量求偏导后可得

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{E}^T \\ \mathbf{E} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \tilde{\mathbf{y}}_k \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \Delta \mathbf{p}_k \end{bmatrix} \quad (31)$$

式中： $\Delta \tilde{\mathbf{y}}_k = \tilde{\mathbf{y}}_k - \mathbf{y}_k$ ， $\tilde{\mathbf{y}}_k$ 即为算法所寻找的新线性化点，通过求解方程(31)获得 λ

$$\mathbf{E} \mathbf{E}^T \lambda = -\Delta \mathbf{p}_k \quad (32)$$

$\tilde{\mathbf{y}}_k$ 可以通过式(31)(32)求得

$$\tilde{\mathbf{y}}_k = \mathbf{y}_k - \mathbf{E}^T \lambda \quad (33)$$

根据式(30)定义，此时 $\tilde{\mathbf{y}}_k$ 在满足 $\mathbf{p} - \mathbf{E}\mathbf{y} = \mathbf{0}$ 的同时尽可能地接近 $\mathbf{y}_k$ ，在 $\tilde{\mathbf{y}}_k$ 处线性化

$$\begin{aligned} \mathbf{y} - \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{C}\mathbf{x}) &\cong \Delta \mathbf{y}_k - \tilde{\mathbf{F}}^{-1} \mathbf{C} \Delta \mathbf{x}_k = \\ &\Delta \mathbf{y}_k - \tilde{\mathbf{F}}^{-1} [\mathbf{C}\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{f}(\tilde{\mathbf{y}}_k)] \end{aligned} \quad (34)$$

将式(34)代入式(23), 转化为如下形式, 由于 $\tilde{\mathbf{y}}_k$ 满足 $\mathbf{p} - \mathbf{E}\mathbf{y} = \mathbf{0}$, 此时 $\Delta\mathbf{p}_k = \mathbf{0}$ 。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & -\tilde{\mathbf{F}}^{-1}\mathbf{C} & \mathbf{E}^T \\ -\mathbf{C}^T\tilde{\mathbf{F}}^{-1} & \mathbf{C}^T\tilde{\mathbf{D}}\mathbf{C} & \mathbf{0} \\ \mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{y}_k \\ \mathbf{x}_{k+1} \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\tilde{\mathbf{F}}^{-1}\mathbf{f}(\tilde{\mathbf{y}}_k) \\ \mathbf{C}^T\tilde{\mathbf{D}}\mathbf{f}(\tilde{\mathbf{y}}_k) \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (35)$$

与式(25)~(27)相似, 消去 $\Delta\mathbf{y}_k$, 当 $\mathbf{E}\tilde{\mathbf{F}}^{-1}\mathbf{C}$ 非奇异时解得 $\mu = \mathbf{0}$, 推出

$$[\mathbf{E}\tilde{\mathbf{F}}^{-1}\mathbf{C}]\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{E}\tilde{\mathbf{F}}^{-1}\mathbf{f}(\tilde{\mathbf{y}}_k) \quad (36)$$

2.4 两步法求解方程流程

综上所述, 两步法求解方程主要由以下两步构成。

步骤 1) 通过辅助最小二乘问题求解式(32)得到 λ , 借助 λ 可以获得一个比当前迭代值更接近真实解的线性化点 $\tilde{\mathbf{y}}_k$, 以提高算法对初值的鲁棒性。

步骤 2) 根据上一步获得的新线性化点 $\tilde{\mathbf{y}}_k$, 直接解出下一迭代步变量值 $\mathbf{x}_{k+1}$, 减少计算量。

具体步骤如图 1 所示。

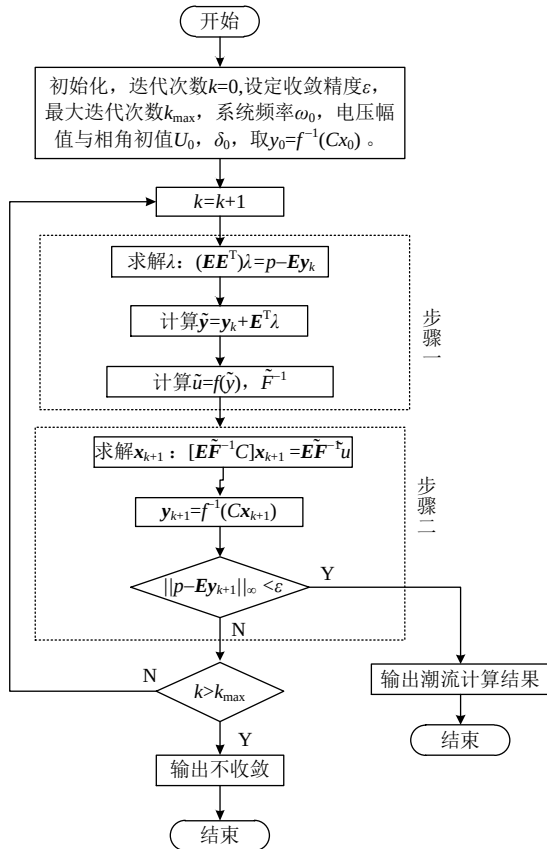


图 1 两步法求解方程流程

Fig. 1 Two-step method for solving equation flow chart

2.5 收敛性能及计算效率分析

当初值 $\mathbf{x}_0$ 与方程的真实解偏离较远时, 牛顿法容易出现不收敛或收敛较慢的情形。本文算法步骤 1) 通过构造一个最小二乘问题, 寻找满足约束下尽可能接近真实解的 $\tilde{\mathbf{y}}_k$, 在逼近过程中

$\lambda \rightarrow 0, \tilde{\mathbf{y}}_k \rightarrow \mathbf{y}_\infty$, 可以有效提高收敛性, 文献[19]中对该方法的收敛性进行了详细说明。

在计算速度方面, 虽然步骤 1) 需要额外求解方程(32), 但 $\mathbf{E}\mathbf{E}^T$ 在每次迭代中均保持不变, 只需在第一次计算后保存 $(\mathbf{E}\mathbf{E}^T)^{-1}$, 在后续计算中方程(32)可视为矩阵相乘, 不会带来过多的计算量。与牛顿拉夫逊法先计算 $\Delta\mathbf{x}_k$, 再计算 $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \Delta\mathbf{x}_k$ 不同, 本文方法步骤 2) 直接计算 $\mathbf{x}_{k+1}$, 相比牛顿拉夫逊法计算量更小, 可以一定程度上抵消步骤 1 带来的额外计算量, 故总体计算速度与牛顿法相近。

3 算例分析

3.1 算例系统

本文采用文献[16]中的大型微电网算例作为测试系统。该算例有 115 个节点, 118 条支路, 含 3 个风力机组, 2 个光伏电池和 8 个燃气轮机, 如附录 A 图 A1 所示。其中把风力机组所在的 71、72、73 节点视为 PQ 节点, 光伏电池所在的 49、50 节点视为 PV 节点, 风力机组与光伏机组的出力设定值如附录 B 表 B1 所示。燃气轮机所在节点视为下垂控制节点, 其具体所在位置及下垂控制参数设定如附录 B 表 B2 所示。在下垂节点空载运行时, 取 $\omega_0 = 1.004$, $U_{0i} = 1.06$ 。负荷模型中, 有功、无功功率指数来自文献[24], 静态频率特性参数来自文献[25], 如附录 B 表 B3 所示。取系统基准容量为 1 MVA, 基准频率为 50 Hz。

本文所提出的潮流计算方法用 Matlab 2018b 编程实现, 运行在配置为 core i7-6700HQ 2.6 GHz CPU、8GB 内存的计算机上。

本文算法将与 3 种常见的潮流计算方法进行对比分析, 方法 2、3 参数设定来自相应的参考文献, 如附录 B 表 B4 所示。

- 1) 牛顿拉夫逊法(N-R);
- 2) 传统单步自适应 LM 法^[26](A-LM);
- 3) 三步 LM 法^[13](MTLM)。

3.2 结果验证

N-R 作为求解非线性方程的经典方法, 其正确性已经得到了检验。本节分别采用 N-R 与本文算法对孤岛微电网潮流进行计算, 对计算结果进行对比, 验证本文方法计算的准确性。取收敛精度 $\varepsilon = 10^{-6}$, 最大迭代次数 10, 计算结果如表 1 所示。由于节点数较多, 表 1 仅展示节点 1~30 的电压幅值。

由表 1 可知, 本文算法计算结果与 N-R 计算结果完全一致, 原因在于本文方法虽然引入辅助因子, 对原潮流方程进行变形, 但本质上依然是对方

程进行数值迭代求解,因此会得到与 N-R 完全相同的解。

另外,把下垂节点角频率与电压代入下垂控制方程(4)计算得到的功率输出与潮流平衡方程计算得到的下垂节点注入功率进行对比,如表 2 所示。

表 1 潮流计算结果

Tab.1 Results of power calculation

节点	U_i/pu		节点	U_i/pu		节点	U_i/pu	
	本文算法	N-R		本文算法	N-R		本文算法	N-R
1	0.964 3	0.964 3	11	0.987 3	0.987 3	21	0.970 6	0.970 6
2	0.964 3	0.964 3	12	0.985 5	0.985 5	22	0.964 6	0.964 6
3	0.964 7	0.964 7	13	0.979 7	0.979 7	23	0.960 5	0.960 5
4	0.965 2	0.965 2	14	0.978 2	0.978 2	24	0.957 1	0.957 1
5	0.966 1	0.966 1	15	0.977 0	0.977 0	25	0.957 3	0.957 3
6	0.968 9	0.968 9	16	0.975 6	0.975 6	26	0.957 9	0.957 9
7	0.970 4	0.970 4	17	0.975 2	0.975 2	27	0.958 3	0.958 3
8	0.973 6	0.973 6	18	0.974 6	0.974 6	28	0.959 4	0.959 4
9	0.980 7	0.980 7	19	0.973 8	0.973 8	29	0.960 0	0.960 0
10	0.988 4	0.988 4	20	0.971 5	0.971 5	30	0.960 4	0.960 4

表 2 下垂节点不同计算方式所得功率对比

Tab.2 Power comparison of different calculation methods for drooping nodes

节点	下垂控制方 程计算所 得有功/pu	潮流平衡方程 计算所得 有功/pu	下垂控制方 程计算所 得无功/pu	潮流平衡方程 计算所得 无功/pu
10	1.734 3	1.734 3	0.311 5	0.311 5
34	2.167 8	2.167 8	0.319 2	0.319 2
46	1.445 2	1.445 2	-0.080 0	-0.080 0
55	2.890 5	2.890 5	0.561 0	0.561 0
65	1.238 8	1.238 8	0.316 7	0.316 7
81	0.963 5	0.963 5	0.254 4	0.254 4
90	1.313 8	1.313 8	0.380 9	0.380 9
103	1.885 1	1.885 1	0.371 5	0.371 5

如表 2 所示,下垂控制方程(4)计算所得的有功无功功率与潮流平衡方程计算所得的节点注入功率完全一致,进一步验证了本文方法的正确性。

3.3 不同初值下的潮流计算

采取随机产生的变量初值进行计算,考虑微电网运行安全,电压初值与频率满足以下约束^[9]: $0.94\text{pu} < U_i^{(0)} < 1.06\text{pu}$, $0.996\text{pu} < \omega_0 < 1.004\text{pu}$ 。为排除单次计算的随机干扰,各算法均进行 100 次的随机初值计算,收敛精度 $\varepsilon=10^{-6}$,本文算法与 N-R 法最大迭代次数设为 10, A-LM 与 MTLM 最大迭代次数设为 40 次^[13]。改变相角初值波动的幅度,统计 4 种算法不收敛次数,如表 3 所示。

由表 3 可知,在初值随机选取时, N-R 在相角初值均为 0 时就出现了严重的不收敛情况。随着相角初值波动范围的增大, A-LM 与 MTLM 算法的不收敛次数也逐渐增多,其中部分算例存在发散情况,其余算例也无法在规定的迭代次数内收敛到规

定精度,但本文算法依然能保持良好的收敛性,满足微电网潮流计算的需要。

3.4 收敛性能与计算效率

将本文算法与 N-R、A-LM、MTLM 3 种算法进行收敛性能与计算效率的比较。A-LM 的参数设

表 3 初值变化下 4 种算法收敛情况对比

Tab.3 Convergence comparison of four algorithms under initial value change

初值波动范围	本文算法	N-R	A-LM	MTLM
$0.94\text{pu} < U_i^{(0)} < 1.06\text{pu}$ $\delta_i^{(0)} = 0\text{rad}$ $0.996\text{pu} < \omega_0 < 1.004\text{pu}$	0	86	0	0
$0.94\text{pu} < U_i^{(0)} < 1.06\text{pu}$ $0\text{rad} < \delta_i^{(0)} < 0.1\text{rad}$ $0.996\text{pu} < \omega_0 < 1.004\text{pu}$	0	100	3	3
$0.94\text{pu} < U_i^{(0)} < 1.06\text{pu}$ $0\text{rad} < \delta_i^{(0)} < 0.2\text{rad}$ $0.996\text{pu} < \omega_0 < 1.004\text{pu}$	0	100	17	31
$0.94\text{pu} < U_i^{(0)} < 1.06\text{pu}$ $0\text{rad} < \delta_i^{(0)} < 0.3\text{rad}$ $0.996\text{pu} < \omega_0 < 1.004\text{pu}$	0	100	67	91

置来自文献[26], MTLM 的参数来自文献[13]。算法初值设定 $\omega=1$, $\delta_i^{(0)}=0$, 下垂节点 $U_i^{(0)}=1.06$, 其他节点采用平启动,即 $U_i^{(0)}=1$, 将收敛精度分别设置为 10^{-1} , 10^{-2} , ..., 10^{-10} 记录不同算法在不同收敛精度下的收敛次数,如图 2 所示。

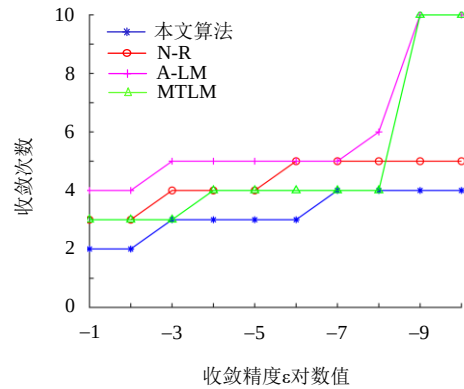


图 2 不同精度下 4 种算法收敛次数对比

Fig.2 Comparison of convergence times of four algorithms under different precisions

由图 2 可知,相较其他 3 种算法,本文算法在收敛次数上具有优势,例如在收敛精度为 10^{-6} 时,本文算法只需 3 步即可收敛,但 MTLM 需要 4 次收敛, N-R 与 A-LM 均需 5 次才能收敛。且在收敛精度进一步提高时,基于 LM 的算法收敛次数明显增加,但本文算法依然保持良好的收敛性能。

另外微电网中常用蒙特卡洛模拟 DG 出力的不确定性,对算法的计算效率有一定要求。现假设

71、72、73 节点连接的风力机组,其风速遵循两参数威布尔分布,49、50 节点连接的光伏电池,其光照分布遵循 Beta 分布,具体参数来自文献[27],见附录 B 表 B5 和 B6。设定收敛精度 $\varepsilon=10^{-6}$,对孤岛微电网进行 1000 次模拟计算,记录 4 种算法的计算时间如表 4 所示。

表 4 蒙特卡洛模拟耗费时间
Tab. 4 Monte Carlo simulation takes time

方法	计算时间/s	相对耗时/%
本文方法	31.790 2	106.91
N-R	29.735 6	100
A-LM	37.780	127.05
MTLM	44.916 8	151.05

由表 4 可知,本文算法略慢于牛拉法,原因在于本文算法步骤 1)通过求解式(32)来寻找更接近真实解的线性化点,在提高鲁棒性的同时一定程度上牺牲了计算效率,因此计算速度慢于牛顿法,但相差不大,仅差 6.91%。而本文算法相较 A-LM 计算耗时减少近 20%,显著快于 MTLM。由于 A-LM 需要在每一迭代步额外对自适应因子进行计算取舍与更新,MTLM 在每一次迭代中需要求解 3 个线性方程,因此计算效率较低。

综合本节分析,相较于其他 3 种算法,本文算法收敛次数少,在高精度下也能快速收敛,能够满足不同的精度要求。另外在保证鲁棒性的同时计算效率较高,适用于大规模重复性计算。

4 结论

本文针对孤岛微电网特点,提出辅助因子两步求解算法对孤岛微电网潮流进行求解,经大型微电网 115 节点算例对比分析后表明:

1) 在鲁棒性方面,本文算法在不同的初值波动幅度下,均未出现不收敛情况,鲁棒性强。

2) 在收敛性能与计算效率方面,本文算法收敛次数少于牛顿法、牛顿法、单步自适应 LM 算法与三步 LM 算法,且在保证鲁棒性的同时计算耗时较短,在大规模系统或在大规模重复计算中具有明显优势。

在未来的研究中,可以以本文所提算法为基础,进行其他微电网相关的分析计算,如稳定性分析、优化调度等。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/volumn/current.shtml>)。

参考文献

[1] 张丹,王杰.国内微电网项目建设及发展趋势研究[J].电网技术,2016,40(2): 451-458.

Zhang Dan, Wang Jie. Research on construction and development trend of micro-grid in China[J]. Power System Technology, 2016, 42(2): 451-458(in Chinese).

[2] 赵卓立,杨苹,许志荣,等.多源多变换微电网大扰动暂态稳定性研究综述[J].电网技术,2017,41(7): 2195-2204.
Zhao Zhuoli, Yang Ping, Xu Zhirong, et al. Review on large-disturbance transient stability research of microgrid with multiple energy resources and multiple conversions[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2195-2204(in Chinese).

[3] 彭寒梅,李帅虎,李辉,等.孤岛运行交直流混合微电网的潮流计算[J].电网技术,2017,41(9): 2887-2895.
Peng Hanmei, Li Shuaihu, Li Hui, et al. Power flow calculation of islanded hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2887-2895(in Chinese).

[4] 彭寒梅,昌玲,郭颖聪,等.主从控制微电网的动态区间潮流计算[J].电网技术,2018,42(1): 195-202.
Peng Hanmei, Chang Ling, Guo Yingcong, et al. Dynamic interval power flow calculation of microgrid under master-slave control [J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 195-202(in Chinese).

[5] 吴舜裕,许刚.主从控制微电网孤岛切换暂态震荡分析与抑制[J].电网技术,2017,41(6): 1990-1996.
Wu Shunyu, Xu Gang. Analysis and damping of transient oscillation in islanding switching-over process for microgrid under master-slave control[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1990-1996(in Chinese).

[6] 于芑,刘兴华,孙树敏,等.高可再生能源渗透率海岛微电网运行控制[J].电网技术,2018,42(3): 780-788.
Yu Peng, Liu Xinghua, Sun Shumin, et al. Study on operation control of island microgrid with high renewable energy penetration[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 780-788(in Chinese).

[7] Colson C M, Nehrir M H. Comprehensive real-time microgrid power management and control with distributed agents[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 617-627.

[8] 田梁玉,唐忠,田晨,等.基于状态跟随器的微电网平滑切换研究[J].电网技术,2017,41(4): 1285-1290.
Tian Liangyu, Tang Zhong, Tian Chen, et al. Research of microgrid seamless switching based on state follower[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1285-1290(in Chinese).

[9] 潘忠美,刘健,石梦,等.计及电压/频率静特性的孤岛微电网电压稳定性与薄弱节点分析[J].电网技术,2017,41(7): 2214-2221.
Pan Zhongmei, Liu Jian, Shi Meng, et al. Static voltage stability and weak bus analysis of islanded microgrids considering static voltage/frequency characteristics[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2214-2221(in Chinese).

[10] 彭寒梅,曹一家,黄小庆.基于 BFGS 信赖域算法的孤岛微电网潮流计算[J].中国电机工程学报,2014,34(16): 2627-2638.
Peng Hanmei, Cao Yijia, Huang Xiaoqing. Power flow calculation of islanded microgrids based on BFGS trust region method [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2627-2638(in Chinese).

[11] Abdelaziz M M A, Farag H E, El-saadany E F, et al. A novel and generalized three-phase power flow algorithm for islanded microgrids using a newton trust region method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 190-201.

[12] 彭寒梅,曹一家,黄小庆,等.无平衡节点孤岛运行微电网的连续潮流计算[J].中国电机工程学报,2016,36(8): 2057-2067.
Peng Hanmei, Cao Yijia, Huang Xiaoqing, et al. Continuous power flow for islanding microgrid without balance nodes[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2057-2067(in Chinese).

[13] 王晗,严正,徐潇源,等.计及可再生能源不确定性的孤岛微电网概率潮流计算[J].电力系统自动化,2018,42(15): 110-117.

- Wang Han, Yan Zheng, Xu Xiaoyuan, et al. Probabilistic power flow calculation of islanded microgrid considering uncertainty of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 110-117(in Chinese).
- [14] 唐坤杰, 董树锋, 朱炳铨, 等. 大规模输配一体化系统牛顿法潮流计算性能分析及改进方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(6): 92-99.
- Tang Kunjie, Dong Shufeng, Zhu Bingquan, et al. Performance analysis and improvement of newton method for power flow calculation of large-scale integrated transmission and distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6): 92-99(in Chinese).
- [15] Tang K, Dong S, Shen J, et al. A robust and efficient two-stage algorithm for power flow calculation of large-scale systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 5012-5022.
- [16] Zambroni D S A C, Santos M, Castilla M, et al. Voltage security in AC microgrids: a power flow-based approach considering droop-controlled inverters[J]. IET Renewable Power Generation, 2015, 9(8): 954-960.
- [17] 李培帅, 施烨, 吴在军, 等. 孤岛微电网潮流的类奔德斯分解算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 119-125.
- Li Peishuai, Shi Ye, Wu Zaijun, et al. Power flow calculation method similar to benders decomposition for islanded microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 119-125(in Chinese).
- [18] Mumtaz F, Syed M H, Hosani M A, et al. A simple and accurate approach to solve the power flow for balanced islanded microgrids [C]//IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering. 2015, Rome, Italy: 1852-1856.
- [19] Gomez-exposito A. Factored solution of nonlinear equation systems [J]. Proceedings of The Royal Society-A, 2014(470): 20140236.
- [20] Gomez-exposito A, Gomez-quiles C. Factorized load flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4607-4614.
- [21] Gomez-quiles C, Gomez-exposito A, Vargas W. Computation of maximum loading points via the factored load flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 4128-4134.
- [22] Eajal A A, Abdelwahed M A, Ei-saadany E F, et al. A unified approach to the power flow analysis of AC/DC hybrid microgrids [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 1145-1158.
- [23] 邓思成, 陈来军, 郑天文, 等. 考虑系统延时的微电网有功功率分布式控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1537-1542.
- Deng Sicheng, Chen Laijun, Zheng Tianwen, et al. Active power distributed control of microgrids considering system time delays [J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1537-1542(in Chinese).
- [24] Singh D, Misra R K, Singh D. Effect of load models in distributed generation planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 2204-2212.
- [25] IEEE Task Force on Load Representaion for Dynamic Performance. Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(1): 523-538.
- [26] 严正, 范翔, 赵文恺, 等. 自适应 Levenberg-Marquardt 方法提高潮流计算收敛性[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 1909-1918.
- Yan Zheng, Fan Xiang, Zhao Wenkai, et al. Improving the convergence of power flow calculation by a self-adaptive Levenberg-Marquardt method[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 1909-1918(in Chinese).
- [27] 张喆, 李庚银, 魏军强. 考虑分布式电源随机特性的配电网电压质量概率评估[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 150-156.
- Zhang Zhe, Li Gengyin, Wei Junqiang. Probabilistic evaluation of voltage quality in distribution networks considering the stochastic characteristic of distributed generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 150-156(in Chinese).



林立亨

收稿日期: 2019-09-11。

作者简介:

林立亨(1995), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统, E-mail: 21810116@zju.edu.cn;

董树锋(1982), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统状态估计和有缘配电网分析, E-mail: dongshufeng@zju.edu.cn;

朱承治(1977), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化, E-mail: chengzhi_zhu@163.com。

(责任编辑 王晔)

附录 A

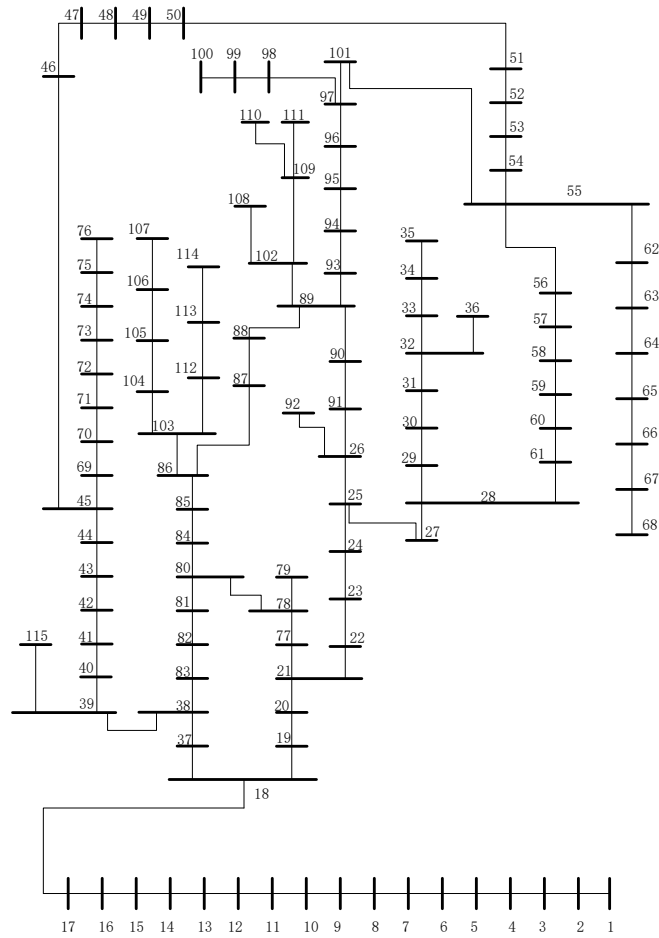


图 A1 115 节点孤岛微电网
Fig. A1 115 nodes islanded AC microgrid

附录 B

表 B1 风力机组与光伏电池出力
Tab. B1 Wind turbine and PV arrays output

节点号	发电机类型	有功出力/MVA	无功出力/MVA
49	光伏电池	0.4	
50	光伏电池	0.35	
71	风力机组	0.4	0.267
72	风力机组	0.6	0.4
73	风力机组	0.65	0.433

表 B2 下垂节点控制系数
Tab. B2 Parameters of droop control for DG

下垂节点编号	m/pu	n/pu
10	0.002 5	0.23
34	0.002	0.167
46	0.003	0.122
55	0.001 5	0.125
65	0.003 5	0.182
81	0.004 5	0.3
90	0.003 3	0.25
103	0.002 3	0.2

表 B3 负荷类型和参数设定
Tab. B3 Load type and parameter setting

负荷类型	α	β	K_{pf}	K_{qf}
恒定负荷	0.00	0.00	0.00	0.00
工业负荷	0.18	6.00	2.6	1.6
居民负荷	0.92	4.04	0.85	-2.00
商业负荷	1.51	3.40	1.35	-1.35

表 B4 LM 与 MTLM 参数设定
Tab. B4 LM and MTLM parameter settings

参数	μ	m	p_0	p_1	p_2	η_1	η_2	α_M
LM	0.1	0.001	0.0001	0.8	0.95	10	0.1	\
MTLM	0.1	0.001	0.0001	0.25	0.75	4	0.25	20

表 B5 风力机组相关参数
Tab. B5 Parameters of wind turbine generators

节点号	切入风速/(m/s)	额定风速/(m/s)	k	c
71	3	14	2.02	8.02
72	4	15	2.04	8.51
73	4	15	2.05	8.30

表 B6 光伏电池相关参数
Tab. B6 Parameters of PV arrays

节点号	α	β
49	0.45	9.18
50	0.47	9.3