

## 孤岛运行的微电网潮流计算方法研究

刘杨华<sup>1,2</sup>, 吴政球<sup>1</sup>

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 广东技术师范学院机电学院, 广东 广州 510665)

**摘要:** 提出改进潮流计算方法, 将各分布式电源视为松弛节点, 免去系统平衡节点的设定, 考虑了孤岛运行的微电网三相对称及不对称潮流的情况。采用牛顿迭代法, 以与 IEEE-5 节点系统相同网络结构的微电网为例, 将之与传统潮流计算进行对比。算例分析了含有不同分布式电源的发电系统及其有功/无功调节能力、不同负荷模型等情况。该方法物理意义明确, 计算简单, 计算潮流的同时反映系统频率的变化, 较传统潮流计算方法更适于孤岛运行的微电网潮流计算。

**关键词:** 电力系统; 潮流计算; 微电网; 分布式发电; 孤岛运行

### Study on power flow calculation method for islanding micro grids

LIU Yang-hua<sup>1,2</sup>, WU Zheng-qiu<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. School of Mechatronic Engineering, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, China)

**Abstract:** The paper proposes a new power flow calculation method which takes each distributed power as slack node, avoids the set of system balance node, and considers the situation of three-phase symmetric/asymmetric current in islanding micro grid. Based on Newton-Raphson iteration, taking the micro grid which has the same net structure as IEEE-5 node system as an example, the new algorithm is compared with the traditional one through analyzing different DG systems with various distributed powers as well as their active/reactive adjustment capability and different load models. The results show that the new algorithm is easy to use, has clear physical meaning, can reflect the change of system frequency as calculating the power flow, and is more suitable for power flow calculation of islanding micro grid than the traditional one.

**Key words:** power system; power flow calculation; micro grid; distributed generation; islanding

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)23-0016-05

## 0 引言

传统潮流计算一般需要首先设定系统的平衡节点(往往由具有调节能力大、反应速度较快的大型水电厂承担)<sup>[1-13]</sup>。然而目前分布式电源由于出力极有限, 且为简化控制, 微型电网中的电源一般没有独立的二次调频设备, 在孤岛运行的微电网<sup>[14]</sup>中, 无一能够承担传统电力系统调频电厂的角色。

分布式电源经一定的接口(目前主要是电力电子逆变器接口<sup>[15]</sup>)向交流负荷供电。通过对逆变器端口加以控制, 可以实现分布式电源的电流、电压和功率控制<sup>[8-15]</sup>。分布式发电系统及其储能等能量管理控制系统的配合<sup>[8-13]</sup>可以调节分布式电源的有功、无功以保证供电电压及功率因素等运行指标。

孤岛<sup>[14]</sup>运行的微电网中, 分布式电源相互之间必须予以适当的调配, 通过控制其逆变器控制其出

力, 以满足负荷需求的变化。文献[8]讨论了多种不同分布式电源通过逆变器接口设计以及储能装置的协调控制, 可得到类似微型燃气轮机和传统同步发电机的频率有功特性和电压无功特性, 提出了对孤岛系统有功、无功和频率控制策略, 并评估了孤岛系统自治稳定的可能性。同样的, 文献[9]讨论了利用电压及频率下降特性, 孤岛系统并行逆变器的控制策略。文献[10-12]虽然考虑了分布式电源的电压及功率调节控制能力, 将分布式电源视为松弛PQ等节点类型, 计算中仍要假定一电源点为系统的平衡节点。

本文提出一种新的潮流计算方法(下称改进潮流计算方法), 去掉传统潮流计算平衡节点的设定。以类似 IEEE-5 节点系统结构为算例, 进行三相对称和不对称潮流计算, 详细比较了不同分布式电源及其有功/无功调节能力、电源不同出力及位置、不同

负荷模型及其电压/频率静态调节特性等各种情况。结果表明,改进潮流计算方法比传统方法更适于分布式发电系统孤岛运行的潮流分析。

## 1 孤岛运行的微电网潮流计算理论分析

### 1.1 节点类型分析

对母线即节点进行分类,是潮流计算的前提假设和基本步骤。传统上主要分为 PQ 节点、PV 节点和平衡节点(Vθ 节点)三大类型<sup>[1-7]</sup>。本文提出将具有调节能力的分布式电源和具有时变性的负荷节点均视为功率可变节点,由各分布式电源动态分配系统功率缺额,平衡负荷实时变化。即孤岛运行的微电网潮流计算中仅有松弛 PQ 节点。

### 1.2 三相对称潮流计算

#### 1.2.1 节点功率方程

考虑分布式电源点的功率调节能力(不同的电源类型的调节方式和调节能力不同,通过调节系数的设置加以区别),节点功率方程如式(1)所示:

$$\begin{cases} P_{Gi} = P_{Gi0}[1 - k_{Gi,p}(f - f_0)] \\ Q_{Gi} = Q_{Gi0}[1 - k_{Gi,q}(U_{Gi} - U_{Gi0})] \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $P_{Gi}$ 、 $Q_{Gi}$  分别为电源节点  $i$  注入的有功、无功;  $k_{Gi,p}$ 、 $k_{Gi,q}$  分别为电源节点  $i$  的有功、无功等效调节系数;  $f$  为系统频率,  $U_{Gi}$  为电源节点  $i$  的电压幅值。下标  $i$ 、 $j$  为节点编号; G、L 分别表示电源、负荷; p、q 分别表示有功、无功, 0 表示各个量对应的初值。

负荷用恒阻抗、恒电流、恒功率三种模型组合描述(百分比系数满足  $A_i + B_i + C_i = 1$ )。考虑其静特性<sup>[1]</sup>,节点功率方程如式(2)所示:

$$\begin{cases} P_{Li} = P_{Li0}[A_{i,p}(\frac{U_i}{U_{i0}})^2 + B_{i,p}\frac{U_i}{U_{i0}} + C_{i,p}][1 + k_{Li,p}(f - f_0)] \\ Q_{Li} = Q_{Li0}[A_{i,q}(\frac{U_i}{U_{i0}})^2 + B_{i,q}\frac{U_i}{U_{i0}} + C_{i,q}][1 + k_{Li,q}(f - f_0)] \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $P_{Li}$ 、 $Q_{Li}$  分别为负荷节点  $i$  注入的有功、无功;  $k_{Li,p}$ 、 $k_{Li,q}$  分别为负荷节点  $i$  的有功、无功等效调节系数;  $U_i$  为节点  $i$  的电压幅值。其他同上。

#### 1.2.2 雅可比矩阵分块及元素

相应得到的雅可比矩阵如式(3)示:

$$\begin{bmatrix} \Delta Q \\ \Delta P \\ \Delta f \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} L & M & E \\ N & H & F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U/U \\ \Delta \theta \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中:雅可比矩阵  $L_{nn}$ ,  $M_{n \times (n-1)}$ ,  $N_{nn}$ ,  $H_{n \times (n-1)}$  子块与

传统潮流计算的类似<sup>[1]</sup>(下标  $n$  为系统节点数),比传统的潮流计算分块增加两个子块  $E_{n \times 1}$ 、 $F_{n \times 1}$ ,子块中的元素分别为无功、有功偏量对频率偏差量求偏导值,具体如式(4)~(9)示:

$$L_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_j} \cdot U_j = \begin{cases} -U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) & (i \neq j) \\ U_i^2 B_{ii} - Q_i + L_{Vi} & (i = j) \end{cases} \quad (4)$$

$$N_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_j} \cdot U_j = \begin{cases} -U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) & (i \neq j) \\ -U_i^2 G_{ii} - P_i + N_{Vi} & (i = j) \end{cases} \quad (5)$$

$$M_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_j} = \begin{cases} U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) & (i \neq j) \\ U_i^2 G_{ii} - P_i & (i = j) \end{cases} \quad (6)$$

$$H_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_j} = \begin{cases} -U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) & (i \neq j) \\ U_i^2 B_{ii} + Q_i & (i = j) \end{cases} \quad (7)$$

$$E_i = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial f} = \begin{cases} -Q_{Li0}[A_{i,q}(\frac{U_i}{U_{i0}})^2 + B_{i,q}\frac{U_i}{U_{i0}} + C_{i,q}]k_{Li,q} & (i=1, \dots, m) \\ 0 & (i=m+1, \dots, n) \end{cases} \quad (8)$$

$$F_i = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial f} = \begin{cases} -P_{Li0}[A_{i,p}(\frac{U_i}{U_{i0}})^2 + B_{i,p}\frac{U_i}{U_{i0}} + C_{i,p}]k_{Li,p} & (i=1, \dots, m) \\ -P_{G0}K_{Gi,p} & (i=m+1, \dots, n) \end{cases} \quad (9)$$

式(4)、(5)的中间变量  $L_{Vi}$ 、 $N_{Vi}$  具体如下:

$$L_{Vi} = \begin{cases} -Q_{Li0}[2A_{i,q}(\frac{U_i}{U_{i0}})^2 + B_{i,q}\frac{U_i}{U_{i0}}][1 + k_{Li,q}(f - f_0)] & (i=1, \dots, m) \\ -Q_{G0}K_{Gi,q}U_i & (i=m+1, \dots, n) \end{cases}$$

$$N_{Vi} = \begin{cases} -P_{Li0}[2A_{i,p}(\frac{U_i}{U_{i0}})^2 + B_{i,p}\frac{U_i}{U_{i0}}][1 + k_{Li,p}(f - f_0)] & (i=1, \dots, m) \\ 0 & (i=m+1, \dots, n) \end{cases}$$

其中:下标  $m$  为负荷节点数;  $\theta_{ij}$  为节点  $i$ 、 $j$  间的电压相角差;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  为对应导纳矩阵元素;  $L_{Vi}$ 、 $N_{Vi}$  分别为电源和负荷有功、无功的电压静特性等效调节效应,其他同前述。

### 1.3 三相不对称潮流计算

#### 1.3.1 三相不平衡时导纳矩阵的推导

由于配电网电压等级较低,不考虑各相对地电容以及之间的耦合,仅考虑支路电感相间耦合,且计及三相不对称,节点  $i$ 、 $j$  间支路电压方程如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_a \\ \Delta \dot{U}_b \\ \Delta \dot{U}_c \end{bmatrix}_{ij} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{cc} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix}_{ij} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix}_{ij} \quad (10)$$

支路电流方程如式(11)示:

$$\dot{I}_{abc,ij} = Y_{abc,ij} \Delta \dot{U}_{abc,ij} = Y_{abc,ij} (U_{abc,i} - U_{abc,j}) \quad (11)$$

由此可得  $i, j$  节点间三相支路导纳:

$$Y_{abc,ij} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix}_{ij}^{-1} = \begin{bmatrix} y_{aa,ij} & y_{ab,ij} & y_{ac,ij} \\ y_{ba,ij} & y_{bb,ij} & y_{bc,ij} \\ y_{ca,ij} & y_{cb,ij} & y_{cc,ij} \end{bmatrix} \quad (12)$$

可知  $i$  节点的注入电流方程为:

$$\dot{I}_{abc,i} = \sum_{j \neq i} Y_{abc,ij} (U_{abc,i} - U_{abc,j}) \quad (13)$$

图 1 所示为考虑变压器接线方式对移相角的影响:

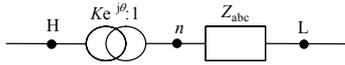


图 1 双绕组变压器移相角示意图

Fig.1 Phase shifting between two windings of the transformer

则变压器一侧电流方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{ia} \\ \dot{I}_{ib} \\ \dot{I}_{ic} \end{bmatrix} = Y_{abc,ij} \begin{bmatrix} \dot{V}_{ia} \\ \dot{V}_{ib} \\ \dot{V}_{ic} \end{bmatrix} - Y^1_{abc,ij} \begin{bmatrix} \dot{V}_{ja} \\ \dot{V}_{jb} \\ \dot{V}_{jc} \end{bmatrix} = Y^1_{abc,ij} \begin{bmatrix} \dot{V}_{ia} \\ \dot{V}_{ib} \\ \dot{V}_{ic} \end{bmatrix} - Y^2_{abc,ij} \begin{bmatrix} \dot{V}_{ja} \\ \dot{V}_{jb} \\ \dot{V}_{jc} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中, 变压器支路低侧:

$$Y^1_{abc,LH} = Y_{abc,ij}$$

$$Y^2_{abc,LH} = Y_{abc,ij} \frac{1}{3k} \begin{bmatrix} e^{j\theta} + e^{-j\theta} + 1 & \alpha e^{j\theta} + \alpha^2 e^{-j\theta} + 1 & \alpha^2 e^{j\theta} + \alpha e^{-j\theta} + 1 \\ \alpha^2 e^{j\theta} + \alpha e^{-j\theta} + 1 & e^{j\theta} + e^{-j\theta} + 1 & \alpha e^{j\theta} + \alpha^2 e^{-j\theta} + 1 \\ \alpha e^{j\theta} + \alpha^2 e^{-j\theta} + 1 & \alpha^2 e^{j\theta} + \alpha e^{-j\theta} + 1 & e^{j\theta} + e^{-j\theta} + 1 \end{bmatrix}$$

变压器支路高侧:

$$Y^1_{abc,HL} = \frac{1}{3k} \begin{bmatrix} e^{-j\theta} + e^{j\theta} + 1 & \alpha e^{-j\theta} + \alpha^2 e^{j\theta} + 1 & \alpha^2 e^{-j\theta} + \alpha e^{j\theta} + 1 \\ \alpha^2 e^{-j\theta} + \alpha e^{j\theta} + 1 & e^{-j\theta} + e^{j\theta} + 1 & \alpha e^{-j\theta} + \alpha^2 e^{j\theta} + 1 \\ \alpha e^{-j\theta} + \alpha^2 e^{j\theta} + 1 & \alpha^2 e^{-j\theta} + \alpha e^{j\theta} + 1 & e^{-j\theta} + e^{j\theta} + 1 \end{bmatrix} Y^2_{abc,HL}$$

$$Y^2_{abc,HL} = \frac{1}{3k} \begin{bmatrix} e^{j\theta} + e^{-j\theta} + 1 & \alpha e^{j\theta} + \alpha^2 e^{-j\theta} + 1 & \alpha^2 e^{j\theta} + \alpha e^{-j\theta} + 1 \\ \alpha^2 e^{j\theta} + \alpha e^{-j\theta} + 1 & e^{j\theta} + e^{-j\theta} + 1 & \alpha e^{j\theta} + \alpha^2 e^{-j\theta} + 1 \\ \alpha e^{j\theta} + \alpha^2 e^{-j\theta} + 1 & \alpha^2 e^{j\theta} + \alpha e^{-j\theta} + 1 & e^{j\theta} + e^{-j\theta} + 1 \end{bmatrix} Y^1_{abc,HL}$$

### 1.3.2 节点功率方程和雅可比矩阵分块及元素

以节点  $i$  的  $a$  相为例, 节点功率方程为:

$$S_{ia} = P_{ia} + jQ_{ia} = \dot{V}_{ia} (\dot{I}_{ia})^* = \dot{V}_{ia} \sum_{j \neq i} [y_{aa,ij} (\dot{V}_{ia} - \dot{V}_{ja}) + y_{ab,ij} (\dot{V}_{ib} - \dot{V}_{jb}) + y_{ac,ij} (\dot{V}_{ic} - \dot{V}_{jc})]^* \quad (15)$$

变压器支路, 考虑变压器移相角影响,  $a$  相节点功率方程为:

$$S_{ia} = P_{ia} + jQ_{ia} = \dot{V}_{ia} \sum_{j \neq i} [(y^1_{aa,ij} \dot{V}_{ia} - y^2_{aa,ij} \dot{V}_{ja}) + (y^1_{ab,ij} \dot{V}_{ib} - y^2_{ab,ij} \dot{V}_{jb}) + (y^1_{ac,ij} \dot{V}_{ic} - y^2_{ac,ij} \dot{V}_{jc})]^* \quad (16)$$

类似可得  $b, c$  相的节点功率方程, 其中  $y_{ij}, y^1_{ij}, y^2_{ij}$  分别为导纳矩阵  $Y_{ij}, Y^1_{ij}, Y^2_{ij}$  中的对应元素。

三相潮流计算雅可比矩阵子块  $L_{3n \times 3n}, N_{3n \times 3n}, M_{3n \times (3n-1)}, H_{3n \times (3n-1)}$  的结构相应扩展成三相, 并考虑频率调节特性的影响增加  $E_{3n \times 1}, F_{3n \times 1}$  子块。

## 2 算例分析

以IEEE-5节点系统网络结构<sup>[1]</sup>为例, 系统基准容量设为100 kVA。系统频率初值为50 Hz, 采用平直启动(即所有节点电压为1.0、相角为0), 用牛顿拉夫逊迭代法进行潮流计算。节点1-3为负荷节点, 节点4和5为电源节点, 节点5为传统潮流计算的平衡节点和改进计算的参考相位点(三相不对称计算中,  $a$ 相为系统参考相位), 其他均为松弛PQ节点。

### 2.1 三相不对称潮流计算

为与传统方法比较, 其他网络参数见文献[1]。

表 1 不同计算方案对照表

Tab.1 Comparison of different calculate cases

C	Description, 计算方案描述
0	M1: 恒功率负荷模型, 基础负荷
1	M1: 恒功率负荷模型, 各负荷节点有功、无功增加 10%
2	M2: K1 调节系数, L1 负荷组合模型, 基础负荷
3	M2: K1 调节系数, L1 负荷组合模型, 各负荷有功、无功增加 10%
4	M2: K2 调节系数 (不同电源类型), L1 负荷组合模型, 基础负荷
5	M2: K3 调节系数 (电源交换位置), L1 负荷组合模型, 基础负荷
6	M2: K4 调节系数 (电源无调节), L1 负荷组合模型, 基础负荷
7	M2: K4 调节系数, L1 负荷组合模型, 各负荷有功、无功增加 2%
8	M2: K5 调节系数 (负荷无调节), L1 负荷组合模型, 基础负荷
9	M2: K6 调节系数 (电源调节减半), L1 负荷组合模型, 基础负荷
10-12	M2: K6 调节系数, 基础负荷, 分别为 L2、L3、L4 负荷模型

C: case, C0-C12 分别表示 13 种不同的计算方案; M: method, 不同的潮流计算方法, M1 为传统潮流计算, M2 为改进潮流计算; K1-K6 为调节系数组编号 (详见表 2); L1-L4 为负荷模型组编号, 其中 L1 为组合模型: 恒阻抗、恒电流、恒功率分别所占比例分别为 0.3, 0.3, 0.4; L2-L4 分别为纯恒阻抗、纯恒电流、纯恒功率负荷。

表 2 不同调节系数组对照表

Tab.2 Summary of different regulation coefficients

n	K <sub>1</sub>		K <sub>2</sub>		K <sub>3</sub>		K <sub>4</sub>		K <sub>5</sub>		K <sub>6</sub>	
	K <sub>q1</sub>	K <sub>p1</sub>	K <sub>q2</sub>	K <sub>p2</sub>	K <sub>q3</sub>	K <sub>p3</sub>	K <sub>q4</sub>	K <sub>p4</sub>	K <sub>q5</sub>	K <sub>p5</sub>	K <sub>q6</sub>	K <sub>p6</sub>
1-3	-2	2	-2	2	-2	2	-2	2	0	0	-2	2
4	20	20	0	20	20	40	0	0	20	20	10	10
5	20	40	20	40	20	20	0	0	20	40	10	20

传统方法C0的计算结果见文献[1]。计算结果(除频率外均为标么值)见表3~6, 迭代误差 $<10^{-5}$ 。

表 3 不同计算方案下各节点的有功比较

Tab.3 Active power of 5 nodes vary with different cases

n	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
1	-1.70	-1.46	-1.49	-1.50	-1.49	-1.50	-1.48	-1.46	-1.47	-1.35	-1.45	-1.61
2	-2.10	-2.16	-2.22	-2.22	-2.20	-2.19	-2.18	-2.16	-2.16	-2.34	-2.17	-2.01
3	-3.80	-3.83	-3.86	-3.87	-3.88	-3.82	-3.81	-3.83	-3.83	-3.95	-3.85	-3.72
4	5.01	5.01	5.05	5.05	5.01	5.01	5.01	5.01	5.01	5.06	5.01	4.98
5	2.88	2.68	2.77	2.76	2.68	2.68	2.68	2.68	2.69	2.78	2.69	2.63

表 4 不同计算方案下各节点的无功比较

Tab.4 Reactive power of 5 nodes vary with different cases

n	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
1	-0.90	-0.73	-0.80	-0.76	-0.75	-0.94	-0.80	-0.73	-0.73	-0.69	-0.73	-0.80
2	-1.10	-1.08	-1.17	-1.12	-1.10	-1.37	-1.18	-1.08	-1.08	-1.19	-1.09	-1.00
3	-1.40	-1.35	-1.43	-1.37	-1.36	-1.68	-1.45	-1.35	-1.35	-1.42	-1.35	-1.29
4	2.10	1.72	1.97	1.81	1.66	1.81	1.81	1.72	1.73	1.74	1.72	1.84
5	2.49	2.21	2.41	2.03	1.87	2.20	2.20	2.21	2.20	2.21	2.19	2.27

表 5 不同计算方案下各节点的电压比较

Tab.5 Voltage of 5 nodes vary with different cases

n	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
1	0.82	0.90	0.86	0.94	0.92	1.06	0.94	0.90	0.90	0.92	0.91	0.86
2	1.07	1.08	1.07	1.12	1.11	1.24	1.13	1.08	1.09	1.09	1.09	1.07
3	1.03	1.04	1.02	1.06	1.05	1.17	1.07	1.04	1.04	1.04	1.04	1.03
4	1.05	1.05	1.04	1.09	1.08	1.20	1.09	1.05	1.06	1.06	1.06	1.05
5	1.05	1.05	1.04	1.06	1.05	1.17	1.08	1.05	1.05	1.05	1.05	1.04

表 6 不同计算方案下各节点的系统频率比较

Tab.6 Frequency of the system varies with different cases

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	
f	50.00	50.00	49.88	49.90	50.00	47.21	49.11	50.00	49.98	49.74	49.97	50.12

结果讨论如下:

1) 比较 case 0 和 case 1 可知, 当负荷增加时, 引起系统的有功缺额在传统潮流中主要由节点 5 (平衡节点) 承担, 无功缺额由节点 4 (PV 节点) 和平衡节点共同承担, 除节点 1 (系统电压最低点) 外, 系统各节点维持电压水平较好; 由 case 2 和 case 3 点的比较可见, 改进算法则不然, 这是因为孤岛系统的功率缺额要由各电源点共同分担。

2) 比较 case 2 和 case 4、5 可知, 电源的类型不同或者分布的位置不同会引起潮流分布以及线损的变化。表 4 可见改进潮流算法还能同时体现这两种情况对系统频率的影响。

3) 比较 case2 与 case 6、7 可知, 当孤岛运行的微电网中, 分布式电源无调节能力时, 系统的电压和频率严重异常; 与 case8 比较看, 是否考虑负荷调节效应, 对系统频率及潮流基本上没影响。

4) 在 case2 的基础上降低电源的调节能力, 比较 case 9 与 case 10、11、12 可知, 采用的不同负荷模型及其组合对系统频率和潮流都有较大影响。

5) 综合 3)、4)可知, 负荷调节效应对简单系统频率以及潮流的影响, 取决于系统电源与负荷调节能力的相对强弱。

## 2.2 三相不对称潮流计算

两台变压器 Yn/d11 接线, 变比  $k$  为 1.05, 所有参数均折算至低压侧, 网络参数见表 7 示。负荷采用 L1 组合模型。各相角初值相差  $120^\circ$ , 计及变压器相角偏移, 节点 1、2、3 的 a 相  $-30^\circ$ , 节点 4 的 a 相  $0^\circ$ ; 节点注入功率初值及调节效应系数见表 8 示。

表 7 支路参数

Tab.7 Parameters of the branches

母线 Bus	自阻抗 Self-impedance	互阻抗 Mutual-impedance
1-2	aa 0.05 + 0.0367i	ab 0 + 0.0187i
	bb 0.04 + 0.0467i	ac 0 + 0.0197i
	cc 0.047 + 0.0267i	bc 0 + 0.0192i
1-3	aa 0.11 + 0.1283i	ab 0 + 0.0603i
	bb 0.1 + 0.1383i	ac 0 + 0.0613i
	cc 0.107 + 0.1183i	bc 0 + 0.0608i
2-3	aa 0.11 + 0.1283i	ab 0 + 0.0603i
	bb 0.1 + 0.1383i	ac 0 + 0.0613i
	cc 0.107 + 0.1183i	bc 0 + 0.0608i
2-4	aa 0.09 + 0.0917i	ab 0 + 0.0437i
	bb 0.08 + 0.1017i	ac 0 + 0.0447i
	cc 0.087 + 0.0817i	bc 0 + 0.0442i
3-5	aa 0.01 + 0.0275i	ab 0 + 0.0145i
	bb 0 + 0.0375i	ac 0 + 0.0155i
	cc 0.007 + 0.0175i	bc 0 + 0.015i

表 8 节点注入功率及调节效应系数

Tab.8 Input power and adjust coefficient of the buses

Bus	$K_P$	$K_Q$	有功初值 $P_{i0}$			无功初值 $Q_{i0}$		
			a	b	c	a	b	c
1	1	-2	-0.8	-0.76	-0.85	-0.78	-0.73	-0.83
2	2	-2	-2	-1.95	-2.05	-1.4	-1.35	-1.45
3	3	-2	-3.7	-3.65	-3.75	-1.25	-1.2	-1.3
4	50	10	4.46	4.46	4.46	0.45	0.45	0.45
5	20	10	2.55	2.55	2.55	2.9	2.9	2.9

计算结果如表 9 所示（电压值为标么值表示）。系统频率为 49.994 2 Hz。

表 9 三相不对称潮流计算结果

Tab.9 Results of 3-phase unbalanced power flow

节 点	a 相		b 相		c 相	
	幅值	相角/ (°)	幅值	相角/ (°)	幅值	相角/ (°)
1	0.938 8	-27.152 4	0.999	-147.343	0.900 8	94.368 3
2	0.99 9 1	-26.161 2	1.049 8	-145.867	0.967 8	94.590 4
3	0.949 1	-33.204 2	1.009 4	-153.173	0.912 4	87.718 3
4	1.004 3	6.771 9	1.000 6	-111.658	0.974 9	126.367
5	1.014 6	0	1.038	-120.066	0.982 2	120.773 1

### 3 结论

本文提出的改进潮流计算方法较传统潮流计算更好地反映了微电网孤岛运行控制的实质，物理意义明确，计算简单、计算结果既能够有效分析孤岛系统的潮流分布，还能分析系统频率的变化。

限于篇幅，本文没有做进一步的研究。但是必须指出，值得未来进一步研究的有：微电网中所有机组均参与调节的动态过程仿真及试验，以及提高孤岛运行的微电网稳定连续运行的措施研究等。

### 参考文献

[1] 西安交通大学, 等. 电力系统计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1978 .  
Xi'an Jiaotong University, et al. Power system calculation[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1978.

[2] Lin C E, Huang Y W, Huang C L. Distribution system load flow calculation with microcomputer implementation[J]. Electrical Power System Research, 1987, 13: 139-145.

[3] Lo K L, Zhang C. Decomposed three phase power flow solution using the sequence component frame[J]. Proc IEE, 1993, 140 (3): 181-187.

[4] Zhang Xiao-ping. Fast three phase load flow methods[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11 (3): 248-252.

[5] Ghosh S, Das D. Method for load flow solution of radial distribution networks[J]. IEE Proceeding G T D, 1999, 146 (6): 641-648.

[6] 丘文千. 具有变量范围约束的电力系统潮流计算方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (17): 36-40.  
QIU Wen-qian. Power flow calculation considering the constraints of changing range of variables[J]. Automation

of Electric Power Systems, 2006, 30 (17): 36-40.

[7] Abdel-Akher M, Nor K M, Rashid A H A. Improved three-phase power-flow methods using sequence components[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1389-1397.

[8] Peças Lopes J A, Moreira C L, Madureira A J. Defining control strategies for micro grids islanded operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 916-924.

[9] De Brabandere K, Bolsens B, Van den Keybus J, et al. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters[C]. // 2004 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Aachen Germany: 2004: 2501-2507.

[10] Iyer S, Ghosh A, Joshi A. Power flow control in a distribution system through an inverter interfaced distributed generator[C]. //Power Engineering Society General Meeting. 2006: 18-22.

[11] Dai M, Marwali M N, Jung J W, et al. Power flow control of a single distributed generation unit with nonlinear local load[C]. //Power Systems Conference and Exposition, IEEE PES. 2004: 398-403.

[12] Piagi, Paolo. Microgrid control[D]. The University of Wisconsin-Madison, 2005.

[13] FAN Zhen-yu. Voltage and frequency control of distribution system in the presence of distributed generation[D]. Clemson University, 2004.

[14] 盛鹏, 孔力, 齐智平, 等. 新型电网-微电网(Microgrid)研究综述[J]. 继电器, 2007, 35 (12): 75-81.  
SHENG Kun, KONG Li, QI Zhi-ping, et al. A survey on research of microgrid—a new power system[J]. Relay, 2007, 35 (12): 75-81.

[15] 王燕, 谢志远, 聂恩旺. 分布式发电及其并网逆变器拓扑结构的发展现状[J]. 中国电力教育(研究综述与技术论坛专刊) 2006: 205-207.  
WANG Yan, XIE Zhi-yuan, NIE En-wang. Distributed-generation and topological construction of its networking inverter[J]. Electric Power Education in China (Monograph of Research Review and Technology Forum) 2006: 205-207.

收稿日期: 2009-12-08; 修回日期: 2010-01-28

作者简介:

刘杨华(1979-), 女, 博士研究生, 主要从事电力系统分析与控制的研究; E-mail: ruby\_liu4@yahoo.com.cn

吴政球(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事电力市场和电力系统的研究和教学工作。