

# 考虑频率波动的孤岛微电网在线三相概率潮流计算方法

王 聪<sup>1</sup>, 颜 伟<sup>2</sup>, 户秀琼<sup>1</sup>

(1. 攀枝花学院 智能制造学院, 四川 攀枝花 617000;

2. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:**为了量化短期源荷功率扰动对频率波动的影响并保证模拟精度,从短期概率潮流问题出发,采用预测分量和随机预测误差分量分别表示风电和负荷的实时扰动功率,同时用一次调频实现扰动功率中随机预测误差分量的平衡,用基于超前控制方式的二次调频实现系统当前功率缺额和扰动功率预测分量的平衡,从而实现了对源荷功率扰动影响的准确量化评估。同时,提出的模型考虑了微电源的三相电压、电流对称控制特性以及可控微电源与负荷的静态频率电压调节特性,精确模拟了孤岛微电网的调频过程以及微电源的三相潮流控制特性,因而大幅提高了三相潮流与频率波动的仿真精度。采用三点估计法实现所建模型的概率评估,并通过IEEE 33节点修正系统的仿真分析验证了所提方法的有效性。

**关键词:**孤岛微电网;一次调频;二次调频;三点估计法;三相概率潮流

**中图分类号:**TM 712.3;TM 744

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202001018

## 0 引言

作为消纳新能源和提升供电可靠性的一种重要手段,微电网有着十分广泛的发展前景<sup>[1-3]</sup>。微电网主要接入中低压配电网,负荷功率甚至电网常具有不对称性。风电是微电网中常见的一种新能源,其发电功率具有很大的随机性和不可控性。当微电网孤岛运行且风电功率渗透率较大时,风电功率的随机波动对微电网的三相潮流和频率都会产生显著的影响。因此,有必要研究考虑风电功率随机波动影响的微电网三相潮流和频率的概率分析方法。

目前,已有一些文献研究了三相潮流的概率评估问题。潮流的概率评估方法主要有以点估计<sup>[4]</sup>为代表的近似法、以蒙特卡洛模拟<sup>[5]</sup>为代表的模拟法及需进行卷积计算的解析法<sup>[6]</sup>。在扰动模型方面,中长期评估通常以服从正态分布的随机量表示负荷的扰动功率<sup>[7]</sup>、以Weibull分布描述风速反映风电功率的随机波动<sup>[5]</sup>,而短期评估则通常采用预测值加随机扰动的预测误差来描述源荷扰动<sup>[8]</sup>,文献[4]还考虑了扰动源之间的相关性。在潮流模型方面,文献[9]提出了考虑负荷的不对称性及异步风电机组的三相输电网概率潮流模型,其中风机功率采用内电势对称的PQ节点描述;文献[10]提出了考虑负荷和线路的不对称性以及异步风电机组的三相配电网概率潮流模型,其中风机功率采用三相功率相等的PQ节点描述。然而上述模型中,并没有考虑逆变并网的风电机组,也没有研究三相电流或电压对称的并网控制方式在三相功率输出方面的差异。另外,现

有方法无法量化源荷功率扰动对系统频率的影响。

在对称系统的概率潮流方法研究中,已有学者注意到单一平衡节点独自承担不平衡功率的问题。文献[11-12]提出了同时考虑一次调频与二次调频作用的概率潮流方法,其假设已知系统的不平衡功率,并且假设一次调频和二次调频的作用与功率的扰动同时发生,由此可以实现不平衡功率的完全平衡。这种假设忽略了频率的波动,因而无法用于仿真扰动功率对频率的影响。文献[13]提出了考虑下垂控制(模拟一次调频作用)的微电网概率潮流方法,其采用了考虑微电源与负荷频率电压静态特性的潮流模型,因此可以直接通过仿真分析扰动功率对系统频率的影响。但是文献[13]只考虑了一次调频作用,因而其频率的仿真结果可能与实际不符,并且没有给出频率波动的仿真结果。

针对扰动功率对系统频率波动影响的仿真需要计及不平衡功率的合理分摊问题,同时考虑逆变并网风电机组的三相功率控制特性,本文提出了一种微电网三相潮流和频率的在线概率评估方法。本文假设已知系统当前的频率与潮流状态(潮流与频率的初始状态),已知风电和负荷下一时刻的预测功率且其随机预测误差都服从正态分布<sup>[10]</sup>,为简化计算暂不考虑其相关性。同时假设二次调频采用超前控制方式,随机预测误差扰动主要由一次调频承担。由此实现了一次调频与二次调频作用的精确模拟,从而保证了扰动功率对微电网频率影响的仿真精度。在调频策略能够精确模拟的基础上,本文进一步考虑微电网三相不对称的运行特点以及含逆变并网微电源的应用场景,根据笔者提出的三相潮流模型<sup>[14]</sup>构建三相概率潮流模型。同时假设可控微电源采用三相电压对称控制方式以及有功-频率的下垂

收稿日期:2019-01-23;修回日期:2019-11-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677012)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677012)

控制方式和恒定相电压幅值控制方式,而风电机组采用三相电流对称控制方式以及恒定有功和恒定正序电压幅值控制方式<sup>[15]</sup>。本文采用三点估计法对所建潮流模型进行概率评估,并通过IEEE 33节点修正系统的仿真分析对所提方法的有效性进行验证。

## 1 微电网的三相概率潮流模型

### 1.1 逆变并网风电机组的三相概率潮流模型

逆变并网风电机组常采用最大功率点跟踪控制方式,其三相总有功输出由风速确定,具有随机性和不可控性。但其无功功率具有独立可控性,主要受逆变器的容量限制。当风机容量较大且有功输出较小时,甚至可以具有恒电压控制能力。因此,在本文的三相潮流模型中,假设风机为三相总有功和正序电压给定的PV节点,具体如下:

$$\begin{cases} P_{Wi} = \sum_{d=a,b,c} P_{Wi}^d \\ U_i^1 = U_{i,s} \end{cases} \quad i \in \Phi_W \quad (1)$$

其中, $P$ 为有功; $U$ 为电压幅值; $d$ 为相别; $i$ 为节点编号; $\Phi_W$ 为风电机组所在节点集合;上标1表示正序分量;下标W表示风电;下标s表示指定量。

本文研究的是在线概率潮流评估,时间尺度为5 min级,风电的扰动功率可用其预测值加随机预测误差来表示<sup>[8]</sup>,具体如下:

$$P_{Wi} = (1 + x_{Wi})(1 + \lambda_{Wi})P_{Wi,0} \quad (2)$$

其中, $x_{Wi}$ 为风电有功的预测误差增量系数,是一个随机变量,服从正态分布,且 $x_{Wi} \sim N(\mu_{PW_i}, \sigma_{PW_i}^2)$ ;  $\lambda_{Wi}$ 为风电有功预测值的增量系数,记 $\Delta P_{Wi}$ 为风电有功的预测增量,则 $\Delta P_{Wi} = \lambda_{Wi} P_{Wi,0}$ ;下标0表示当前状态。

逆变并网风电机组常采用三相电流对称控制方式,其三相电流的幅值与相角可表示为:

$$\begin{cases} I_{Wi}^a = I_{Wi}^b = I_{Wi}^c \\ \delta_{Wi}^a = \delta_{Wi}^b + \frac{2\pi}{3} = \delta_{Wi}^c - \frac{2\pi}{3} \end{cases} \quad i \in \Phi_W \quad (3)$$

其中, $I_W$ 、 $\delta_W$ 分别为风电机组注入电流的幅值、相角。

由式(1)和式(3)可知,在该控制方式下,三相电流对称且正序电压幅值恒定为 $U_{i,s}$ 。

### 1.2 考虑静态特性与随机性的三相负荷模型

负荷扰动功率包括预测值和随机预测误差两部分,其中预测值由相对初始值的增量表示。同时,负荷模型考虑了其静态频率电压特性,因而可表示为:

$$\begin{cases} P_{Di}^d = (1 + x_{PDi})(1 + \lambda_{PDi}) \left[ 1 + K_{Dp,i}(f - f_0) \right] f_0 \times \\ \quad \left[ A_{p,i}^d + B_{p,i}^d \frac{U_i^d}{U_{i,0}^d} + C_{p,i}^d \left( \frac{U_i^d}{U_{i,0}^d} \right)^2 \right] P_{Di,0}^d \\ Q_{Di}^d = (1 + x_{QDi})(1 + \lambda_{QDi}) \left[ 1 + K_{Dq,i}(f - f_0) \right] f_0 \times \\ \quad \left[ A_{q,i}^d + B_{q,i}^d \frac{U_i^d}{U_{i,0}^d} + C_{q,i}^d \left( \frac{U_i^d}{U_{i,0}^d} \right)^2 \right] Q_{Di,0}^d \end{cases} \quad (4)$$

其中, $x_{PDi}$ 和 $x_{QDi}$ 分别为负荷有功和无功的预测误差增量系数,均是随机变量,分别服从正态分布 $N(\mu_{PDi}, \sigma_{PDi}^2)$ 和 $N(\mu_{QDi}, \sigma_{QDi}^2)$ ;  $\lambda_{PDi}$ 和 $\lambda_{QDi}$ 分别为负荷有功和无功预测值的增量系数,记 $\Delta P_{Di}$ 和 $\Delta Q_{Di}$ 分别为负荷的三相总有功和总无功的预测增量,则 $\Delta P_{Di} = \lambda_{PDi} P_{Di,0}$ ,  $\Delta Q_{Di} = \lambda_{QDi} Q_{Di,0}$ ;  $K_{Dp}$ 、 $K_{Dq}$ 为负荷等效静态频率调节系数,下标p、q分别表示有功、无功分量; $f$ 和 $f_0$ 分别为系统最终频率和系统当前频率; $A$ 、 $B$ 和 $C$ 分别为恒功率、恒电流和恒阻抗负荷在总负荷中的比重系数,且 $A + B + C = 1$ 。

### 1.3 考虑一、二次调频作用的三相可控微电源模型

#### 1.3.1 可控微电源的一、二次调频作用

本文同时考虑一、二次调频作用的可控微电源有功出力为:

$$P_{Gi} = P_{Gi,0} - K_{Gp,i}(f - f_0) + \Delta P_{Gi} \quad i \in \Phi_G \quad (5)$$

其中, $P_{Gi}$ 和 $P_{Gi,0}$ 分别为节点 $i$ 上可控微电源三相总有功功率和当前三相总有功功率;等号右边第二项为一次调频功率, $K_{Gp,i}$ 为节点 $i$ 上可控微电源的有功-频率调节特性系数,其反映电源一次调节能力的大小;等号右边第三项 $\Delta P_{Gi}$ 为节点 $i$ 上可控微电源的二次调频量,若忽略该项则认为微电源只有一次调频作用; $\Phi_G$ 为可控逆变电源所在节点集合。

在调频控制策略方面,二次调频可以采用滞后与超前控制2种方式。对于前者,其调节量由系统当前的功率缺额(具体是通过区域控制偏差ACE(Area Control Error)进行计算<sup>[16]</sup>)确定,不考虑电源与负荷功率下一步的变化趋势;对于后者,调节量由ACE和未来时刻电源与负荷功率增量的预测值共同确定。相对而言,超前控制能有效平衡扰动功率中的预测分量,而一次调频只承担扰动功率中的随机预测误差分量,由此可以有效降低扰动功率对系统频率的影响。据此,本文考虑3种频率控制方式,由微电网的频率控制方式确定二次调频量 $\Delta P_{Gi}$ ,具体如下。

(1)超前控制方式。系统的二次调频量 $\Delta P_{\Sigma}$ 由系统当前的功率缺额以及下一时刻风电与负荷功率的预测功率增量决定。本文用区域控制偏差 $P_{ACE}$ 表示系统当前的功率缺额,相应地,可以将系统和可控微电源的二次调频量可分别表示为:

$$\Delta P_{\Sigma} = P_{ACE} + \Delta P_{pre} \quad (6)$$

$$\Delta P_{Gi} = \alpha_i \Delta P_{\Sigma} \quad (7)$$

$$P_{ACE} = (K_{Gp,i} - K_{Dp,i})(f_0 - f_n) \quad (8)$$

$$\Delta P_{pre} = \sum_i (\Delta P_{Wi} + \Delta P_{Di}) \quad (9)$$

其中, $\alpha_i$ 为可控微电源的二次调频参与因子; $f_n$ 为系统的额定频率; $\Delta P_{pre}$ 为下一时刻所有风电与负荷的预测功率增量之和。式(8)中,同时考虑了电源和负

荷的频率调节特性,假定下一时刻系统频率恢复至额定频率 $f_n$ 。

(2)滞后控制方式。系统的二次调频量 $\Delta P_s$ 仅由系统当前的功率缺额决定,则可控微电源的二次调频量为:

$$\Delta P_{Gi} = \alpha_i P_{ACE} \quad (10)$$

(3)不考虑二次调频作用,系统的扰动功率完全由微电源与负荷的一次调频作用承担。此时微电源的二次调频量为0,式(5)可以退化为一次调频方程,即:

$$P_{Gi} = P_{Gi,0} - K_{Gp,i}(f - f_0) \quad (11)$$

本文应对风电和负荷扰动功率的控制方式中,通过设定二次调频量完成相对精确的预测分量的平衡,而对于随机预测误差,则是由式(4)和式(5)中负荷和电源的一次调频共同作用实现平衡。

### 1.3.2 逆变并网可控微电源的三相控制方式

本文假设可控微电源为逆变并网的微型燃气轮机,其采用三相电压对称控制方式,且在潮流模型中为恒定相电压幅值控制节点,相应地,其电压控制方式可以表示为:

$$U_i^d = U_{i,s} \quad i \in \Phi_G \quad (12)$$

$$\begin{cases} U_i^a = U_i^b = U_i^c \\ \theta_i^a = \theta_i^b + \frac{2\pi}{3} = \theta_i^c - \frac{2\pi}{3} \end{cases} \quad i \in \Phi_G \quad (13)$$

其中, $\theta$ 为节点电压相角。

由式(12)和式(13)可知,在该控制方式下,三相电压幅值相等且恒定为 $U_{i,s}$ 。

### 1.4 三相微电网的概率潮流方程

本文同时考虑三相有功、无功的控制,可以有效计及网损、预测误差等对潮流结果的影响。采用的三相微电网的概率潮流方程如式(14)和式(15)所示。

$$\begin{cases} P_{Gi}^d + P_{Wi}^d - P_{Di}^d - P_i^d = 0 \\ Q_{Gi}^d + Q_{Wi}^d - Q_{Di}^d - Q_i^d = 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} P_i^d = \sum_{j=1}^n \sum_{x=a,b,c} U_i^d y_{ij}^{dx} U_j^x \cos(\alpha_{ij}^{dx} + \theta_j^x - \theta_i^d) - \sum_{j=1}^n \sum_{x=a,b,c} U_i^d y_{ij}^{dx} U_j^x \cos(\alpha_{ij}^{dx} + \theta_j^x - \theta_i^d) \\ Q_i^d = \sum_{j=1}^n \sum_{x=a,b,c} U_i^d y_{ij}^{dx} U_j^x \sin(\alpha_{ij}^{dx} + \theta_j^x - \theta_i^d) - \sum_{j=1}^n \sum_{x=a,b,c} U_i^d y_{ij}^{dx} U_j^x \sin(\alpha_{ij}^{dx} + \theta_j^x - \theta_i^d) \end{cases} \quad (15)$$

其中, $y_{ij}^{dx}$ 和 $\alpha_{ij}^{dx}$ 分别为与支路 $i-j$ 的 $dx$ 相之间对应的

导纳矩阵元素的模值和相角。

式(14)中, $P_{Wi}^d$ 、 $Q_{Gi}^d$ 、 $P_{Di}^d$ 和 $Q_{Di}^d$ 均含随机变量,当确定其扰动值后,可以通过常规潮流方法计算系统的潮流状态,具体计算方法见文献[14]。

## 2 三点估计法

三点估计法原理简单,能得到较高精度的估计值<sup>[17]</sup>;计算速度快,满足在线控制计算需要,是一种常用的概率评估方法。文献[6,11]应用三点估计法求解并网三相系统的概率评估问题,但其在考虑频率波动的孤岛微电网三相概率潮流评估问题中的适用性并未得到有效证实,本文引入三点估计法对该问题进行求解。三点估计法的基本原理为:在符合一定概率分布的第 $k$ 个随机输入变量 $x_k$ 上取3个点进行确定性计算来估计输出变量 $Z_k$ 的概率密度,其中 $k=\{1,2,\dots,m\}$ , $m$ 为总的随机输入变量个数。根据三点估计法准则<sup>[4]</sup>,随机输入变量 $x_k$ 的取值方法及其权重 $\omega_{k,r}$ 为:

$$x_{k,r} = \mu_{x_k} + \xi_{k,r} \sigma_{x_k} \quad r=1,2,3 \quad (16)$$

$$\begin{cases} \xi_{k,r} = \frac{\lambda_{k,3}}{2} + (-1)^{3-r} \sqrt{\lambda_{k,4} - \frac{3}{4} \lambda_{k,3}^2} & r=1,2 \\ \xi_{k,3} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \omega_{k,r} = \frac{(-1)^{3-r}}{\xi_{k,r}(\xi_{k,1} - \xi_{k,2})} & r=1,2 \\ \omega_{k,3} = \frac{1}{m} - \omega_{k,1} - \omega_{k,2} \end{cases} \quad (18)$$

$$\lambda_{k,r} = E((x_k - \mu_{x_k})^r) / \sigma_{x_k}^r \quad r=3,4 \quad (19)$$

其中, $\mu_{x_k}$ 和 $\sigma_{x_k}$ 分别为随机变量 $x_k$ 的均值与标准差; $r$ 为取点个数; $\xi_{k,r}$ 为位置度量系数; $\lambda_{k,3}$ 和 $\lambda_{k,4}$ 分别为 $x_k$ 的偏度和峰度系数; $E(\cdot)$ 表示求取均值。

对于 $m$ 个随机输入变量,每个变量 $x_k$ 用式(16)确定的3个点分别代替,其他随机输入变量在均值处取值,进行3次确定性潮流计算。当每个点在均值处取点时,只需计算1次,因而,总共只需进行 $2m+1$ 次确定性潮流计算,可以得到输出变量 $Z_k$ 的3个估计值 $Z_{k,1}$ — $Z_{k,3}$ 。给定每个随机变量在 $m$ 个随机变量中的权重为 $1/m$ ,结合式(18)可求得输出变量 $Z_k$ 的 $j$ 阶原点矩为:

$$E(Z_k^j) = \sum_{k=1}^m \sum_{r=1}^3 \omega_{k,r} Z_{k,r}^j \quad (20)$$

进而,得到 $Z_k$ 的均值和标准差的估计为:

$$\begin{cases} \mu_{Z_k} = E(Z_k) \\ \sigma_{Z_k} = \sqrt{E(Z_k^2) - E^2(Z_k)} \end{cases} \quad k=1,2,\dots,m \quad (21)$$

由 $\mu_{Z_k}$ 和 $\sigma_{Z_k}$ 可估计 $Z_k$ 的概率密度函数或累积概率分布<sup>[18]</sup>。

### 3 孤岛微电网三相概率潮流点估计方法的计算步骤

本文采用三点估计法进行孤岛微电网三相潮流的概率评估,其主要步骤如下:

(1)将风电和负荷的随机预测误差功率作为随机输入变量 $x_k$ ,根据其概率密度函数参数 $\mu_{x_k}$ 和 $\sigma_{x_k}$ ,通过式(19)计算得到对应随机输入变量的偏度系数 $\lambda_{k,3}$ 和峰度系数 $\lambda_{k,4}$ ;

(2)由偏度和峰度系数以及式(17)和式(18),计算出3个估计点对应的3个权重系数 $\xi_{k,r}$ 和取值概率 $\omega_{k,r}$ ,由式(16)确定出3个随机参数 $x_{k,r}$ ;

(3)根据系统当前潮流状态和频率,由式(8)计算得到当前的系统功率缺额,并结合已知的风电和负荷的预测分量,由式(6)计算得到二次调频总量 $\Delta P_s$ ;

(4)根据系统的频率控制方式,由式(7)按每台可控微电源的参与因子分配二次调频总量,得到可控微电源的二次调频量 $\Delta P_{Gi}$ ;

(5)对于每个随机输入变量 $x_{k,r}$ ,结合其预测值,得到式(2)所示风电或式(4)所示负荷扰动功率,代入式(14)中计算潮流,并保存结果;

(6)循环计算完全部随机输入变量后,可得到系统频率、节点电压和支路潮流等的统计特征值。

### 4 算例分析

#### 4.1 仿真条件

本文采用修正的IEEE 33节点系统验证所提方法的有效性。IEEE 33节点系统接线图见附录中图A1,线路及负荷原始参数详见文献[19]。

为了突出本文模型的特点,对算例系统进行了以下修改:假定各节点负荷由星形中性点接地方式的恒功率、恒电流和恒阻抗负荷组成,其组分系数、有功无功等效频率调节特性系数均相等,设 $A_p=A_q=0.85$ 、 $B_p=B_q=0.1$ 、 $C_p=C_q=0.05$ 、 $K_{Dp}=1.5$ 、 $K_{Dq}=-1$ 。

假设系统中接入5个微电源,DG<sub>1</sub>—DG<sub>3</sub>为可控微电源,DG<sub>4</sub>和DG<sub>5</sub>为风电机组,其功率控制方式和并网接入点控制方式分别见1.3节和1.1节,其中可控微电源的参与因子按容量裕度比设定。各微电源的接入节点、有功-频率调节特性系数 $K_{Gp}$ 和额定容量 $S_G$ 如表1所示,表中 $S_G$ 为标么值。

表1 各微电源参数

Table 1 Parameters of micro sources

| 微电源             | 接入节点 | $K_{Gp}$ | $S_G$ | 微电源             | 接入节点 | $K_{Gp}$ | $S_G$ |
|-----------------|------|----------|-------|-----------------|------|----------|-------|
| DG <sub>1</sub> | 8    | 62.5     | 2.5   | DG <sub>4</sub> | 25   | —        | 1.0   |
| DG <sub>2</sub> | 12   | 37.5     | 1.5   | DG <sub>5</sub> | 29   | —        | 1.0   |
| DG <sub>3</sub> | 22   | 50.0     | 2.0   |                 |      |          |       |

假设修正系统负荷的a相功率为原系统的1.2

倍,b相功率不变,c相功率为原系统的80%。设置功率基准值为1 MV·A,电压基准值为12.66 kV,额定频率为50 Hz。设定节点电压幅值的安全范围为[0.95,1.05] p.u.,频率的安全范围为[49.8,50.2] Hz。

当前微电网的潮流为:DG<sub>1</sub>—DG<sub>3</sub>的三相总有功功率均为0.8048 p.u.,相电压幅值分别为1.0225、1.0242、1.0280 p.u.;DG<sub>4</sub>、DG<sub>5</sub>的三相总有功功率均为0.6 p.u.,正序电压幅值分别为1.0177、1.0153 p.u.;系统频率为49.85 Hz。该潮流初始值的选取参考文献[20],通过以有功网损最小为目标的最优潮流方法计算得到。

设下一时刻所有节点负荷功率的预测值增量系数 $\lambda_i$ 都为0.15,风电机组DG<sub>4</sub>、DG<sub>5</sub>输出有功的预测值增量系数 $\lambda_{wi}$ 均为0.20。负荷、风电功率的预测误差均服从正态分布,其中均值 $\mu$ 均取为0,负荷预测误差的有功、无功标准差 $\sigma_{PDi}$ 、 $\sigma_{QDi}$ 设定相同且为0.05 p.u.,风电功率预测误差标准差 $\sigma_{PWi}=0.10$  p.u.。

#### 4.2 调频方式对潮流和频率波动的影响

为精确模拟扰动对潮流和频率分布的影响,本文模拟了文献[13]的一次调频作用,并与本文提出的二次调频方案进行对比,具体仿真方案如下:方案1,不考虑二次调频,负荷和风电功率的预测增量及预测误差完全由一次调频承担[13];方案2,采用滞后控制的二次调频方式,二次调频承担系统当前的功率缺额,负荷和风电功率的预测增量及预测误差由一次调频作用承担;方案3,采用超前控制的二次调频方式,二次调频同时承担系统当前的功率缺额以及负荷和风电机组的预测功率增量,负荷和风电功率的预测误差则由一次调频作用承担。

3种方案的对比结果如图1和附录中表A1、A2所示。图1为不同方案下频率的概率密度函数曲线。由图1可知,3种方案下频率的概率密度函数曲线都具有对称分布特征。3条曲线除均值不同外,形状、大小相同,曲线2(方案2)和曲线3(方案3)可看成是由曲线1(方案1)的2次平移产生。主要原因是3种方案的随机预测误差扰动完全相同,不同之处仅是不平衡扰动中确定分量(系统当前的功率缺额以及下一时刻的预测增量)的分摊方案不同。方案3采用超前控制,确定分量完全由二次调频机组承担,使得频率的均值恢复到接近于50 Hz的49.9992 Hz;

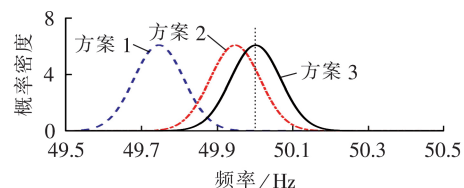


图1 不同调频方案下系统频率的概率密度函数

Fig.1 Probabilistic density function of system frequency under different frequency regulation schemes

方案2采用滞后控制,确定性扰动分量中的一部分(系统当前的功率缺额)由二次调频机组承担,因此频率均值只能由初始值49.85 Hz恢复到49.9018 Hz;方案1没有考虑二次调频作用,因此在预测增量的不平衡功率作用下,频率均值由初始值49.85 Hz下降到49.7408 Hz,且使频率均值从安全变为不安全(低于下限值49.80 Hz)。

因为频率波动的均值不同,也即不平衡扰动中确定分量的分摊方案不同,系统在同样的扰动作用下频率波动满足安全要求的概率存在很大差别。方案3下的安全频率概率为99.27%,方案2下为91.46%,方案1下为21.19%。该结果一方面说明采用二次调频的超前控制方式对于保证频率的安全最有利,另一方面也说明,忽略二次调频的作用,完全用一次调频来分摊所有的扰动功率,可能得出频率大概率越限的结论,这不符合实际。

表A1和表A2分别为不同方案下各微电源的有功和无功功率输出的均值和标准差。观察表A1和表A2可发现,对于各微电源,其单相有功输出均值的最大偏差为 $(0.4850-0.4796)/0.4796 \times 100\% = 1.13\%$ ,无功的最大偏差为 $(0.0387-0.0363)/0.0363 \times 100\% = 6.61\%$ ,差别较小。说明不平衡扰动功率的分摊方式不同,对机组功率分配的影响并不大。因此,若不考虑随机扰动对频率波动均值的影响,用一次调频方式来模拟随机扰动对潮流分布的影响也是可行的。

#### 4.3 随机预测误差标准差对概率潮流结果的影响

为了分析随机预测误差标准差对概率潮流结果的影响,假定风电功率和负荷的预测增量不变(对应随机量的均值不变),设定二次调节控制方式为超前控制方式。通过改变随机预测误差的标准差大小,得到系统频率的概率密度函数如图2和图3所示。

图2保持负荷的预测误差标准差 $\sigma_{PDi} = 0.05$  p.u.不变,增大风电功率的预测误差标准差。由图2可知,随着风电功率预测误差标准差的增大,频率的均值不变,概率密度函数的标准差变大,体现为钟形曲线覆盖范围变宽,进而频率的合格率由 $\sigma_{PWi} = 0.05$

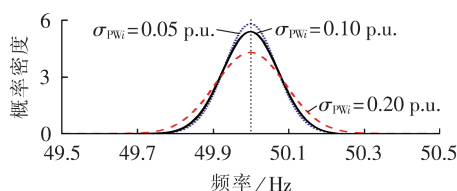


图2 不同风电功率预测误差标准差下系统频率的概率密度函数

Fig.2 Probabilistic density function of system frequency under different standard deviations of wind generator predictive error

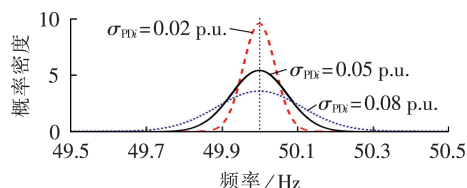


图3 不同负荷功率预测误差标准差下系统频率的概率密度函数

Fig.3 Probabilistic density function of system frequency under different standard deviations of load predictive error

p.u.时的99.63%降低到 $\sigma_{PWi} = 0.20$  p.u.时的96.81%。

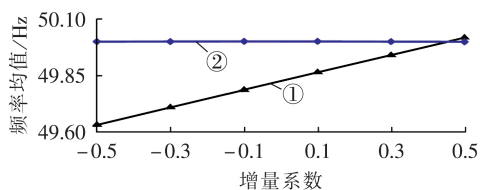
图3保持风电功率的预测误差标准差 $\sigma_{PWi} = 0.10$  p.u.不变,增大负荷功率的预测误差标准差。由图3可知,随着负荷功率预测误差标准差的增大,频率的均值不变,概率密度函数的标准差变大,频率的合格率由 $\sigma_{PDi} = 0.02$  p.u.时的100%降至 $\sigma_{PDi} = 0.08$  p.u.时的92.57%。

综上可知,随着风电功率或负荷功率预测误差标准差的增大,系统频率的合格率均会出现一定程度的下降。而采用本文所提的超前控制方式,系统频率仍可以保证在较大范围内合格,具有较强的鲁棒性。

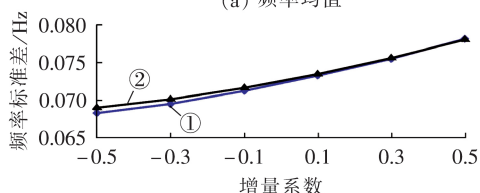
#### 4.4 风电功率渗透率对概率潮流结果的影响

本节分析风电功率渗透率大小对概率潮流结果的影响,假定不同风电功率渗透率下其随机预测误差标准差 $\sigma_{PWi} = 0.10$  p.u.维持不变,通过下一时刻风电机组 $DG_4$ 和 $DG_5$ 输出有功的预测值增量系数 $\lambda_{Wi}$ 的变化来反映渗透率的不同,对比超前和滞后2种二次调频控制方式,得到仿真结果如图4和图5所示。图中,网损均值和标准差为标么值,后同。

由图4(a)可知,随着风电功率增量系数的逐渐增大,滞后控制方式下系统频率均值逐渐增加,而超



(a) 频率均值



(b) 频率标准差

① 滞后控制, ② 超前控制

图4 不同风电功率渗透率下的频率

Fig.4 Frequencies under different wind power penetrations

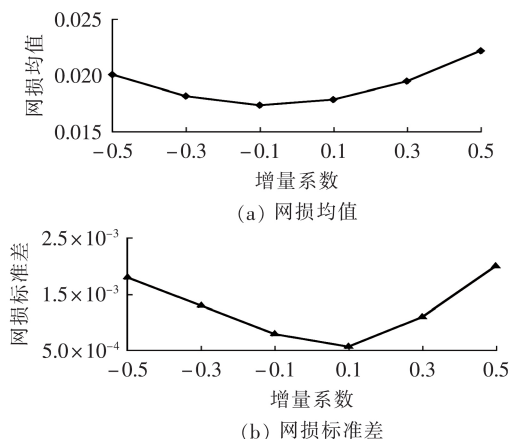


图5 不同风电功率渗透率下的网损

Fig.5 Active power losses under different wind power penetrations

前控制方式下系统频率均值则维持在额定值附近。原因在于:采用滞后控制方式时,二次调频量设定主要依据系统当前功率缺额,而源荷预测增量则由可控微电源的一次调频能力承担。随着风电功率的增加,二次调频量未发生变化,而具有一次调节能力的可控微电网输出功率减少,系统频率增加。当风电功率增量超过系统当前功率缺额和预测负荷增量时,系统频率将会超过额定频率 50 Hz,如  $\lambda_{wi}=0.5$  时。当采用超前控制方式时,二次调频量由系统当前功率缺额和源荷预测增量共同确定,随着风电功率的增加,相应的二次调节量也发生变化,因而可以将系统频率维持在额定值附近。

由图4(b)可知,随着风电功率渗透率的增加,2种控制方式下系统频率的标准差大小基本相同,且随着风电功率渗透率的增加而增加。原因在于:由4.2节可知,不同的二次调频控制方式不改变系统频率的标准差大小,随机扰动功率在2种控制方式下相同;由式(2)可知,随机预测误差功率关联风电功率的渗透率,渗透率越大,随机预测误差功率也越大,对应输出的系统频率标准差也越大。

图5给出了在超前控制方式下,系统网损的统计特征值情况。由图5可知,随着风电功率渗透率的增加,系统网损均值和标准差均出现先降后升的变化趋势。原因在于:在风电功率渗透率较小时,负荷主要由系统中的可控微电源承担,随着风电渗透率的增加,风电功率开始承担更多的负荷功率,此时系统潮流分布较为均匀,网损会出现一定程度的下降;当达到最小网损后,随着风电功率渗透率继续增大,其开始承担更多的负荷功率,进一步改变了网络中潮流的分布,网损又开始增加。

#### 4.5 风电机组的三相控制方式对概率潮流结果的影响

为分析风电机组的三相控制方式对概率潮流和

频率结果的影响,假定风电机组和可控微电源都采用电压型控制方式,其无功控制方式为控制恒电压幅值,设定其幅值等于电流型时的正序电压幅值。对比本文提出的电流型控制方式,微电源有功、无功功率的均值如表2所示。表中,有功、无功、网损均为标么值。

表2 不同风机控制方式下的潮流均值  
Table 2 Mean value of power flow under different control modes for wind turbines

| 微电源             | 相别 | 电流型     |         | 电压型     |          |
|-----------------|----|---------|---------|---------|----------|
|                 |    | 有功      | 无功      | 有功      | 无功       |
| DG <sub>4</sub> | a  | 0.239 3 | 0.038 7 | 0.327 9 | 0.074 7  |
|                 | b  | 0.240 1 | 0.039 1 | 0.219 3 | 0.038 7  |
|                 | c  | 0.240 6 | 0.039 2 | 0.172 8 | 0.001 7  |
| DG <sub>5</sub> | a  | 0.239 5 | 0.061 4 | 0.300 7 | 0.106 1  |
|                 | b  | 0.239 9 | 0.061 6 | 0.245 6 | 0.086 5  |
|                 | c  | 0.240 7 | 0.061 7 | 0.173 7 | -0.007 9 |
| 网损              |    | 0.018 5 |         | 0.017 8 |          |

观察表2中风电机组的三相功率均值可以发现,在电流型控制方式中,其三相有功的最大偏差为  $(0.240\ 6-0.239\ 3)/0.239\ 3 \times 100\ \% = 0.54\ \%$ ,三相无功的最大偏差为  $(0.039\ 2-0.038\ 7)/0.038\ 7 \times 100\ \% = 1.29\ \%$ ,三相功率基本对称;在电压型控制方式中,三相有功的最小偏差为  $(0.219\ 3-0.172\ 8)/0.172\ 8 \times 100\ \% = 26.91\ \%$ ,三相无功的最小偏差为  $(0.106\ 1-0.086\ 5)/0.086\ 5 \times 100\ \% = 22.66\ \%$ ,三相偏差较大。对比电流型和电压型的三相功率分配结果,说明在负荷不对称时,电流型风电机组为了保证其三相电流的对称性,其三相功率基本对称。因此,负荷的不对称分量主要由电压型可控微电源承担(相关数据见附录中表A1和表A2)。对比电流型和电压型控制方式下的有功网损可知,电压型控制方式下的有功网损为电流型控制方式下的94.05%,说明系统中微电源更多地采用电压型控制方式,有助于负荷不对称分量的分配,进而利于有功网损的减少。

#### 4.6 三点估计法应用于孤岛微电网在线三相概率潮流的可行性分析

本文采用三点估计法计算孤岛微电网的三相概率潮流,不需要对潮流方程进行任何特殊处理,与蒙特卡洛仿真相比,三点估计法的计算次数更少,可有效提高计算效率。计算环境如下:CPU为Core(TM)i5-6300HQ 2.3 GHz、计算机内存为4 GB,并采用MATLAB编写的概率潮流程序完成。以本文提出的超前控制方式为例,令三点估计法和10 000次蒙特卡洛仿真的结果分别为  $R_{TP}$  和  $R_{MCS}$ ,定义两者之间的相对误差为:

$$\varepsilon = \frac{|R_{TP} - R_{MCS}|}{R_{MCS}} \times 100\ \%$$

表3比较了采用2种方法得到的频率和网损的统计特征量,可见采用2种方法得到的结果基本相符。此外,由表3可见,本文采用的三点估计法计算速度快,能够适应孤岛微电网的在线分析要求。

表3 系统频率和网损比较

Table 3 Comparison of system frequency and active power loss

| 方法       | 频率 / Hz            |        | 网损     |                       | 耗时 / s |
|----------|--------------------|--------|--------|-----------------------|--------|
|          | 均值                 | 标准差    | 均值     | 标准差                   |        |
| 蒙特卡洛仿真   | 49.9996            | 0.0776 | 0.0187 | $7.64 \times 10^{-4}$ | 241.96 |
| 三点估计法    | 49.9992            | 0.0725 | 0.0185 | $7.72 \times 10^{-4}$ | 1.02   |
| 相对误差 / % | $8 \times 10^{-4}$ | 0.07   | 1.08   | 1.05                  | —      |

图6显示了与蒙特卡洛仿真得到的各可控微电源三相功率输出结果相比,采用三点估计法得到的计算结果的均值和标准差的相对误差。图中 $P_{gi}$ 、 $Q_{gi}$ 分别为第 $i$ 个可控微电源的三相总有功、总无功。结果显示均值和标准差的相对误差均在0.7%以下,这说明采用三点估计法得到的结果具有较高的精度。

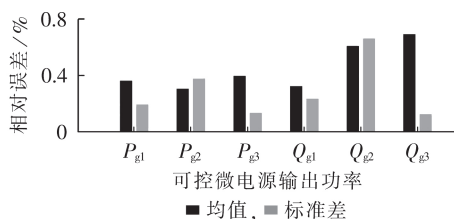


图6 可控微电源输出功率的相对误差

Fig.6 Relative error of output power for controllable micro sources

## 5 结论

本文提出了一种考虑频率波动的微电网三相概率潮流模型,该模型精确模拟了孤岛微电网系统、二次调频作用以及逆变并网微电源三相电压或电流的对称特性,并得到以下的结论。

(1)采用二次调频的超前控制方式对于保证系统频率质量最为有效,而仅考虑一次调频作用的控制方式则可能带来频率波动仿真的较大失真;针对不同大小的随机预测误差,本文所提二次调频超前控制方式仍能保证系统在较大范围内的系统频率质量合格,具有较强的鲁棒性。

(2)在调节三相不对称潮流时,电流型和电压型微电源的调节性能相差很大。电流型微电源按其给定有功输出对称电流,三相输出功率基本对称;而电压型微电源则输出对称电压,三相电流差异较大,系统负荷不平衡分量主要由系统中电压型微电源承担。为了解决潮流的不对称问题,应更多地采用电压型微电源,有利于降低系统的有功网损。

本文研究工作采用改造后的标准测试系统验证

了所提方法的有效性。后续研究将基于本文所提方法,充分考虑风电和负荷的相关性及其功率和预测误差服从任意分布时的情况,以满足实际孤岛微电网中在线概率评估要求。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 支娜,肖曦,田培根,等. 微网群控制技术研究现状与展望[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):107-115.  
ZHI Na, XIAO Xi, TIAN Peigen, et al. Research and prospect of multi-microgrid control strategies[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 107-115.
- [2] 陈洁. 考虑三相不平衡潮流的微网分相优化调度[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 184-193.  
CHEN Jie. Optimal single-phase scheduling for microgrid considering unbalanced three-phase power flow[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 184-193.
- [3] 杨健,唐飞,廖清芬,等. 考虑可再生能源随机性的微电网经济性与稳定性协调优化策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 179-184, 200.  
YANG Jian, TANG Fei, LIAO Qingfen, et al. Microgrid economy and stability coordinated optimization considering randomness of renewable energy resource[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 179-184, 200.
- [4] DELGADO C, DOMÍNGUEZ J A. Point estimate method for probabilistic load flow of an unbalanced power distribution system with correlated wind and solar sources[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 61: 267-278.
- [5] CARAMIA P, CARPINELLI G, PAGANO M, et al. Probabilistic three-phase load flow for unbalanced electrical distribution systems with wind farms[J]. IET Renewable Power Generation, 2007, 1(2): 115-122.
- [6] 朱星阳,刘文霞,张建华,等. 电力系统随机潮流及其安全评估应用研究综述[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 257-270.  
ZHU Xingyang, LIU Wenxia, ZHANG Jianhua, et al. Reviews on power system stochastic load flow and its applications in safety evaluation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 257-270.
- [7] MARTINEZ J A, MAHSEREDJIAN J. Load flow calculations in distribution systems with distributed resources: a review [C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. Detroit, MI, USA: IEEE, 2011: 1-8.
- [8] 周竞,王珂,石飞,等. 计及源荷双侧响应的概率潮流计算方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(8): 76-81.  
ZHOU Jing, WANG Ke, SHI Fei, et al. Probabilistic power flow algorithm considering source-side and load-side responses[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8): 76-81.
- [9] GUPTA N, DARATHA N. Probabilistic three-phase load flow for unbalanced electrical systems with wind farms[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 87: 154-165.
- [10] RAN X, MIAO S. Three-phase probabilistic load flow for power system with correlated wind, photovoltaic and load[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(12): 3093-3101.
- [11] 朱星阳,刘文霞,张建华,等. 计及系统调频作用的随机潮流模型与算法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 168-178.  
ZHU Xingyang, LIU Wenxia, ZHANG Jianhua, et al. Probabilistic load flow method considering function of frequency mo-

- dulation[J]. Proceeding of the CSEE, 2014, 34(1):168-178.
- [12] 石飞, 於益军, 冯树海, 等. 计及多机平衡策略的半不变量法在线概率潮流[J]. 电网技术, 2015, 39(5):1337-1342.  
SHI Fei, WU Yijun, FENG Shuhai, et al. Online probabilistic load flow based on cumulant method considering multi-slack strategy[J]. Power System Technology, 2015, 39(5):1337-1342.
- [13] PAN Z, SHI M, WU Y, et al. Probabilistic load flow of islanded microgrid with droop-controlled distributed generations[C]// IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Xi'an, China: IEEE, 2016:536-540.
- [14] 王聪, 颜伟, 赵霞, 等. 考虑逆变电源控制模式的微电网三相潮流模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12):2960-2967.  
WANG Cong, YAN Wei, ZHAO Xia, et al. Three-phase power flow model for microgrid considering inverter control modes[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12):2960-2967.
- [15] HWANG P, MOON S, AHN S. A vector-controlled distributed generator model for a power flow based on a three-phase current injection method[J]. Energies, 2013, 6(8):4269-4287.
- [16] 颜伟, 赵瑞锋, 赵霞, 等. 自动发电控制中控制策略的研究发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8):149-155.  
YAN Wei, ZHAO Ruifeng, ZHAO Xia, et al. Review on control strategies in automatic generation control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8):149-155.
- [17] 刘宇, 高山, 杨胜春, 等. 电力系统概率潮流算法综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23):127-135.  
LIU Yu, GAO Shan, YANG Shengchun, et al. Review on algorithms for probabilistic load flow in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23):127-135.
- [18] 谢应昭, 卢继平. 基于多项式正态变换和最大熵估计的含风电系统电压稳定概率分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10):66-73.  
XIE Yingzhao, LU Jiping. Probabilistic voltage stability analysis based on polynomial normal transformation and maximum entropy estimation for power system containing wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10):66-73.
- [19] 车仁飞, 李仁俊. 一种少环配电网三相潮流计算新方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1):74-79.  
CHE Renfei, LI Renjun. A new three-phase power flow method for weakly meshed distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1):74-79.
- [20] ROMAN C, ROSEHART W. Complementarity model for generator buses in OPF-based maximum loading problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1):514-516.

#### 作者简介:



王聪

王聪(1983—),男,湖北仙桃人,讲师,博士,从事电力系统优化运行与控制、智能控制等方面的研究工作(E-mail: cong100hai@163.com);

颜伟(1968—),男,四川眉山人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统优化运行与控制、风险评价等方面的研究工作。

(编辑 李玮)

## Online three-phase probabilistic power flow calculation method for islanded microgrid considering frequency fluctuation

WANG Cong<sup>1</sup>, YAN Wei<sup>2</sup>, HU Xiuqiong<sup>1</sup>

(1. School of Intelligent Manufacturing, Panzhihua University, Panzhihua 617000, China;

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** In order to quantify the impact of short-term source-load power disturbance on frequency fluctuation and guarantee the simulation accuracy, a three-phase probabilistic power flow model of microgrid is developed. In this model, the prediction component and random prediction error component are employed to represent the disturbance of wind power and load demands respectively. At the same time, the primary frequency regulation is utilized to balance the random prediction error. The secondary frequency regulation based on advanced control mode is used to balance current power shortage and the prediction component of disturbance power. In addition, the proposed model considers the symmetrical control characteristics of three-phase voltage and current of micro sources, and the static frequency voltage regulation characteristics of controllable micro sources and loads are considered. Furthermore, the model can accurately simulate the frequency adjustment process of the islanded microgrid and the three-phase power flow control characteristics of the micro sources. As a result, the simulation accuracy of three-phase power flow and frequency fluctuation can be efficiently improved. Three-point estimation method is applied to provide the probabilistic evaluation of the model, and the proposed method is verified by simulative results on modified IEEE 33-bus system.

**Key words:** islanded microgrid; primary frequency regulation; secondary frequency regulation; three-point estimation method; three-phase probabilistic power flow

## 附 录

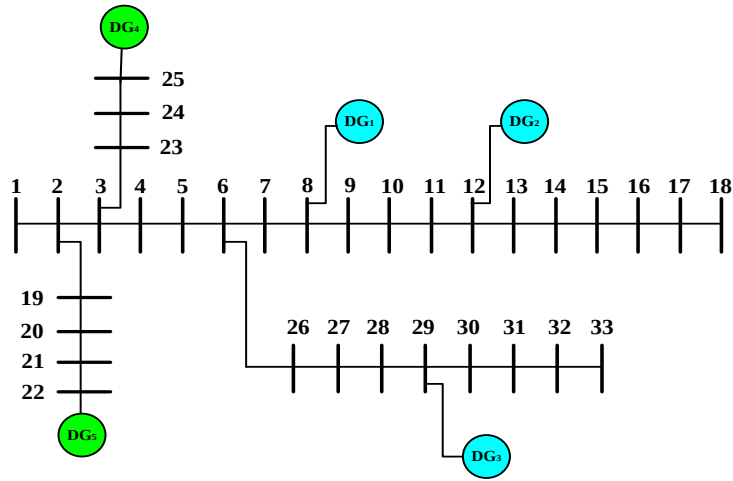


图 A1 IEEE 33 节点修改系统的接线图

**Fig.A1 Modified IEEE 33-bus distribution system circuit diagram**

表 A1 3 种方案下的各微电源有功输出

**Table A1 Active power of micro sources under different schemes**

| DG              | 相别 | 均值     |        |        | 标准差    |        |        |
|-----------------|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                 |    | 方案1    | 方案2    | 方案3    | 方案1    | 方案2    | 方案3    |
| DG <sub>1</sub> | a  | 0.4796 | 0.4828 | 0.4850 | 0.0380 | 0.0382 | 0.0383 |
|                 | b  | 0.3008 | 0.3036 | 0.3052 | 0.0303 | 0.0304 | 0.0305 |
|                 | c  | 0.1596 | 0.1619 | 0.1632 | 0.0245 | 0.0246 | 0.0247 |
| DG <sub>2</sub> | a  | 0.3285 | 0.3303 | 0.3314 | 0.0200 | 0.0201 | 0.0201 |
|                 | b  | 0.3067 | 0.3084 | 0.3095 | 0.0190 | 0.0190 | 0.0191 |
|                 | c  | 0.2508 | 0.2522 | 0.2531 | 0.0166 | 0.0167 | 0.0167 |
| DG <sub>3</sub> | a  | 0.3792 | 0.3817 | 0.3833 | 0.0279 | 0.0280 | 0.0281 |
|                 | b  | 0.2940 | 0.2961 | 0.2975 | 0.0242 | 0.0243 | 0.0244 |
|                 | c  | 0.2398 | 0.2418 | 0.2430 | 0.0220 | 0.0220 | 0.0221 |
| DG <sub>4</sub> | a  | 0.2393 | 0.2393 | 0.2393 | 0.0239 | 0.0239 | 0.0239 |
|                 | b  | 0.2401 | 0.2401 | 0.2401 | 0.0240 | 0.0240 | 0.0240 |
|                 | c  | 0.2406 | 0.2406 | 0.2406 | 0.0241 | 0.0241 | 0.0241 |
| DG <sub>5</sub> | a  | 0.2395 | 0.2395 | 0.2395 | 0.0239 | 0.0239 | 0.0239 |
|                 | b  | 0.2399 | 0.2399 | 0.2399 | 0.0240 | 0.0240 | 0.0240 |
|                 | c  | 0.2407 | 0.2407 | 0.2407 | 0.0241 | 0.0241 | 0.0241 |

表 A2 3 种方案下的各微电源无功输出  
Table A2 Reactive power of micro sources under different schemes

| DG              | 相别 | 均值     |        |        | 标准差    |        |        |
|-----------------|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                 |    | 方案1    | 方案2    | 方案3    | 方案1    | 方案2    | 方案3    |
| DG <sub>1</sub> | a  | 0.4114 | 0.4088 | 0.4073 | 0.0147 | 0.0147 | 0.0147 |
|                 | b  | 0.3345 | 0.3324 | 0.3312 | 0.0165 | 0.0166 | 0.0166 |
|                 | c  | 0.2258 | 0.2243 | 0.2232 | 0.0202 | 0.0202 | 0.0203 |
| DG <sub>2</sub> | a  | 0.1836 | 0.1823 | 0.1815 | 0.0133 | 0.0133 | 0.0133 |
|                 | b  | 0.1672 | 0.1659 | 0.1651 | 0.0136 | 0.0136 | 0.0136 |
|                 | c  | 0.1393 | 0.1381 | 0.1374 | 0.0141 | 0.0141 | 0.0142 |
| DG <sub>3</sub> | a  | 0.3300 | 0.3280 | 0.3269 | 0.0156 | 0.0157 | 0.0157 |
|                 | b  | 0.2881 | 0.2863 | 0.2853 | 0.0172 | 0.0172 | 0.0173 |
|                 | c  | 0.2481 | 0.2465 | 0.2454 | 0.0188 | 0.0188 | 0.0189 |
| DG <sub>4</sub> | a  | 0.0363 | 0.0378 | 0.0387 | 0.0428 | 0.0429 | 0.0429 |
|                 | b  | 0.0367 | 0.0382 | 0.0391 | 0.0430 | 0.0430 | 0.0431 |
|                 | c  | 0.0368 | 0.0383 | 0.0392 | 0.0431 | 0.0431 | 0.0432 |
| DG <sub>5</sub> | a  | 0.0601 | 0.0609 | 0.0614 | 0.0489 | 0.0489 | 0.0489 |
|                 | b  | 0.0603 | 0.0611 | 0.0616 | 0.0489 | 0.0490 | 0.0490 |
|                 | c  | 0.0604 | 0.0612 | 0.0617 | 0.0491 | 0.0491 | 0.0492 |