

## 基于坐标旋转虚拟阻抗的微电网控制与性能分析

王瑞琪<sup>1</sup>, 程艳<sup>1</sup>, 孙树敏<sup>1</sup>, 靳占新<sup>2</sup>, 李宝贤<sup>3</sup>, 李超英<sup>4</sup>

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250002; 2. 国网山东省电力公司人力资源部, 山东 济南 250001;  
3. School of Electrical, Computer and Energy Engineering, Arizona State University, USA;  
4. 国网山东省电力公司德州供电公司, 山东 德州 263000)

**摘要:** 微电网中系统阻抗不平衡和复阻抗特性、电源和负载位置复杂性等因素严重影响了系统功率分配的准确性、稳定性和动态性能。提出了基于坐标旋转虚拟阻抗的孤岛微电网控制策略, 采用坐标旋转虚拟阻抗闭环改善微电网的阻抗特性, 基于电压幅值和频率下垂控制实现系统功率分配, 带前馈补偿的电压外环控制和电流内环控制保证了系统的稳态和暂态性能。建立了完整的微电网小信号动态模型, 并在此基础上分析了坐标旋转虚拟阻抗对整个微电网性能的影响。算例仿真验证了小信号动态建模分析的准确性, 证明了该方法能够改进功率解耦和分配的准确性, 提高微电网控制的稳定性和动态性能。

**关键词:** 微电网; 虚拟阻抗; 小信号模型; 坐标旋转; 下垂控制

### Control and performance analysis of microgrid based on coordinate rotational virtual impedance

WANG Rui-qi<sup>1</sup>, CHENG Yan<sup>1</sup>, SUN Shu-min<sup>1</sup>, JIN Zhan-xin<sup>2</sup>, LI Bao-xian<sup>3</sup>, LI Chao-ying<sup>4</sup>

(1. Shandong Electric Power Research Institute of State Grid, Jinan 250002, China; 2. Shandong Electric Company Human Resources Department of State Grid, Jinan 250001, China; 3. School of Electrical, Computer and Energy Engineering, Arizona State University, USA; 4. Dezhou Electric Company of State Grid, Dezhou 263000, China)

**Abstract:** The power-sharing accuracy, system stability and transient performance can be seriously influenced by the unbalanced complex impedance, the complicated location of power generations and loads in microgrid. The control strategy of autonomous microgrid based on coordinate rotational virtual impedance is proposed to handle this problem. The coordinate rotational virtual impedance loop is adopted to improve the impedance characteristic. The system power-sharing is implemented by voltage magnitude and frequency based droop control strategy. The system stability and transient performance is ensured by the outer voltage control loop and inner current control loop with feed-forward compensation. In order to analyze the effect of coordinate rotational virtual impedance on the performance of microgrid, the small-signal dynamic model of whole microgrid is built. The simulation results verify the accuracy of small-signal dynamic modeling and analysis, confirming that the proposed control strategy can improve the active and reactive power decoupling, the power sharing accuracy, and the system stability and transient performance.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050206).

**Key words:** microgrid; virtual impedance; small-signal model; coordinate rotation; droop control

中图分类号: TM76      文献标识码: A      文章编号: 1674-3415(2014)12-0078-09

## 0 引言

在能源需求与环境保护的双重压力下, 既可提高传统能源利用率又能充分利用各种可再生能源的分布式供能技术获得了越来越多的重视与应用。微电网由分布式电源(Distributed Generator, DG)、储

能装置、能量变换装置、相关负载和监控、保护装置汇集而成, 能够充分发挥 DG 为电力系统和用户所带来的技术、经济、环境效益, 进一步提高电力系统运行的灵活性、高效性和清洁性, 更好地满足电力用户对电能质量、供电可靠性的要求, 是智能电网建设的重要组成部分<sup>[1-4]</sup>。

在微电网孤岛工作模式下, 多种类型的能源利用逆变器或者交交变流器并联到微电网的交流母线上。在维持电压幅值和频率稳定的同时实现功率的

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2012AA050206); 国家电网公司科技项目(12-12)

准确分配, 是微电网孤岛运行控制中需要解决的关键问题。根据即插即用与“对等”的控制思想和设计理念提出的电压幅值和频率下垂控制, 使 DG 只需要检测接入点的信息, 通过调整自身输出电压的频率和幅值来控制输出的有功和无功功率, 无需通信环节, 因此具有更高的可靠性和灵活性<sup>[5-7]</sup>。文献[8]和文献[9]假定微电网线路阻抗呈感性, 基于下垂控制策略对微电网控制系统进行了整体设计。然而, 接入中低压电网的微电网的线路阻抗一般呈复阻抗特性, 逆变器的输出阻抗特性也依赖于所采取的控制策略和系统参数, 而且 DG 和负载的分布导致线路阻抗不平衡<sup>[10]</sup>。因此, 采用传统下垂控制的微电网不但无法有效实现功率解耦和均分, 同时系统的稳态和动态性能也会受到影响。

国内外围绕微电网的控制策略问题提出了众多改进方法。基于虚拟有功无功坐标系<sup>[11]</sup>和虚拟电压频率坐标系<sup>[12]</sup>的改进下垂控制策略实现了功率解耦, 但均未能同时提高系统功率分配的准确性。文献[13-15]分别基于静止坐标系引入虚拟电感、虚拟电阻、虚拟阻抗设计系统阻抗特性和相应的控制策略, 改善了系统的功率控制和分配性能, 同时也能实现循环电流抑制和高次谐波电流分配。但上述虚拟阻抗设计方法引入了高频电流干扰, 使用低通滤波器又产生了相移和延迟。文献[16]基于 dq 旋转坐标系设计了虚拟阻抗, 但是虚拟阻抗选择方法过于粗略, 不能保证微网的稳定性, 也没有考虑对微网动态性能的影响。国内外现有文献缺乏虚拟阻抗对微电网系统性能影响的相关理论研究<sup>[17]</sup>。

本文针对孤岛模式下系统阻抗复杂的微电网, 提出了基于坐标旋转虚拟阻抗的微电网控制策略。通过 dq 坐标旋转正交变换设计虚拟阻抗, 基于电压幅值和频率下垂控制实现系统功率分配, 采用带前馈补偿的电压外环控制和电流内环控制保证系统的稳态和动态性能。同时, 基于 dq 旋转坐标系设计虚拟阻抗便于建立完整的微电网小信号动态模型, 在此基础上分析了坐标旋转虚拟阻抗对整个微电网稳定性和动态性能的影响。算例仿真验证了所提出控制策略的有效性和理论分析的准确性。

## 1 微电网结构

图 1 为典型的微电网结构示意图, 其中包含光伏电池、风力发电、燃料电池三个典型的分布式电源 (DG1~DG3) 和三个位置不同的负载 (Load1~Load3), 各段线路阻抗分别为  $z_1 \sim z_5$ 。本文中各分布式电源均假设为直流源或整流后的直流源, 经 PWM 逆变器转变为三相交流电并由 LCL 低通滤波

器滤除高次谐波后, 并联连接到微电网的交流母线上, 并通过静态切换开关在公共连接点 PCC 处与主电网相连。

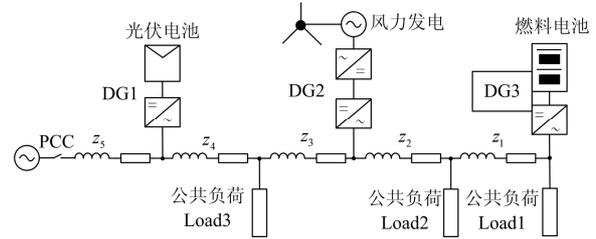


图 1 微电网结构

Fig. 1 Schematic of the microgrid

## 2 微电网的功率下垂控制

图 2 为分布式电源接入微电网交流母线的戴维南等效电路。图中,  $E \angle \phi$  为逆变器开路电压,  $U \angle 0$  为交流母线电压,  $Z$  和  $\theta$  分别为逆变器输出阻抗的幅值和相角。

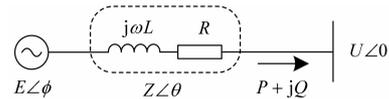


图 2 DG 接入微电网的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of DG connected to microgrid

根据等效电路, 逆变器输出的有功和无功功率分别为

$$P = \frac{U}{Z} [(E \cos \phi - U) \cos \theta + E \sin \phi \sin \theta] \quad (1)$$

$$Q = \frac{U}{Z} [(E \cos \phi - U) \sin \theta - E \cos \phi \cos \theta] \quad (2)$$

由于逆变器输出电压与交流母线电压的相角差  $\phi$  非常小, 因此, 式(1)和式(2)可以近似为

$$P \approx \frac{U}{Z} [(E - U) \cos \theta + E \phi \sin \theta] \quad (3)$$

$$Q \approx \frac{U}{Z} [(E - U) \sin \theta - E \phi \cos \theta] \quad (4)$$

根据系统阻抗特性的不同, 即相角  $\theta$  的不同, 输出有功和无功功率与阻抗特性的关系如表 1 所示。

表 1 输出功率和系统阻抗特性的关系

Table 1 Relationship between output power and system impedance

阻抗特性	纯阻性 ( $\theta = 0^\circ$ )	纯感性 ( $\theta = 90^\circ$ )	复阻抗特性 ( $0^\circ < \theta < 90^\circ$ )
有功功率	$\frac{U(U-E)}{Z}$	$\frac{UE\phi}{Z}$	$\frac{U}{Z} [(E-U) \cos \theta + E\phi \sin \theta]$
无功功率	$-\frac{UE\phi}{Z}$	$\frac{U(U-E)}{Z}$	$\frac{U}{Z} [(E-U) \sin \theta - E\phi \cos \theta]$

传统下垂控制策略通常认为系统阻抗近似呈感性, 因此有功功率主要由电压相角  $\phi$  决定, 无功功率主要由电压幅值  $E$  决定<sup>[18]</sup>, 其功率调节关系为

$$\omega_o = \omega_n - mP \quad (5)$$

$$V_o = V_n - nQ \quad (6)$$

式中:  $\omega_o$  和  $\omega_n$  分别为逆变器的输出角频率和额定角频率;  $V_o$  和  $V_n$  分别为逆变器输出电压幅值和额定幅值;  $m$  和  $n$  分别为有功功率和无功功率的下垂系数。增加下垂系数可以提高动态响应性能, 但同时加大了电压幅值和频率的偏移<sup>[19]</sup>。另一方面, 在实际微电网中线路阻抗一般呈复阻抗特性, 逆变器的输出阻抗也依赖于所采取的控制策略和系统参数, 而且 DG 和负载的分布更导致线路阻抗不平衡。微电网中线路阻抗差异和逆变器输出阻抗差异都会影响功率分配的准确性, 文献[20]给出了相关理论证明。

图 3 为 DG 控制及接口电路图, 图 4 为逆变器的闭环控制框图(实线部分), 采用带前馈补偿的电压外环 PI 控制和电流内环 PI 控制可以有效地减少系统的稳态误差, 提高系统的暂态性能。针对图 4 根据戴维南定理采用开路电压和短路电流计算逆变

器的输出阻抗, 其频域特性随电压 PI 调节器的积分系数  $k_i$  和滤波器电阻  $R_f$  的变化情况如图 5 所示( $k_{iv} = 0, 500$ ,  $R_f = 0.2, 0.4, 0.8 \Omega$ , 箭头方向表示  $R_f$  增加)。从图中可以看出, 当  $k_i = 500$  时, 逆变器输出阻抗在输出电压频率处近似为感性; 当  $k_i = 0$  时, 逆变器输出阻抗在输出电压频率处近似为复阻抗特性。逆变器输出阻抗对滤波器的寄生电阻  $R_f$  也很敏感, 但是  $R_f$  取决于滤波器的等效串联电阻和 IGBT 的开关电阻等因素, 难以测量和估计<sup>[13]</sup>。

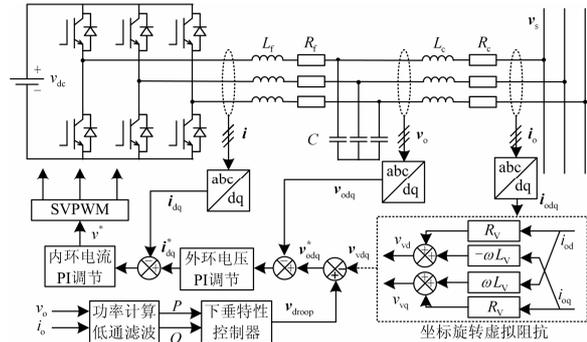


图 3 DG 控制及接口电路

Fig. 3 Control and interface circuit of DG

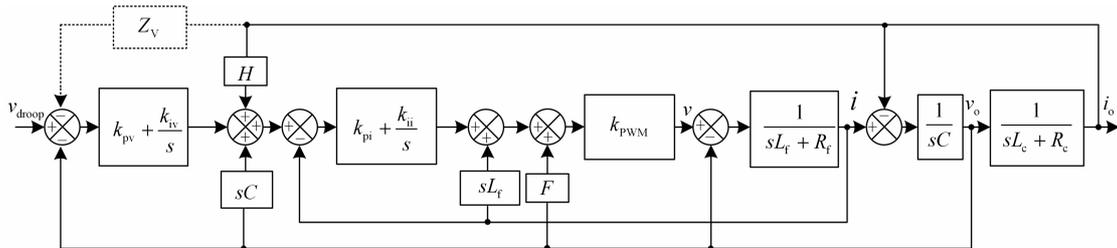


图 4 逆变器闭环控制框图

Fig. 4 Block diagram of control loop of inverter

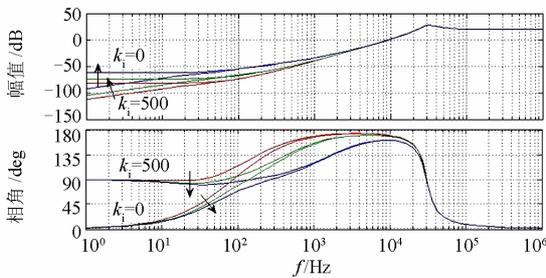


图 5 无虚拟阻抗的逆变器频域特性

Fig. 5 Frequency domain characteristic of inverter without virtual impedance

因此, 实际微电网的系统阻抗特性复杂, 传统下垂控制策略并不适用, 且限制了微电网功率控制和分配性能。

### 3 坐标旋转虚拟阻抗

虚拟阻抗无需增加硬件设备就可以用来设计系统阻抗特性, 如图 3 虚线部分所示, 其闭环实现方式为

$$v_o^* = v_{droop} - z_v(s)i_o \quad (7)$$

式中:  $v_o^*$  为电压控制的参考给定;  $v_{droop}$  为下垂控制产生的电压参考;  $z_v(s)$  为虚拟阻抗。虚拟阻抗包括虚拟电阻和虚拟电感。虚拟电阻可以调节系统的阻尼特性, 在高频区自动分配谐波电流, 降低相位误差对功率分配的影响。虚拟电感有利于实现功率解耦, 抑制系统环流, 降低阻抗不平衡的影响。文献[21]通过输出电流时间微分来设计虚拟电感  $z_v(s) = sL_v$ , 引入了电流高次谐波。文献[13]在此基础上增加了低通滤波器来避免高频干扰, 但造成了

相移和延迟。本文通过 dq 坐标旋转正交变换设计虚拟阻抗, 使 DG 的输出电流解耦后直接应用于虚拟阻抗闭环实现, 降低了电流高次谐波的影响, 避免相移和延迟, 工程实现简单。假定虚拟阻抗中  $R_V = -0.055 \Omega$ ,  $L_V = 1.1 \text{ mH}$ , 虚拟电阻取负是为了改变系统阻尼特性, 提高系统暂态性能, 则逆变器输出阻抗的频域特性随控制参数  $k_i$  和滤波器电阻  $R_f$  的变化情况如图 6 所示。与图 5 对比表明, 引入虚拟阻抗闭环后, 逆变器的输出阻抗对于系统控制参数  $k_i$  和滤波器电阻  $R_f$  的变化不敏感, 且在输出电压频率处呈感性, 同时高频段输出阻抗呈阻性, 可以有效抑制高次谐波。

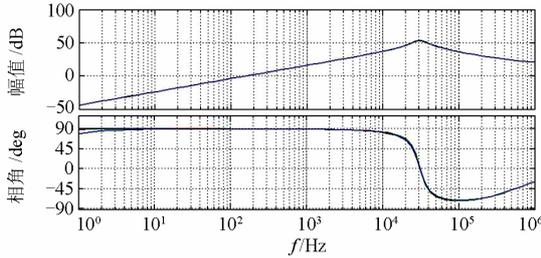


图 6 带虚拟阻抗的逆变器频域特性

Fig. 6 Frequency domain characteristic of inverter with virtual impedance

## 4 基于坐标旋转虚拟阻抗的微电网小信号动态建模与分析

### 4.1 微电网小信号动态建模

为理论分析坐标旋转虚拟阻抗对微电网系统性能的影响, 建立图 1 所示微电网的小信号动态模型, DG 控制结构如图 3 所示。此系统中包含 3 个额定功率和下垂特性相同的 DG 以及位置不同的阻感负载, 线路阻抗及具体控制参数见算例分析部分。

每个 DG 的逆变器模型建立在其输出电压确定的 dq 旋转坐标系上, 旋转角频率  $\omega_i$  由相应的下垂特性确定。为建立整个微电网的动态模型, 需要将 DG 模型变换到旋转角频率为  $\omega_{\text{com}}$  的微电网全局参考坐标系下<sup>[22]</sup>, 则第  $i$  个 DG 的逆变器参考坐标系与微电网全局参考坐标系的夹角为

$$\delta_i = \int (\omega_i - \omega_{\text{com}}) \quad (8)$$

平均功率  $P$ 、 $Q$  由瞬时输出电压和电流计算后经低通滤波器得到

$$P = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} (v_{\text{od}} i_{\text{od}} + v_{\text{oq}} i_{\text{oq}}) \quad (9)$$

$$Q = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} (v_{\text{od}} i_{\text{oq}} - v_{\text{oq}} i_{\text{od}}) \quad (10)$$

式中:  $\omega_c$  为低通滤波器的截止频率;  $v_{\text{od}}$ 、 $v_{\text{oq}}$ 、 $i_{\text{od}}$ 、 $i_{\text{oq}}$

分别为 dq 轴的输出电压和电流。

根据前文所述, 由式(5)~式(7)可得, 带 dq 坐标旋转虚拟阻抗闭环的下垂特性调节关系为

$$\omega_i = \omega_n - mP \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} v_{\text{od}}^* \\ v_{\text{oq}}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_n - nQ \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_V & -\omega_i L_V \\ \omega_i L_V & R_V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\text{od}} \\ i_{\text{oq}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

上式采用电压矢量定向控制, 将参考电压矢量定位于旋转坐标系的 d 轴。

为获得稳定的负载电压和良好的电压调节性能, 电压外环控制采用带前馈补偿的 PI 调节器来产生参考电流矢量, 其动态特性为

$$\frac{d\phi_d}{dt} = v_{\text{od}}^* - v_{\text{od}}$$

$$\frac{d\phi_q}{dt} = v_{\text{oq}}^* - v_{\text{oq}}$$

$$i_d^* = k_{\text{pv}} (v_{\text{od}}^* - v_{\text{od}}) + k_{\text{iv}} \phi_d - \omega_n C v_{\text{oq}} + H i_{\text{od}} \quad (13)$$

$$i_q^* = k_{\text{pv}} (v_{\text{oq}}^* - v_{\text{oq}}) + k_{\text{iv}} \phi_q + \omega_n C v_{\text{od}} + H i_{\text{oq}} \quad (14)$$

式中:  $k_{\text{pv}}$ 、 $k_{\text{iv}}$  分别为电压 PI 控制器的比例和积分系数;  $H$  为前馈增益。

为获得良好的系统动态特性和电流调节性能, 电流内环控制采用带前馈补偿的 PI 调节器来产生参考电压矢量, 其动态特性为

$$\frac{d\phi_d}{dt} = i_{\text{od}}^* - i_{\text{od}}$$

$$\frac{d\phi_q}{dt} = i_{\text{oq}}^* - i_{\text{oq}}$$

$$v_d^* = k_{\text{pi}} (i_d^* - i_d) + k_{\text{ii}} \phi_d - \omega_n L_f i_q + F v_{\text{od}} \quad (15)$$

$$v_q^* = k_{\text{pi}} (i_q^* - i_q) + k_{\text{ii}} \phi_q + \omega_n L_f i_d + F v_{\text{oq}} \quad (16)$$

式中:  $k_{\text{pi}}$ 、 $k_{\text{ii}}$  分别为电流 PI 控制器的比例和积分系数;  $F$  为前馈增益。

逆变器接口电路的电压电流动态特性可以表示为

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R_f}{L_f} i_d + \omega_i i_q + \frac{v_d - v_{\text{od}}}{L_f} \quad (17)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R_f}{L_f} i_q - \omega_i i_d + \frac{v_q - v_{\text{oq}}}{L_f} \quad (18)$$

$$\frac{dv_{\text{od}}}{dt} = \omega_i v_{\text{oq}} + \frac{i_d - i_{\text{od}}}{C} \quad (19)$$

$$\frac{dv_{\text{oq}}}{dt} = -\omega_i v_{\text{od}} + \frac{i_q - i_{\text{oq}}}{C} \quad (20)$$

$$\frac{di_{\text{od}}}{dt} = -\frac{R_c}{L_c} i_{\text{od}} + \omega_i i_{\text{oq}} + \frac{v_{\text{od}} - v_{\text{sd}}}{L_c} \quad (21)$$

$$\frac{di_{\text{oq}}}{dt} = -\frac{R_c}{L_c} i_{\text{oq}} - \omega_i i_{\text{od}} + \frac{v_{\text{oq}} - v_{\text{sq}}}{L_c} \quad (22)$$

式中： $v_d$ 、 $v_q$ 、 $i_d$ 、 $i_q$  分别为逆变器 dq 轴的电压和电流； $v_{sd}$ 、 $v_{sq}$  分别为 dq 轴的交流母线电压； $L_f$ 、 $C$ 、 $L_c$  构成 LCL 滤波器； $R_f$ 、 $R_c$  为等效电阻。

式(8)~式(22)描述了微电网中 DG 的动态特性，将其在稳态运行点处线性化可得

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_{DG} = \mathbf{A}_{DG} \Delta \mathbf{x}_{DG} + \mathbf{B}_{DG} \Delta \mathbf{v}_{sdq} \quad (23)$$

其中： $\Delta \mathbf{x}_{DG} = [\Delta \delta \ \Delta P \ \Delta Q \ \Delta \phi_{dq} \ \Delta \theta_{dq} \ \Delta i_{dq} \ \Delta v_{odq} \ \Delta i_{odq}]^T$ ； $\Delta \mathbf{v}_{sdq} = [\Delta v_{sd} \ \Delta v_{sq}]^T$ ； $\mathbf{A}_{DG}$ 、 $\mathbf{B}_{DG}$  分别为状态矩阵和输入矩阵。需要说明的是，文中所有下标为 dq 的变量均为类似列向量。微电网中分布式电源 DG1 的状态矩阵和输入矩阵见附录。

整个微电网的小信号动态模型包括：DG 的小信号动态子模型和网络及负载小信号动态子模型。类似于逆变器的接口电路模型，网络及负载小信号模型由网络及负载的电路等效微分方程线性化后得到<sup>[23]</sup>。通过坐标变换将各 DG 的小信号模型和网络及负载小信号模型变换到全局参考坐标系下，得到整个微电网的小信号状态空间模型为

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \quad (24)$$

其中， $\Delta \mathbf{x}$  是包含 DG、线路和负载状态变量的微电网状态矢量。

#### 4.2 坐标旋转虚拟阻抗的小信号动态分析

根据经典控制理论，小信号模型的特征根反映了系统的稳定性、动态性能和阻尼特性，而且系统的频率模式与特征根也密切相关<sup>[24]</sup>。微电网小信号模型的所有特征根分布如图 7 所示，在较宽的频带内，系统的特征根被明显地分为高频(约 1.6 kHz)、中频(400~650 Hz)、低频(2~10 Hz)三组频率模式。通过系统矩阵特征根的敏感性分析和控制系统设计原理可知，低频模式对应于功率控制器和低通滤波器的状态变量，中频模式对电压控制闭环的状态变量较为敏感，电流控制闭环和 LCL 滤波器的状态变量处于高频模式。这种频率分布特征避免了外层控制闭环对内层控制闭环稳定性和鲁棒性的影响，保证了微电网的良好运行。

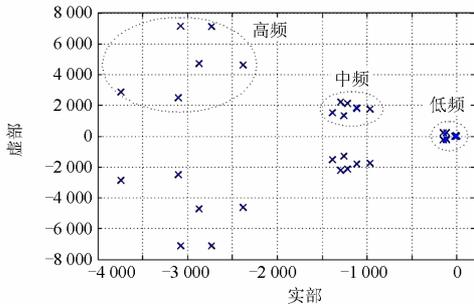
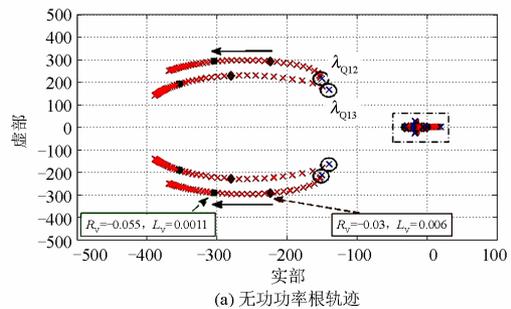


图 7 微电网的特征根分布

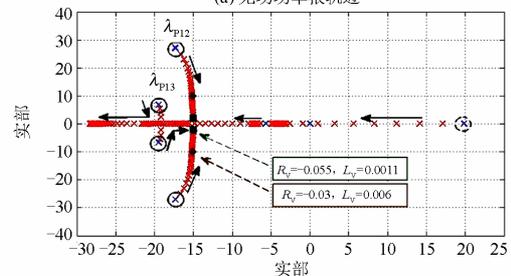
Fig. 7 Eigenvalues distribution of microgrid

图 8(a)为虚拟阻抗变化时，对应微电网低频模式下特征值根轨迹的变化。其中 $\lambda_{Q12}$ 是与 DG1 和 DG2 的无功功率状态变量相对敏感的一对共轭极点， $\lambda_{Q13}$ 是与 DG1 和 DG3 的无功功率状态变量相对敏感的一对共轭极点，因此无功功率控制处于欠阻尼状态。此时系统有超调且存在振荡，振荡的幅度与共轭极点和零点的夹角有关，角度越小，幅值越小。同时，共轭极点离虚轴的距离与系统响应快慢有关，距离越远，响应越慢。因此，随着虚拟阻抗值的线性增加( $R_v=0 \rightarrow 0.09 \ \Omega$ ， $L_v=0 \rightarrow 1.8 \text{ mH}$ )，系统的振荡幅值越来越小，动态响应越来越快。

图 8(b)为图 8(a)中虚线框中图形的放大，其中 $\lambda_{p12}$ 是与 DG1 和 DG2 的有功功率状态变量相对敏感的一对共轭极点， $\lambda_{p13}$ 是与 DG1 和 DG3 的有功功率状态变量相对敏感的一对共轭极点。当虚拟阻抗为零时，虚轴右侧存在一个不稳定极点。这表明对于系统阻抗特性复杂的微电网，只采用传统下垂控制方法而无虚拟阻抗闭环时，系统不稳定。当虚拟阻抗值线性增加到 $R_v=-0.055 \ \Omega$ ， $L_v=1.1 \text{ mH}$ 时，不稳定极点沿实轴移动到负半平面，系统稳定性提高。同时，共轭极点 $\lambda_{p12}$ 和 $\lambda_{p13}$ 向实轴移动逐渐变为相距较近的负实根，有功功率控制由欠阻尼状态逐渐变为过阻尼状态，稳态误差为零且无超调。若虚拟阻抗值继续增加，极点将沿实轴相互远离，系统会产生稳态误差。因此，综合考虑系统功率控制的稳定性和动态性能，本文取虚拟阻抗值为 $R_v=-0.055 \ \Omega$ ， $L_v=1.1 \text{ mH}$ 。



(a) 无功功率根轨迹



(b) 有功功率根轨迹

图 8 低频模式下特征根随虚拟阻抗的变化轨迹

Fig. 8 Trace of eigenvalues in low frequency mode as a function of virtual impedance

确定虚拟阻抗值之后, 无功功率下垂系数  $n$  变化时, 无虚拟阻抗闭环和有虚拟阻抗闭环的微电网有功功率极点  $\lambda_{p12}$  和  $\lambda_{p13}$  的根轨迹变化分别如图 9(a) 和图 9(b) 所示。从图中对比看出, 当  $n$  增加时, 无虚拟阻抗闭环的微电网有功功率极点也随之变化, 且出现了不稳定极点。而引入虚拟阻抗闭环后, 能够改进有功功率和无功率解耦, 提高系统的稳定裕度。

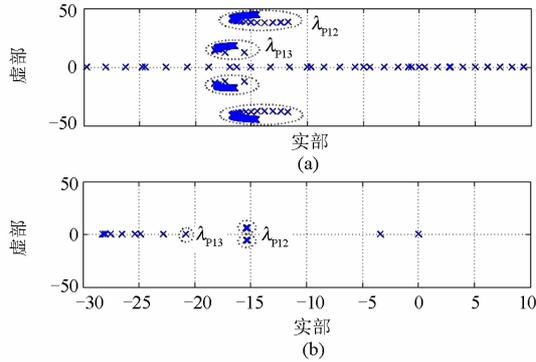


图 9 有功功率特征根随  $n$  的变化轨迹

Fig. 9 Trace of active power eigenvalues as a function of  $n$

## 5 算例分析

为验证本文所提出控制策略的有效性以及建模分析的准确性, 在 Matlab/Simulink 环境下搭建了图 1 所示结构的微电网模型, DG 控制系统如图 3 所示。微电网模型的具体参数如下:

DG:  $v_{DC}=700$  V,  $L_f=1.5$  mH,  $L_c=0.5$  mH,  $C=50$   $\mu$ F,  $R_f=0.2$   $\Omega$ ,  $R_c=0.05$   $\Omega$ ,  $m=0.0001$  rad $\cdot$ s $^{-1}$ /W,  $n=0.001$  V/var,  $\omega_c=30$  rad/s,  $k_{pv}=0.05$ ,  $k_{iv}=500$ ,  $k_{pi}=15$ ,  $k_{ii}=15\ 000$ ,  $F=0.75$ ,  $H=0.68$ 。

线路:  $z_1=0.08+j0.06$   $\Omega$ ,  $z_2=0.07+j0.05$   $\Omega$ ,  $z_3=0.07+j0.08$   $\Omega$ ,  $z_4=0.09+j0.06$   $\Omega$ ,  $z_5=0.2+j0.16$   $\Omega$ 。

### 5.1 算例 1

假定微电网初始状态时只有有功负载, load1=10 kW, load2=10 kW, load3=13 kW。0.4 s 时, 负载 load1 有功功率增加 12 kW, 负载无功功率保持不变。0.9 s 时, 负载 load1 无功功率增加 6.5 kvar, 负载有功功率保持不变。坐标旋转虚拟阻抗  $z_{v1}$  取  $R_{v1}=-0.03$   $\Omega$ ,  $L_{v1}=0.6$  mH,  $z_{v2}$  取  $R_{v2}=-0.055$   $\Omega$ ,  $L_{v2}=1.1$  mH, 其特征值根轨迹如图 8 所示。

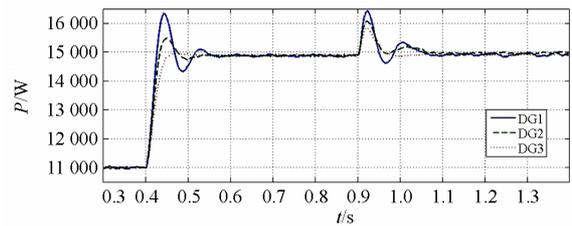
图 10(a)和图 10(b)为虚拟阻抗分别取  $z_{v1}$  和  $z_{v2}$  时 DG1、DG2、DG3 的有功功率响应曲线, DG1、DG2、DG3 的无功功率的响应曲线分别如图 11(a)和图 11(b)所示。和  $z_{v1}$  相比, 旋转坐标虚拟阻抗取  $z_{v2}$  时, 可以有效改善系统功率耦合和均分特性,

动态响应更快且超调和振荡更小, 符合上述小信号动态模型分析的结论。因此, 采用合适的虚拟阻抗闭环, 可以有效提高系统功率控制的准确性和动态性能, 减小动态变化过程中的超调和振荡。

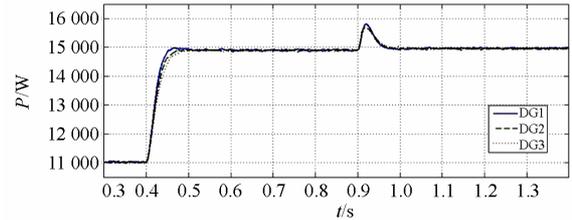
图 12(a)和图 12(b)为虚拟阻抗分别为  $z_{v1}$  和  $z_{v2}$  时 DG1 的输出电压、输出电流和系统环流的动态变化过程。从图中可以看出, 当采取合适的虚拟阻抗值时, 输出电压和电流的频率幅值更稳定, 系统的动态响应更快且无超调和振荡, 同时可以有效减小系统中的循环电流。

### 5.2 算例 2

算例 2: 假定微电网初始状态时的阻感负载 load1=22 kW/6.5 kvar, load2=10 kW/0 kvar, load3=13 kW/0 kvar。0.5 s 时, 微电网中的旋转坐标虚拟



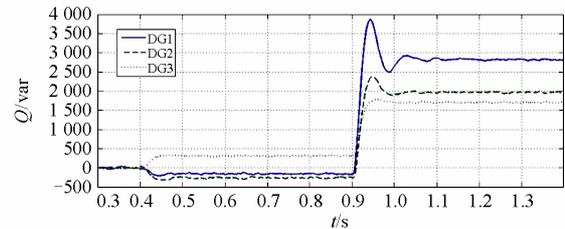
(a) 虚拟阻抗为  $z_{v1}$



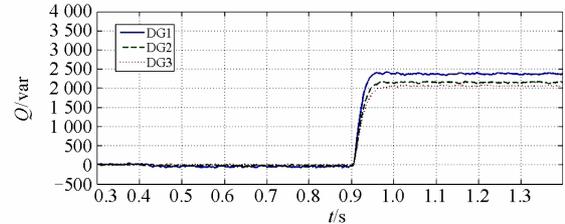
(b) 虚拟阻抗为  $z_{v2}$

图 10 微电网中 DG 的有功功率动态响应曲线

Fig. 10 Active power dynamic response curve of DG



(a) 虚拟阻抗为  $z_{v1}$



(b) 虚拟阻抗为  $z_{v2}$

图 11 微电网中 DG 的无功功率动态响应曲线

Fig. 11 Reactive power dynamic response curve of DG

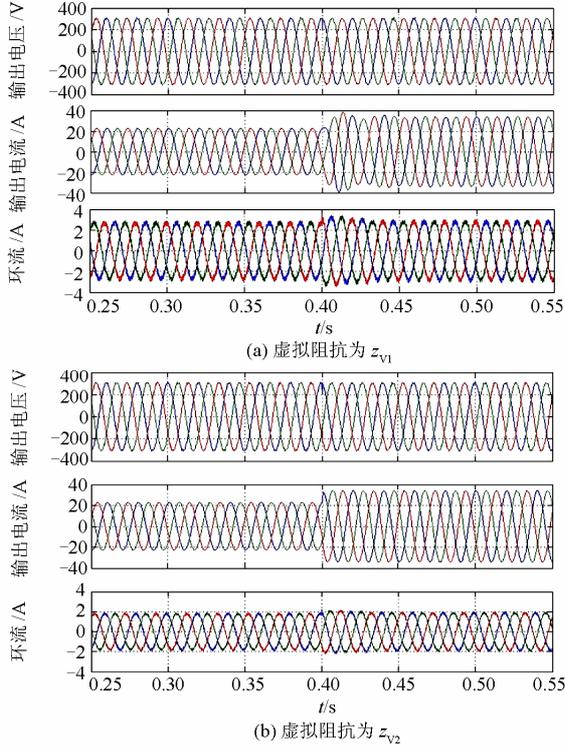


图 12 微电网中 DG1 的输出电压和电流动态响应曲线  
Fig. 12 Output voltage and current dynamic response curve of DG1

阻抗由  $z_{v2}$  切换为 0, DG1、DG2、DG3 的有功功率和无功功率响应曲线图 13 所示。从图 13 中可以看出, 当无虚拟阻抗闭环时, 系统失稳, 与前文的小附录 A

$$A_{DG1} = \begin{bmatrix} 0 & -m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_c I_{od} & \omega_c I_{oq} & \omega_c V_{od} & \omega_c V_{oq} & 0 \\ 0 & 0 & -\omega_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_c I_{oq} & -\omega_c I_{od} & -\omega_c V_{oq} & \omega_c V_{od} & 0 \\ (R_v \sin \delta_1 + \omega_1 L_v \cos \delta_1) I_{od} + & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -R_v \cos \delta_1 + \omega_1 L_v \sin \delta_1 & R_v \sin \delta_1 + \omega_1 L_v \cos \delta_1 & 0 \\ (R_v \cos \delta_1 - \omega_1 L_v \sin \delta_1) I_{oq} & 0 & -n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_1 L_v \sin \delta_1 & \omega_1 L_v \cos \delta_1 & 0 \\ (\omega_1 L_v \sin \delta_1 - R_v \cos \delta_1) I_{od} + & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R_v \sin \delta_1 - \omega_1 L_v \cos \delta_1 & -R_v \cos \delta_1 + \omega_1 L_v \sin \delta_1 & 0 \\ (R_v \sin \delta_1 + \omega_1 L_v \cos \delta_1) I_{oq} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \omega_1 L_v \cos \delta_1 & \omega_1 L_v \sin \delta_1 & 0 \\ 0 & 0 & -nk_{pv} & k_{pi} & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -k_{pv} & -\omega_1 C & H & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{pi} & 0 & 0 & 0 & -1 & -\omega_1 C & -k_{pv} & 0 & H \\ 0 & -mI_q & \frac{-nk_{pi}k_{pv}}{L_f} & \frac{k_{pi}}{L_f} & 0 & \frac{k_{ii}}{L_f} & 0 & \frac{-k_{pi} - R_f}{L_f} & \omega_1 - \omega_{com} & \frac{-F - k_{pi}k_{pv}}{L_f} & \frac{-\omega_1 C k_{pi}}{L_f} & \frac{k_{pi}H}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{k_{pi}}{L_f} & 0 & \frac{k_{ii}}{L_f} & \omega_1 - \omega_{com} & \frac{-k_{pi} - R_f}{L_f} & \frac{\omega_1 C k_{pi}}{L_f} & \frac{-F - k_{pi}k_{pv}}{L_f} & 0 & \frac{k_{pi}H}{L_f} \\ 0 & -mV_{od} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & 0 & 0 & \omega_1 & -\frac{1}{C} & 0 \\ 0 & mV_{od} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & -\omega_1 & 0 & 0 & -\frac{1}{C} \\ \frac{V_{sd} \sin \delta_1 - V_{sq} \cos \delta_1}{L_c} & -mI_{oq} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_c} & 0 & -\frac{R_c}{L_c} & \omega_1 \\ \frac{V_{sq} \cos \delta_1 + V_{sd} \sin \delta_1}{L_c} & mI_{od} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_c} & -\omega_1 & -\frac{R_c}{L_c} \end{bmatrix}$$

信号动态分析结论相吻合。因此, 针对系统阻抗特性较为复杂的微电网, 坐标旋转虚拟阻抗闭环的引入, 有效提高了系统的稳定裕度。

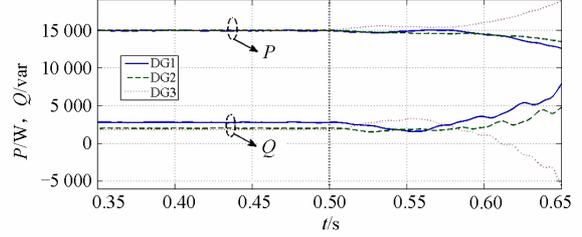


图 13 虚拟阻抗切换时 DG 的功率动态响应曲线  
Fig. 13 Power dynamic response curve of DG when virtual impedance switching

## 6 结论

本文针对系统阻抗特性复杂的孤岛微电网控制问题, 提出了包含坐标旋转虚拟阻抗、基于电压幅值和频率下垂控制和带前馈补偿的电压电流双闭环控制的微电网整体控制方案。建立了完整的微电网小信号动态模型, 分析了坐标旋转虚拟阻抗对微电网性能的影响, 为虚拟阻抗的优化取值提供了更为准确、完整的理论依据。小信号动态分析和算例分析均表明, 本文提出的坐标旋转虚拟阻抗方法, 能够改进有功和无功功率的分配和解耦, 减小系统环流, 提高了微电网控制的准确性、稳定性和动态性能。虚拟阻抗中的虚拟电感值和虚拟电阻值的优化与匹配值得进一步研究。

$$\mathbf{B}_{DG1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\cos \delta_1}{L_c} & -\frac{\sin \delta_1}{L_c} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\sin \delta_1}{L_c} & -\frac{\cos \delta_1}{L_c} \end{bmatrix}^T$$

## 参考文献

- [1] LI Yun-wei, VILATHGAMUWA D M, LOH P C. Design, analysis and real time testing of controllers for multi-bus micro-grid system[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19(5): 1195-1204.
- [2] 刘文, 杨慧霞, 祝斌, 等. 微电网关键技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 152-155.  
LIU Wen, YANG Hui-xia, ZHU Bin, et al. Survey on key technologies of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 152-155.
- [3] 陈昌松, 段善旭, 蔡涛, 等. 基于改进遗传算法的微网能量管理模型[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 196-201.  
CHEN Chang-song, DUAN Shan-xu, CAI Tao, et al. Microgrid energy management model based on improved genetic algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 196-201.
- [4] 王瑞琪, 李珂, 张承慧. 基于混沌多目标遗传算法的微网系统容量优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 16-22.  
WANG Rui-qi, LI Ke, ZHANG Cheng-hui. Optimization allocation of microgrid capacity based on chaotic multi-objective genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(22): 16-22.
- [5] 吕志鹏, 罗安, 蒋雯倩, 等. 多逆变器环境微网环流控制新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 40-47.  
Lü Zhi-peng, LUO An, JIANG Wen-qian, et al. New circulation control method for micro-grid with multi-inverter micro-sources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 40-47.
- [6] 顾和荣, 赵巍, 王雷, 等. 微电网逆变器电流下垂控制分析与实验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 45-48.  
GU He-rong, ZHAO Wei, WANG Lei, et al. Analysis and experimental verification of current droop control for microgrid inverters[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 45-48.
- [7] 林新春, 段善旭, 康勇, 等. 基于下垂特性控制的无互连线并联 UPS 建模与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 33-38.  
LIN Xin-chun, DUAN Shan-xu, KANG Yong, et al. Modeling and stability analysis for parallel operation of UPS with no control interconnection basing on droop characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 33-38.
- [8] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 98-103.  
WANG Cheng-shan, XIAO Chao-xia, WANG Shou-xiang. Synthetical control and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 98-103.
- [9] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网中分布式电源逆变器的多换反反馈控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 100-107.  
WANG Cheng-shan, XIAO Zhao-xia, WANG Shou-xiang. Multiple feedback loop control scheme for inverters of the micro source in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 100-107.
- [10] LI Yun-wei, KAO Ching-nan. An accurate power control strategy for power-electronics-interfaced distribution generation units operating in low-voltage multibus microgrid[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24(12): 2977-2988.
- [11] 周贤正, 荣飞, 吕志鹏, 等. 低压微电网采用坐标旋转的虚拟功率 V/f 下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 47-51.  
ZHOU Xian-zheng, RONG Fei, Lü Zhi-peng, et al. A coordinate rotational transformation based virtual power V/f droop control method for low voltage microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 47-51.
- [12] BRABANDERE K D, BOLSENS B, KEYBUS J V D, et al. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(4): 1107-1115.
- [13] GUERRERO J M, DE VICUNA L G, MATAS J, et al. Output impedance design of parallel-connected UPS Inverters with wireless Load-sharing control[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2005, 52(4): 1126-1135.

- [14] GUERRERO J M, MATAS J, DE VICUNA L G, et al. Decentralized control for parallel operation of distribution generation inverter using resistive output impedance[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2007, 54(2): 994-1004.
- [15] WEI Yao, MATAS J, GUERRERO J M, et al. Design and analysis of the droop control method for parallel inverters considering the impact of the complex impedance on the power sharing[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2011, 58(2): 576-587.
- [16] ROWE C N, SUMMERS T J, BETZ R E, et al. Implementing the virtual output impedance concept in a three phase system utilizing cascaded PI controllers in the dq rotating reference frame for microgrid inverter control[C] // Proceedings of 15th European Conference on Power Electronics and Applications, Lille, France, 2013.
- [17] HE Jin-wei, LI Yun-wei. Analysis, design and implementation of virtual impedance for power electronics interfaced distributed generation[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2011, 47(6): 2525-2538.
- [18] 张尧, 马皓, 雷彪, 等. 基于下垂特性控制的无互联线逆变器并联动态性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 42-48.
- ZHANG Yao, MA Hao, LEI Biao, et al. Analysis of dynamic performance for parallel operation of inverters without wire interconnections[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(3): 42-48.
- [19] MATAS J, CASTILLA M, DE VICUNA L G, et al. Virtual impedance loop for droop-controlled single-phase parallel inverters using a second-order general-integrator scheme[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2010, 25(12): 2993-3001.
- [20] 阚加荣, 谢少军, 吴云亚, 等. 无互联线并联逆变器的功率解耦控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 40-45.
- KAN Jia-rong, XIE Shao-jun, WU Yun-ya, et al. Research on decoupling droop characteristic for parallel inverters without control interconnection[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 40-45.
- [21] GUERRERO J M, MATAS J, DE VICUNA L G, et al. Wireless control strategy for parallel operation of distribution generation inverters[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1462-1470.
- [22] YASSER A I M, EHAB F E. Adaptive decentralized droop controller to preserve power sharing stability of parallel inverters in distributed generation microgrid[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2008, 23(6): 2806-2816.
- [23] NAGARA P, MILAN P, TIMOTHY C G. Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(2): 613-625.
- [24] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.

收稿日期: 2013-09-08; 修回日期: 2013-12-09

作者简介:

王瑞琪(1986-), 男, 博士, 工程师, 主要从事智能电网和可再生能源发电研究工作; E-mail: wangruiqisdu@aliyun.com

程艳(1981-), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事新能源发电并网及电力电子技术工作;

孙树敏(1968-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电机与电器、电力系统稳定分析及电力电子技术方面的研究工作。