

DOI: 10.7667/PSPC180160

## 基于虚拟同步电机控制的微电网稳定性分析

晁凯云, 苗世洪, 刘子文, 范志华, 康祎龙, 段偲默, 刘君瑶

(华中科技大学电气与电子工程学院强电磁工程与新技术国家重点实验室,  
电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 随着微电网中电力电子器件的大量接入, 多电源与负荷的动态特性相互耦合, 使得微电网系统中稳定分析问题成为研究热点。针对基于虚拟同步电机控制的微电网系统, 提出了一种含多分布式电源的系统非线性状态空间建模方法。建立了含分布式电源、线路和负荷的微电网统一状态空间方程。基于所建立的状态空间方程, 运用特征根分析法研究了影响微电网系统稳定性的因素。并利用分岔理论研究了虚拟同步电机控制关键参数和系统拓扑结构参数对系统稳定性的影响。在 PSCAD/ETMDC 仿真平台搭建了基于虚拟同步电机控制的微电网模型, 验证了所提方法的正确性和有效性。

**关键词:** 微电网; 虚拟同步电机; 非线性状态空间建模; 分岔理论; 稳定性分析

### Stability analysis of microgrid based on virtual synchronous generator control

CHAO Kaiyun, MIAO Shihong, LIU Ziwen, FAN Zhihua, KANG Yilong, DUAN Simo, LIU Junyao

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** With the massive access of power electronic devices in the microgrid, the dynamic characteristics of multiple power sources and loads are coupled with each other, which makes the problem of stability analysis in the microgrid system become a hot spot. In this paper, based on the virtual synchronous motor control of microgrid systems, a multi-distributed power system nonlinear state-space modeling method is proposed, and a unified state-space equation of microgrid with distributed power, line and load is established. Based on the established state-space equation, the eigenvalue analysis is used to study the factors that affect the stability of the microgrid system. Then the bifurcation theory is used to study the influence of the key parameters of the virtual synchronous motor control and the system topology parameters on system stability. The microgrid model based on virtual synchronous motor control is built on the PSCAD/ETMDC simulation platform, which verifies the correctness and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0903601), National Natural Science Foundation of China (No. 51777088), and Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China in 2018 "Research and Application of Pre-installed Microgrid Energy-storage Substation Optimization Integration Techniques" (No. SGNXDK00DWJS1800016).

**Key words:** microgrid; virtual synchronous machine; nonlinear state space modeling; bifurcation theory; stability analysis

## 0 引言

当前, 在能源需求与环境保护的双重压力下,

**基金项目:** 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0903601); 国家自然科学基金项目资助(51777088); 2018年国家电网公司总部科技项目资助(SGNXDK00DWJS1800016)“预装式微电网储能电站优化集成技术研究及应用”

利用清洁可再生能源的分布式发电技术已成为国内外的研究热点<sup>[1-2]</sup>。大多数分布式电源具有波动性和间歇性的特点, 要实现大规模分布式电源的接入与消纳, 传统的控制手段必然不能满足用户对于用电可靠性与安全性的需求, 而电力电子器件的引入会加剧配电网的非线性特征, 使得微电网系统的稳定性分析变得更加困难<sup>[3]</sup>。

微电网引入大量电力电子装置, 相较于传统发

电机组，微电网惯性环节缺失，稳定性能差，因此其稳定性成为值得研究的问题。文献[3-4]指出，微电网是典型的非线性动力系统，其稳定性控制器与线性最优控制器类似，大多选择在微电网稳定运行状态  $x_e$  附近对微电网运行状态进行线性化处理，这导致只有在微电网的运行状态在  $x_e$  附近时稳定性分析的结果才比较准确；换言之，这种方法仅仅适用于平衡点附近的小扰动分析，不能很好地满足微电网发生大扰动保持稳定的需求。文献[5]采用谐波能量耗散法展开了对非线性负荷的稳定性研究，但是只针对单个恒功率负荷建立了动态模型，此外，建立的状态空间方程是线性的，没有展开对非线性问题的研究；文献[6]建立了系统的非线性状态空间方程，并利用 Lyapunov 能量函数法展开了研究，但只建立了逆变器交直流侧的方程，并未对整个微电网系统进行分析，同时该文献采用的 Lyapunov 能量函数法在低阶系统稳定中比较实用，高阶系统的能量函数难以获取。文献[7-9]在仿真方面论证了微电网系统的稳定性，通过仿真实验为实际系统建立提供了一些建议，但是并未建立数值上的理论模型，没有足够的理论依据。

电力系统是一个具有强非线性特征的动力系统，理论和实践证明，分岔理论是研究非线性动力系统强有力的方法<sup>[10-12]</sup>。文献[10]提出一种新的基于割线预测-校正的同伦延拓法来追踪Hopf分岔点，就同伦延拓法的同伦函数、有效路径以及步长选取进行了探讨，主要侧重对算法的研究；引起电压失稳的分岔形式包括鞍结点分岔(SNB)和Hopf分岔(HB)<sup>[11]</sup>，但是文献[11]主要探讨了分岔理论在电力系统中应用的前景，未对实际的电力系统进行分析和研究。至目前为止，利用分岔理论对微电网进行研究，在国内外鲜有报道。

本文以基于虚拟同步电机控制策略的微电网为研究对象，建立了逆变器、线路和负荷的统一状态空间模型；通过对系统状态矩阵的特征值及灵敏度分析，确定了影响系统稳定性的影响因子；以所确定的影响因子作为分岔参数，利用分岔理论进一步研究这些影响因子对系统稳定性的机理；通过在 PSCAD/ETMDC 仿真平台搭建了基于虚拟同步电机控制的微电网模型，验证了所提分析方法的正确性。

## 1 模型推导

### 1.1 VSG 模型

图 1 为采用 VSG 控制策略的主电路结构，直流侧为分布式电源，为简化分析，本文用直流电压源代替。

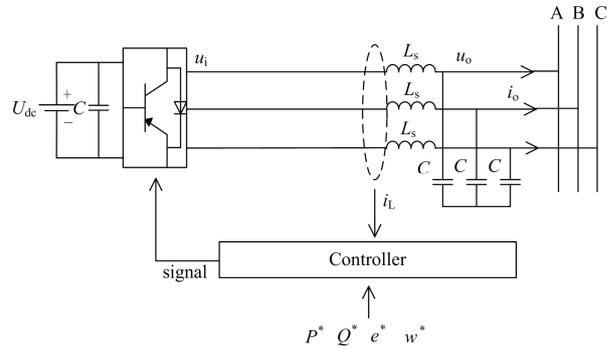


图 1 VSG 电路拓扑

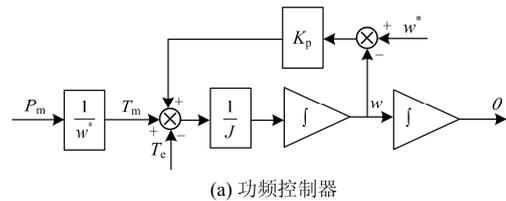
Fig. 1 VSG circuit topology

图 1 中，主电路采用 DC/AC 三相电压型逆变器，采用 PWM 整流<sup>[13]</sup>； $U_{dc}$  为直流电压； $L_s$ 、 $C$  分别为 LC 滤波器的滤波电感和滤波电容，用于降低开关闭合引起的纹波； $u_o$  和  $i_o$  分别为经过滤波器后的电压和电流， $u_i$  为逆变器输出电压； $w^*$  为频率参考值， $e^*$  为 VSG 电压指令信号； $P^*$  和  $Q^*$  分别代表输入机械功率和无功给定值。

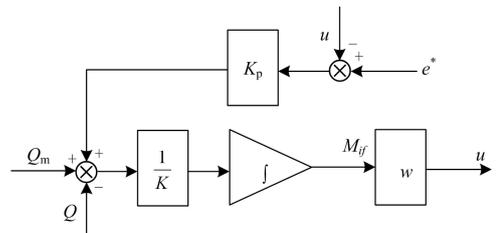
VSG 的控制方程如式(1)和式(2)所示<sup>[14]</sup>，图 2 为 VSG 控制结构，包含功频控制器和励磁控制器的结构框图。功频控制器主要模拟了同步发电机的转子运动方程，本文对其数学模型的建立旨在使分布式电源具有同步发电机的基本特性，而不期望引入过多同步发电机的暂态过程，因此采用同步发电机的二阶模型，转子运动方程为

$$J \frac{dw}{dt} = \frac{P^*}{w^*} - T_e + K_p (w^* - w) \quad (1)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = w \quad (2)$$



(a) 功频控制器



(b) 励磁控制器

图 2 VSG 控制结构

Fig. 2 Structure of VSG control

式中:  $J$ 、 $K_p$  分别表示频率的惯性常数与频率的下垂系数;  $T_e$  代表 VSG 的转动惯量;  $\theta$  代表转子角度,  $w$  代表转子角速度。当下垂系数  $K_p$  给定, 惯性常数  $J$  必须足够小以满足频率的快速响应。

励磁控制器模拟同步电机的转子运动方程, 引入空间中旋转的虚拟磁通变量  $M_{if}$  如图 2(b)所示, 由图可以得到其动作方程为

$$K \frac{dM_{if}}{dt} = [Q^* - Q + K_q (e^* - u)] \quad (3)$$

$$u = w \cdot M_{if} \cdot \cos \theta \quad (4)$$

$$P_e = \frac{3}{2} w \cdot u \cdot i_L \cdot \cos \theta \quad (5)$$

$$Q = \frac{3}{2} w \cdot u \cdot i_L \cdot \sin \theta \quad (6)$$

式中:  $K_q$  表示电压下垂系数;  $K$  表示电压的惯性常数;  $u$  表示输出电压;  $i_L$  表示电感电流;  $M_{if}$  为模拟同步发电机中的虚拟磁通变量。

通过式(1)一式(6)已经建立了 VSG 的非线性动态方程。假设选定  $dq$  坐标轴跟踪转子转角(逆变器输出电压)进行  $dq$  变换,  $dq$  坐标轴下电压、有功功率、无功功率的方程可以修改成(此处所有变量下标加上  $k$  是为了区分不同的 VSG, 代表第  $k$  个 VSG)

$$u_k = M_{ifk} \cdot w_k \quad (7)$$

$$T_{ek} = \frac{P_{ek}}{w_k} = \frac{3}{2} M_{ifk} \cdot i_{Ldk} \quad (8)$$

$$Q_k = -\frac{3}{2} M_{ifk} \cdot w_k \cdot i_{Lqk} \quad (9)$$

根据 VSG 的结构可知, 逆变器输出电压  $u_{ik}$  和输出电流  $i_{Lk}$  经过 LC 滤波器得到 VSG 的输出电压  $u_{ok}$  和输出电流  $i_{ok}$ , 其滤波过程的状态方程为

$$L_{sk} \frac{di_{Ldk}}{dt} = u_{idk} - u_{odk} - R_{sk} \cdot i_{Ldk} \cdot w_k + i_{Lqk} \cdot w_k \cdot L_{sk} \quad (10)$$

$$L_{sk} \frac{di_{Lqk}}{dt} = u_{iqk} - u_{oqk} - R_{sk} \cdot i_{Lqk} \cdot w_k - i_{Ldk} \cdot w_k \cdot L_{sk} \quad (11)$$

$$C_k \frac{du_{odk}}{dt} = i_{Ldk} - i_{odk} + u_{oqk} \cdot w_k \cdot C_k \quad (12)$$

$$C_k \frac{du_{oqk}}{dt} = i_{Lqk} - i_{oqk} - u_{odk} \cdot w_k \cdot C_k \quad (13)$$

式(1)一式(13)已经初步建立起 VSG 的动态数学模型。在实际运行过程中, 微网中往往含有多个分布式电源 DG 单元(如图 3 所示), 因此需要多个 VSG 来协调控制。多个 VSG 由于运行状态的差异, 运行过程中必然会存在细微的频率差异, 上文中提到选取的  $dq$  坐标轴是跟踪逆变器的输出电压, 那么

由于不同 VSG 中运行状态存在差异, 各个  $dq$  坐标轴必然存在细微的频率差异, 当微网在稳定运行时, 各个 VSG 的稳定运行频率保持不变; 要建立含多 VSG 的微电网状态方程, 需选择一个公共坐标系。

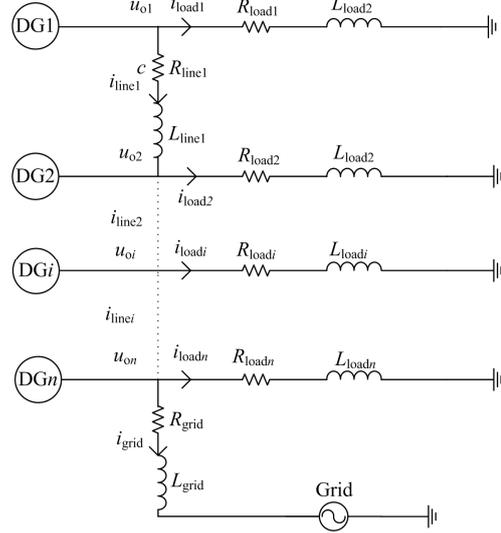


图 3 微电网结构

Fig. 3 Microgrid structure

选择  $DG_i$  的坐标系作为公共坐标系, 其他坐标系变量均转换成公共坐标系下的变量如图 4; 图中:  $D$  和  $Q$ 、 $D_k$  和  $Q_k$ 、 $D_{grid}$  和  $Q_{grid}$  分别代表以不同速度旋转的坐标系,  $w$  代表公共  $dq$  轴角速度,  $w_k$  代表第  $k$  个逆变器  $dq$  轴角速度,  $w_{grid}$  代表大电网电压角速度;  $\varphi_k$  为第  $k$  个逆变器  $dq$  轴超前公共  $dq$  轴的角度,  $\alpha$  为大电网超前公共  $dq$  轴的角度; 此处用  $f_d$ 、 $f_q$ 、 $F_D$ 、 $F_Q$  分别是转换前电气分量和转换后电气分量。根据角度关系, 易得

$$\frac{d\varphi_k}{dt} = w_k - w \quad (14)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = w_{grid} - w \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} F_D \\ F_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_k & -\sin \varphi_k \\ \sin \varphi_k & \cos \varphi_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} \quad (16)$$

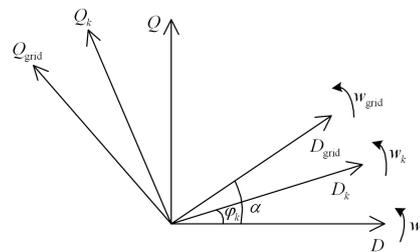


图 4 坐标变换

Fig. 4 Transformation of coordinates

## 1.2 线路和负荷模型

如图3微电网模型由VSG、线路、负荷与大电网构成。本文为了建模方便选择对RL负荷进行建模分析；第*i*个VSG(DG*i*)为负荷*i*提供有功和无功功率，相邻的VSG(DG*i*与DG(*i*+1))经过线路*i*相连，整个微电网通过线路与大电网相连。

经过线路的状态方程为

$$L_{\text{line}_i} \frac{di_{\text{lineD}_i}}{dt} = u_{oD_i} - u_{oD_{i+1}} - R_{\text{line}_i} \cdot i_{\text{lineD}_i} + w \cdot L_{\text{line}_i} \cdot i_{\text{lineQ}_i} \quad (17)$$

$$L_{\text{line}_i} \frac{di_{\text{lineQ}_i}}{dt} = u_{oQ_i} - u_{oQ_{i+1}} - R_{\text{line}_i} \cdot i_{\text{lineQ}_i} - w \cdot L_{\text{line}_i} \cdot i_{\text{lineD}_i} \quad (18)$$

同理连接在节点*i*的负荷状态方程为

$$L_{\text{load}_i} \frac{di_{\text{loadD}_i}}{dt} = u_{oD_i} - R_{\text{load}_i} \cdot i_{\text{loadD}_i} + w \cdot L_{\text{load}_i} \cdot i_{\text{loadQ}_i} \quad (19)$$

$$L_{\text{load}_i} \frac{di_{\text{loadQ}_i}}{dt} = u_{oQ_i} - R_{\text{load}_i} \cdot i_{\text{loadQ}_i} - w \cdot L_{\text{load}_i} \cdot i_{\text{loadD}_i} \quad (20)$$

连接公共连接点(PCC)与主电网的线路流过的电流状态方程为

$$L_{\text{grid}} \frac{di_{\text{gridD}}}{dt} = u_{okD} - u_{\text{gridD}} - R_{\text{grid}} \cdot i_{\text{gridD}} + w \cdot L_{\text{grid}} \cdot i_{\text{gridQ}} \quad (21)$$

$$L_{\text{grid}} \frac{di_{\text{gridQ}}}{dt} = u_{okQ} - u_{\text{gridQ}} - R_{\text{grid}} \cdot i_{\text{gridQ}} - w \cdot L_{\text{grid}} \cdot i_{\text{gridD}} \quad (22)$$

上文将系统划分成VSG、线路、负荷与大电网等子系统，流经各个子系统的电压电流微分方程如式(1)一式(20)；考虑到每个节点*i*的基尔霍夫电流定律，可以得到各个子系统变量的约束方程为

$$\begin{cases} i_{od_i} = i_{\text{line}_i} + i_{\text{load}_i} & i = 1 \\ i_{od_i} = i_{\text{line}_i} - i_{\text{line}_{i-1}} + i_{\text{load}_i} & 1 < i < n \\ i_{od_i} = i_{\text{grid}} - i_{\text{line}_{i-1}} + i_{\text{load}_i} & i = n \end{cases} \quad (23)$$

式(1)一式(23)建立起基于VSG的状态空间方程，可以统一用式(24)和式(25)来表示。

$$\dot{x} = f(x, y, \alpha) \quad (24)$$

$$y = g(x) \quad (25)$$

式中：*x*代表系统状态变量；*y*代表约束条件变量； $\alpha$ 为系统参数。

## 2 基于分岔理论的微电网系统稳定性分析

微电网的状态方程上节已经确立了，可以看出微电网系统具有很强的非线性。理论和实践证明，分

岔理论是分析研究非线性动态系统稳定性的有力工具<sup>[15]</sup>。电力系统在电压失稳前可能经历霍扑夫分岔(HB)、鞍结点分岔(SNB)等分岔形式。HB分岔的实质在于系统的雅可比矩阵特征根出现一对共轭的纯虚解；SNB分岔实质在于系统的雅可比矩阵出现纯虚解。基于动态分岔分析对微电网系统的稳定性分析可以从下面两个方面来论述：

1) 改变系统的参数，利用同伦延拓法连续追踪系统平衡解流形，获得系统运行状态随参数变化时平衡曲线；同时不断判别平衡点是否为分岔点。

2) 根据得到的平衡解流形，对微电网运行状态在平衡点取线性化，利用Lyapunov函数研究参数变化过程中微电网状态方程特征根变化情况。

考虑到实际状态空间方程的阶数，本文以图5中单机微网作为研究对象，分布式电源直接为负荷进行供电，负荷直接用纯电阻代替；二者直接通过线路与主电网联接。

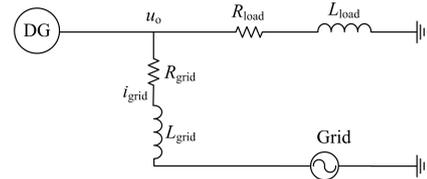


图5 典型微网结构

Fig. 5 Typical microgrid structure

虚拟同步电机控制技术是在下垂控制的基础上增加惯性环节演变而来，所以又被称作改进下垂控制策略。 $K_p$ 、 $K_q$ 的选取规则在文献[16-18]中已有介绍，本文侧重研究惯性常数*J*、*K*对系统稳定性的影响。以表1中参数为例搭建仿真模型<sup>[19]</sup>，得到系统稳定运行状态如表2。在平衡点进行线性化，在图6中绘制雅可比矩阵的特征根。

表1 系统参数

Table 1 Parameter of system

参数	大小
$e^*/V$	311.127
$P^*/W$	20 000
$Q^*/W$	10 000
$w^*/(\text{rad/s})$	100 $\pi$
$J/(\text{J/rad}^2)$	0.02
$K/(\text{J/V})$	3 333.3
$K_p/(\text{W/rad})$	100
$K_q/(\text{W/V})$	1 000
$L_s/\text{mH}$	2
$C/\mu\text{F}$	80
$R_{\text{load}}/\Omega$	3.63
$L_{\text{grid}}/\text{mH}$	0.45
$R_{\text{grid}}/\Omega$	0.1
$U_{\text{grid}}/V$	311.127
$W_{\text{grid}}/(\text{rad/s})$	100 $\pi$

表 2 稳定运行值

Table 2 Value of steady operation

参数	稳定运行值
$u_{od}/V$	302.83
$u_{oq}/V$	-51.83
$i_{id}/A$	41.25
$i_{iq}/A$	-16.24
$i_{lined}/A$	-43.48
$i_{lineq}/A$	-9.58
$w/(rad/s)$	314.15
$\alpha/rad$	-0.162
$M_{if}$	1.03

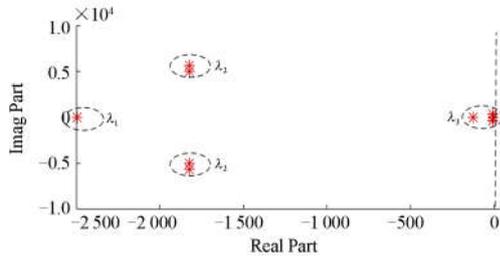


图 6 稳态运行特征根分布

Fig. 6 Eigenvalue distribution of steady-state operation

## 2.1 特征根分析

如图 6 所示, 将方程矩阵  $A$  的特征根划分成 3 个簇群, 特征根群 1 距离虚轴最远, 主要影响系统的动态响应; 特征根群 3 的实部接近于零, 此时特征根发生变化易导致系统失稳; 特征群 2 对系统的稳定性影响介于特征群 1 和特征群 3 之间。

根据文献[20], 假设  $u$ 、 $v$  分别是雅可比矩阵  $A(n \times n)$  的左右特征向量阵, 可以获得矩阵特征根的参与因子矩阵为

$$\mathbf{P} = \begin{matrix} x_1 \\ \vdots \\ x_i \\ \vdots \\ x_n \end{matrix} \begin{bmatrix} u_{11}v_{11} & \cdots & u_{1i}v_{1i} & \cdots & u_{1n}v_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ u_{i1}v_{i1} & \cdots & u_{ii}v_{ii} & \cdots & u_{in}v_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ u_{n1}v_{n1} & \cdots & u_{ni}v_{ni} & \cdots & u_{nn}v_{nn} \end{bmatrix} \begin{matrix} \lambda_1 \\ \lambda_i \\ \lambda_n \end{matrix} \quad (26)$$

式中, 参与因子的矩阵元素  $p_{ij}$  ( $u_{ij} \cdot v_{ij}$ ) 表示第  $i$  个状态变量  $x_i$  对状态方程第  $j$  个特征根  $\lambda_j$  大小的影响。对参与因子矩阵的每列进行如下标幺化处理, 可以进一步研究各个状态变量对特征值的相对影响, 进而确定影响稳定性的影响因素。

根据标幺化处理可以得到表 3, 可以看出: 参与因子  $w$  对特征值群  $\lambda_1$  的影响最大, 远大于其他变量特征值群  $\lambda_1$  的影响, 故特征值群  $\lambda_1$  主要受逆变器

输出电压频率影响; 同理, 特征值群  $\lambda_2$  主要受电网中线路中的电压和电流的影响; 特征值群  $\lambda_3$  主要受电压相角、虚拟磁通变量以及滤波电路的电流影响。本文旨在研究稳定性影响因素, 考虑到下垂系数在文献[15-18]中已有研究, 故确定频率惯性常数  $J$ 、电压惯性常数  $K$  与滤波电路电感作为主要研究对象; 下文将利用分岔理论研究三者对系统稳定性的影响。

表 3 影响因子

Table 3 Factor of influence

参数	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$
$u_{od}/V$	0.003	0.228	0.004
$u_{oq}/V$	0.002	0.218	0.003
$i_{id}/A$	0.016	0.003	0.253
$i_{iq}/A$	0.006	0.001	0.298
$i_{lined}/A$	0.001	0.203	0.001
$i_{lineq}/A$	0.000	0.193	0.011
$w/(rad/s)$	0.867	0.012	0.018
$\alpha/rad$	0.059	0.001	0.215
$M_{if}$	0.047	0.001	0.204

## 2.2 频率惯性对稳定性影响

以表 1 中参数为例构建系统, 选定频率惯性常数  $J$  作为分岔参数, 研究频率惯性常数改变对系统稳定性的影响。改变参数  $J$  的数值, 利用 Matcont 软件追踪系统的平衡解流形<sup>[21-22]</sup>, 绘制出分岔参数  $J$  改变系统的平衡曲线, 未检测到系统出现分岔点。

根据系统在频率惯性常数  $J$  变化过程中系统的状态对状态方程线性化, 获得方程特征根绘制在图 8 中, 可以看出在  $J$  在 (0.02, 10 000) 的情况下, 此时离虚轴最近点为 (-0.03, 318), 系统所有特征根的实部仍然小于零; 根据 Lyapunov 定律, 系统在  $J$  的变化过程中能够保持稳定。

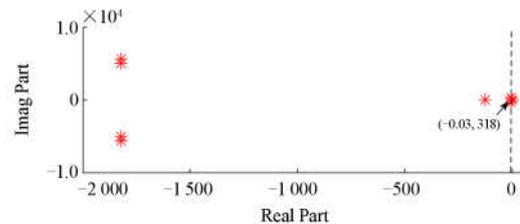

 图 7  $J=10\ 000$  特征根分布

 Fig. 7 Eigenvalue distribution of  $J=10\ 000$ 

## 2.3 电压惯性对稳定性影响

以表 1 中参数为例构建系统, 选定频率惯性常数  $K$  作为分岔参数, 分析电压惯性常数改变对系统稳定性的影响。改变参数  $K$  的数值, 利用 Matcont 软件追踪系统的平衡解流形, 绘制出分岔参数  $K$  改

变系统的平衡曲线，检测是否出现分岔点。图 7 为  $w$ - $K$  平衡曲线， $w$  代表 DG 输出电压的频率， $K$  由 5 500 开始减小，当  $K=1\ 839$  时系统出现 Hopf 分岔点，如图 8 所示。

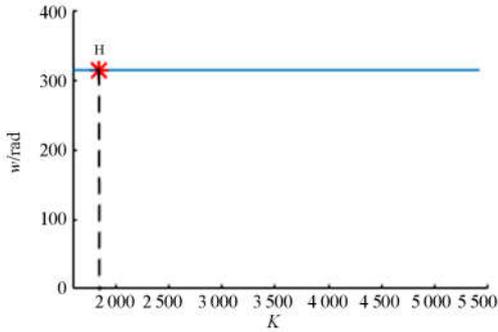


图 8  $K$  分岔平衡曲线

Fig. 8 Equilibrium curve of bifurcation parameter  $K$

在  $K=1\ 839$  时，绘制出此时特征根的分布情况如图 9；此时，系统出现一对实部为零的共轭特征根  $(0, \pm 324)$ ，根据 Lyapunov 定律，此时系统开始出现失稳现象。

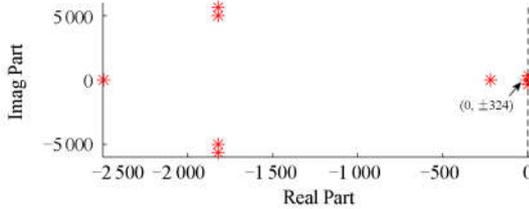


图 9  $K=1\ 839$  特征根分布

Fig. 9 Eigenvalue distribution of  $K=1\ 839$

### 2.4 滤波电感对稳定性的影响

以表 1 中参数为例构建系统，以滤波电感  $L_s$  为分岔参数，研究频率惯性常数改变对系统稳定性的影响。改变参数  $L_s$  的数值，利用 Matcont 软件追踪系统的平衡解流形，绘制出分岔参数  $L_s$  改变系统的平衡曲线，检测是否出现分岔点。图 10 为  $w$ - $L_s$

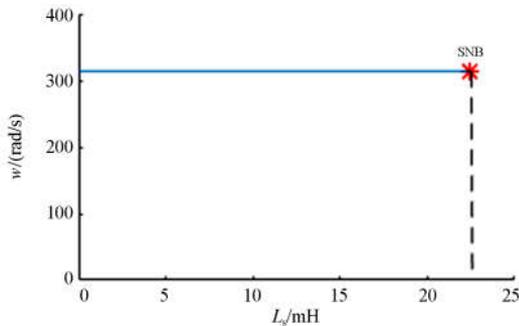


图 10  $L_s$  分岔平衡曲线

Fig. 10 Equilibrium curve of bifurcation parameter  $L_s$

平衡曲线， $w$  代表 DG 输出电压频率， $L_s$  为系统惯性常数。 $L_s$  初始值设置为 2 mH，逐步增大至 22.34 mH，当  $L_s=22.34$  出现 SNB 分岔点，如图 10。绘制出系统出现分岔点时的系统特征根分布图如图 11，此时系统出现一个实部为零特征根，根据 Lyapunov 第一法，系统在  $L_s=23.46$  时开始出现失稳现象。

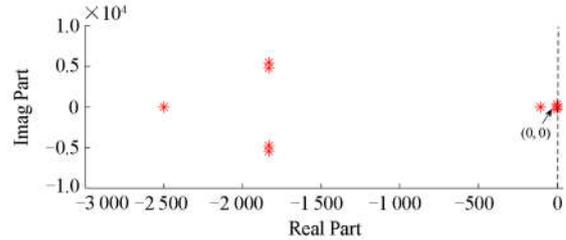


图 11  $L_s=22.34$  特征根分布

Fig. 11 Eigenvalue distribution of  $L_s=22.34$

### 3 仿真实验分析

上节研究了频率惯性常数  $J$ 、电压惯性常数  $K$  以及滤波电路电感  $L_s$  对基于 SVG 微网系统稳定性的影响，在理论上分析了三者对微电网系统稳定性的影响。以表 1 中的参数搭建仿真模型，验证稳定性分析内容，考虑到频率惯性常数对系统稳定性影响可以忽略，本文仅从电压惯性常数以及滤波电感值进行验证。

图 12 为  $K=1\ 900$  和  $K=1\ 800$  时分布式电源输出的  $d$  轴电压。在  $K$  为 1 900 时，电压稳定在 302 V 左右，当  $K$  越过 Hopf 分岔点达到 1 800 时，电压出现等幅振荡现象。同理，图 13 中，频率在  $K$  未越

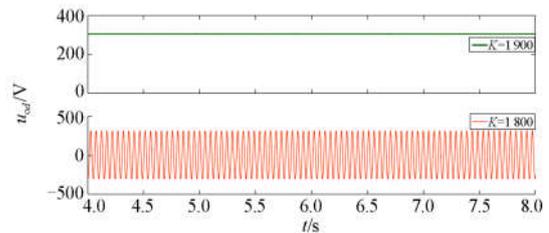


图 12 输出电压

Fig. 12 Output voltage curve

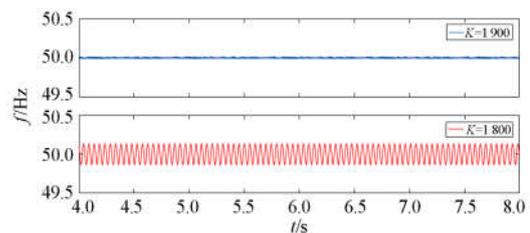


图 13 输出频率

Fig. 13 Output frequency curve

过分岔点时稳定在 50 Hz,  $K$  达到 1 800 时出现约 0.2 Hz 左右的振荡现象。

图 14 和图 15 分别是  $L_s$  从 22 mH 变化成 23 mH 分布式电源有功出力和无功出力变化曲线; 由图中可以看出, 当  $L_s=22$ , 即  $L_s$  未超过鞍结点分岔点, 系统有功和无功出力均稳定在 20 kW 左右; 当  $L_s$  的值为 23 mH(超过鞍结点分岔点), 此时系统出现一个实部为正的实特征根, 系统失稳, 分布式电源有功和无功出力出现了不规则的波动。

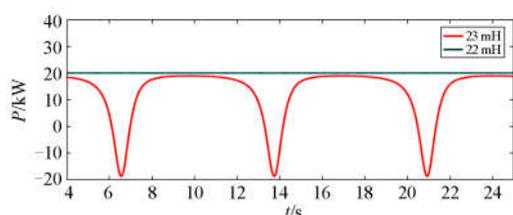


图 14 有功功率曲线

Fig. 14 Active power curve

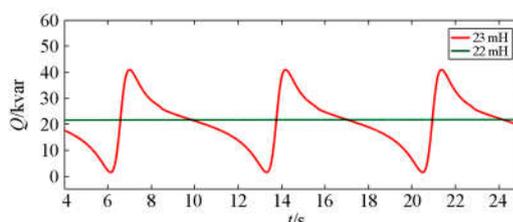


图 15 无功功率曲线

Fig. 15 Reactive power curve

## 4 结论

本文针对虚拟同步电机主导控制的微电网系统稳定性问题, 建立了含多分布式电源的统一微电网模型, 利用特征根分析法确定了影响微电网稳定性的关键因素, 并基于分岔理论和 Lyapunov 稳定性理论研究了所确定的关键因素对系统稳定性的影响。得出如下结论:

1) 微电网系统稳定性主要受分布式电源出口电压的相角、虚拟同步电机的磁通变量以及滤波电路电流的影响;

2) 微电网系统稳定性随电压惯性常数减小而降低, 随着滤波电感增加而下降;

3) 在 PSCAD/ETMDC 仿真平台搭建了基于虚拟同步电机控制的微电网模型, 验证了所提方法的正确性和有效性。本文所提的稳定性分析方法对虚拟同步电机主导控制的微电网控制参数设计与稳定运行具有一定的理论指导意义。

## 参考文献

[1] LOPES J A P, HATZIARGYRIOU N, MUTALE J, et al.

- Integrating distributed generation into electric power systems: a review of drivers, challenges and opportunities[J]. *Electric Power Systems Research*, 2007, 77(9): 1189-1203.
- [2] 田龙刚. 直流微电网电压等级的选择及其稳定控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(13): 21-26. TIAN Longgang. Research on the voltage level selection and its stability control strategy of DC microgrid[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(13): 21-26.
- [3] ZHANG B, HAO Z, BO Z. New development in relay protection for smart grid[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [4] KABALAN M, SINGH P, NIEBUR D. Large signal Lyapunov-based stability studies in microgrids: a review[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(5): 2287-2295.
- [5] KARIMPOUR D, SALMASI F R. Stability analysis of AC microgrids with constant power loads based on Popov's absolute stability criterion[J]. *IEEE Transactions on Circuits & Systems II Express Briefs*, 2015, 62(7): 696-700.
- [6] ANDRADE F, KAMPOUROPOULOS K, ROMERAL L, et al. Study of large-signal stability of an inverter-based generator using a Lyapunov function[C] // *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, October 29 - November 1, 2014, Dallas, TX, USA: 1840-1846.
- [7] XIAO Z, FANG H. Impacts of motor load on the transient stability of the microgrid[C] // *2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*, July 7-9, 2010, Jinan, China: 2623-2627.
- [8] 马添翼, 金新民, 黄杏. 含多变流器的微电网建模与稳定性分析[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(6): 12-17. MA Tianyi, JIN Xinmin, HUANG Xing. Modeling and stability analysis of microgrid with multiple converts[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(6): 12-17.
- [9] ISHCHENKO A, MYRZIK J M A, KLING W L. Transient stability analysis of distribution network with dispersed generation[C] // *Proceedings of the International Universities Power Engineering Conference*, UPEC '06. IEEE, 2006: 227-231.
- [10] 李升, 徐艳, 陈建华, 等. 基于 MATCONT 的电力系统电压稳定分岔及控制仿真试验[J]. *实验室研究与探索*, 2011, 30(12): 63-67. LI Sheng, XU Yan, CHEN Jianhua, et al. Simulation tests of voltage stability bifurcation and control in power systems based on MATCONT[J]. *Research and Exploration*

- in Laboratory, 2011, 30(12): 63-67.
- [11] 曹国云, 刘丽霞, 赵亮, 等. 基于延拓法的电力系统稳定模型中二维参数局部分岔边界的计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 13-16.  
CAO Guoyun, LIU Lixia, ZHAO Liang, et al. Continuation method to computation two-dimensional parameter local bifurcations boundary in power system stability differential-algebraic equation model[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 13-16.
- [12] 赵兴勇, 张秀彬. 运用分岔理论研究电力系统电压稳定性[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 190-194.  
ZHAO Xingyong, ZHANG Xiubin. Analysis of power system voltage stability using the bifurcation theory[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11): 190-194.
- [14] 李斌, 周林, 余希瑞, 等. 基于改进虚拟同步发电机算法的微网逆变器二次调频方案[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2681-2687.  
LI Bin, ZHOU Lin, YU Xirui, et al. Secondary frequency regulation for microgrid inverters based on improving virtual synchronous generator[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2681-2687.
- [13] 王萌, 祁明艳, 沈明辉, 等. 静止坐标系下 PWM 整流器的控制及谐波补偿策略[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2015, 35(1): 49-53.  
WANG Meng, QI Mingyan, SHEN Minghui, et al. Control and harmonic compensation strategy for PWM rectifier in static coordinate system[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2015, 35(1): 49-53.
- [15] 李宏仲, 程浩忠, 朱振华, 等. 分岔理论在电力系统电压稳定研究中的应用述评[J]. 电力系统保护与控制, 2006, 34(4): 69-73.  
LI Hongzhong, CHENG Haozhong, ZHU Zhenhua, et al. Review on application of bifurcation theory in power system voltage stability[J]. Power System Protection and Control, 2006, 34(4): 69-73.
- [16] 刘宁宁, 曹炜, 赵晋斌. 直流微电网的一种增量式下垂控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 48(8): 24-30.  
LIU Ningning, CAO Wei, ZHAO Jinbin. An incremental droop control method for DC micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 48(8): 24-30.
- [17] 彭湃. 基于虚拟阻抗的微电网下垂控制策略研究[J]. 供用电, 2018, 35(6): 60-65.  
PENG Pai. Research on droop control strategy in micro-grid based on virtual impedance[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(6): 60-65.
- [18] 蔡宏达, 夏杨红, 杨鹏程, 等. 交直流混合微电网多模式协调下垂控制[J]. 供用电, 2018, 35(1): 2-7.  
CAI Hongda, XIA Yanghong, YANG Pengcheng, et al. Multi-mode coordination droop control for hybrid AC/DC microgrids[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(1): 2-7.
- [19] 麦倩屏, 陈鸣. 用于多微源低压微电网的虚拟阻抗反下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 96-102.  
MAI Qianping, CHEN Ming. P-V/Q-f droop control strategy with virtual impedance for low-voltage microgrid with multiple micro sources[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 96-102.
- [20] 彭谦, 马晨光, 杨雪梅, 等. 线性模态分析中的参与因子与贡献因子[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 92-96.  
PENG Qian, MA Chenguang, YANG Xuemei, et al. Participation factors and contribution factors in linear modal analysis[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 92-96.
- [21] KUZNETSOV Y A. Elements of applied bifurcation theory[M]. Springer, 1995.
- [22] DHOOGHE A, GOVAERTS W, KUZNETSOV Y A. MATCONT: A MATLAB package for numerical bifurcation analysis of ODEs[J]. ACM Transactions on Mathematical Software, 2003, 29(2): 141-164.

收稿日期: 2018-02-06; 修回日期: 2018-05-03

作者简介:

晁凯云(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网与配电网运行与控制; E-mail: 747873640@qq.com

苗世洪(1963—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制, 微电网与配电网新技术。E-mail: shmiao@hust.edu.cn

(编辑 周金梅)