

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.06.008

含旋转电机接口和逆变器接口的微网小信号稳定性分析

肖朝霞, 赵玉珠, 赵倩宇, 贾 双

(天津工业大学 电工电能新技术天津市重点实验室, 天津 300387)

摘要:提出了一种包含了逆变器接口(voltage source inverter, VSI)、同步电机接口(synchronous generator, SG)的独立微网控制策略,并分析了其小信号稳定性。VSI 接口和 SG 接口的分布式电源均采用下垂控制策略,二者之间无需实时通信,可实现负荷功率共享。建立了系统的小信号状态空间模型,主要包括:同步发电机及其控制器的小信号模型、逆变器及其控制器的小信号模型、电网络及负荷小信号模型。计算了下垂增益变化时的根轨迹,得到了系统主特征值随参数变化的根轨迹,计算了不同状态变量对特征值的参与因子。稳定性分析结果表明:当所有分布式电源采用下垂控制时,引入同步电机接口的分布式电源,系统频率小信号稳定性大大增强。PSCAD 时域仿真验证了特征值计算的正确性。

关键词:微网;小信号模型;稳定性分析;逆变器接口;同步发电机;下垂控制

中图分类号:TM712

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2016)06-058-13

Small-signal stability analysis of a micro-grid with a synchronous generator and an inverter-interfaced micro source

XIAO Zhaoxia, ZHAO Yuzhu, ZHAO Qianyu, JIA Shuang

(Tianjin Key Laboratory of Advanced Electrical Engineering and Energy Technology,
Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, P.R.China)

Abstract: An independent microgrid control strategy including voltage source inverter (VSI) and synchronous generator (SG) was proposed, and its small signal stability was analyzed. Both VSI interfaces and SG interfaces used droop control strategy, sharing the load power without real-time communication. A small-signal micro-grid model was developed, including a small-signal model of the synchronous generator and its controller, a small-signal model of the inverter-interfaced micro source and its controller, and a small-signal model of the power network and its load. The eigenvalues were calculated when the droop gains change. The root locus of the principal eigenvalues were obtained when the main parameters change. And the participation factor of different state variables to the eigenvalues was investigated by PSCAD time domain simulations. The results show that the frequency stability is improved greatly by the synchronous generator when all micro sources use droop control. PSCAD time domain simulation verified the correctness of the eigenvalue calculation.

Keywords: micro-grid; small signal model; stability analysis; inverter-interfaced; synchronous generator; droop control

收稿日期:2016-07-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51107088);天津市应用基础与前沿技术研究计划重点项目(15JCZDJC32100);天津市科技支撑计划项目(15ZCZDZX00980)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51107088), Tianjin Research Program of Application Foundation and Advanced Technology(15JCZDJC32100) and The key technologies R & D program of Tianjin(15ZCZDZX00980).

作者简介:肖朝霞(1981-),女,天津工业大学副教授,主要从事分布式发电与微电网技术研究,(E-mail) xiaozhaoxia@tjpu.edu.cn.

近年来,环境污染和能源短缺问题日益严重,包括大量可再生能源的分布式发电受到广泛关注。微网技术是实现分布式发电系统大规模应用和电网智能化的关键技术之一^[1-3]。它是指将分布式电源(DG)、储能装置、负荷和控制保护装置组织起来形成一个微型网络为本区域的当地负荷提供冷、热和电。微网中分布式电源接口方式主要为同步发电机接口、逆变器接口及异步发电机接口 3 类^[4],采用同步发电机接口的分布式电源主要包括各种小型水利发电机和柴油发电机等,采用逆变器接口的分布式电源主要包括光伏发电、储能装置、燃料电池和风力发电等,采用异步发电机接口的分布式电源主要为风力发电机。

与大电网相比,微网安装容量小,频率和电压不易控制;微网中含多类分布式电源,其中光伏和风力发电具有间歇性,导致输出功率波动;微网中大量电力电子装置的使用降低了系统惯性;微网内负荷的随机波动也会影响系统电压和频率的稳定性。微网的稳定性分为小信号稳定性和暂态稳定性。国内外已有很多学者对微网稳定性问题,尤其是对小信号稳定性问题进行了相关的研究和探讨^[5-7]。微网小信号稳定性又称小干扰稳定性,一般是指系统遭受小扰动后保持频率电压稳定的能力。特征值分析已成为微网小信号稳定性分析的一种重要方法^[8-10]。特征值对参数的灵敏度定量地提供了参数对稳定性影响的程度和趋势,并提供了改善系统稳定性的依据。

现阶段对微网小信号稳定性分析与研究多集中于逆变型微网,针对同时含有同步发电机和逆变器接口的微网研究较少。文献[3]主要建立了完整的并网运行逆变型微网小信号模型并分析其稳定性。文献[9]研究了逆变型微网中所有分布式电源采用 $P-f$ 和 $Q-V$ 下垂控制时系统频率稳定性问题。文献[11]建立了孤岛模式下分布式电源采用 V/f 控制的逆变型微网的小信号模型。文献[12]研究了含有光伏电源的微网孤岛运行时多种振荡模式的小信号稳定性。文献[13-14]研究了含同步发电机和逆变器接口的微网控制策略,分别针对下垂控制器和电力系统稳定器进行改进,并未对系统小信号稳定性进行分析。文献[15]研究了含同步发电机和逆变器接口的微网独立运行时采用主从控制系统的稳定性;文献[4]在此基础上增加了异步发电机接口的分布式电源。

研究了含同步发电机和逆变器接口的分布式电源采用下垂控制时独立运行微网的小信号稳定性,给出了微网及其控制器结构;建立了系统的小信号状态空间模型,主要包括:同步发电机及其控制器的小信号模型、逆变器及其控制器的小信号模型、电网络及负荷小信号模型;进行了系统稳定性分析,最后得出结论。

1 微网及其控制器

含同步发电机和逆变器接口的微网及其控制器如图 1 所示。传统的同步发电机通过调速系统和励磁系统实现频率和电压调节,在此基础上设计了外环下垂控制器以实现分布式电源间的无通信负荷功率共享。图 1 左下为同步发电机侧下垂控制器,通过测量线路的有功功率和无功功率分别对原有的调速系统和励磁系统加入下垂控制;图 1 右下为逆变器侧下垂控制器^[16]。

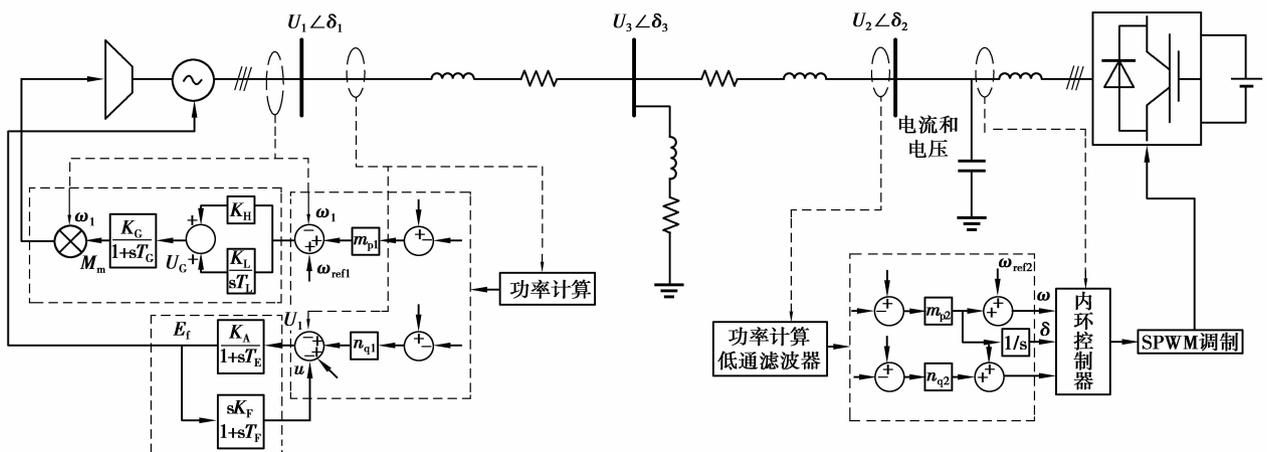


图 1 含同步发电机和逆变器接口微网及其控制器结构图

Fig.1 Structure of a microgrid with a synchronous generator and an inverter-interfaced micro source

同步发电机采用下垂控制,控制策略中采集的控制信号为发电机出口处的角速度、电压和电流。由于同步发电机要输入合适的励磁电压和机械功率才能够正常工作,文中同步发电机接口的控制策略主要分为 2 个部分。

1.1 同步发电机的 $Q-V$ 电压控制器

同步发电机的 $Q-V$ 电压控制器如图 2 所示, n_{q1} 为无功-电压下垂增益, Q_{ref1} 和 Q_1 为同步发电机的参考无功功率和输出无功功率。 K_A 为调节器放大倍数; T_E 为励磁机时间常数; u 为转子软反馈电压; K_F 、 T_F 分别为转子电压软反馈系数及时间常数。

由图 2 可知,其外环为控制器,其内环为励磁系统。 $Q-V$ 下垂控制求得 ΔU_{11} 后与 U_{ref1} 作比较,作为励磁系统的输入信号,最终得到励磁电压,使发电机稳定工作。

1.2 同步发电机的 $P-\omega$ 频率控制器

同步发电机的 $P-\omega$ 频率控制器如图 3 所示, m_{p1} 为有功-频率下垂增益; ω_{ref1} 、 P_{ref1} 和 P_1 分别表示同步发电机侧的参考角频率、参考有功功率和输出有功功率。 K_H 为调速器回路比例放大倍数; K_L 为调速器回路积分放大倍数; T_L 为调速器回路积分时间常数; K_G 和 T_G 分别为调速器惯性环节放大倍数和时间常数。

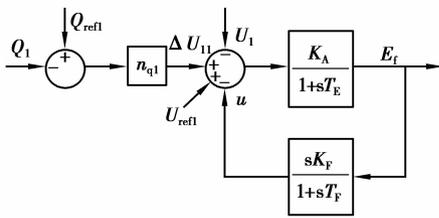


图 2 同步发电机的 $Q-V$ 电压控制器

Fig.2 $Q-V$ voltage controller of the synchronous generator

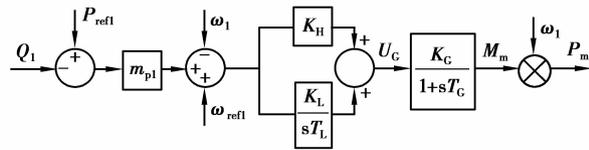


图 3 同步发电机的 $P-f$ 频率控制器

Fig.3 $P-f$ frequency controller of the synchronous generator

由图 3 可知,其外环为 $P-\omega$ 下垂控制器,其内环为调速器经 $P-\omega$ 下垂控制器得到 ω 后与参考值作比较,其差值经过 PI 控制器调整作为原动机的输入电压,原动机则等效为 1 个一阶惯性环。

2 微网小信号模型

2.1 同步发电机其控制器小信号模型

同步发电机及其控制器小信号模型如式(1)所示:

$$[\Delta \dot{X}_1] = [B] [\Delta X_1], \quad (1)$$

其中:

$$[\Delta X_1] = [\Delta \omega_1 \quad \Delta \delta_1 \quad \Delta E'_q \quad \Delta E_f \quad \Delta u \quad \Delta U_G \quad \Delta M_m], \quad (2)$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{D}{T_J} & -\frac{K_1}{T_J} & \frac{K_2}{T_J} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_J} \\ 2\pi f_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_4}{T'_{d0}} & -\frac{1}{K_3 T'_{d0}} & \frac{1}{T'_{d0}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_A}{T_E}(K_5 + n_{q1} K_7) & -\frac{K_A}{T_E}(K_6 + n_{q1} K_8) & -\frac{1}{T_E} & -\frac{K_A}{T_E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_A K_F}{T_E T_F}(K_5 + n_{q1} K_7) & -\frac{K_A K_F}{T_E T_F}(K_6 + n_{q1} K_8) & -\frac{K_F}{T_E T_F} & -\frac{1}{T_F} \left(1 + \frac{K_F K_A}{T_E}\right) & 0 & 0 & 0 \\ K_{10} & K_9 & K_{11} & -\frac{m_{p1} K_2 K_H}{T'_{d0}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_G}{T_G} & -\frac{1}{T_G} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: E'_q 为定子 q 轴暂态电动势; T'_{d0} 为 d 轴开路暂态时间常数; E_f 为励磁电动势; M_m 、 ω_1 分别为同步发电机机械转矩转子角速度; u 为转子软反馈电压; K_A 为调节器放大倍数; T_E 为励磁机时间常数; K_F 、 T_F 分别为转子电压软反馈系数及时间常数。上述变量均以标么值表示。 t 单位为 s , δ_1 同步发电机输出电压的相角, 单位为 rad 。

其中:

$$\begin{aligned}
 K_1 &= \frac{X_q - X_d}{X'_d + X_1} I_{1q0} U_3 \sin \delta_{10} + \frac{U_3 \cos \delta_{10}}{X_q + X_1} E_{Q0}; \\
 K_2 &= \frac{X_q - X_1}{X'_d + X_1} I_{1q0}; \\
 K_3 &= \frac{X'_d + X_1}{X_d + X_1} I_{1q0}; \\
 K_4 &= \frac{X_d - X'_d}{X'_d + X_1} U_3 \sin \delta_{10}; \\
 K_5 &= \frac{U_{1d0}}{U_{10}} \frac{X_q}{X_q + X_1} U_3 \cos \delta_{10} - \frac{U_{1q0}}{U_{10}} \frac{X'_d}{X'_d + X_1} U_3 \sin \delta_{10}; \\
 K_6 &= \frac{U_{1q0}}{U_{10}} \frac{X_1}{X'_d + X_1}; \\
 K_7 &= \frac{2X_q I_{1q0} U_3 \cos \delta_{10}}{X_q + X_1} + \frac{(2X_q I_{1d0} - E_{Q0}) U_3 \sin \delta_{10} - (X_q - X'_d) I_{1d0} U_3 \sin \delta_{10}}{X'_d + X_1}; \\
 K_8 &= \frac{(2X_q I_{1d0} - E_{Q0}) - (X_q + X_1) I_{1d0}}{X'_d + X_1}; \\
 K_9 &= \frac{K_1 K_H}{T_J} + \frac{m_{p1} K_2 K_4 K_H}{T'_{d0}} - \frac{m_{p1} K_1 K_L}{T_L}; \\
 K_{10} &= \frac{K_H D}{T_J} - \frac{K_L}{T_L} - 2\pi f_0 m_{p1} K_1 K_H; \\
 K_{11} &= \frac{K_H K_2}{T_J} + \frac{m_{p1} K_H K_2}{k_3 T'_{d0}} - \frac{m_{p1} K_2 K_L}{T_L}.
 \end{aligned}$$

2.2 电网络及负荷小信号模型

电网络及负荷的小信号模型为式(4)所示, 结构图如图4所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & R_{24} \\ M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta \delta_1 \\ \Delta \delta_2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: $R_{11} = \frac{3}{2} |Y_{12}| U_2 \cos \beta_{12} + 3 |Y_{11}| U_1 \cos \beta_{11}$; $R_{12} = \frac{3}{2} |Y_{12}| U_1 \cos \beta_{12}$; $R_{13} = \frac{3}{2} |Y_{12}| U_1 U_2 \sin \beta_{12}$;
 $R_{14} = -\frac{3}{2} |Y_{12}| U_1 U_2 \sin \beta_{12}$; $R_{21} = \frac{3}{2} |Y_{21}| U_2 \cos \beta_{21}$; $R_{22} = -\frac{3}{2} |Y_{21}| U_2 \cos \beta_{21} + 3 |Y_{22}| U_2 \cos \beta_{22}$;
 $R_{23} = -\frac{3}{2} |Y_{21}| U_2 \sin \beta_{21}$; $R_{24} = \frac{3}{2} |Y_{21}| U_2 U_1 \sin \beta_{21}$; $M_{11} = -\frac{3}{2} |Y_{12}| U_2 \sin \beta_{12} - 3 |Y_{11}| U_1 \sin \beta_{11}$; $M_{12} =$
 $-\frac{3}{2} |Y_{12}| U_1 \sin \beta_{12}$; $M_{13} = \frac{3}{2} |Y_{12}| U_1 U_2 \cos \beta_{12}$; $M_{14} = -\frac{3}{2} |Y_{12}| U_1 U_2 \cos \beta_{12}$; $M_{14} = -\frac{3}{2} |Y_{12}| U_1 U_2 \cos \beta_{12}$;
 $M_{21} = -\frac{3}{2} |Y_{21}| U_2 \sin \beta_{21}$; $M_{22} = -\frac{3}{2} |Y_{21}| U_1 \sin \beta_{21} - 3 |Y_{22}| U_2 \sin \beta_{22}$; $M_{23} = -\frac{3}{2} |Y_{21}| U_1 U_2 \cos \beta_{21}$; $M_{24} =$
 $\frac{3}{2} |Y_{21}| U_2 U_1 \cos \beta_{21}$ 。

2.3 逆变器及其控制器的小信号模型

逆变器侧的下垂控制器如图5所示, 经线性化可得逆变器及其控制器的小信号模型如式(5)所示。

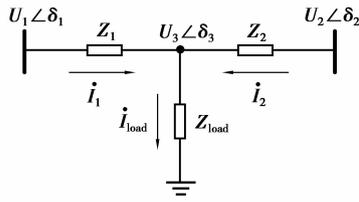


图 4 电网络结构图

Fig.4 Structure of the power network

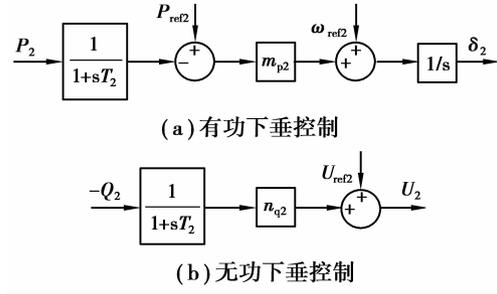


图 5 逆变器侧的下垂控制器

Fig.5 Droop controller of inverter-interfaced micro source

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta\delta_2} \\ \ddots \\ \Delta\delta_2 \\ \dot{\Delta U_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{m_{p2}R_{23}}{T_2} & 0 & -\frac{m_{p2}R_{21}}{T_2} & -\frac{m_{p2}R_{24}}{T_2} & -\frac{1}{T_2} & -\frac{m_{p2}R_{22}}{T_2} \\ -\frac{n_{q2}M_{23}}{T_2} & 0 & -\frac{n_{q2}M_{21}}{T_2} & -\frac{n_{q2}M_{24}}{T_2} & 0 & -\frac{n_{q2}M_{22}-1}{T_2} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: T_2 、 m_{p2} 和 n_{q2} 分别为低通滤波器滤波时间常数、有功-频率下垂系数和无功-电压下垂系数; P_{ref2} 、 P_2 、 Q_2 分别为参考有功功率、输出有功功率和输出无功功率; ω_{ref2} 、 U_{ref2} 、 U_2 和 δ_2 分别为参考角频率、参考电压、输出电压幅值和相角。

联立式(2)和(5)可得含同步发电机与逆变器接口微网小信号模型如式(6)所示,

$$[\dot{\Delta X}] = [A] [\Delta X], \quad (6)$$

其中:

$$[\Delta X_1] = [\Delta\omega_1 \quad \Delta\delta_1 \quad \Delta E'_q \quad \Delta E_f \quad \Delta u \quad \Delta U_G \quad \Delta M_m \quad \Delta\delta_2 \quad \Delta\dot{\delta}_2 \quad \Delta U_2], \quad (7)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{D}{T_J} & -\frac{K_1}{T_J} & -\frac{K_2}{T_J} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_J} & 0 & 0 & 0 \\ 2\pi f_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_4}{T_{\text{do}}} & -\frac{1}{k_3 T_{\text{do}}} & \frac{1}{T_{\text{do}}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_A}{T_E}(K_5 + n_{q1}K_7) & -\frac{K_A}{T_E}(K_6 + n_{q1}K_8) & -\frac{1}{T_E} & -\frac{K_A}{T_E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_A K_F}{T_E T_F}(K_5 + n_{q1}K_7) & -\frac{K_A K_F}{T_E T_F}(K_6 + n_{q1}K_8) & -\frac{K_F}{T_E T_R} & -\frac{1}{T_F}\left(1 + \frac{K_F K_A}{T_E}\right) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{10} & K_9 & K_{11} & -\frac{m_{p1}K_2 K_{12}}{T_{\text{do}}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_G}{T_G} & -\frac{1}{T_G} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{m_{p2}R_{23}}{T_2} + \frac{-m_{p2}R_{21}}{T_2}K_5 & -\frac{m_{p2}R_{21}}{T_2}K_6 & 0 & 0 & 0 & -\frac{m_{p2}R_{24}}{T_2} & -\frac{1}{T_2} & -\frac{m_{p2}R_{22}}{T_2} \\ 0 & -\frac{n_{q2}M_{23}}{T_2} + \frac{-n_{q2}M_{21}}{T_2}K_5 & -\frac{n_{q2}M_{21}}{T_2}K_7 & 0 & 0 & 0 & -\frac{n_{q2}M_{24}}{T_2} & 0 & -\frac{n_{q2}M_{22}-1}{T_2} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

3 系统小信号稳定性分析

利用上述建立的微网小信号状态空间模型,分别计算下垂增益 m_{p2} 、 n_{q1} 和 n_{q2} 变化时系统特征值,得到参数变化时系统主特征值的根轨迹,并将特征值分析结果和时域仿真结果进行比较,分析了参与因子对系统状态变量的影响。

文中所述的微网系统及其控制器参数如表 1 所示,系统额定频率 50 Hz,额定线电压为 0.4 kV,初始负载阻抗 $Z_{load} = 11.885 + j3.14$ 。

表 1 系统及其控制器参数

Table 1 The system and its controller parameters

变量	参数值
纵轴同步电抗 X_d	1.81
纵轴暂态电抗 X'_d	0.300
横轴同步电抗 X_q	1.76
阻尼系数 D	1
励磁时间常数 T'_{d0}	8.0
发电机转子机械惯性时间常数 T_J	0.207 2
励磁系统调节器放大倍数 K_A	400
励磁系统励磁机时间常数 T_E	0.8
励磁系统转子电压软反馈系数 K_F	0.03
励磁系统软反馈时间常数 T_F	1.0
调速器回路比例放大倍数 K_H	60
调速器回路积分放大倍数 K_L	1
调速器回路积分时间常数 T_L	0.01
调速器惯性环节放大倍数 K_G	0.3
调速器惯性环节时间常数 T_G	0.01
额定频率 f_0	1
同步发电机侧 P - f 下垂增益 m_{p1}	0.05
同步发电机侧 Q - V 下垂增益 n_{p2}	0.05
逆变器侧 P - f 下垂增益 m_{q2}	0.64
逆变器侧 Q - V 下垂增益 n_{q2}	0.64
逆变器侧低通滤波器滤波时间常数 T_2	1.25

3.1 系统特征值及根轨迹分析

经潮流计算得到 1 个稳态运行点,其参数及该稳态运行点处的系统特征值如表 2 所示。其中 $\lambda_{2,3}$ 、 $\lambda_{6,7}$ 、 $\lambda_{8,9}$ 为复数特征值,对应于 3 个振荡模式。实部刻画了系统对振荡的阻尼,虚部体现了振荡的频率。该运行点处系统所有特征值均位于复平面的左半平面,因此系统是稳定运行的。

表 2 稳态运行点参数及该点特征值

Table 2 Steady-state operating parameters and its eigenvalues

变量	参数值	变量	参数值	序号	特征值
U_{1d}	0.0744 V	U_{1q}	311.846 V	λ_1	-171.12
U_{2d}	4.3096 V	U_{2q}	311.523 6 V	$\lambda_{2,3}$	-16.86 = 70.06i
U_{3d}	3.982 V	U_{3q}	311.0133 V	λ_4	-24.52
I_{1d}	-48.527	I_{1q}	82.072 A	λ_5	-4.03
ω_1	50.08 Hz	ω_2	50.08 Hz	$\lambda_{6,7}$	-0.21 = 0.24i
P_{ref1}	40 kW	P_{ref2}	20 kW	$\lambda_{8,9}$	-0.41 = 0.55i
R_{load}	11.885 Ω	X_{load}	0.01 H	λ_{10}	-0.8

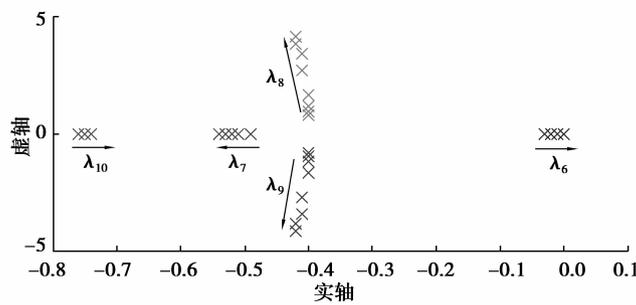
3.1.1 m_{p2} 的变化

某一稳定运行点时同步发电机接口的分布式电源 P - f 下垂增益 m_{p1} 和逆变器接口的分布式电源 P - f 下

垂增益 m_{p2} 均为 0.025, 同步发电机和逆变器接口分布式电源额定有功功率均为 40 kW。当 m_{p1} 保持不变, m_{p2} 逐渐增大, 系统特征值的变化情况如表 3 所示。由表 3 可知, 由于微网中包括同步发电机单元, 系统小信号稳定性大大增强, m_{p2} 几乎可增大到纵轴, 此时逆变器接口的分布式电源容量已经很小 $P_{ref1}=1.7$ kW, 系统才出现不稳定。系统主特征根的根轨迹如图 6 所示, 当 m_{p2} 增大时, 主特征根 λ_6 向右移动直至系统不稳定。

表 3 m_{p2} 变化时系统的特征值Table 3 The system eigenvalues when m_{p2} changes

参数名	数值				
	$m_{p1} = 0.025$	$m_{p1} = 0.025$	$m_{p1} = 0.025$	$m_{p1} = 0.025$	
m_{p1}	$m_{p2} = 0.025$	$m_{p2} = 0.033$	$m_{p2} = 0.050$	$m_{p2} = 0.100$	
m_{p2}	$P_{ref1} = 40$ kW	$P_{ref1} = 40$ kW	$P_{ref1} = 40$ kW	$P_{ref1} = 40$ kW	
	$P_{ref1} = 40$ kW	$P_{ref1} = 30$ kW	$P_{ref1} = 20$ kW	$P_{ref1} = 10$ kW	
系统特征值	λ_1	-171.13	-171.13	-171.13	
	$\lambda_{2,3}$	-16.8470.14i	-16.8470.14i	-16.8470.14i	
	$\lambda_{4,5}$	-20.77, -4.00	-20.76, -4.00	-20.87, -4.00	-21.23, -3.99
	$\lambda_{6,7}$	-0.03, -0.49	-0.03, -0.51	-0.02, -0.52	-0.02, -0.52
	$\lambda_{8,9}$	-0.40.81i	-0.40.95i	-0.41.19i	-0.41.66i
	λ_{10}	-0.76	-0.75	-0.74	-0.75
		$m_{p1} = 0.025$	$m_{p1} = 0.025$	$m_{p1} = 0.025$	$m_{p1} = 0.025$
m_{p1}	$m_{p2} = 0.200$	$m_{p2} = 0.400$	$m_{p2} = 0.500$	$m_{p2} = 0.600$	
m_{p2}	$P_{ref1} = 40$ kW	$P_{ref1} = 40$ kW	$P_{ref1} = 40$ kW	$P_{ref1} = 40$ kW	
	$P_{ref1} = 5$ kW	$P_{ref1} = 2.5$ kW	$P_{ref1} = 2$ kW	$P_{ref1} = 1.7$ kW	
系统特征值	λ_1	-171.13	-171.13	-171.13	
	$\lambda_{2,3}$	-16.8470.14i	-16.8470.14i	-16.8470.14i	
	$\lambda_{4,5}$	-21.17, -4.00	-21.22, -4.00	-21.22, -4.00	-21.22, -4.00
	$\lambda_{6,7}$	-0.02, -0.53	-0.01, -0.53	-0.01, -0.53	0.0001, -0.54
	$\lambda_{8,9}$	-0.412.71i	-0.413.43i	-0.423.83i	-0.424.15i
	λ_{10}	-0.74	-0.74	-0.74	-0.74

图 6 m_{p2} 变化时系统主特征值的根轨迹Fig.6 The root locus of main eigenvalues when m_{p2} changes

当 $m_{p1}=0.025, m_{p2}=0.05, 10$ s 加 10 kW 负荷, 14 s 切 20 kW 负荷, 系统的频率和有功变化如图 7 所示, 由图 7 可知, 系统稳定运行。当 $m_{p1}=0.025, m_{p2}=0.6$, 此时逆变器接口的分布式电源额定功率为 1.7 kW, 时域仿真结果如图 8 所示。由图 8 可知, 系统不稳定。当 $m_{p1}=0.025, m_{p2}=0.001$, 此时逆变器接口的分布式电源额定功率为 1 000 kW, 且 $t=15$ s 时, 加入有功负荷 175 kW, 当 $t=20$ s 时, 加入 195 kW 有功负荷, 系统的频率和有功功率的变化如图 9 所示。由图 9 可知, 系统保持稳定。由此可知, 时域仿真结果和特征值分析结果一致, 当系统保持稳定时, m_{p2} 的变化区间为 $0 < m_{p2} < 0.6$ 。

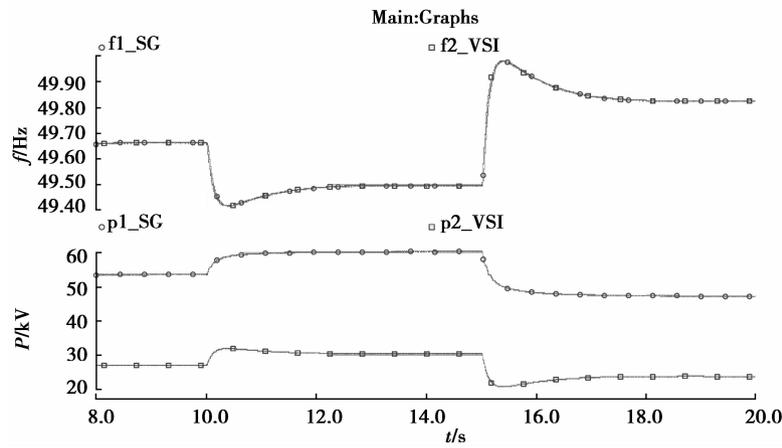


图 7 $m_{p1}=0.025, m_{p2}=0.05$ 时系统的频率和功率

Fig.7 The frequency and active power of the system when m_{p1} is 0.025, m_{p2} is 0.05

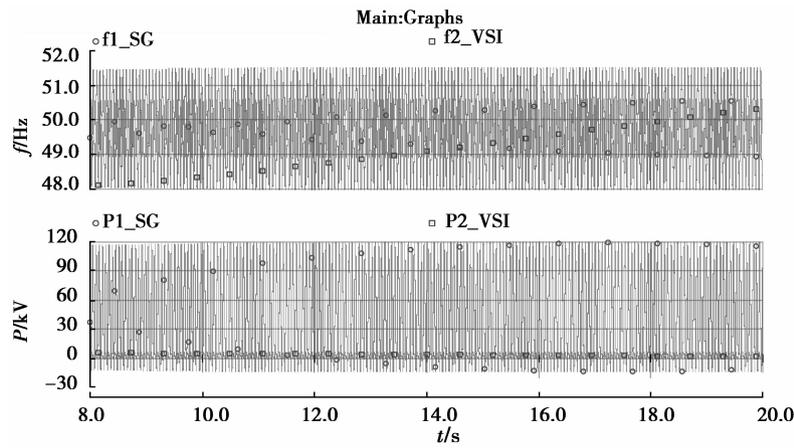


图 8 $m_{p1}=0.025, m_{p2}=0.6$ 系统的频率和有功功率

Fig.8 The frequency and active power of the system when m_{p1} is 0.025, m_{p2} is 0.6

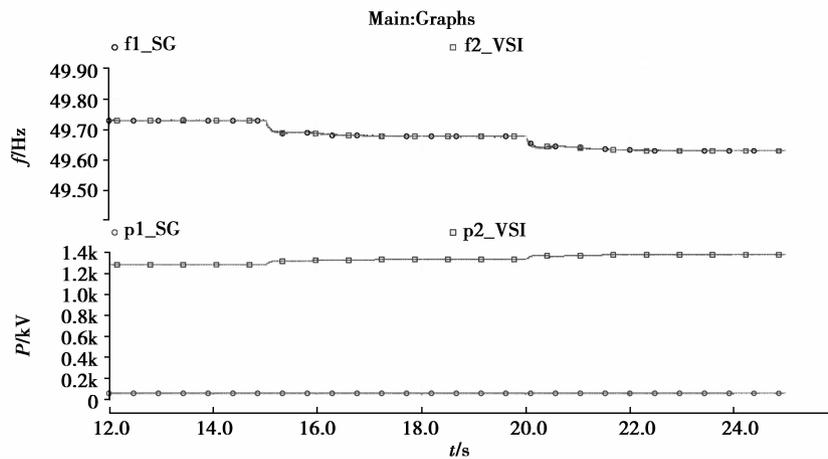


图 9 $m_{p1}=0.025, m_{p2}=0.001$ 系统的频率和有功功率

Fig.9 The frequency and active power of the system with m_{p1} is 0.025, m_{p2} is 0.001

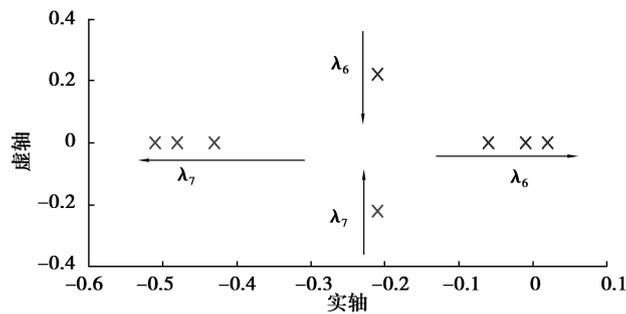
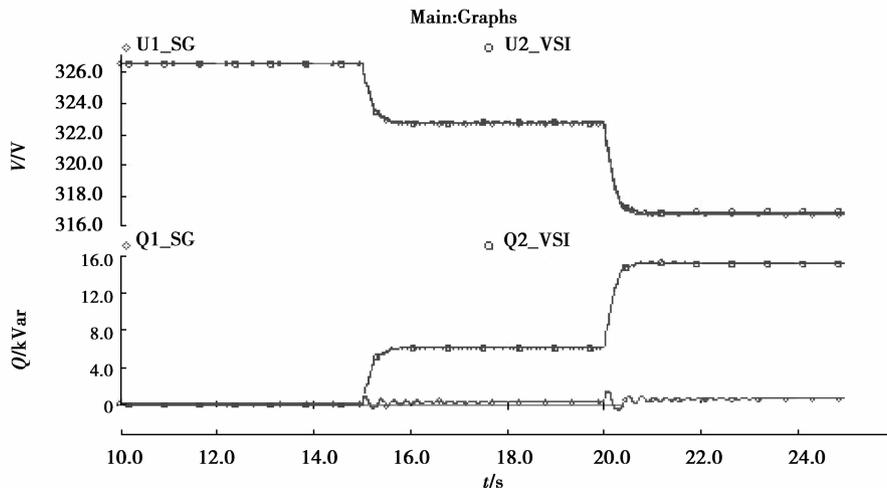
3.1.2 n_{q1} 的变化

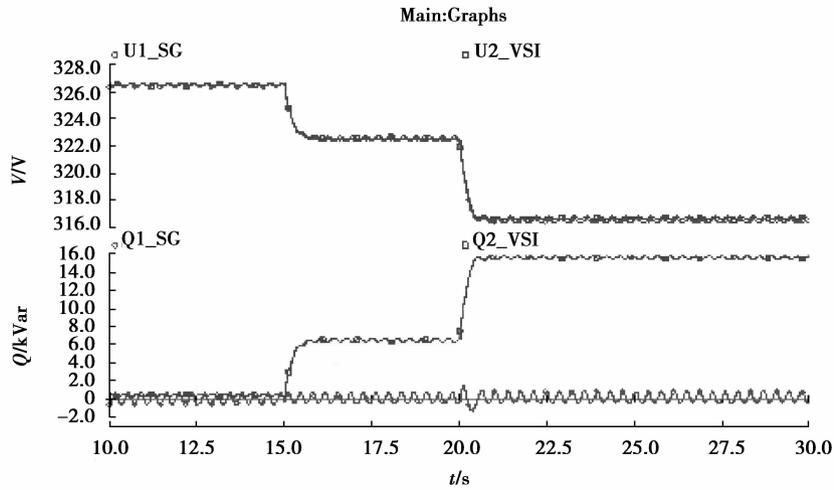
n_{q2} 保持不变, n_{q1} 从 0.78 变化到 25 时系统特征值的变化如表 4 所示。由表 4 可知,随着 n_{q1} 的增大,系统稳定性下降,直至不稳定。 n_{q1} 变化时系统主特征值的根轨迹如图 10 所示,由图 10 可知,随着 n_{q1} 的增大, $\lambda_{6,7}$ 由一

对共轭复根逐渐变化为 2 个实数根, 其中一个实数根向左半平面移动, 另一个实数根向右半平面移动直至系统不稳定。当 $n_{q1}=20, n_{q2}=0.64, t=15$ s 时加 6.4 kVar 负荷, $t=20$ s 时加 10.2 kVar 负荷, 2 个分布式电源输出的电压和无功功率的变化情况如图 11 所示。由图 11 可知, 系统是稳定的。当 $n_{q1}=25, n_{q2}=0.64$ 时, 时域仿真结果如图 12 所示, 电压和无功功率以及频率均出现等幅振荡, 系统变得不稳定。而当 n_{q1} 减小时, 系统的稳定性不断增强, 当 $n_{q1}=0.03, n_{q2}=0.64$ 时, $t=15$ s 时, 加入无功负荷 6.4 kVar, $t=20$ s 时, 切掉 10.2 kVar 无功负荷, 2 个分布式电源输出的电压和无功功率的变化情况如图 13 所示。由图 13 可知系统仍然保持稳定。由此可知, 时域仿真结果和特征值分析结果一致, 当系统保持稳定时, n_{q1} 的变化区间为 $0 < n_{q1} < 25$ 。

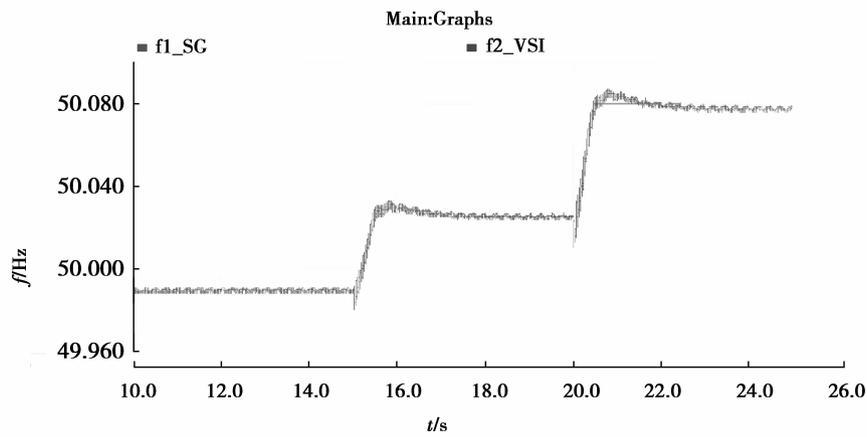
表 4 n_{q1} 变化时系统的特征值Table 4 The system eigenvalues when n_{q1} changes

参数名	数值				
n_{q1}	$n_{q1} = 0.78$	$n_{q1} = 5.00$	$n_{q1} = 20.00$	$n_{q1} = 25.00$	
n_{q2}	$n_{q2} = 0.64$	$n_{q2} = 0.64$	$n_{q2} = 0.64$	$n_{q2} = 0.64$	
系统特征值	λ_1	-171.12	-171.13	-171.13	-171.14
	$\lambda_{2,3}$	-16.8570.08i	-16.8470.14i	-16.8470.14i	-16.8370.16i
	$\lambda_{4,5}$	-20.69, -4.03	-19.24, -4.00	-19.10, -3.96	-18.95, -3.92
	$\lambda_{6,7}$	-0.210.22i	-0.06, -0.43	-0.01, -0.49	0.02, -0.51
	$\lambda_{8,9}$	-0.410.68i	-0.411.10i	-0.401.10i	-0.401.16i
	λ_{10}	-0.77	-0.78	-0.81	-0.81

图 10 n_{q1} 变化时主特征值的根轨迹Fig.10 The root locus of main eigenvalues when n_{q1} changes图 11 $n_{q1}=20, n_{q2}=0.64$ 时系统的电压和无功功率Fig.11 The voltage and reactive power of the system when n_{q1} is 20, n_{q2} is 0.64



(a) $n_{q1}=25, n_{q2}=0.64$ 系统的电压、无功功率



(b) $n_{q1}=25, n_{q2}=0.64$ 系统功率

图 12 系统频率电压和无功功率

Fig.12 The voltage, reactive power and frequency of the system when n_{q1} is 25, n_{q2} is 0.64

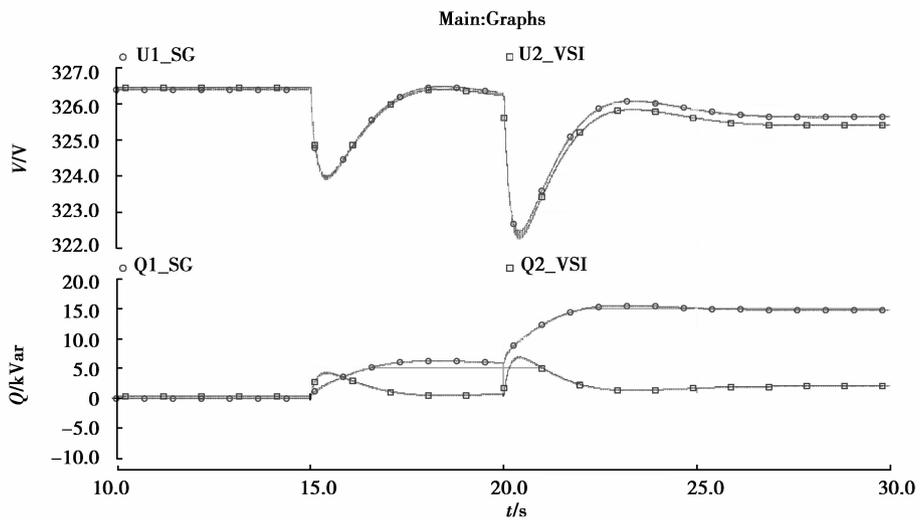


图 13 $n_{q1}=0.03, n_{q2}=0.64$ 时系统的电压和无功功率

Fig.13 The voltage and reactive power of the system when n_{q1} is 0.03, n_{q2} is 0.64

3.1.3 n_{q2} 的变化

某一稳定运行点时同步发电机接口的分布式电源 Q-V 下垂增益 n_{q1} 和逆变器接口的分布式电源 Q-V 下

垂增益 n_{q2} 均为 0.64, 即无功增加 50 kVar, 电压下降 10%。当 n_{q1} 保持不变时, n_{q2} 从 0.64 变化到 10 时系统特征值的变化如表 5 所示。

表 5 n_{q2} 变化时系统的特征值
Table 5 The system eigenvalues when n_{q2} changes

参数名	数值				
n_{q1}	$n_{q1} = 0.64$	$n_{q1} = 0.64$	$n_{q1} = 0.64$	$n_{q1} = 0.64$	
n_{q2}	$n_{q2} = 0.64$	$n_{q2} = 1$	$n_{q2} = 5$	$n_{q2} = 10$	
系 统 特 征 值	λ_1	-171.12	-171.11	-171.11	-171.10
	$\lambda_{2,3}$	-16.8670.06i	-16.8670.14i	-16.8670.14i	-16.8769.97i
	$\lambda_{4,5}$	-24.52, -4.03	-40.80, -4.03	-125.60, -4.03	-353.10, -4.03
	$\lambda_{6,7}$	-0.210.24i	-0.210.20i	-0.210.14i	-0.1, -0.36
	$\lambda_{8,9}$	-0.410.55i	-0.410.17i	-0.410.03i	0.52, -1.32
	λ_{10}	-0.80	-0.79	-0.76	-0.74

由表 5 可知, 随着 n_{q2} 的增大, 系统从稳定运行变为不稳定, 系统的稳定性不断下降。 n_{q2} 变化时系统主特征值的根轨迹如图 14 所示。由图 14 可知, 随着 n_{q2} 的增大, $\lambda_{6,7}$ 和 $\lambda_{8,9}$ 均为由一对共轭复根逐渐变化为 2 个实数根, 其中一个实数根向左半平面移动, 另一个实数根向右半平面移动直至系统不稳定, λ_{10} 一直向右移动。当 $n_{q1} = 0.64, n_{q2} = 10$ 时, 系统的电压和无功功率的变化情况如图 15 所示, 系统处于不稳定的状态。而 n_{q2} 减小时, 系统的稳定性不断增强, 当 $n_{q1} = 0.64, n_{q2} = 0.03, t = 10$ s 时, 加入无功负荷 6.4 kVar, $t = 15$ s 时, 切掉 10.2 kVar 无功负荷, 2 个分布式电源输出的电压和无功功率的变化情况如图 16 所示, 系统仍然保持稳定。由此可知, 时域仿真结果和特征值分析结果相一致, 当系统保持稳定时, n_{q2} 的变化区间为 $0 < n_{q2} < 10$ 。

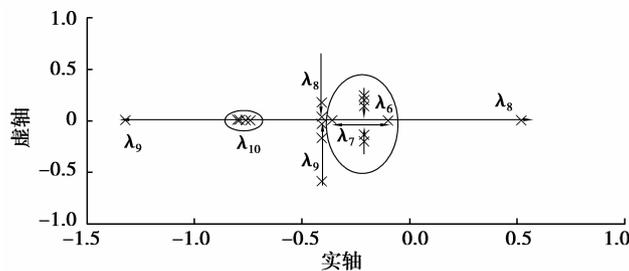


图 14 n_{q2} 变化时主特征值的根轨迹

Fig.14 The root locus of main eigenvalues when n_{q2} changes

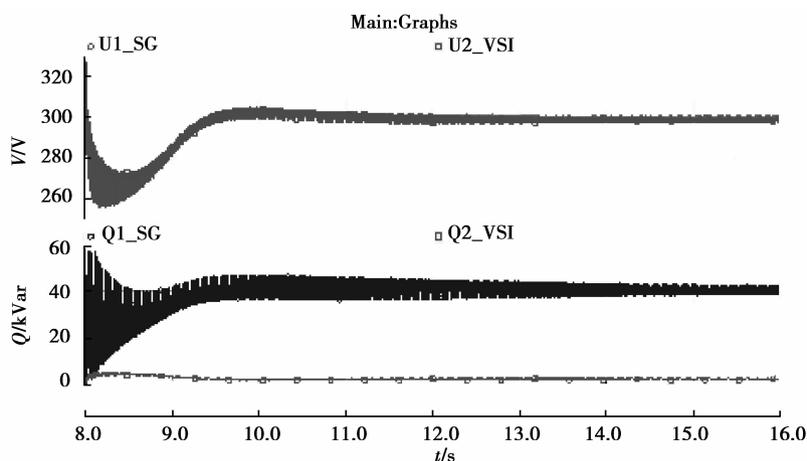


图 15 $n_{q1} = 0.64, n_{q2} = 10$ 时系统的电压和无功功率

Fig.15 The voltage and reactive power of the system when n_{q1} is 0.64, n_{q2} is 10

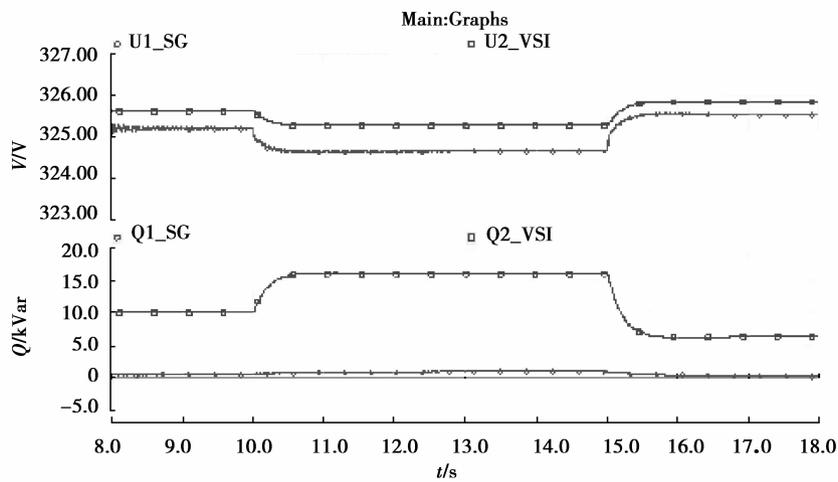


图 16 $n_{q1}=0.64, n_{q2}=0.03$ 时系统的电压和无功功率

Fig.16 The voltage and reactive power of the system when n_{q1} is 0.64, n_{q2} is 0.03

3.2 参与因子

参与因子表征振荡模式的灵敏度,它反映了相关状态变量对振荡模式的参与程度。某一变量对特征值的参与因子为正,表明该变量恶化了系统振荡;为负,表明该变量对系统振荡起阻尼作用。含同步发电机和逆变器接口的微网状态变量对特征值的参与因子如表 6 所示。由表 6 可知,同步发电机的频率、功角、调速装置的控制器、机械转矩主要影响系统振荡模式 $\lambda_{2,3}$,同步发电机功角、暂态电动势及励磁电动势主要影响系统振荡模式 $\lambda_{6,7}$,逆变器输出电压的相角、频率、电压幅值主要影响系统振荡模式 $\lambda_{8,9}$ 。

表 6 含同步发电机和逆变器接口的微网状态变量对特征值的参与因子

Fig.6 Participation factor of a microgrid state variables to the eigenvalues with a synchronous generator and an inverter-interfaced micro source

参数名	振荡模式						
	λ_1	$\lambda_{2,3}$	λ_4	λ_5	$\lambda_{6,7}$	$\lambda_{8,9}$	λ_{10}
$\Delta\omega_1$	0.176 2	0.411 9	0.000 0	-0.000 2	0.000 2	0.000 0	-0.000 3
$\Delta\delta_1$	0.000 0	-0.000 5	0.000 0	0.003 5	0.483 7	0.000 0	0.030 0
ΔE_q	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.008 8	0.203 2	0.000 0	0.584 8
ΔE_f	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.428 2	0.242 8	0.000 0	0.086 1
Δu	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.558 7	0.071 6	0.000 0	0.298 0
ΔU_G	0.411 9	0.294 3	0.000 0	0.000 5	-0.000 8	0.000 0	0.000 6
ΔM_m	0.411 9	0.294 3	0.000 0	0.000 5	-0.000 8	0.000 0	0.000 6
$\Delta\delta_2$	0.000 0	0.000 0	-0.001 0	0.000 0	0.000 0	0.500 5	0.000 0
$\Delta\omega_2$	0.000 0	0.000 0	-0.001 0	0.000 0	0.000 0	0.500 5	0.000 0
ΔU_2	0.000 0	0.000 0	1.002 0	0.000 0	0.000 0	-0.001 0	0.000 0

4 结 论

1) 当微网独立运行且所有分布式电源采用下垂控制时,含同步发电机接口的微网与全部为逆变器接口的微网相比,系统频率小信号稳定性大大增强,逆变器接口分布式电源有功-频率下垂系数几乎可从零增大到纵轴;

- 2)通过主要特征值的根轨迹分析,给出了有功-频率和无功-电压下垂增益选取的范围;
- 3)计算了不同状态变量对特征值的参与因子,分析了对系统主要振荡模式影响较大的状态变量。

参考文献:

- [1] 肖朝霞.微网控制及运行特性分析[D].天津:天津大学,2010.
XIAO Zhaoxia. Control and operation characteristic analysis of a microgrid[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- [2] Shi H, Zhuo F, Hou L, et al. Small-signal stability analysis of a microgrid operating in droop control mode[C]. ECCE Asia Down under (ECCE Asia), Melbourne, Australia, June 3-6, 2013: 882-887.
- [3] 张建华,苏玲,刘若溪,等.逆变型分布式电源微网并网小信号稳定性分析[J].电力系统自动化,2011,35(6):76-80.
ZHANG Jianhua, SU Ling, LIU Ruoxi, et al. Small-signal stability analysis of grid-connected microgrid with inverter-interfaced distributed resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(6): 76-80. (in Chinese)
- [4] Tang X S, Deng W, Qi Z P. Investigation of the dynamic stability of microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 698-706.
- [5] Wang C S, Li Y, Peng K, et al. Coordinated optimal design of inverter controllers in a micro-grid with multiple distributed generation units[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2679-2687.
- [6] Pogaku N, Prodanovic M, Green T C. Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 613-625.
- [7] Iyer S V, Belur M N, Chandorkar M C. A generalized computational method to determine stability of a multi-inverter microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(9): 2420-2432.
- [8] 李霞林,郭力,王成山.微网主从控制模式下的稳定性分析[J].电工技术学报,2014,29(2): 24-34.
LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan. Stability analysis in a master-slave control based microgrid[J]. Transactions of China Electro technical Society, 2014, 29(2):24-34. (in Chinese)
- [9] 肖朝霞,王成山,王守相.含多微型电源的微网小信号稳定性分析[J].电力系统自动化,2009,33(6): 81-85.
XIAO Zhaoxia, WANG Chengshan, WANG Shouxiang. Small signal stability analysis of microgrid containing multiple micro sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6): 81-85. (in Chinese)
- [10] Rasgedyzzanab M, Mueller J, Kimball J. An accurate small-model of inverter-dominated islanded microgrids using dq reference frame[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4): 1070-1080.
- [11] 郑竞宏,李兴旺,王燕廷,等.微电网切换至孤岛运行时的小信号稳定性分析[J].电力系统自动化,2012,36(15):25-32.
ZHENG Jinghong, LI Xingwang, WANG Yanting, et al. Small-signal stability analysis of a microgrid switching to islanded mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 25-32. (in Chinese)
- [12] 杜威,姜齐荣,洪芦诚,等.光伏微电网孤岛运行时多种振荡模式的小信号建模分析[J].电力系统自动化,2014,38(10): 17-23.
DU Wei, JIANG Qirong, HONG Lucheng, et al. Small signal analysis of multiple oscillation modes in a photovoltaic microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(10): 17-23. (in Chinese)
- [13] 高晓芝,李林川,张蕾.含电压源型逆变器和同步电机接口的微网控制[J].电力系统保护与控制,2012,40(13):145-150.
GAO Xiaozhi, LI Linchuan, ZHANG Lei. Microgrid control with voltage source inverter interface and synchronous generator interface[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 145-150. (in Chinese)
- [14] 张丽,徐玉琴,王增平,等.包含同步发电机及电压源逆变器接口的微网控制策略[J].电网技术,2011,35(3):170-176.
ZHANG Li, XU Yuqin, WANG Zengping, et al. Control scheme of microgrid fed by synchronous generator and voltage source inverter[J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 170-176. (in Chinese)
- [15] Katiraei F, Iravani M R, Lehn P W. Small-signal dynamic model of a microgrid including conventional and electronically interfaced distributed resources[J]. IET Gener Transm Distrib, 2007, 1(3): 369-378.
- [16] 王成山,肖朝霞,王守相.微网中分布式电源逆变器的多环反馈控制策略[J].电工技术学报,2009,24(2):100-107.
WANG Chengshan, XIAO Zhaoxia, WANG Shouxiang. Multiple feedback loop control scheme for inverters of the micro source in microgrids[J]. Transactions of China Electro technical Society, 2009, 24(2): 100-107. (in Chinese)