

引用格式:徐波,李沛泓,姚寅,等.GFM、GFL 变流器与同步发电机构成的混合电力系统小信号建模与稳定性分析[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):141-151.

Citation: XU Bo, LI Peihong, YAO Yin, et al. Small signal modeling and stability analysis of hybrid power system with GFM and GFL converters and synchronous generator[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 141-151.

GFM、GFL 变流器与同步发电机构成的混合电力系统小信号建模与稳定性分析

徐波¹, 李沛泓¹, 姚寅¹, 陈浩², 边晓燕¹, 李东东¹

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国家电网有限公司华东分部, 上海 200120)

摘要:高比例新能源经变流器接入电力系统,使得电力系统的频率支撑能力降低,进而影响系统的同步稳定性。针对由构网型(grid-forming, GFM)、跟网型(grid-following, GFL)变流器以及同步发电机构成的混合电力系统,进行小信号建模与稳定性分析。首先,对采用虚拟同步发电机控制的 GFM 变流器、基于锁相环(phase locked loop, PLL)的 GFL 变流器、同步发电机以及其他元件构成的混合电力系统进行小信号建模,并将建立的小信号模型与实际电路模型进行相同阶跃功率扰动对比,验证信号模型的正确性;其次,利用特征值分析法分析新能源渗透率及 GFM 变流器渗透率的变化对系统小信号稳定性的影响,并利用参与因子法分析相关状态变量对系统特征值的影响程度;然后,分析 GFM 变流器控制参数中虚拟转动惯量与虚拟阻抗对系统小信号稳定性的影响;最后,利用仿真验证理论分析的准确性。

关键词:构网型变流器;跟网型变流器;同步发电机;小信号稳定性;新能源渗透率

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.06.015 **中图分类号:** TM712 **文章编号:** 1673-9140(2024)06-0141-11

Small signal modeling and stability analysis of hybrid power system with GFM and GFL converters and synchronous generator

XU Bo¹, LI Peihong¹, YAO Yin¹, CHEN Hao², BIAN Xiaoyan¹, LI Dongdong¹

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. East China Branch of State Grid Corporation of China, Shanghai 200120, China)

Abstract: A high proportion of new energy is connected to the power system through converters, which reduces the frequency support ability of the power system and affects the synchronization stability of the system. Small signal modeling and stability analysis are presented for a hybrid power system composed of a grid-forming (GFM) converter, a grid-following (GFL) converter, and a synchronous generator. Firstly, small signal modeling is conducted on a hybrid power system composed of a GFM converter controlled by a virtual synchronous generator, a GFL converter based on a phase lock loop (PLL), a synchronous generator, and other components. To verify the correctness of the signal model, the established small signal model is compared with the actual circuit model for the same step power disturbance. Secondly, the eigenvalue analysis method is used to analyze the influence of changes in the penetration rate of new energy and GFM converter on the small signal stability of the system, and the participation factor method is employed to analyze the degree of influence of relevant state variables on the system eigenvalues. Then, the influence of the virtual moment of inertia and virtual impedance in the control parameters of the GFM converter on the small signal stability of the system is analyzed. Finally, the accuracy of the theoretical analysis is verified through simulation.

Key words: grid-forming converter; grid-following converter; synchronous generator; small signal stability; penetration rate of new energy

为实现“双碳”目标,大规模新能源接入电网,电力系统正呈现出“双高”的发展趋势^[1],高比例新

能源并网以及高比例电力电子设备的接入对电力系统的运行及稳定带来了巨大的影响^[2-4]。

收稿日期:2023-10-13;修回日期:2024-05-10

基金项目:国家自然科学基金(52377111)

通信作者:徐波(1981—),男,博士,副教授,主要从事新能源并网分析与控制研究;E-mail: xubo@shiep.edu.cn

目前,新能源经变流器接入电力系统时,使用较多的是跟网型(grid-following, GFL)变流器,其可以通过控制注入电流实现快速功率输出,但在弱电网中,GFL变流器与电网实现同步所依赖的锁相环(phase locked loop, PLL)容易与其他控制环节发生耦合现象,影响系统的稳定性^[5-7],且无法提供电压、频率支撑^[8]。为了解决GFL变流器可能造成的低惯量问题,构网型(grid-forming, GFM)变流器应运而生^[9-11]。类似于同步发电机,在系统中出现扰动时,GFM变流器可以增加或减少其输出功率,以平衡负载并保持电压及频率的稳定^[12]。此外,GFM变流器还可以为负载及其他元件提供参考电压和频率,并为系统提供电压和频率支撑^[13],其控制策略包括下垂控制、虚拟同步发电机控制^[14]、匹配控制^[15]和虚拟振荡器控制等。

随着电力系统中变流器逐渐增多,系统的稳定性不再由同步发电机主导,GFL变流器、GFM变流器也会对系统的稳定性产生影响。对于变流器的小信号稳定性问题,部分学者已经进行了一些研究^[16],文献[17]对下垂控制的GFM变流器并入无穷大电力系统进行小信号建模,分析了变流器控制参数对系统小信号稳定性的影响。文献[18]利用状态空间模型法,详细建模了GFL变流器、GFM变流器的控制回路,并利用特征值轨迹确定了GFL变流器、GFM变流器的边界短路比。文献[19]建立了包含多台GFL变流器及多台GFM变流器的100%逆变器系统阻抗模型,分析控制参数变化对小信号稳定性的影响。文献[20]建立了由GFM变流器和GFL变流器组成的微电网,分析了变流器渗透率及系统参数对小信号稳定性的影响。

上述文献仅研究单一或2种变流器的小信号稳定性,没有涉及同步发电机。文献[21]建立了仅包含同步发电机及GFM变流器的系统模型,分析了GFM变流器接入后与同步发电机的耦合,以及对系统稳定性的影响。但对于同时包含同步发电机、GFM变流器以及GFL变流器这3种不同结构的电源构成的混合电力系统的小信号稳定性分析尚不多见。

因此,针对包含同步发电机、GFL变流器及GFM变流器的混合电力系统,本文首先进行详细的小信号建模,并利用特征值分析法分析了新能源渗透率、GFM变流器渗透率以及变流器控制参数对系统小信号稳定性的影响;然后,利用参与因子分析法,分析系统状态变量对各个特征值对应振荡模式的参与程度;最后,利用仿真验证理论分析的准确性。

1 主电路模型

1.1 主电路结构

本文研究的系统主电路拓扑图如图1所示,包含GFM变流器、GFL变流器以及同步发电机。其中,GFM变流器经滤波电路后连接至公共连接点(point of common coupling, PCC),GFL变流器通过PLL与系统保持同步,经滤波电路连接至PCC处,同步发电机经等效阻抗连接至PCC处,并入无穷大系统。

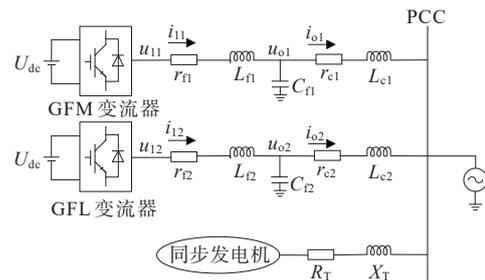


图1 主电路拓扑图

Figure 1 Topology of main circuit

图1中, U_{dc} 为GFM变流器、GFL变流器直流电源; L_{f1} 、 C_{f1} 分别为GFM变流器输出端口滤波器的滤波电容和滤波电感; L_{f2} 、 C_{f2} 分别为GFL变流器输出端口滤波器的滤波电容和滤波电感; r_{f1} 为GFM变流器滤波电感的寄生电阻; r_{f2} 为GFL变流器滤波电感的寄生电阻; r_{c1} 、 L_{c1} 分别为GFM变流器到PCC处线路的等效电阻和等效电感; r_{c2} 、 L_{c2} 分别为GFL变流器到PCC处线路的等效电阻和等效电感; R_{load} 为系统带的电阻负载; R_T 、 X_T 分别为同步发电机及线路等效电阻及电抗; u_{01} 为GFM变流器的端口电压; u_{02} 为GFL变流器的端口电压; i_{01} 为GFM变流器滤波器滤波电感电流; i_{02} 为GFL变流器滤波器滤波电感电流; u_{01} 、 i_{01} 分别为GFM变流器的输出电压和输出电流; u_{02} 、 i_{02} 分别为GFL变流器的输出电压和输出电流。

1.2 GFM变流器控制策略

GFM变流器采用虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制策略。VSG控制策略模拟了同步发电机的运行特性,包括有功功率-频率控制和无功功率-电压控制两部分^[22]。

有功功率-频率控制部分模拟的是同步发电机的转子运动方程和调速器,可以实现惯量特性和阻尼特性的模拟^[23]。无功功率-电压控制部分模拟的是同步发电机的励磁控制器,通过调节电压来控制VSG的无功功率输出。

有功功率-频率控制环节表达式为

$$\begin{cases} \frac{d\theta_1}{dt} = \omega_1 \\ J \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{P_{m1} - P_{e1}}{\omega_n} - D(\omega_n - \omega_1) \end{cases} \quad (1)$$

$$P_{m1} = P_{set} + K_f(\omega_n - \omega_1) \quad (2)$$

式(1)、(2)中, θ_1 为虚拟内电势相角; ω_n 、 ω_1 分别为额定角频率和虚拟转子角频率; J 为虚拟转动惯量; D 为阻尼系数; P_{m1} 、 P_{e1} 分别为虚拟机械功率和电磁功率; P_{set} 为VSG有功功率设定值; K_f 为有功功率-频率下垂系数。

无功功率-电压控制环节表达式为

$$\begin{cases} \frac{d\Delta U}{dt} = K [Q_{set} + K_v(U_n - U) - Q_{e1}] \\ E = \Delta U + U_n \end{cases} \quad (3)$$

式中, K 为积分系数; Q_{set} 为VSG无功功率设定值; K_v 为无功功率-电压下垂系数; U_n 、 U 分别为额定电压和电容电压; Q_{e1} 为无功功率输出值; E 为虚拟内电势; ΔU 为电压变化值。

1.3 GFL变流器控制策略

GFL变流器整体控制策略包括PLL环节、功率外环以及电流内环3个部分^[24]。PLL环节采用典型基于同步坐标系的PLL,通过跟踪并网点的相角实现与电网的同步^[25-27]。功率外环采用PQ控制。

PLL的表达式为

$$\begin{cases} \frac{d\theta_2}{dt} = \omega_2 \\ \omega_2 = K_{p,PLL} u_{oq2} + K_{i,PLL} \int u_{oq2} dt + \omega_n \end{cases} \quad (4)$$

式中, θ_2 为变流器电角度; ω_2 为变流器角频率; $K_{p,PLL}$ 、 $K_{i,PLL}$ 分别为PLL比例和积分环节系数; u_{oq2} 为GFL变流器输出电压 q 轴分量。

功率外环的表达式为

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = P_{ref} - P_{e2} \\ \frac{dx_2}{dt} = Q_{ref} - Q_{e2} \\ i_{dref} = (P_{ref} - P_{e2}) K_{pp} + x_1 K_{ip} \\ i_{qref} = (Q_{ref} - Q_{e2}) K_{pq} + x_2 K_{iq} \end{cases} \quad (5)$$

式中, x_1 、 x_2 为引入的中间状态变量; P_{ref} 、 P_{e2} 分别为有功功率参考值和实际值; Q_{ref} 、 Q_{e2} 分别为无功功率参考值和实际值; i_{dref} 、 i_{qref} 分别为功率外环输出电流的 d 轴和 q 轴分量; K_{pp} 、 K_{ip} 分别为有功环的比例和积分系数; K_{pq} 、 K_{iq} 分别为无功环的比例和积分系数。

1.4 同步发电机模型

对于同步发电机,本文考虑同步发电机励磁回路的影响,忽略阻尼绕组的影响,并假定励磁电压

恒定,采用3阶实用模型,此处不再详述。

2 系统小信号建模

2.1 GFM变流器小信号模型

根据GFM变流器整体控制策略可知,小信号模型包括功率计算模块、VSG外环控制、虚拟阻抗环节和内环控制4个部分。

1) 功率计算环节。

VSG输出的有功功率和无功功率可由输出电压、电流计算得出,线性化后如下:

$$\frac{\Delta P_{e1}}{dt} = -\omega_c \Delta P_{e1} + \frac{3}{2} \omega_c (\Delta u_{od1} I_{od1} + U_{od1} \Delta i_{od1} + \Delta u_{oq1} I_{oq1} + U_{oq1} \Delta i_{oq1}) \quad (6)$$

$$\frac{\Delta Q_{e1}}{dt} = -\omega_c \Delta Q_{e1} + \frac{3}{2} \omega_c (\Delta u_{oq1} I_{od1} + U_{oq1} \Delta i_{od1} - \Delta u_{od1} I_{oq1} - U_{od1} \Delta i_{oq1}) \quad (7)$$

式(6)、(7)中, Δ 为对应变量的小信号分量,后续不再赘述; ω_c 为滤波器截止频率; I_{od1} 、 U_{od1} 分别为输出电流、电压在 d 轴分量的稳态值; I_{oq1} 、 U_{oq1} 分别为输出电流、电压在 q 轴分量的稳态值; u_{od1} 、 u_{oq1} 分别为GFM变流器输出电压 d 、 q 轴分量。

2) VSG外环控制。

将VSG外环控制环节线性化可得:

$$\begin{cases} \frac{\Delta \theta_1}{dt} = \Delta \omega_1 \\ \frac{\Delta \omega_1}{dt} = \left(-\frac{K_f}{J\omega_n} - \frac{D}{J}\right) \Delta \omega_1 - \frac{1}{J\omega_n} \Delta P_{e1} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \Delta e_d = -K Q_{e1} \Delta Q_{e1} - K K_v U_{od1} \Delta u_{od1} - K K_v U_{oq1} \Delta u_{oq1} \\ \Delta e_q = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式(8)、(9)中, e_d 、 e_q 分别为由虚拟内电势相角和有效值得到的瞬时值在 d 、 q 轴的分量。

3) 虚拟阻抗环节。

虚拟阻抗控制可以使GFM变流器的输出特性更好地接近同步发电机定子特性,其线性化后表达式为

$$\begin{cases} \Delta u'_{od1} = \Delta e_d - r_v \Delta i_{od1} + L_v (I_{oq1} \Delta \omega_1 + \omega_0 \Delta i_{oq1}) \\ \Delta u'_{oq1} = \Delta e_q - r_v \Delta i_{oq1} - L_v (I_{od1} \Delta \omega_1 - \omega_0 \Delta i_{od1}) \end{cases} \quad (10)$$

式中, u'_{od1} 、 u'_{oq1} 分别为虚拟阻抗环节的输出电压在 d 、 q 轴的分量; r_v 、 L_v 分别为虚拟电阻和电感。

4) 内环控制环节。

为保证变流器输出电压、电流的稳定性和可靠性,内环控制环节采用典型的电压、电流双闭环控制方式。其中,电压环线性化后的表达式为

$$\begin{cases} \frac{\Delta\chi_d}{dt} = \Delta u'_{od1} - \Delta u_{od1} \\ \Delta i'_{ld1} = K_{pv} \frac{\Delta\chi_d}{dt} + K_{iv} \Delta\chi_d + \Delta i_{od1} - \omega_n C_{fl} \Delta u_{oq1} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \frac{\Delta\chi_q}{dt} = \Delta u'_{oq1} - \Delta u_{oq1} \\ \Delta i'_{lq1} = K_{pv} \frac{\Delta\chi_q}{dt} + K_{iv} \Delta\chi_q + \Delta i_{oq1} + \omega_n L_{fl} \Delta u_{od1} \end{cases} \quad (12)$$

式(11)、(12)中, χ_d 、 χ_q 分别为电压内环引入的中间状态变量在 d 、 q 轴的分量; i'_{ld1} 、 i'_{lq1} 分别为电压内环输出电流值在 d 、 q 轴的分量; K_{pv} 、 K_{iv} 分别为电压环的比例和积分系数。

电流环线性化后的表达式为

$$\begin{cases} \frac{\Delta\gamma_d}{dt} = \Delta i'_{ld1} - \Delta i_{ld1} \\ \Delta u'_{d1} = K_{pi} \frac{\Delta\gamma_d}{dt} + K_{ii} \Delta\gamma_d + \Delta u_{od1} - \omega_n C_{fl} \Delta i_{lq1} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \frac{\Delta\gamma_q}{dt} = \Delta i'_{lq1} - \Delta i_{lq1} \\ \Delta u'_{q1} = K_{pi} \frac{\Delta\gamma_q}{dt} + K_{ii} \Delta\gamma_q + \Delta u_{oq1} + \omega_n L_{fl} \Delta i_{ld1} \end{cases} \quad (14)$$

式(13)、(14)中, γ_d 、 γ_q 分别为电流内环引入的中间状态变量在 d 、 q 轴的分量; u'_{d1} 、 u'_{q1} 分别为电流内环输出电压值在 d 、 q 轴的分量; K_{pi} 、 K_{ii} 分别为电流环的比例和积分系数。

2.2 GFL变流器小信号模型

根据GFL变流器整体控制策略,小信号模型包括PLL、功率外环和电流内环这3个部分。

对于PLL,将式(4)线性化后可以得到:

$$\begin{cases} \frac{\Delta\theta_2}{dt} = \Delta\omega_2 \\ \frac{\Delta\omega_2}{dt} = K_{p,PLL} \frac{\Delta u_{oq2}}{dt} + K_{i,PLL} \Delta u_{oq2} \end{cases} \quad (15)$$

对于功率外环,将式(5)线性化后可以得到:

$$\begin{cases} \frac{\Delta x_1}{dt} = -P_{e2} \\ \frac{\Delta x_2}{dt} = -Q_{e2} \\ \Delta i_{dref} = -K_{pp} P_{e2} + K_{ip} \Delta x_1 \\ \Delta i_{qref} = -K_{pq} Q_{e2} + K_{iq} \Delta x_2 \end{cases} \quad (16)$$

电流内环控制线性化后的表达式为

$$\begin{cases} \frac{\Delta x_3}{dt} = \Delta i_{dref} - \Delta i_{od2} \\ \frac{\Delta x_4}{dt} = \Delta i_{qref} - \Delta i_{oq2} \\ \Delta u'_{d2} = K_{p1} (\Delta i_{dref} - \Delta i_{od2}) + K_{i1} \Delta x_3 - \omega_n L_{f2} \Delta i_{oq2} + \Delta u_{od2} \\ \Delta u'_{q2} = K_{p2} (\Delta i_{qref} - \Delta i_{oq2}) + K_{i2} \Delta x_4 + \omega_n L_{f2} \Delta i_{od2} + \Delta u_{oq2} \end{cases} \quad (17)$$

式(15)~(17)中, x_3 、 x_4 为电流内环的中间状态变量; K_{p1} 、 K_{i1} 分别为电流内环 d 轴的比例和积分系数; K_{p2} 、 K_{i2} 分别为电流内环 q 轴的比例和积分系数; u'_{d2} 、 u'_{q2} 为电流内环输出值; i_{od2} 、 i_{oq2} 分别为GFL变流器输出电流 d 、 q 轴分量; u_{od2} 为GF2变流器输出电压 d 轴分量。

2.3 同步发电机小信号模型

将同步发电机模型线性化可得到:

$$\begin{cases} \frac{\Delta\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H} (\Delta T_m - \Delta T_e - \Delta\omega_r) \\ \frac{\Delta\delta_r}{dt} = \omega_0 \Delta\omega_r \\ \frac{\Delta\psi_{fd}}{dt} = \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}} \Delta E_{fd} - \omega_0 R_{fd} \Delta i_{fd} \end{cases} \quad (18)$$

式中, ω_r 为角速度偏差; H 为惯性常数; T_m 、 T_e 分别为同步发电机的机械转矩、加速转矩; δ_r 为转子角; ψ_{fd} 为磁场绕组磁链; R_{fd} 为转子电路电阻; L_{adu} 为定子与转子之间的不饱和互感; E_{fd} 为励磁机的输出电压; i_{fd} 为磁场绕组电流。

由此可得同步发电机的小信号模型为

$$\frac{d\mathbf{x}_{SG}}{dt} = \mathbf{A}_{SG} \mathbf{x}_{SG} \quad (19)$$

式中, \mathbf{A}_{SG} 为同步发电机的状态矩阵,该小信号模型有3个状态变量,包括 $\Delta\omega_r$ 、 $\Delta\delta_r$ 、 $\Delta\psi_{fd}$ 。

2.4 线路及滤波器小信号模型

GFM变流器的线路和滤波器模型的线性化表达式为

$$\begin{cases} \frac{d\Delta i_{ld1}}{dt} = -\frac{r_{fl}}{L_{fl}} \Delta i_{ld1} + \omega_0 \Delta i_{lq1} + I_{lq1} \Delta\omega_1 + \frac{1}{L_{fl}} (\Delta u_{ld1} - \Delta u_{od1}) \\ \frac{d\Delta i_{lq1}}{dt} = -\frac{r_{fl}}{L_{fl}} \Delta i_{lq1} - \omega_0 \Delta i_{ld1} - I_{ld1} \Delta\omega_1 + \frac{1}{L_{fl}} (\Delta u_{lq1} - \Delta u_{oq1}) \\ \frac{d\Delta u_{od1}}{dt} = \omega_0 \Delta u_{oq1} + U_{oq1} \Delta\omega_1 + \frac{1}{C_{fl}} (\Delta i_{ld1} - \Delta i_{od1}) \\ \frac{d\Delta u_{oq1}}{dt} = -\omega_0 \Delta u_{od1} - U_{od1} \Delta\omega_1 + \frac{1}{C_{fl}} (\Delta i_{lq1} - \Delta i_{oq1}) \\ \frac{d\Delta i_{od1}}{dt} = -\frac{r_{c1}}{L_{c1}} \Delta i_{od1} + \omega_0 \Delta i_{oq1} + I_{oq1} \Delta\omega_1 + \frac{1}{L_{c1}} (\Delta u_{od1} - \Delta u_{gd}) \\ \frac{d\Delta i_{oq1}}{dt} = -\frac{r_{c1}}{L_{c1}} \Delta i_{oq1} - \omega_0 \Delta i_{od1} - I_{od1} \Delta\omega_1 + \frac{1}{L_{c1}} (\Delta u_{oq1} - \Delta u_{gq}) \end{cases} \quad (20)$$

式中, u_g 为PCC处电压。GFL变流器的线路及滤波

器模型的线性化表达式同理。

2.5 坐标变换

变流器小信号模型均处于各自的坐标系下,当组成一个系统时,需要将变流器坐标系转换到公共旋转坐标系下。

变流器坐标系与公共旋转坐标系之间的相角差为

$$\delta = \int (\omega_{1,2} - \omega_{\text{com}}) dt \quad (21)$$

式中, δ 为相角差; ω_{com} 为公共旋转坐标系的角频率; $\omega_{1,2}$ 表示 ω_1 或 ω_2 。线性化后可得:

$$\frac{\Delta\delta}{dt} = \Delta\omega_{1,2} - \Delta\omega_{\text{com}} \quad (22)$$

变流器接入PCC处的电压在公共旋转坐标系下为 u_{gD} 、 u_{gQ} ,转换到变流器各自的坐标系中为 u_{gd} 、 u_{gq} :

$$\begin{bmatrix} u_{gd} \\ u_{gq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & \sin\delta \\ -\sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{gD} \\ u_{gQ} \end{bmatrix} \quad (23)$$

线性化之后可得到:

$$\begin{bmatrix} \Delta u_{gd} \\ \Delta u_{gq} \end{bmatrix} = D\Delta\delta + \begin{bmatrix} \cos\delta & \sin\delta \\ -\sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{gD} \\ \Delta u_{gQ} \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中,

$$D = \begin{bmatrix} -U_{gD} \sin\delta + U_{gQ} \cos\delta \\ -U_{gD} \cos\delta - U_{gQ} \sin\delta \end{bmatrix}$$

2.6 混合系统小信号模型

由式(6)~(14)、(20)可得出GFM变流器的小信号模型为

$$\frac{\Delta x_{\text{GFM}}}{dt} = A_{\text{GFM}} \Delta x_{\text{GFM}} \quad (25)$$

式中, A_{GFM} 为GFM变流器的状态矩阵。该小信号模型有14个状态变量, $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\omega_1$ 、 ΔP_{e1} 、 ΔQ_{e1} 、 $\Delta\chi_d$ 、 $\Delta\chi_q$ 、 $\Delta\gamma_d$ 、 $\Delta\gamma_q$ 、 Δi_{d1} 、 Δi_{q1} 、 Δu_{od1} 、 Δu_{oq1} 、 Δi_{od1} 和 Δi_{oq1} 。

由式(15)~(17)、(20)可得出GFL变流器的小信号模型为

$$\frac{\Delta x_{\text{GFL}}}{dt} = A_{\text{GFL}} \Delta x_{\text{GFL}} \quad (26)$$

式中, A_{GFL} 为GFL变流器的状态矩阵。该小信号模型有11个状态变量,包括 $\Delta\omega_2$ 、 Δx_1 、 Δx_2 、 Δx_3 、 Δx_4 、 Δi_{d2} 、 Δi_{q2} 、 Δu_{od2} 、 Δu_{oq2} 、 Δi_{od2} 和 Δi_{oq2} 。

至此,由式(19)、(25)、(26)即可得出系统完整的小信号模型为

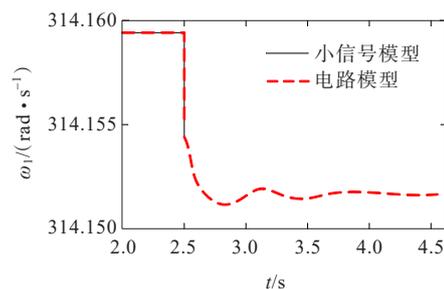
$$\frac{\Delta x}{dt} = A\Delta x \quad (27)$$

式中, $A = \text{diag}[A_{\text{GFM}} \ A_{\text{GFL}} \ A_{\text{SG}}]$ 为该系统完整的状态矩阵,该小信号模型共有28个状态变量。

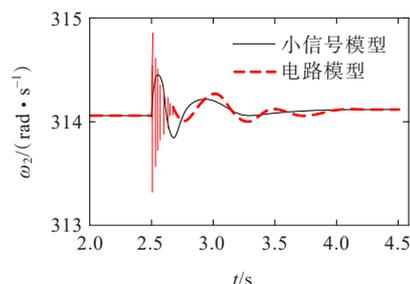
根据这28个状态变量所对应的状态矩阵 A ,即可对系统的小信号稳定性进行分析。

2.7 小信号模型验证

为了验证所建立的小信号模型的正确性,在MATLAB/Simulink中分别搭建实际电路模型以及小信号模型,在2.5s时同时给2个模型加入相同的阶跃功率扰动,GFM变流器2个模型的角频率 ω_1 曲线如图2(a)所示,GFL变流器2个模型的角频率 ω_2 曲线如图2(b)所示,同步发电机采用现有小信号模型,因此无须验证其正确性。从图2中可以看出,所建立的2个变流器小信号模型的角频率曲线与实际电路仿真曲线基本一致,表明了所建立小信号模型的正确性。



(a) GFM变流器 ω_1



(b) GFL变流器 ω_2

图2 阶跃功率扰动下变流器响应

Figure 2 Response of converter under step power disturbance

综上,GFM变流器及GFL变流器与同步发电机构成的混合电力系统小信号建模完成。

3 系统小信号稳定性分析

3.1 稳定性分析方法

采用特征值分析法以及参与因子分析法,分析系统各个状态变量对特征值对应振荡模式的参与程度。

首先求出状态矩阵 A 的左右特征值及特征向量,然后根据特征向量求出参与矩阵 P :

$$\begin{cases} A\varphi_i = \lambda_{ir}\varphi_i, i = 1, 2, \dots, n \\ \psi_i A = \lambda_{il}\psi_i \end{cases} \quad (28)$$

式中, λ_{ir} 、 λ_{il} 分别为状态矩阵 A 的右、左特征值; $\varphi_i = [\varphi_{1i}, \varphi_{2i}, \dots, \varphi_{ni}]$ 和 $\psi_i = [\psi_{1i}, \psi_{2i}, \dots, \psi_{ni}]^T$ 分别为右、左特征向量, 参与矩阵为

$$P = [P_1 \quad P_2 \quad \dots \quad P_n]$$

其中,

$$P_i = [P_{1i} \quad P_{2i} \quad \dots \quad P_{ki} \quad \dots \quad P_{ni}]^T = [\varphi_{1i}\psi_{i1} \quad \varphi_{2i}\psi_{i2} \quad \dots \quad \varphi_{ki}\psi_{ik} \quad \dots \quad \varphi_{ni}\psi_{in}]^T$$

P_{ki} 为参与因子, 表示在第 i 个特征值对应振荡模式下第 k 个状态变量的参与程度, $i=1, 2, \dots, n$ 。

3.2 新能源渗透率对系统稳定性的影响

设定系统总功率输出不变, 新能源渗透率改变时, 同步发电机的占比改变导致可以提供给系统的

频率和惯量支撑发生改变, 进而影响系统的小信号稳定性。通过改变同步发电机输出的功率可改变其在系统中的占比, GFM变流器、GFL变流器输出的有功功率与系统总输出功率的比值为GFM变流器、GFL变流器的渗透率, 通过改变GFM变流器、GFL变流器的功率设定值可控制其渗透率。为了在新能源渗透率变化的过程中控制GFM变流器、GFL变流器的不同并网特性对系统小信号稳定性的影响, 设定2种变流器的渗透率相同。

根据表1中的系统参数, 可知初始状态下同步发电机的占比为50%, GFM变流器和GFL变流器渗透率均为25%。根据状态矩阵 A 求取系统特征值, 同时计算参与矩阵, 可得各个特征值对应的振荡频率和阻尼比, 以及主要的参与状态变量。

表1 系统参数

Table 1 System parameters

$r_{\pi 1}, r_{\pi 2}/$ Ω	$r_{c1}, r_{c2}/$ Ω	$r_v/$ Ω	$L_{\pi 1}, L_{\pi 2}/$ mH	$L_{c1}, L_{c2}/$ mH	$L_v/$ mH	$C_{\pi 1}, C_{\pi 2}/$ μF	$\Omega_n/$ (rad · s ⁻¹)	$J/$ (kg · m ²)	$D/$ s · rad ⁻¹)	K_f	K_v	K	K_{vp}	K_{vi}	K_{ip}	K_{ii}
0.1	0.3	0	2	0.2	2	30	100 π	0.1	0.01	792	160	0.05	3	200	5	1 000
$K_{p, PLL}$	$K_{i, PLL}$	K_{pp}	K_{pq1}	K_{ip}	K_{iq}	K_{p1}	K_{p2}	K_{i1}	K_{i2}	$P_{set1}/$ MW	$P_{set2}/$ MW	$P_{SG}/$ MW	$L_{adu}/$ p.u.	$R_{fd}/$ p.u.	$H/$ p.u.	
100	500	0.5	0.5	50	50	2	2	100	100	250	250	500	1.6	0.000 6	3.5	

由求出的特征值及其对应的状态变量可以看出, 系统状态矩阵的28个特征值均具有负实部, 位于复平面左半平面, 因此系统在出现小扰动时可以保持稳定, 处于逐渐稳定状态。

除了实数特征值之外, 根据复数特征值所对应的振荡频率高低, 可以将其划分为高频振荡特征值 $\lambda_8, \lambda_9, \lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{15}, \lambda_{16}$, 中高频振荡特征值 λ_6, λ_7 , 以及低频振荡特征值 $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_{22}, \lambda_{23}, \lambda_{24}, \lambda_{25}, \lambda_{26}, \lambda_{27}$ 。进一步, 根据特征值对应的参与因子可知:

1) 高频振荡特征值 $\lambda_8, \lambda_9, \lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{15}, \lambda_{16}$ 的主要相关状态变量表明, 高频振荡模态主要与系统中GFM变流器、GFL变流器的外环控制参数, GFM变流器的虚拟阻抗参数及内环电压电流控制参数有关;

2) 中高频振荡特征值 λ_6, λ_7 的主要相关状态变量有 $\Delta P_{e1}, \Delta i_{d1}, \Delta i_{q1}$, 说明中高频振荡模态与GFM变流器功率输出, 即电压电流稳态输出值、GFM功率外环控制参数以及滤波器参数有关;

3) 低频振荡特征值可分为2类, 其中 $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_{22}, \lambda_{23}, \lambda_{24}, \lambda_{25}$ 主要与2个变流器的线路及变流器参数有关, $\lambda_{26}, \lambda_{27}$ 则主要与同步发电机的参数有关。

为了研究新能源渗透率改变对系统小信号稳定性的影响, 改变同步发电机的输出功率以及2个变流器的功率设定值, 将新能源渗透率从50%增加到90%, 在此过程中, GFM变流器和GFL变流器的渗透率保持相同。选择高频振荡模态的3组特征值进行分析, 特征值 λ_8, λ_9 和 $\lambda_{11}, \lambda_{12}$ 的变化轨迹如图3所示, 特征值 $\lambda_{15}, \lambda_{16}$ 的变化轨迹及其参与因子轨迹如图4所示。特征值轨迹图中带箭头的曲线由特征值分布粗略拟合得到, 顺箭头方向表示新能源渗透率增大。

随着新能源渗透率增大, 从 λ_8, λ_9 以及 $\lambda_{11}, \lambda_{12}$ 的轨迹可知, 特征值实部逐渐增大, 虚部绝对值减小, 在复平面向右移动, 逐渐靠近虚轴但并未越过。图4展示了新能源渗透率变化时特征值和参与因子轨迹。由图4(a)可以看出, 在新能源渗透率从70%增加到80%的过程中, $\lambda_{15}, \lambda_{16}$ 突破虚轴到达复平面的右半平面, 这表明随着新能源渗透率的增加, 系统的小信号稳定性逐渐降低, 系统从稳定状态转变为不稳定状态的新能源渗透率变化范围为70%~80%。

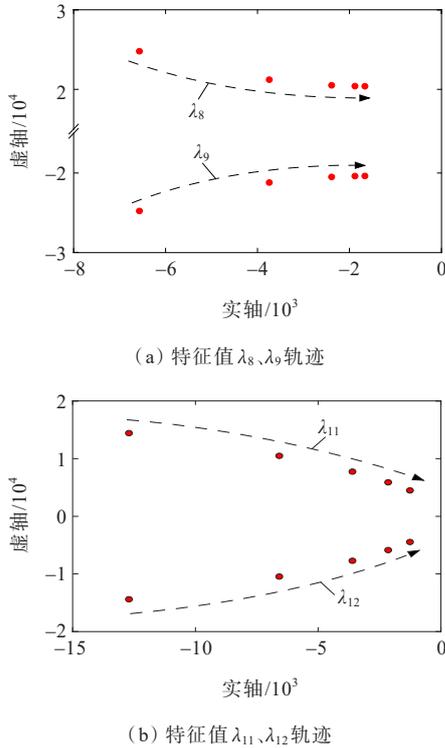


图 3 新能源渗透率变化时特征值 $\lambda_8, \lambda_9, \lambda_{11}, \lambda_{12}$ 变化轨迹
 Figure 3 Variation of eigenvalues $\lambda_8, \lambda_9, \lambda_{11}, \lambda_{12}$ with penetration rate of new energy

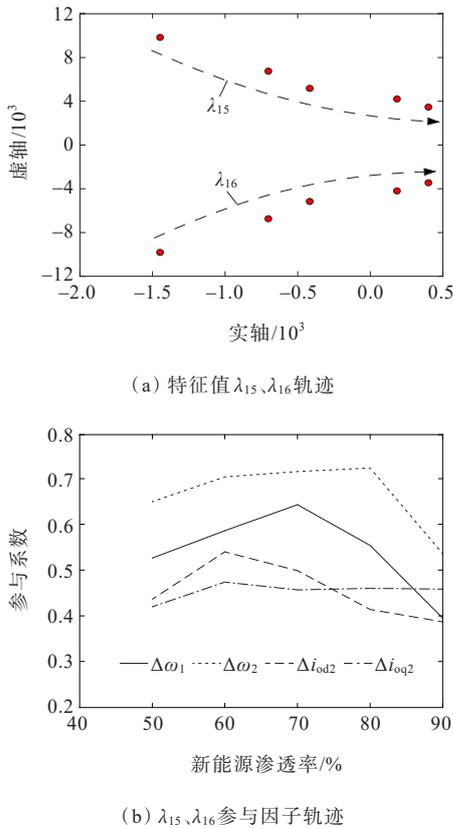


图 4 新能源渗透率变化时特征值和参与因子轨迹
 Figure 4 Variation of eigenvalue and participation factor with penetration rate of new energy

进一步,对 $\lambda_{15}, \lambda_{16}$ 的参与因子矩阵进行分析,在 $\lambda_{15}, \lambda_{16}$ 逐渐右移并跨越虚轴的过程中,参与因子较大的主导状态变量是 GFM 变流器的 $\Delta\omega_1$, GFL 变流器的 $\Delta\omega_2, \Delta i_{od2}, \Delta i_{oq2}$, 其参与因子变化轨迹如图 4(b) 所示。随着同步发电机占比的降低,2 种变流器渗透率增加,由 GFM 变流器外环控制参数,包括虚拟转动惯量 J 、阻尼系数 D 和有功功率-频率下垂系数 K_f 主导的状态变量 $\Delta\omega_1$, 以及由 GFL 变流器的 PLL 参数 $K_{p,PLL}, K_{i,PLL}$ 主导的状态变量 $\Delta\omega_2$ 的参与系数逐渐增大。这表明,系统失稳主要与 2 个原因有关:一方面, GFM 变流器所提供的频率和惯量支撑无法弥补同步发电机减少所带来的空缺,导致系统失稳;另一方面,与 GFL 变流器的 PLL 有关,在系统整体频率和惯量支撑减少的情况下, PLL 的动态特性会削弱系统的稳定裕度,造成失稳。

因此,为了保持系统小信号稳定性,可以考虑保留适当比例的同步发电机,为系统提供稳定的频率和惯量支撑,在未来同步发电机占比逐渐降低的必然趋势下,需要对 GFM 变流器的功率外环参数进行优化,使其有足够的能力为电网提供必要的支撑。此外,对 GFL 变流器的 PLL 参数进行优化也是提高小信号稳定性的思路之一。

3.3 GFM 变流器渗透率对系统稳定性的影响

GFM 变流器作为可以为系统提供频率和惯量支撑的元件之一,其渗透率同样会影响系统的小信号稳定性。新能源渗透率达到 90% 时,系统在小扰动下会失稳,本节将在此基础上,将同步发电机占比固定为 10%,使 GFM 变流器的渗透率从 50% 增加至 60%、70%、80% 和 90%,以此来研究混合电力系统中 GFM 变流器渗透率和 GFL 变流器渗透率的改变对系统新能源渗透率及系统小信号稳定性的影响。

计算特征值、特征向量以及参与矩阵后,本文选取 λ_8, λ_9 和 $\lambda_{15}, \lambda_{16}$ 2 组特征值轨迹进行分析。特征值 λ_8, λ_9 轨迹如图 5 所示, $\lambda_{15}, \lambda_{16}$ 特征值轨迹以及参与因子轨迹如图 6 所示,顺着箭头方向 GFM 变流器渗透率增大。

随着 GFM 变流器渗透率的增大,由图 5 可知, λ_8, λ_9 始终位于复平面左半平面,实部逐渐减小,特征值向左移动,远离虚轴,表明系统小信号稳定性在逐渐增强。而 $\lambda_{15}, \lambda_{16}$ 则不同,从图 6(a) 可以看出,在 GFM 变流器渗透率从 60% 增加为 70% 的过程中,特征值从复平面右半平面越过虚轴,向左半平面移动,且 GFM 渗透率越高,特征值在复平面越向左移动,表明系统由不稳定状态转为稳定状态,并趋向更稳定的状态。

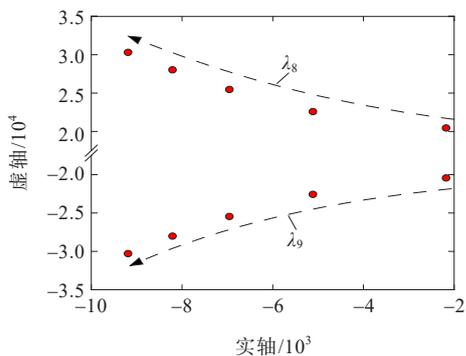
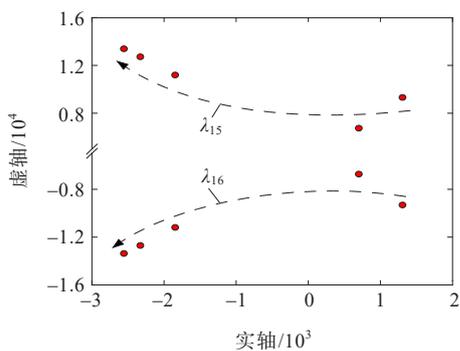
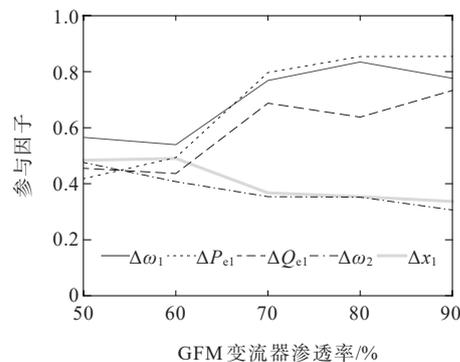


图5 GFM变流器渗透率变化时特征值 λ_8 、 λ_9 变化轨迹

Figure 5 Variation of eigenvalue λ_8 、 λ_9 with penetration rate of GFM converter



(a) 特征值 λ_{15} 、 λ_{16} 轨迹



(b) λ_{15} 、 λ_{16} 参与因子轨迹

图6 GFM变流器渗透率变化时特征值和参与因子轨迹

Figure 6 Variation of eigenvalue and participation factor with penetration rate of GFM converter

进一步,为确定在系统由不稳定逐渐趋向稳定过程中起到主导作用的状态变量,对 λ_{15} 、 λ_{16} 的参与矩阵进行分析,其主导的状态变量为GFM变流器的功率外环产生的状态变量 $\Delta\omega_1$ 、 ΔP_{e1} 、 ΔQ_{e1} ,GFL变流器PLL产生的状态变量 $\Delta\omega_2$ 以及功率外环产生的状态变量 Δx_1 ,其参与因子轨迹如图6(b)所示。在GFM变流器渗透率超过60%后, λ_{15} 、 λ_{16} 的主导状态变量中 $\Delta\omega_1$ 、 ΔP_{e1} 、 ΔQ_{e1} 的参与因子增大,且增大程度较大, $\Delta\omega_2$ 和 Δx_1 的参与因子逐渐减小。GFM变流器渗透率增大,系统稳定性增强的过程主要与

功率外环产生的状态变量相关,GFM变流器外环控制参数包括虚拟转动惯量 J 、阻尼系数 D 和有功功率-频率下垂系数 K_I 。外环控制模拟同步发电机转子特性,GFM变流器渗透率增加,实际是变流器功率参考值增大时,可以为系统提供频率和惯量支撑增加,进而可以提高系统稳定性。此外,虚拟阻抗控制模拟同步发电机定子特性,可以调节变流器的输出阻抗,增强系统抗干扰能力,在系统稳定性增强的过程中也起到一定作用。

因此,在系统中同步发电机占比逐渐降低的必然趋势下,在GFM变流器渗透率增加的同时,GFL变流器渗透率减少,不仅可以使系统在同步发电机占比更低的情况下维持稳定状态,还可以在一定程度上提高系统可容纳的新能源渗透率,增强系统的小信号稳定性。

3.4 虚拟转动惯量对系统稳定性的影响

在GFM变流器渗透率为80%的场景下,将GFM变流器外环功率控制中的虚拟转动惯量 J 从初始值 0.1 kg/m^2 增大至 1 kg/m^2 ,其中一对复数特征值 λ_{15} 、 λ_{16} 的轨迹如图7所示,顺箭头方向虚拟转动惯量增大。从图7中可知,在 J 逐渐增大的过程中, λ_{15} 、 λ_{16} 的实部逐渐增大,虚部绝对值逐渐减小,表明特征值对应的振荡频率降低,阻尼比减小,系统小信号稳定性降低,且 J 增大到一定程度之后, λ_{15} 、 λ_{16} 越过虚轴进入复平面右半平面,系统小信号失稳。由此可见,虽然为了增强GFM变流器的频率和惯量支撑能力,可以适当增大 J 的取值,但是 J 的取值过大会造成系统小信号失稳,因此参数 J 的选择和优化需要综合系统情况进行考虑。

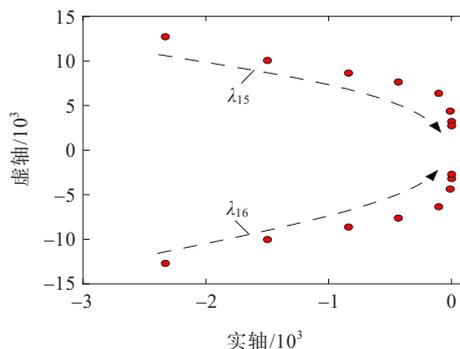


图7 虚拟转动惯量变化时特征值 λ_{15} 、 λ_{16} 变化轨迹

Figure 7 Variation of eigenvalue λ_{15} 、 λ_{16} with virtual moment of inertia

3.5 虚拟阻抗对系统稳定性的影响

在GFM变流器渗透率为80%的场景下,将虚拟阻抗从原始设定值逐渐增大为原来的50倍,2对

特征值 λ_2 、 λ_3 和 λ_4 、 λ_5 的轨迹如图 8 所示,顺箭头方向虚拟阻抗增大。随着虚拟阻抗的增大, λ_2 、 λ_3 实部逐渐增大,虚部的绝对值减小,表明对应的振荡频率减小,当虚拟阻抗增大到一定程度后, λ_2 、 λ_3 越过虚轴进入复平面的右半平面。而 λ_4 、 λ_5 则不同,始终在复平面左半平面,其实部逐渐减小,虚部绝对值增大,表明对应的振荡频率增大。由此可见,虚拟阻抗的变化对于系统特征值影响较复杂,参数的整定需要依据特征值变化情况进行。

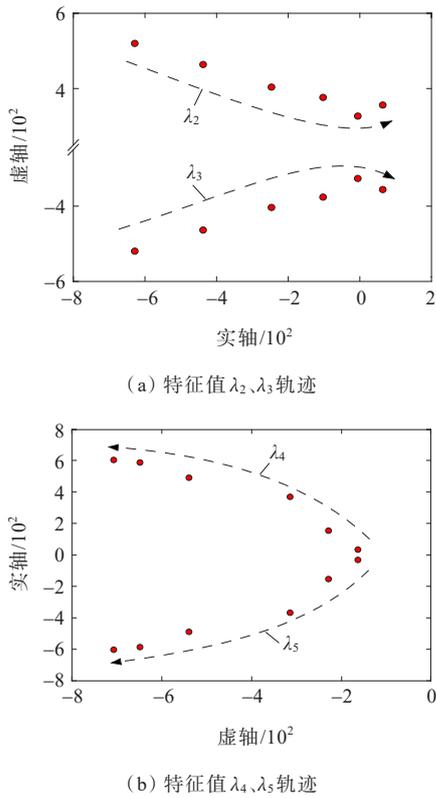


图 8 虚拟阻抗变化时特征值 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 、 λ_5 轨迹
 Figure 8 Variation of eigenvalue λ_2 、 λ_3 、 λ_4 、 λ_5 with virtual impedance

4 仿真验证

为了对理论分析的正确性进行验证,本文利用 MATLAB/Simulink 平台进行仿真,按照研究的系统结构,搭建仿真电路。为验证新能源渗透率改变对系统小信号稳定性的影响,0.20 s 时新能源的渗透率由 76% 增加为 77%,0.25 s 时增加为 78%,系统频率的仿真结果如图 9 所示。由图 9 可知,系统频率在 0.25 s 之前处于稳定状态,保持在 50.0 Hz,0.25 s 后频率出现振荡,系统失稳。

图 10 展示了 GFM 变流器渗透率增加对系统频率的影响。GFM 变流器渗透率为 63% 时,系统频

率的仿真图如图 10(a) 所示,GFM 变流器渗透率增加为 64% 后,系统频率的仿真图如图 10(b) 所示,可以看出系统频率在 GFM 变流器渗透率为 63% 时处于振荡状态,当渗透率增加到 64% 后,系统频率经小幅度波动后趋于 50 Hz,系统达到稳定状态,验证了前文中理论分析的可靠性。

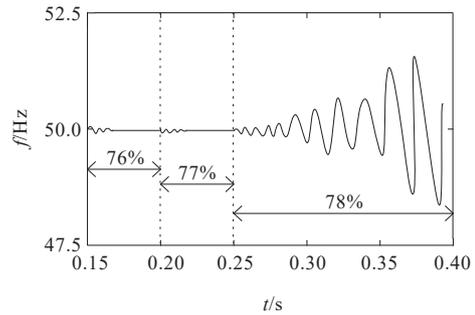
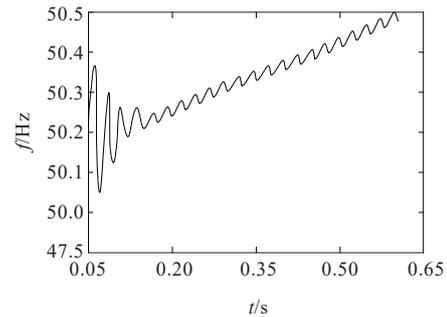
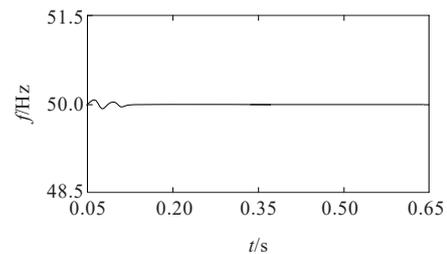


图 9 新能源渗透率对系统频率的影响
 Figure 9 Influence of penetration rate of new energy on system frequency



(a) GFM 变流器渗透率为 63%



(b) GFM 变流器渗透率为 64%

图 10 GFM 变流器渗透率对系统频率的影响
 Figure 10 Influence of penetration rate of GFM converter on system frequency

最后,为了验证虚拟转动惯量变化对系统小信号稳定性的影响,对采用不同虚拟转动惯量的系统进行仿真,系统频率仿真结果如图 11 所示,由图 11 可知,适当增大虚拟转动惯量可以减少系统频率的振荡,有利于系统频率稳定,但虚拟转动惯量太大,反而会使得系统失稳,与理论分析结果一致。

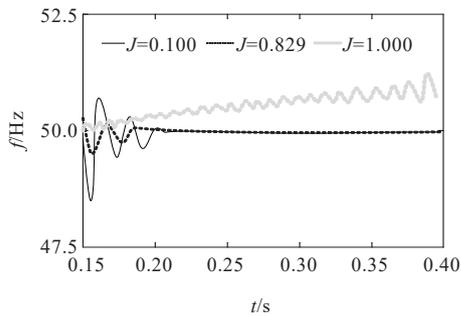


图 11 虚拟转动惯量对系统频率的影响

Figure 11 Influence of virtual moment of inertia on system frequency

5 结语

本文针对包含同步发电机、GFM变流器和GFL变流器的系统,进行了详细的小信号模型建模,利用特征值分析法和参与因子分析法,研究了新能源渗透率、GFM变流器渗透率、虚拟转动惯量以及虚拟阻抗变化对系统小信号稳定性的影响。主要结论如下:

1) 大规模新能源接入导致同步发电机占比降低,不利于系统的小信号稳定。系统中可以保留适当比例的同步发电机,并通过优化GFM变流器参数,保证系统的频率和惯量支撑能力;

2) 在同步发电机占比较低时,GFM变流器渗透率增大可以在一定程度上提高系统的新能源渗透率以及小信号稳定性;

3) GFM变流器功率外环控制参数中的虚拟转动惯量 J 适当增大虽然可以提高变流器的频率和惯量支撑能力,但 J 太大可能会导致系统失稳,需要进行合理地整定;

4) GFM变流器虚拟阻抗的变化会对系统不同的特征值产生不同的影响,其取值需要综合系统情况进行整定。

本文研究的系统中,仅包含了一台同步发电机、一台GFM变流器以及一台GFL变流器,对于包含多台同步发电机及多台变流器系统的小信号稳定性还有待研究。除此之外,本文中同步发电机模型采用的是3阶实用模型,为了使系统小信号模型更加准确,可以采用更高阶的同步机模型。

参考文献:

[1] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9):171-191.
ZHUO Zhenyu,ZHANG Ning,XIE Xiaorong,et al. Key

technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J].Automation of Electric Power Systems,2021,45(9):171-191.

- [2] 张子扬,张宁,杜尔顺,等.双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施[J].中国电机工程学报,2022,42(1):1-25.
ZHANG Ziyang,ZHANG Ning,DU Ershun,et al. Review and countermeasures on frequency security issues of power systems with high shares of renewables and power electronics[J].Proceedings of the CSEE,2022,42(1):1-25.
- [3] 谢小荣,贺静波,毛航银,等.“双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J].中国电机工程学报,2021,41(2):461-475.
XIE Xiaorong,HE Jingbo,MAO Hangyin,et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(2):461-475.
- [4] 江友华,刘弘毅,叶尚兴,等.考虑电压质量及灵活性的高比例新能源配电网储能-无功优化配置[J].电力建设,2023,44(9):68-79.
JIANG Youhua,LIU Hongyi,YE Shangxing,et al. Energy-storage and reactive-power optimization of a high-proportional new energy distribution network considering voltage quality and flexibility[J]. Electric Power Construction,2023,44(9):68-79.
- [5] LASSETER R H,CHEN Z,PATTABIRAMAN D. Grid-forming inverters: a critical asset for the power grid[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2020,8(2):925-935.
- [6] HUANG Y H,YUAN X M,HU J B,et al. Modeling of VSC connected to weak grid for stability analysis of DC-link voltage control[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2015,3(4):1193-1204.
- [7] 赵玉静,牟倩颖,宾子君,等.考虑直流侧动态的跟网型变换器稳定性分析[J].电力工程技术,2024,43(3):12-22.
ZHAO Yujing,MOU Qianying,BIN Zijun,et al. Stability analysis of grid-following converter considering DC side dynamics[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024,43(3):12-22.
- [8] HU Q,FU L J,MA F,et al. Analogized synchronous-generator model of PLL-based VSC and transient synchronizing stability of converter dominated power system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021,12(2):1174-1185.
- [9] ROSSO R,WANG X F,LISERRE M,et al. Grid-forming converters: an overview of control approaches and future trends[C]//2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).Detroit,MI,USA.IEEE,2020:4292-4299.
- [10] 马秀达,卢宇,田杰,等.柔性直流输电系统的构网型控制关键技术与挑战[J].电力系统自动化,2023,47(3):1-11.
MA Xiuda,LU Yu,TIAN Jie,et al. Key technologies and challenges of grid-forming control for flexible DC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(3):1-11.

- [11] 罗澍忻,韩应生,余浩,等. 构网型控制在提升高比例新能源并网系统振荡稳定性中的应用[J]. 南方电网技术, 2023,17(5):39-48.
LUO Shuxin, HAN Yingsheng, YU Hao, et al. Application of grid-forming control in improving the oscillation stability of power systems with high proportion renewable energy integration[J]. Southern Power System Technology, 2023,17(5):39-48.
- [12] 王新宝,葛景,韩连山,等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023,51(5):172-179.
WANG Xinbao, GE Jing, HAN Lianshan, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system[J]. Power System Protection and Control, 2023,51(5):172-179.
- [13] 李建林,丁子洋,游洪灏,等. 构网型储能支撑新型电力系统稳定运行研究[J]. 高压电器, 2023,59(7):1-11.
LI Jianlin, DING Ziyang, YOU Honghao, et al. Research on stable operation of new power system supported by grid-forming energy storage system[J]. High Voltage Apparatus, 2023,59(7):1-11.
- [14] 王立娜,王逸超,谭丽平等. 基于自适应指数函数的变参数VSG控制[J]. 电力科学与技术学报, 2023,38(3):124-131.
WANG Lina, WANG Yichao, TAN Liping, et al. Variable parameter VSG control based on adaptive exponential function[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023,38(3):124-131.
- [15] 高本锋,邓鹏程,孙大卫,等. 基于匹配控制的构网型直驱风电场次同步振荡机理与特性研究[J]. 电工技术学报, 2024,39(9):2755-2770.
GAO Benfeng, DENG Pengcheng, SUN Dawei, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation of grid-forming direct-drive wind farm based on matching control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024,39(9):2755-2770.
- [16] 詹长江,吴恒,王雄飞,等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023,43(6):2339-2359.
ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2023,43(6):2339-2359.
- [17] BRYANT J S, MCGRATH B, MEEGAHAPOLA L, et al. Small-signal modeling and stability analysis of a droop-controlled grid-forming inverter[C]//2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Denver, CO, USA, IEEE, 2022:1-5.
- [18] GAO X, ZHOU D, ANVARI-MOGHADDAM A, et al. Stability analysis of grid-following and grid-forming converters based on state-space model[C]//2022 International Power Electronics Conference (IPEC-Himeji 2022- ECCE Asia). Himeji, Japan, IEEE, 2022:422-428.
- [19] YANG Z Q, ZHAN M, LIU D, et al. Small-signal synchronous stability of a new-generation power system with 100% renewable energy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023,38(5):4269-4280.
- [20] 李翼翔,田震,唐英杰,等. 考虑构网型与跟网型逆变器交互的孤岛微电网小信号稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2022,42(8):11-18.
LI Yixiang, TIAN Zhen, TANG Yingjie, et al. Small-signal stability analysis of island microgrid considering interaction between grid-forming converter and grid-following converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022,42(8):11-18.
- [21] MARKOVIC U, STANOJEV O, ARISTIDOU P, et al. Understanding small-signal stability of low-inertia systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021,36(5):3997-4017.
- [22] 曹伟,钦焕乘,陆建忠,等. 新型电力系统下虚拟同步机的定位和应用前景展望[J]. 电力系统自动化, 2023,47(4):190-207.
CAO Wei, QIN Huancheng, LU Jianzhong, et al. Orientation and application prospect of virtual synchronous generator in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023,47(4):190-207.
- [23] ZHANG H B, XIANG W, LIN W X, et al. Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid: control strategy, stability, application, and challenges[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021,9(6):1239-1256.
- [24] ZHOU Z X, WANG W Z, RAMASUBRAMANIAN D, et al. Small signal stability of phase locked loop based current-controlled inverter in 100% inverter-based system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023,14(3):1612-1623.
- [25] ZHU D H, ZHOU S Y, ZOU X D, et al. Improved design of PLL controller for LCL-type grid-connected converter in weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020,35(5):4715-4727.
- [26] ZHANG X G, XIA D N, FU Z C, et al. An improved feedforward control method considering PLL dynamics to improve weak grid stability of grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018,54(5):5143-5151.
- [27] LI X, LIN H. A design method of phase-locked loop for grid-connected converters considering the influence of current loops in weak grid[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 8(3): 2420-2429.