

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2026.03.003

# 基于动态相量的构网型储能系统建模与稳定性分析

Modeling and stability analysis of grid-forming energy storage systems based on dynamic phasors

曾蕴睿, 王泽祺\*, 许博, 蒋天雨, 李犀郡, 李亭奕

ZENG Yunrui, WANG Zeqi\*, XU Bo, JIANG Tianyu, LI Xijun, LI Tingyi

(国网四川省电力公司天府新区供电公司, 成都 610213)

(State Grid Sichuan Electric Power Company Tianfu New Area Power Supply Company, Chengdu 610213, China)

**摘要:**随着新能源在电网中的渗透比例不断增加,构网型储能(GFS)设备的并联运行已成为保障电力系统稳定的关键。然而,传统GFS设备的并联运行主要依赖控制器的下垂控制特性,但在系统遭遇扰动时,仅靠下垂控制难以确保系统稳定性。为此,提出了一种基于动态相量的小信号建模方法,并结合特征值分析识别影响并联GFS设备相互作用的关键因素。与传统单一频域或时域方法相比,该方法能够更细致地刻画逆变器的高频动态响应特性,量化控制与网络参数对系统稳定性的耦合作用,从而在不增加额外阻尼的情况下拓展系统的稳定运行区域;该方法的模块化设计便于适应不同系统拓扑结构,显著提升了模型的适应性与稳定性预测的准确性;Matlab/Simulink的仿真验证表明,该方法在多种运行条件下均能有效评估系统稳定性,相较传统方法具备更高的精确性和灵活性。

**关键词:**构网型储能;下垂控制;动态相量;特征值分析;小信号建模

**中图分类号:**TK 01:TM 73 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-0706(2026)03-0027-10

**Abstract:** With the increasing penetration of new energy in the power grid, the parallel operation of grid-forming energy storage (GFS) devices has become crucial for ensuring power system stability. However, the parallel operation of traditional GFS devices mainly relies on the droop control characteristics of controllers, and droop control alone is insufficient to ensure system stability when the system experiences disturbances. Therefore, a small-signal modeling method based on dynamic phasors was proposed, combined with eigenvalue analysis to identify key factors affecting the interactions among parallel GFS devices. Compared with traditional single frequency-domain or time-domain methods, this method could more precisely characterize the high-frequency dynamic response characteristics of inverters and quantify the coupling effects of control and network parameters on system stability, thereby expanding the stable operation region of the system without introducing additional damping. Moreover, the modular design of this method facilitated adaptation to different system topologies, significantly improving the adaptability of the model and the accuracy of stability prediction. Simulation verification using Matlab/Simulink showed that the proposed method could effectively evaluate system stability under various operating conditions, offering higher accuracy and flexibility compared with traditional methods.

**Keywords:** grid-forming energy storage; droop control; dynamic phasor; eigenvalue analysis; small-signal modeling

## 0 引言

随着电力电子和控制技术的不断进步,构网型储能(Grid-forming Energy Storage, GFS)设备的大规模应用得到了广泛推广,这些设备主要用于连接可再生能源系统<sup>[1-4]</sup>。随着传统发电机组逐渐被基于逆变器和储能的资源所取代,电网中原本由同步发电机提供的惯性和强度有所减弱。为应对这一挑战,研究人员开发了多种先进的GFS控制技术,其

中最重要的一种是模拟同步发电机特性的虚拟同步机(Virtual Synchronous Machine, VSM)<sup>[5-7]</sup>。根据模拟同步机的复杂程度,提出了多种VSM方法。在VSM配置中,有功-频率( $P-f$ )下垂控制和无功-电压( $Q-V$ )下垂控制被广泛应用,前者负责频率调节,后者负责电压调节。为了更好地模拟同步发电机的惯性特性, $P-f$ 下垂控制中引入了摆动方程的动态特性。具备构网型(Grid-Forming, GFM)控制能力的储能设备通常被称为GFS设备,在电网中充当

受控电压源的关键角色。

尽管  $P$ - $f$  下垂控制和  $Q$ - $V$  下垂控制策略可以实现 GFS 设备的并联运行,但在某些情况下并不能完全保证系统稳定性,系统可能因控制器参数或网络条件的变化而发生振荡失稳<sup>[8-9]</sup>。针对上述问题,很多学者提出了相应的改进措施。例如文献[10]开发了一个频域模型来指导单个 GFS 设备的参数选择,但在多个 GFS 设备并联时,由于设备间相互作用的复杂性,这种方法将面临挑战,且该方法没有分析 GFS 设备之间的相互作用。文献[11-14]观察到并联 GFS 系统中有功功率的振荡现象,表明通过调整控制参数以增加系统阻尼可以提高系统稳定性。此外,文献[11]还探讨了虚拟惯性对扰动后振荡的影响,但在建模时对网络模型进行了简化,进而忽略了网络动态对系统稳定性的影响,这可能会导致对系统稳定性的判断出现较大误差。文献[15]提出了同时考虑系统频率稳定性与小干扰稳定性的储能型 VSM 参数协同控制策略,实现了系统的小信号稳定,但该方法在分析系统的小信号稳定性时并没有基于动态相量建立系统的小信号模型,这可能会导致系统稳定性分析结果存在误差。同时,在多逆变器系统中,GFS 设备间相互作用的根本原因仍不完全清楚,网络和控制参数的变化可能导致主导振荡模式的不稳定。

因此,为解决这一问题,本研究对包含所有控制和网络动态的 GFS 并联系统进行特征值分析。在 GFS 并联系统的稳定性评估中,基于频域的阻抗分析法<sup>[16]</sup>和基于时域的特征值分析法<sup>[17-20]</sup>被广泛应用,特别是在电力系统领域。基于特征值的分析因其能够通过参与因子识别与振荡模式相关的状态变量而备受重视<sup>[17]</sup>。本研究采用小信号模型<sup>[18-20]</sup>,其中每个并联 GFS 设备都在各自的参考系中建模,并选择一个参考系作为公共参考系。通过适当地变换矩阵,将相关变量转换到公共坐标系中,这种建模方法保持了模块化,允许灵活添加或删除动态设备。随后,通过特征值分析确定系统中的主导振荡模式,并计算参与因子以识别主要的状态变量。研究还探讨控制和网络参数对这些状态的影响,以评估它们对 GFS 设备间相互作用的敏感性。

## 1 系统动态模型

图 1 为一个 2 台 GFS 设备并联的系统(图中: $V_{DC}$  为直流电压源;GFS1,GFS2 为 2 个并联的 GFS 设备; $V_{ci}$  和  $I_{ci}$  ( $i=1,2$ ) 分别为构网型逆变器的端电压和输出电流; $L_{fi}$ ,  $C_{fi}$ ,  $R_{fi}$  ( $i=1,2$ ) 分别为 LC 滤波器的电感、电容和电阻; $V_{fi}$  ( $i=1,2$ ) 为 LC 滤波器电容的电压; $I_{fi}$  ( $i=1,2$ ) 为 LC 滤波器的流出电流; $V_{Li}$  ( $i=1,2$ ) 为 LC 滤

波器的端电压; $L_{xi}$ ,  $C_{xi}$ ,  $R_{xi}$  ( $i=1,2$ ) 分别为  $\pi$  型电路的电感、电容、电阻; $I_{xi}$  ( $i=1,2$ ) 为  $\pi$  型电路的流出电流; $L_L$ ,  $R_L$  分别为负荷的电感、电阻; $I_L$  为负荷的流出电流; $V_L$  为负荷电感的端电压; $V_{x1}$ ,  $V_{x2}$  分别为电容  $C_{x1}$ ,  $C_{x2}$  的电压),在模型建立过程中,由于开关瞬态的频率远远超出本文所研究的频率范围,因此忽略其对系统小信号稳定性的影响。由于直流电源较为简单,因此忽略其动态<sup>[21-22]</sup>。与传统同步机主导的电力系统不同,GFS 系统的快速响应时间可能导致与系统网络的相互作用<sup>[18]</sup>。因此,所开发的模型包含基于动态相量表示的网络元素的网络动态。

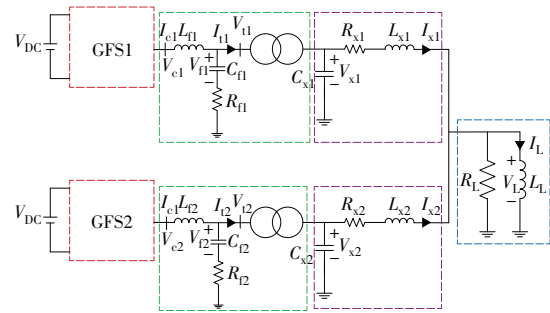


图 1 GFS 并联系统

Fig. 1 GFS parallel system

针对 GFS 系统的快速响应时间可能导致与系统网络的相互作用,以下 3 点需要说明。(1)频率和电压波动:逆变器响应时间短,会快速调整输出功率以匹配负载或网络需求。然而,过于快速的响应可能导致电压或频率的短期波动,这些波动会在网络内传递,影响其他设备的稳定性。(2)控制延迟与振荡:GFS 控制系统包括  $P$ - $f$  和  $Q$ - $V$  下垂控制。如果多个 GFS 设备并联运行,其快速响应可能会触发相互之间的控制信号延迟或相位偏移,导致电力系统振荡。这种情况在低阻尼或高增益参数下尤为明显。(3)动态耦合效应:快速响应的 GFS 设备在应对网络扰动时,其电流控制可能会受到网络中其他设备的影响,尤其是当控制参数不匹配时。网络 and 控制器之间的相互作用容易引发高频动态耦合,增加系统振荡失稳的风险。

本文采用“组件连接方法”<sup>[20]</sup>来建立系统的小信号模型。该方法将电力系统分解为多个子组件(如 GFM 逆变器、跟网型逆变器、同步机、滤波器和  $\pi$  型电路等),并对每个子组件进行局部线性化,以获得其线性、时不变的模型。然后,通过各组件的输入输出变量建立线性代数关系,将这些子组件模型相互连接。相比于通用状态空间模型<sup>[20]</sup>,这种组件的线性代数互联大大减少了计算量。

在建立系统的小信号模型过程中,图 1 中的系统被划分为 4 个子部分:控制系统(红色边框)、LC

滤波器和变压器(绿色边框)、网络(紫色边框)、负载(蓝色边框)。其中,控制系统的具体流程如图 2 所示(图中: $V_{cd}$ 和 $V_{cq}$ 分别为构网型逆变器电压在静止坐标系下 $d,q$ 轴的分量; $V_{cd}^{ref}$ 和 $V_{cq}^{ref}$ 分别为 $V_{cd}$ 和 $V_{cq}$ 的参考值; $V_{ca},V_{cb},V_{cc}$ 分别为构网型逆变器电压的 $a,b,c$ 三相电压; $\theta$ 为 $P-f$ 控制器的输出相角; $V_{vid}$ 和 $V_{viq}$ 分别为视频输入(Video Input, VI)控制器端电压在静止坐标系下 $d,q$ 轴的分量)。每个逆变器的前 3 个子部分都使用各自的参考系进行建模,这些参考系的旋转速度由逆变器自己的 $P-f$ 控制器控制。选择其中一个 GFS 系统的参考系作为公共参考系,该参考系也用于建模负载动态<sup>[23]</sup>。每个逆变器个别参考系中的变量可以如下式所示,使用转换矩阵 $F_i$ 转换为公共参考系变量。

$$x_{DQ} = F_i x_{dq}, \quad (1)$$

$$F_i = \begin{bmatrix} \cos \delta_i & -\sin \delta_i \\ \sin \delta_i & \cos \delta_i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$F_i^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \delta_i & \sin \delta_i \\ -\sin \delta_i & \cos \delta_i \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: $x_{dq}$ 为某一变量在静止坐标系下的表示; $x_{DQ}$ 为某一变量在公共坐标系下的表示; $F_i^{-1}$ 为 $F_i$ 的逆矩阵; $\delta_i$ 为静止坐标系与公共坐标系之间的角度差。

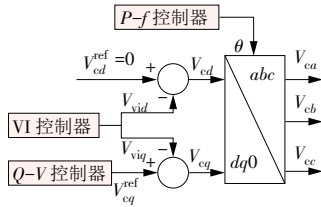


图 2 GFS 控制  
Fig. 2 GFS control

### 1.1 功率控制器

由 $P-f$ 控制和 $Q-V$ 控制组成的功率控制器分别如图 3(图中: $\omega$ 为 $P-f$ 下垂控制器角频率; $\omega_{ref}$ 为 $P-f$ 下垂控制器角频率的参考值; $s$ 为积分; $H$ 和 $D_p$ 分别为 $P-f$ 下垂控制的虚拟惯性常数和阻尼; $P_G, P_G^{ref}$ 分别为 GFS 的输出有功功率和参考功率)和图 4(图中: $V_Q$ 和 $V_Q^{ref}$ 分别为 $Q-V$ 下垂控制的电压及电压参考值; $D_Q$ 为 $Q-V$ 下垂控制的下垂系数; $Q_G, Q_G^{ref}$ 分别为 GFS 控制器的输出无功功率和参考无功功率; $k_p$ 和 $k_i$ 为 $Q-V$ 下垂控制比例积分(Proportional Integral, PI)控制器的比例积分系数; $x_1$ 为 PI 控制器的状态变量)所示。此外,VI 控制器的结构如图 5 所示(图中: $R_{vi}, R_{vi0}$ 为 VI 控制器的电阻和参考电阻; $I_{crs}$ 和 $I_{ths}$ 分别为 VI 控制器的均方根电流、阈值电流; $k_v$ 为 VI 控制器的放大系数; $I_{vdp}, I_{vqp}$ 分别为 VI 控制器在静止坐标系下 $d,q$ 轴上的电流; $I_{vd}, I_{vq}$ 分别为 VI 控制器在静止坐标系下 $d,q$ 轴上的放大电流; $V_{vd}, V_{vq}$ 分别

为 VI 控制器在静止坐标系下 $d,q$ 轴上的输出电压)。

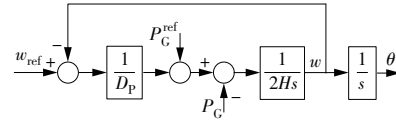


图 3  $P-f$ 下垂控制  
Fig. 3  $P-f$  droop control

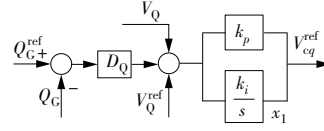


图 4  $Q-V$ 下垂控制  
Fig. 4  $Q-V$  droop control

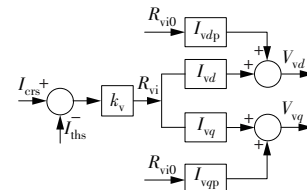


图 5 VI 控制器  
Fig. 5 VI controller

GFS 输出的有功功率 $P_G$ 和无功功率 $Q_G$ 分别在各逆变器的 LC 滤波器的端点。在 $Q-V$ 控制回路中, PI 控制器的动态用状态变量 $x_1$ 来建模。 $P-f$ 下垂控制器的非线性方程为

$$\frac{d\omega_0}{dt} = \omega_c - \omega, \quad (4)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{P_G}{2H} - \frac{\omega}{2HD_p} + \frac{D_p P_G^{ref} + \omega_{ref}}{2HD_p}, \quad (5)$$

$$\frac{dx_1}{dt} = k_i [D_Q (Q_G^{ref} - Q_G) + V_Q^{ref} - V_Q], \quad (6)$$

式中: $\omega_0$ 为角速度; $\omega_c$ 为公共坐标系下的角频率; $t$ 为时间。

将式(4)—(6)线性化,可得

$$\frac{d\Delta X_P}{dt} = A_{p1} \Delta X_P + A_{p2} \Delta X_{LC} + A_{p3} \Delta X_N + A_{p4} \Delta X_L + B_p \Delta U_{inv}, \quad (7)$$

式中: $\Delta(\cdot)$ 为某状态变量的微小变化; $A_{p1}$ 为功率控制器的自耦合矩阵; $A_{p2}$ 为功率控制器与 LC 滤波器的交叉耦合矩阵; $A_{p3}$ 为功率控制器与网络的交叉耦合矩阵; $A_{p4}$ 为功率控制器与系统负荷的耦合矩阵; $B_p$ 为 $P-f$ 下垂控制器的输入矩阵; $X_P, X_{LC}, X_N, X_L$ 分别为 $P-f$ 下垂控制、LC 滤波器、网络、负荷的状态向量; $U_{inv}$ 为逆变器的端电压。

$Q-V$ 控制中下垂时间常数 $T_i$ 为

$$T_i = \frac{1}{k_i}. \quad (8)$$

$Q-V$ 控制器输出电压 $V_{cq}$ 的动态方程为

$$V_{cq} = k_p [D_Q (Q_G^{ref} - Q_G) + V_Q^{ref} - V_Q] + x_1. \quad (9)$$

将式(9)线性化可得

$$\frac{d\Delta V_{cq}}{dt} = \mathbf{C}_{pd}\Delta\mathbf{X}_p + \mathbf{D}_{pd}\Delta U_{inv}, \quad (10)$$

式中: $\mathbf{C}_{pd}$ 和 $\mathbf{D}_{pd}$ 分别为输出矩阵和反馈矩阵。

## 1.2 LC滤波器

静止坐标系下,LC滤波器和变压器的动态方程为

$$\frac{dI_{vd}}{dt} = \frac{R_f(I_{td} - I_{cd}) - \omega L_f I_{cq} + V_{cd} - V_{fd}}{L_f}, \quad (11)$$

$$\frac{dI_{vq}}{dt} = \frac{R_f(I_{tq} - I_{cq}) + \omega L_f I_{cd} + V_{cq} - V_{fq}}{L_f}, \quad (12)$$

$$\frac{dV_{fd}}{dt} = \frac{-\omega C_f V_{fq} - I_{td} + I_{vd}}{C_f}, \quad (13)$$

$$\frac{dV_{fq}}{dt} = \frac{\omega C_f V_{fd} - I_{tq} + I_{vq}}{C_f}, \quad (14)$$

$$\frac{dI_{td}}{dt} = \frac{-(R_f + R_t)I_{td} + R_f I_{cd} - \omega L_t I_{tq} + V_{fd} - V_{pd}}{L_t}, \quad (15)$$

$$\frac{dI_{tq}}{dt} = \frac{-(R_f + R_t)I_{tq} + R_f I_{cq} + \omega L_t I_{td} + V_{fq} - V_{pq}}{L_t}, \quad (16)$$

$$\frac{dI_{vdp}}{dt} = -\frac{I_{vdp}}{T} + \frac{dI_{vd}}{dt}, \quad (17)$$

$$\frac{dI_{vqp}}{dt} = -\frac{I_{vqp}}{T} + \frac{dI_{vq}}{dt}, \quad (18)$$

式中: $R_f, L_f, C_f$ 分别为LC滤波器和变压器的串联电阻、串联电感、并联电容; $R_t$ 和 $L_t$ 分别为连接LC滤波器与网络的变压器的电阻和电感参数; $I_{td}, I_{tq}$ 分别为GFS逆变器输出电流在静止坐标系下 $d, q$ 轴上的分量; $V_{fd}, V_{fq}$ 分别为LC滤波器并联电容电压在静止坐标系下 $d, q$ 轴上的分量; $I_{vd}, I_{vq}$ 分别为LC滤波器输出电流在静止坐标系下 $d, q$ 轴上的分量; $V_{pd}, V_{pq}$ 分别为负荷负载电压在静止坐标系下 $d, q$ 轴上的分量; $T$ 为LC滤波器和变压器相关的时间常数, $T=1/(2\pi f)$ , $f$ 为系统频率。

将式(11)—(18)线性化可得

$$\frac{d\Delta\mathbf{X}_{LC}}{dt} = \mathbf{A}_{LC}\Delta\mathbf{X}_{LC} + \mathbf{B}_{L1}\Delta\omega + \mathbf{B}_{L2}\begin{bmatrix} \Delta V_{cd} \\ \Delta V_{cq} \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{L3}\begin{bmatrix} \Delta V_{pd} \\ \Delta V_{pq} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

式中: $\mathbf{A}_{LC}$ 为LC滤波器的状态空间矩阵; $\mathbf{B}_{L1}, \mathbf{B}_{L2}, \mathbf{B}_{L3}$ 分别为逆变器电压、网络状态、负载状态的输入矩阵。

## 1.3 网络

系统中网络的动态方程如下

$$\frac{dV_{pd}}{dt} = -\omega V_{pq} + \frac{(I_{td} - I_{xd})}{C_x}, \quad (20)$$

$$\frac{dV_{pq}}{dt} = \omega V_{pd} + \frac{(I_{tq} - I_{xq})}{C_x}, \quad (21)$$

$$\frac{dI_{xd}}{dt} = -\omega I_{xq} + \frac{(-R_x I_{xq} + V_{pd} - V_{Ld})}{L_x}, \quad (22)$$

$$\frac{dI_{xq}}{dt} = \omega I_{xd} + \frac{(-R_x I_{xq} + V_{pq} - V_{Lq})}{L_x}, \quad (23)$$

式中: $I_{xd}, I_{xq}$ 分别为 $\pi$ 型电路电流在静止坐标系下 $d, q$ 轴上的分量; $R_x$ 为 $\pi$ 型电路的电阻参数; $L_x$ 为 $\pi$ 型电路的电感参数; $C_x$ 为负荷网络中 $\pi$ 型电路的并联电容参数; $V_{Ld}$ 和 $V_{Lq}$ 分别为由公共坐标系转换为静止坐标系后网络电压的 $d, q$ 轴分量,具体表示如下

$$\begin{bmatrix} V_{Ld} \\ V_{Lq} \end{bmatrix} = \mathbf{F}_i^{-1} \begin{bmatrix} V_{LD} \\ V_{LQ} \end{bmatrix}, \quad (24)$$

式中: $V_{LD}$ 和 $V_{LQ}$ 分别为网络在公共坐标系下 $d, q$ 轴上的电压。

将式(20)—(23)线性化可得

$$\frac{d\Delta\mathbf{X}_N}{dt} = \mathbf{A}_N\Delta\mathbf{X}_N + \mathbf{B}_{N1}\Delta\omega + \mathbf{B}_{N2}\begin{bmatrix} \Delta I_{td} \\ \Delta I_{tq} \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{N3}\begin{bmatrix} \Delta V_{Ld} \\ \Delta V_{Lq} \end{bmatrix}, \quad (25)$$

式中: $\mathbf{A}_N$ 为网络的状态空间矩阵; $\mathbf{B}_{N1}, \mathbf{B}_{N2}, \mathbf{B}_{N3}$ 为网络的输入矩阵; $\mathbf{X}_N$ 为网络的状态向量。

将式(24)线性化可得

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{Ld} \\ \Delta V_{Lq} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{sd}\begin{bmatrix} \Delta V_{LD} \\ \Delta V_{LQ} \end{bmatrix} + \mathbf{T}_{vd}\Delta\omega_0, \quad (26)$$

式中: $\mathbf{T}_{sd}$ 和 $\mathbf{T}_{vd}$ 为相应的转换矩阵。

将式(26)代入式(25),可得网络的状态方程

$$\frac{d\Delta\mathbf{X}_N}{dt} = \mathbf{A}_{N1}\Delta\mathbf{X}_p + \mathbf{A}_{N2}\Delta\mathbf{X}_{L1} + \mathbf{A}_{N3}\Delta\mathbf{X}_N + \mathbf{A}_{N4}\Delta\mathbf{X}_L + \mathbf{B}_N\Delta U_{inv}, \quad (27)$$

式中: $\mathbf{A}_{N1}$ 为网络与功率控制器的交叉耦合矩阵; $\mathbf{A}_{N2}$ 为网络与LC滤波器的交叉耦合矩阵; $\mathbf{A}_{N3}$ 为网络的自耦合矩阵; $\mathbf{A}_{N4}$ 为网络与系统负荷的耦合矩阵; $\mathbf{B}_N$ 为网络输入矩阵; $\mathbf{X}_{L1}$ 为LC滤波器的状态向量。

因此,由上述推导可得第 $k$ 个GFS设备的全阶状态方程如下

$$\frac{d\Delta\mathbf{X}_k}{dt} = \mathbf{A}_k\Delta\mathbf{X}_k + \mathbf{A}_{Lk}\Delta\mathbf{X}_L + \mathbf{B}_k\Delta U_k, \quad (28)$$

式中: $\mathbf{X}_k$ 为第 $k$ 个GFS设备的状态向量; $\mathbf{A}_k$ 为第 $k$ 个GFS设备的自状态矩阵; $\mathbf{A}_{Lk}$ 为第 $k$ 个GFS设备与负荷的耦合矩阵; $\mathbf{B}_k$ 为第 $k$ 个GFS设备的输入矩阵; $U_k$ 为第 $k$ 个GFS设备的输入扰动; $\Delta\mathbf{X}_k = [\Delta\mathbf{X}_{Pk} \quad \Delta\mathbf{X}_{L1k} \quad \Delta\mathbf{X}_{Nk}]^T$ , $\mathbf{X}_{Pk}$ 为第 $k$ 个GFS设备 $P$ - $f$ 下垂控制的状态向量, $\mathbf{X}_{L1k}$ 为第 $k$ 个GFS设备LC滤波器的状态向量, $\mathbf{X}_{Nk}$ 为第 $k$ 个GFS设备网络的状态向量。

根据前面推导可得

$$\mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{P1} & \mathbf{A}_{P2} & \mathbf{A}_{P3} \\ \mathbf{A}_{Ld1} & \mathbf{A}_{Ld2} & \mathbf{A}_{Ld3} \\ \mathbf{A}_{N1} & \mathbf{A}_{N2} & \mathbf{A}_{N3} \end{bmatrix}, \quad (29)$$

$$\mathbf{A}_{Lk} = [\mathbf{A}_{P4} \quad \mathbf{A}_{Ld4} \quad \mathbf{A}_{N4}]^T, \quad (30)$$

$$\mathbf{B}_k = [\mathbf{B}_p \quad \mathbf{B}_{Ld} \quad \mathbf{B}_N]^T, \quad (31)$$

式中: $\mathbf{A}_{Ld1}$ 为LC滤波器与功率控制器的交叉耦合矩阵; $\mathbf{A}_{Ld2}$ 为LC滤波器的自耦合矩阵; $\mathbf{A}_{Ld3}$ 为LC滤波器与网络的交叉耦合矩阵; $\mathbf{A}_{Ld4}$ 为LC滤波器与系统负荷的耦合矩阵; $\mathbf{B}_{Ld}$ 为LC滤波器的输入子矩阵。

#### 1.4 负荷

系统中各传输线负载电容和负载电感在公共坐标系下的动态方程为

$$\frac{dV_{LD}}{dt} = -\omega_c V_{LQ} + \frac{(-V_{LD}/R_L - I_{LD} + \sum_{k=1}^N I_{xdk})}{C_L}, \quad (32)$$

$$\frac{dV_{LQ}}{dt} = \omega_c V_{LD} + \frac{(-V_{LQ}/R_L - I_{LQ} + \sum_{k=1}^N I_{xqk})}{C_L}, \quad (33)$$

$$\frac{dI_{LD}}{dt} = -\omega_c I_{LQ} + \frac{V_{LD}}{L_L}, \quad (34)$$

$$\frac{dI_{LQ}}{dt} = \omega_c I_{LD} + \frac{V_{LQ}}{L_L}, \quad (35)$$

$$\begin{bmatrix} I_{xdk} \\ I_{xqk} \end{bmatrix} = \mathbf{F}_i \begin{bmatrix} I_{xdk} \\ I_{xqk} \end{bmatrix}, \quad (36)$$

式中: $I_{LD}, I_{LQ}$ 为负荷电流在公共坐标系下 $d, q$ 轴上的分量; $I_{xdk}, I_{xqk}$ 分别为第 $k$ 台GFS设备的LC滤波器流出电流在公共坐标系下 $d, q$ 轴上的分量; $N$ 为系统中并联GFS设备的总数量; $C_L$ 为传输线路负荷电容; $I_{xdk}, I_{xqk}$ 分别为第 $k$ 条 $\pi$ 型电路的电流在公共坐标系下 $d, q$ 轴上的分量; $I_{xdk}, I_{xqk}$ 分别为第 $k$ 条 $\pi$ 型电路的电流在静止坐标系下 $d, q$ 轴上的分量。

线性化式(32)–(36),可得

$$\frac{d\Delta\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{A}_L \Delta\mathbf{X}_L + \mathbf{B}_{L1} \Delta\omega_c + \mathbf{B}_{L2} \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} \Delta I_{xdk} \\ \Delta I_{xqk} \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{L3} \Delta R_L, \quad (37)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{xdk} \\ \Delta I_{xqk} \end{bmatrix} = \mathbf{F}_i^{-1} \begin{bmatrix} \Delta I_{xdk} \\ \Delta I_{xqk} \end{bmatrix} + \mathbf{F}_i \Delta\omega_0, \quad (38)$$

式中: $\mathbf{A}_L$ 为公共坐标系下负荷的状态空间矩阵。

将式(38)代入式(37)可得

$$\frac{d\Delta\mathbf{X}_L}{dt} = \sum_{k=1}^N (\mathbf{A}_{Lk} \Delta\mathbf{X}_k) + \mathbf{A}_L \Delta\mathbf{X}_L + \mathbf{B}_L \Delta R_L. \quad (39)$$

#### 1.5 系统整体模型

通过联立上述4部分内容的线性化方程可得整个系统的小信号模型。因此,在公共参照坐标系中,2台GFS并联系统为

$$\frac{d\Delta\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{A} \Delta\mathbf{X} + \mathbf{B} \Delta\mathbf{U}, \quad (40)$$

式中: $\mathbf{X}$ 为整个系统的状态向量; $\mathbf{A}$ 为整个系统的状态空间矩阵; $\Delta\mathbf{X} = [\Delta\mathbf{X}_p \quad \Delta\mathbf{X}_{LC} \quad \Delta\mathbf{X}_k \quad \Delta\mathbf{X}_L]^T$ ;  $\Delta\mathbf{U} = [\Delta V_{LD} \quad \Delta V_{LQ} \quad \Delta R_L]^T$ ;  $\mathbf{B}$ 为整个系统的输入矩阵。

#### 1.6 系统小信号稳定性分析

在建立好的系统小信号稳定性模型的基础上,通过特征值分析法对系统的小信号稳定性进行分析<sup>[24–28]</sup>,特征值分析法的具体介绍如下。

对式(40)的系统状态空间矩阵 $\mathbf{A}$ 求取特征值,可得

$$|\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}| = 0, \quad (41)$$

式中: $\lambda$ 为状态空间矩阵 $\mathbf{A}$ 的特征值; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵;特征值的个数及单位矩阵的维数均与矩阵 $\mathbf{A}$ 的维数相同。

对于系统的第 $i$ 个特征值 $\lambda_i$ ,满足以下方程

$$\begin{cases} \mathbf{A} \mathbf{U}_i = \lambda_i \mathbf{U}_i \\ \mathbf{V}_i^T \mathbf{A} = \lambda_i \mathbf{V}_i^{T^*} \end{cases} \quad (42)$$

式中: $\mathbf{V}_i^T, \mathbf{U}_i$ 分别为第 $i$ 个特征值 $\lambda_i$ 的左、右特征向量。

设 $\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i$ ,当 $\omega_i \neq 0$ 时, $\lambda_i$ 为一个振荡模式, $\sigma_i$ 为振荡模式的阻尼, $\omega_i$ 为振荡角频率。当 $\sigma_i > 0$ ,系统会发生小信号失稳。

定义第 $k$ 个状态变量 $x_k$ 与第 $i$ 个特征值 $\lambda_i$ 相关性的参与因子 $P_{ki}$ 为

$$P_{ki} = \frac{V_{ki} U_{ki}}{V_i^T U_i}, \quad (43)$$

式中: $V_{ki}, U_{ki}$ 分别为左、右特征矩阵 $\mathbf{V}$ 和 $\mathbf{U}$ 中的第 $k$ 行第 $i$ 列元素。参与因子的值越大,则说明该状态变量 $x_k$ 在该振荡模式中的参与程度越大。

## 2 算例分析

算例系统的具体参数见表1。本节将通过特征值分析和非线性仿真验证,探讨算例系统主要参数对2个GFS并联系统小信号稳定性的影响。算例仿真验证分析基于Matlab/Simulink平台完成。

表1 系统参数

Table 1 System parameters

变量	数值	变量	数值
$V_{DC}$ (标么值)	1	$R_{v0}/\Omega$	2.2
$H$	5	$k_p$	0.2
$L_i/\mu\text{H}$	80	$k_i$	4
$R_L/\Omega$	100	$D_p$	0.5
$L_L/H$	2	$D_Q$	0.5
$C/\mu\text{F}$	500	$P_G^{\text{ref}}/\text{kW}$	1
$R/\Omega$	0.5	$Q_C^{\text{ref}}/\text{kW}$	0.1
$L_s/H$	2	$R_s/\Omega$	0.8

#### 2.1 特征值分析

利用特征值分析法计算算例系统状态空间矩阵 $\mathbf{A}$ 的特征值,得到系统的主导振荡模式为 $-0.14 \pm j32.33$ ,且主导振荡模式的参与因子如图6所示。从图6中可以看出:主导振荡模式主要与 $P$ - $f$ 下垂控制及瞬态VI路径相关联。 $H$ 和 $D_p$ 为 $P$ - $f$ 下垂控制的动态,而瞬态

VI 路径的动态则由增益  $R_{v0}$  决定。通过改变这些控制参数的数值来评估其对主导振荡模式的影响。除了控制器状态外,逆变器电流的  $d$  分量也有显著的参与度。因此,最后通过改变滤波电感  $L_f$ , 评估其对主导振荡模式影响。此时,系统的非线性仿真波形如图 7 所示。

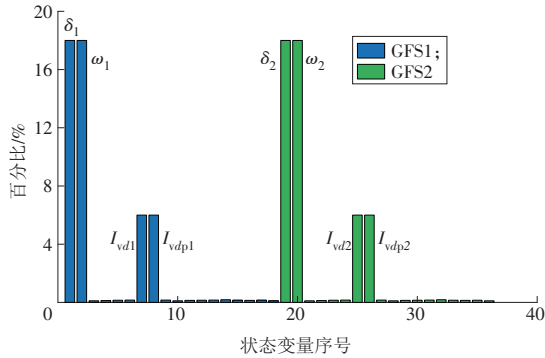


图 6 主导振荡模式参与因子

Fig. 6 Participation factors of dominant oscillation modes

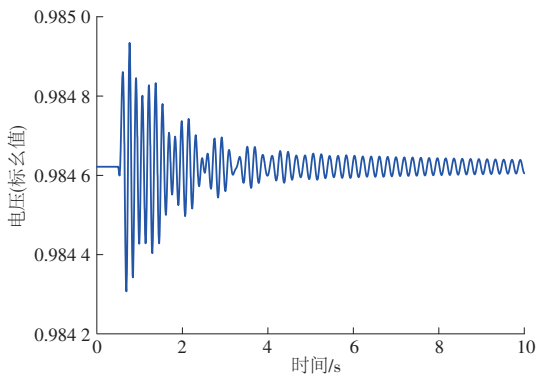


图 7 非线性仿真结果

Fig. 7 Nonlinear simulation results

### 2.2 P-f 控制下 $H$ 对系统稳定性的影响

GFS2 的惯性时间常数  $H_2$  从 0.5 变化到 6.5, 系统主导振荡模式的变化轨迹如图 8 所示。从图 8 中可以看出: 当 GFS2 的惯性时间常数  $H_2$  逐渐靠近 GFS1 的惯性时间常数  $H_1$  时, GFS1 和 GFS2 之间相互作用的可能性增加, 使得 2 个 GFS 并联系统更易失稳。算例系统临界稳定的非线性仿真结果如图 9 所示, 从图 9 中可以看出, 随着  $H_2$  的增加, 算例系统稳定性变差。

通过上述算例可得, 增加 GFS 系统的  $H$  会使系统的稳定性变差。但通过增加  $Q-V$  下垂控制的  $T_i$ , 可以稍微扩大稳定的  $H$  值区域, 具体如图 10 所示。从图 10 中可以看出: 当  $Q-V$  下垂的  $T_i$  由 0.25 增加到 0.45 时, 系统主导振荡模式整体向左移动, 稳定性增强。这是因为  $H$  的增加相应地增加了  $P-f$  控制器的响应时间, 该响应时间由  $2HD_p$  确定。因此, 放慢  $Q-V$  控制器中的 PI 控制以匹配放慢的  $P-f$  控制器动态, 可以降低出现不稳定状态的可能性。需要注意

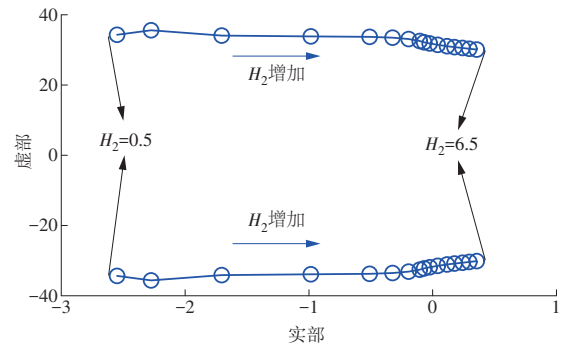


图 8 主导振荡模式随  $H_2$  变化的移动轨迹

Fig. 8 Movement trajectory of dominant oscillation modes varying with  $H_2$

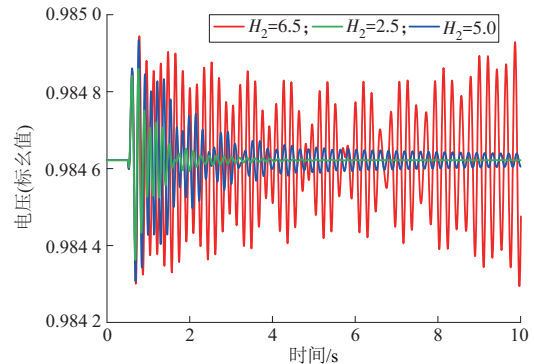


图 9 不同  $H_2$  下的非线性仿真结果

Fig. 9 Nonlinear simulation results under different  $H_2$

的是, 这会放慢整个 GFS 的运行, 并减弱其快速响应能力。此时, 当 GFS2 的惯性时间常数  $H_2$  分别为 5.5 和 6.5 时, 系统的非线性仿真结果如图 11 所示。从图 11 中可以看出,  $P-f$  下垂控制的  $H$  相同的情况下,  $Q-V$  下垂控制  $T_i$  增加, 系统稳定性增强。

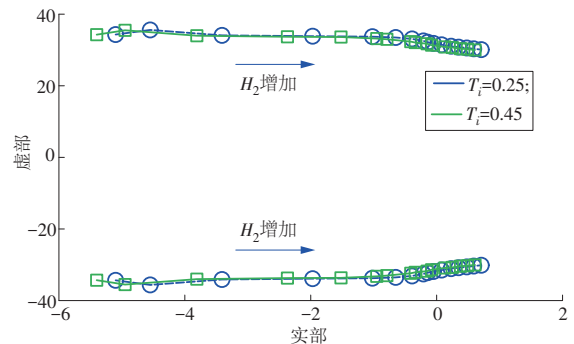


图 10 主导特征值随  $H_2$  变化的轨迹

Fig. 10 Trajectory of dominant eigenvalues varying with  $H_2$

### 2.3 P-f 控制下 $D_p$ 对系统稳定性的影响

为了观察 GFS 系统中  $D_p$  对系统稳定性的影响, 将 2 个并联 GFS 系统中  $P-f$  控制的  $D_p$  从 0.3 调整至 0.8。算例系统主导振荡模式随  $D_p$  变化的情况如图 12 所示。从图 12 中可以观察到, 随着  $D_p$  的增加, 系统发生振荡失稳的风险增大。这主要是因为较大的  $D_p$  会减少 GFS 系统对给定频率变化的功率注入, 从而增加扰动后振荡发生的可能性。系统小信

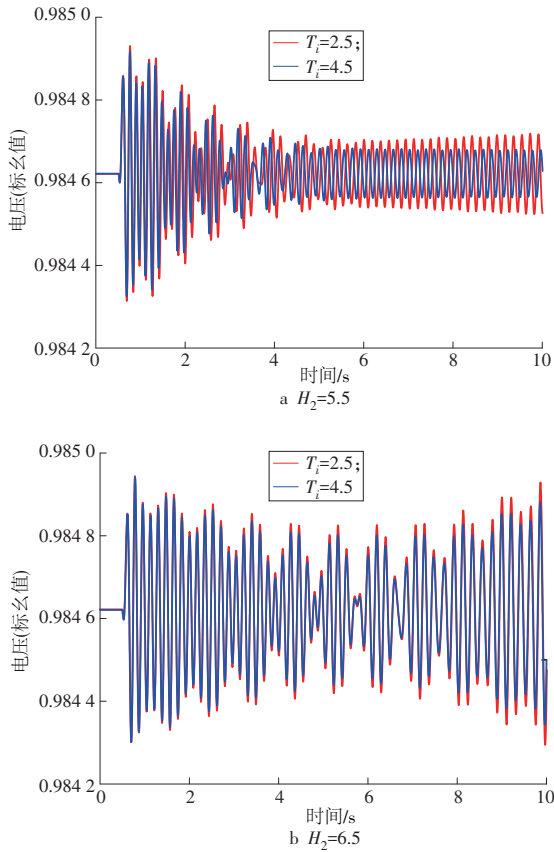


图 11 不同  $H$  和  $T_i$  下的非线性仿真结果

Fig. 11 Nonlinear simulation results under different  $H$  and  $T_i$

号稳定的非线性仿真结果如图 13 所示。从非线性仿真结果也可以看出,随着  $D_p$  的增加,系统稳定性变差,验证了特征值分析的正确性。

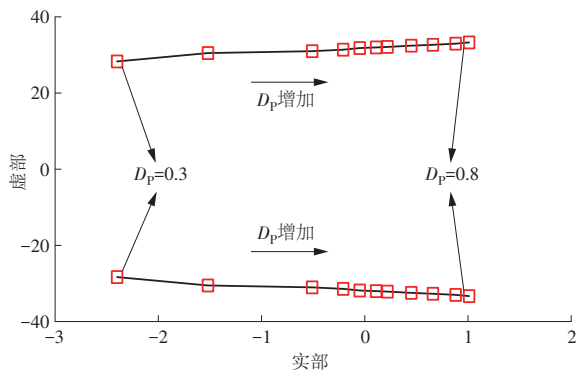


图 12  $D_p$  变化时的主导振荡模式轨迹

Fig. 12 Trajectory of dominant oscillation modes with  $D_p$  variation

### 2.4 瞬态 VI 路径虚拟阻抗对系统稳定性的影响

为了评估瞬态 VI 路径对系统主导振荡模式的影响,将  $R_{v10}$  从 0.2 调整至 8.2,结果如图 14 所示。从图 14 中可以看出,随着瞬态 VI 路径中  $R_{v10}$  变大,系统逐渐变得不稳定。随着  $R_{v10}$  变化,系统的非线性仿真结果如图 15 所示,从图 15 中可以看出,随着  $R_{v10}$  变大,系统稳定性变差。

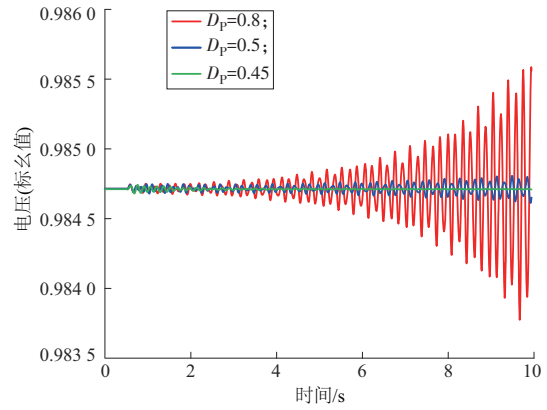


图 13 不同  $D_p$  下的非线性仿真结果

Fig. 13 Nonlinear simulation results under different  $D_p$

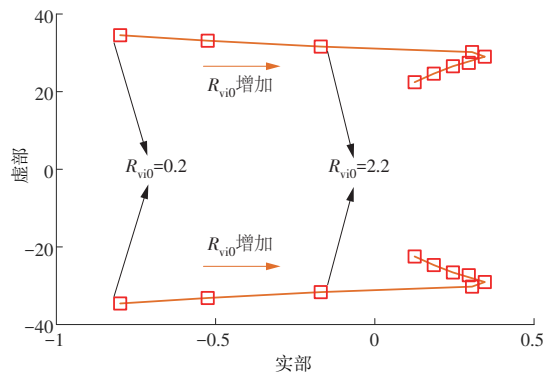


图 14  $R_{v10}$  变化时的主导振荡模式轨迹

Fig. 14 Trajectory of dominant oscillation modes with  $R_{v10}$  variation

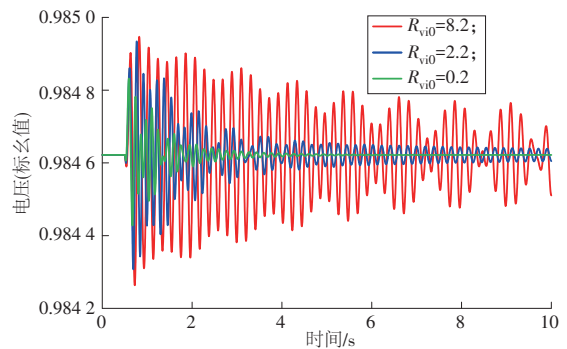


图 15 不同  $R_{v10}$  下的非线性仿真结果

Fig. 15 Nonlinear simulation results under different  $R_{v10}$

### 2.5 $L_r$ 对系统稳定性的影响

由于 GFS 系统电流的  $d$  分量对系统主导振荡模式有一定的影响,因此将 2 个 GFS 系统的  $L_r$  从  $60 \mu\text{H}$  调整至  $110 \mu\text{H}$ 。随着  $L_r$  的增加,系统主导振荡模式的变化轨迹如图 16 所示。从图 16 中可以看出,随着  $L_r$  的增加,主导振荡模式的阻尼增加,系统稳定性增强,而主导振荡模式的振荡频率几乎保持不变。此时,系统非线性仿真验证结果如图 17 所示,从仿真结果也可以看出随着  $L_r$  的增加,系统稳定性增强,验证了特征值分析的正确性。

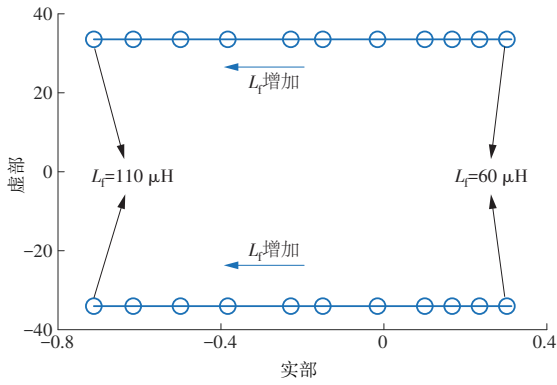


图 16  $L_r$ 变化时的主导振荡模式轨迹

Fig. 16 Trajectory of dominant oscillation modes with  $L_r$  variation

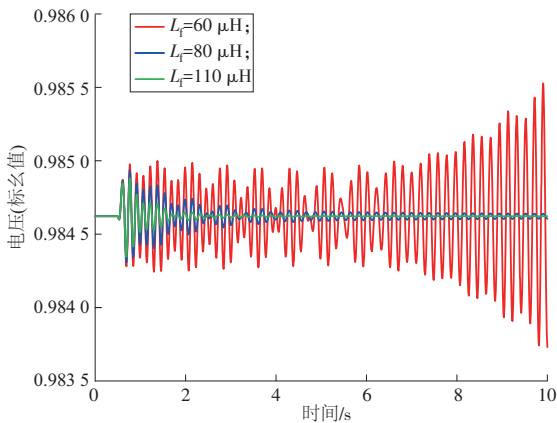


图 17 不同  $L_r$ 下的非线性仿真结果

Fig. 17 Nonlinear simulation results under different  $L_r$

### 3 结论

本文首先建立了2台GFS并联系统的小信号模型,通过特征值分析进一步揭示了GFS控制器和网络参数对系统主导振荡模式的影响,得出了以下结论。

(1)较大的  $H$  和  $D_p$  会增强并联GFM之间的相互作用,导致系统发生振荡。

(2)维持  $P-f$  控制器和  $Q-V$  控制器路径之间的动态匹配表明,在不增加额外阻尼路径的情况下,可以扩大系统的稳定运行区域。

(3)引入瞬态VI路径中的主动阻尼通过变换器电流调节,未能显著改善系统的阻尼特性。

(4)选择合适的  $L_r$  可以有效避免GFS系统之间的相互作用。

该研究量化了控制和网络参数对并联GFS系统相互作用的影响。

### 参考文献:

[1]严文博,黄云辉,王栋,等.基于虚拟母线电压控制的构网型储能变流器稳定性优化研究[J].储能科学与技术, 2024, 13(5): 1532-1541.

YAN Wenbo, HUANG Yunhui, WANG Dong, et al. Investigation of stability optimization of grid-forming energy storage converters based on virtual bus voltage control [J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(5): 1532-1541.

[2]卓超然,辛杰,洪涵卓,等.弱电网条件下并网逆变器阻抗模型的建立方法综述[J].综合智慧能源, 2024, 46(6): 88-101.

ZHUO Chaoran, XIN Jie, HONG Hanzhuo, et al. Review on impedance modeling of grid-connected inverters under weak grid conditions [J]. Integrated Intelligent Energy, 2024, 46(6): 88-101.

[3]郑华,伏睿,张颖,等.构网型储能系统与风力发电的协同控制研究[J].电力信息与通信技术, 2023, 21(11): 48-54.

ZHENG Hua, FU Rui, ZHANG Ying, et al. Research on collaborative control of the grid-forming electrical storage system with the wind power plant [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2023, 21(11): 48-54.

[4]武永强,郭凯,王宇强,等.构网型储能系统并网测试要求及测试实例分析[J].内蒙古电力技术, 2024, 42(2): 8-16.

WU Yongqiang, GUO Kai, WANG Yuqiang, et al. Testing requirements and case analysis of grid-forming energy storage system[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2024, 42(2): 8-16.

[5]朱子民,张锦芳,常清,等.大规模新能源接入弱同步支撑柔直系统的送端自适应VSG控制策略研究[J].中国电力, 2024, 57(5): 211-221.

ZHU Zimin, ZHANG Jinfang, CHANG Qing, et al. Adaptive VSG control strategy of sending end for large-scale renewable energy connected to weakly-synchronized support VSC-HVDC system [J]. Electric Power, 2025, 57(5): 211-221.

[6]RATHNAYAKE D B, AKRAMI M, PHURAILATPAM C, et al. Grid forming inverter modeling, control, and applications [J]. IEEE Access, 2021, 9: 114781-114807.

[7]温春雪,毛健,王鹏,等.基于虚拟同步发电机的构网型光储变流器控制策略研究[J].内蒙古电力技术, 2024, 42(1): 1-8.

WEN Chunxue, MAO Jian, WANG Peng, et al. Research on control strategy of grid-configured photovoltaic storage converters based on VSG [J]. Inner Mongolia Electric Power, 2024, 42(1): 1-8.

[8]王盼宝,王鹏,李坤光,等.电网故障下构网型逆变器动态限流控制策略[J].高电压技术, 2022, 48(10): 3829-3837.

WANG Panbao, WANG Peng, LI Shengguang, et al.

- Dynamic current-limiting control strategy of grid-forming inverter under grid faults [J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(10): 3829–3837.
- [9] 陈薇, 徐佳红, 张亚丽, 等. 基于改进虚拟同步发电机的构网型并联储能逆变器控制研究[J]. *热力发电*, 2024, 5308: 77–84.
- CHEN Wei, XU Jiahong, ZHANG Yali, et al. Research on VSG control of grid-structured parallel fed inverter based on improved virtual synchronous generator [J]. *Thermal Power Generation*, 2024, 53(8): 77–84.
- [10] D'ARCO S, SUUL J A, FOSSO O B. A virtual synchronous machine implementation for distributed control of power converters in Smart Grids [J]. *Electric Power Systems Research*, 2015, 122: 180–197.
- [11] SHUAI Z K, HUANG W, SHEN Z J, et al. Active power oscillation and suppression techniques between two parallel synchronverters during load fluctuations [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(4): 4127–4142.
- [12] 赵金鑫, 苗虹, 曾成碧. 基于改进虚拟同步发电机控制技术的低压微电网功率分配策略[J]. *电力建设*, 2020, 41(7): 42–48.
- ZHAO Jinxin, MIAO Hong, ZENG Chengbi. Microgrid power distribution strategy based on improved control strategy of virtual synchronous generator [J]. *Electric Power Construction*, 2020, 41(7): 42–48.
- [13] ROSSO R, ENGELKEN S, LISERRE M. Analysis of the behavior of synchronverters operating in parallel by means of component connection method (CCM) [C]//2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2018: 2228–2235.
- [14] 邢光正, 吴琛, 陈磊, 等. 电压源变换器接入电网的小扰动稳定机理分析[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(9): 42–52, 193.
- XING Guangzheng, WU Chen, CHEN Lei, et al. Analysis of small disturbance stability mechanism for grid-connected voltage source converter [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(9): 42–52, 193.
- [15] 李立, 王佳明, 张青蕾, 等. 兼顾系统频率稳定性和小干扰稳定性的构网型储能参数优化方法[J]. *电力建设*, 2023, 44(12): 125–135.
- LI Li, WANG Jiaming, ZHANG Qinglei, et al. Parameter optimization method of grid-forming energy storage considering system frequency stability and small signal stability [J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(12): 125–135.
- [16] 张心怡, 杨波. 考虑构网型和跟网型变流器的孤岛微电网小信号稳定性分析[J]. *综合智慧能源*, 2024, 46(2): 12–18.
- ZHANG Xinyi, YANG Bo. Stability analysis on islanded microgrids with grid-forming and grid-following converters [J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2024, 46(2): 12–18.
- [17] 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.
- [18] WANG X F, BLAABJERG F. Harmonic stability in power electronic-based power systems: Concept, modeling, and analysis [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(3): 2858–2870.
- [19] 王玉坤, 张慕婕, 李壮, 等. 构网型直驱风电机组间控制相互作用研究[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(3): 82–90.
- WANG Yukun, ZHANG Mujie, LI Zhuang, et al. Research on control interaction between grid forming direct-drive wind turbines [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(3): 82–90.
- [20] 王海鑫, 刘铭崎, 董鹤楠, 等. 含高比例新能源的电力系统低频振荡分析与抑制综述[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(9): 152–163.
- WANG Haixin, LIU Mingqi, DONG Henan, et al. Review on analysis and suppression of low-frequency oscillation in power system with high penetration of renewable energy sources [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(9): 152–163.
- [21] 邱晓燕, 闫幸, 周毅, 等. 基于自适应虚拟阻抗的构网型与跟网型逆变器主导微网系统无功功率均分控制策略[J]. *电力建设*, 2024, 45(1): 22–32.
- QIU Xiaoyan, YAN Xing, ZHOU Yi, et al. Reactive power sharing control strategy for microgrids dominated by grid-forming and grid-following inverters based on adaptive virtual impedance [J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(1): 22–32.
- [22] 符杨, 陈禹瑾, 季亮, 等. 考虑功率解耦的构网型逆变器的低电压穿越控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(15): 1–13.
- FU Yang, CHEN Yujun, JI Liang, et al. Low voltage ride-through control strategy of a grid-forming inverter considering power decoupling [J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(15): 1–13.
- [23] 叶伟豪, 郭强, 赵兵, 等. 新能源并网换流器功率控制稳定机理分析及改进控制策略[J]. *高电压技术*, 2024, 50(8): 3736–3744.
- YE Weihao, GUO Qiang, ZHAO Bing, et al. Mechanism analysis and improved strategy of power control stability of renewable energy grid-connected converters [J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(8): 3736–3744.
- [24] 龚梓威, 王海风, 陈珏, 等. 直流电压时间尺度下光伏并网控制系统稳定性分析[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(6): 2–13.

- GONG Ziwei, WANG Haifeng, CHEN Yu, et al. Stability analysis of grid-connected photovoltaic generation control system under DC voltage timescale [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(6): 2-13.
- [25]董文凯,王海风.基于小信号模型的风电场同调等值理论[J].南方电网技术,2021,15(11):9-21.
- DONG Wenkai, WANG Haifeng. Coherency-based dynamic equivalent theory of wind farm based on small-signal model [J]. *Southern Power System Technology*, 2021, 15(11): 9-21.
- [26]刘文元,任必兴,李海峰,等.直驱风电场和串补之间的次同步振荡风险[J].电力工程技术,2022,41(4):25-32.
- LIU Wenyuan, REN Bixing, LI Haifeng, et al. Sub-synchronous oscillation risk between PMSG farm and series complement [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(4): 25-32.
- [27]董文凯,杜文娟,王海风.用于振荡稳定性分析的并网风电场动态等效模型[J].中国电机工程学报,2021,41(1):75-87.
- DONG Wenkai, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Dynamic equivalent model of a grid-connected wind farm for oscillation stability analysis [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(1): 75-87.
- [28]李彦,王海风.含并联直驱风电机组并网的风电场多开环模式谐振[J].现代电力,2022,39(1):19-25.
- LI Yan, WANG Haifeng. Multi open-loop mode resonance of wind farm with grid-connected parallel permanent magnet synchronous generators [J]. *Modern Electric Power*, 2022, 39(1): 19-25.

(本文责编:赵赫)

收稿日期:2024-08-28;修回日期:2024-11-12  
 上网日期:2025-01-06;附录网址:www.ienergy.cn

#### 作者简介:

曾蕴睿(1997),女,工程师,硕士,从事电力规划、储能稳定性等方面的研究,zengyunrui97@163.com;

王泽祺\*(1996),男,工程师,硕士,从事配电网精准投资、储能稳定性等方面的研究,295353451@qq.com;

许博(1991),男,工程师,硕士,从事电力系统运行、电磁兼容等方面的研究,15801486809@qq.com;

蒋天雨(1992),男,工程师,从事电力系统运行、需求响应和频率调节等方面的研究,360166898@qq.com;

李犀郡(1996),女,工程师,从事信息系统安全管理方面的研究,daphne\_epic@163.com;

李亭奕(1996),女,工程师,从事配电网需求侧响应方面的研究,651558105@qq.com。

\*为通信作者。