

多虚拟同步机并联系统的功频振荡建模与分析

黎俊铭¹, 石荣亮^{1,2}, 李军徽², 白馨元¹, 赖振晖¹

(1. 桂林理工大学 广西高校先进制造与自动化技术重点实验室, 广西 桂林 541006; 2. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012)

摘要:多虚拟同步机(VSG)并联系统存在功率与频率振荡风险,威胁着系统运行的安全性和稳定性。现有小信号建模方法结构复杂,难以全面揭示系统在不同扰动下的功频响应特性。为此,首先基于机电比拟原理,在不同扰动条件下构建了多VSG并联系统的机械导纳模型,推导了系统功频响应的传递函数。其次,将该传递函数的频域响应结果与MATLAB/Simulink时域仿真结果进行对比分析,揭示并验证了多VSG并联系统在不同参数下的功频振荡特性及其变化规律。最后,通过2台100 kVA-VSG并联系统的实验,进一步验证了所建机械导纳模型和相关理论分析的正确性。

关键词:多虚拟同步机并联系统;功频响应;机械导纳模型;传递函数;功频振荡

0 引言

在国家“双碳”目标推动下,电力系统呈现新能源高占比与电力电子设备高渗透率的“双高”特征^[1-2]。虚拟同步机(Virtual Synchronous Generator, VSG)通过模拟传统同步发电机(Traditional Synchronous Generator, TSG)的运行特性,其具备惯量支撑和主动调频能力,有助于提升系统稳定性^[3-4]。然而,由于VSG与TSG控制机理相似,多VSG并联系统易产生类似同步机的功频振荡,从而威胁系统稳定^[5-6]。因此,有必要建立合适的数学模型,以分析多VSG并联系统在不同扰动下的功频响应特性。

现有多VSG并联系统建模方法主要包括时域建模^[7]和频域建模^[8]。时域建模通常基于状态空间模型,能够较完整地描述系统动态过程。文献[9]建立了考虑延时影响的多VSG全阶状态空间模型;文献[10]提出了 dq 坐标系下的简化状态空间模型;文献[11]基于小信号线性化方法分析了孤岛微电网中多VSG系统的动态特性及振荡抑制策略。然而,状态空间模型依赖于系统拓扑和参数的确定性,当系统结构或参数发生变化时需重新建模,且随着并联VSG数量增加,模型阶数与计算复杂度显著提升。

相比已有建模方法,频域建模通过建立阻抗或导纳模型可有效简化分析过程。文献[12]指出,VSG内环电压、电流控制带宽远高于功率外环,可分别进行频域建模。文献[13-15]基于小信号理论构建阻抗模型,分析了控制参数、锁相环参数及并联系统谐振特性等问题,并在新能源并网系统稳定性评估和振荡机理分析中得到广泛应用^[16-17]。但阻抗模型主要描述电压与电流关系,难以直接反映有功功率与频率的动态特性,因而在分析具有频率下垂特性的VSG系统时存在一定局限^[18-19]。

为更直接刻画功率与频率之间的动态关系,导纳建模方法逐渐受到关注。文献[20]提出了用于稳定性分析的 P/ω 导纳模型,但其主要适用于负载扰动情形。文献[21]进一步拓展了 P/ω 导纳模型,使其能够同时描述有功指令扰动与负载扰动下的动态响应,但其对不同控制策略的适用性仍有待研究。文献[22]基于机电比拟原理,将转子运动方程与RLC(R,L,C分别代表电阻、电感与电容)电路类比,建立了可同时描述输入转矩扰动和负载变化影响的广义导纳模型,具有明确的物理意义,但在多VSG并联系统中的适用性仍需进一步验证。

鉴于此,亟需一种模型结构简洁、能全面描述多VSG并联系统动态响应特性且具有良好扩展性的建模方法。本文基于机电比拟原理建立多VSG并联系统的机械导纳模型,并通过功频响应传递函数的频域分析,揭示不同参数对系统功频振荡特性的影响规律。最后,通过仿真与实验结果对比分析,验证了所提模型的有效性及其理论推导的准确性。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52467022);广西自然科学基金资助项目(2025GXNSFAA069219)

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (52467022); the Guangxi Natural Science Foundation (2025GXNSFAA 069219)

1 VSG 电路拓扑及其控制原理

图1展示了所研究VSG的电路拓扑结构及其控制原理^[6]。VSG通过模拟TSG一次调压方程与转子运动方程的方式,可有效提升新型电力系统的电压调节能力与频率稳定性。其中: U_{dc} 为直流母线电压, T 为隔离变压器, U_{PCC} 为公共连接点电压幅值, L_f 和 C_f 分别为交流滤波电感、滤波电容, $Z_{line} \approx X = \omega_0 L_{line}$ 为线路等效阻抗(此处忽略电阻, X 为线路等效阻抗), L_{line} 为输电线路等效电感, u_{abc} 和 i_{abc} 分别为输出三相电压、电流, S_1 为交流母线开关, ω_0 和 ω 分别为额定角频率、角频率, P_m , P_{ref} 和 P_e 分别为机械功率、有功参考和有功功率, Q_{ref} 和 Q_e 分别为无功参考、无功功率, E_0 和 E 分别为额定电压幅值和输出电压幅值, k_q 和 k_ω 分别为一次调压参数、一次调频参数, J 和 D 分别为虚拟惯量与虚拟阻尼, s 为拉普拉斯算子, θ 为输出相角。

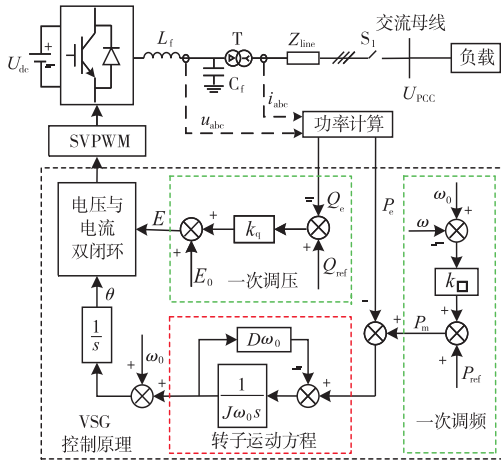


图1 VSG的电路拓扑与功频控制原理

Fig.1 Circuit topology and power-frequency control principle of VSG

本文基于电压与电流内环的响应速度显著高于功率外环,在分析有功功率振荡时可以忽略内环对外环的影响^[22-23];另外,当线路等效阻抗呈感性特性时,VSG的有功-频率控制与无功-电压控制可实现自适应解耦^[12,24]。因此,本研究将不再讨论上述内容。

2 多VSG并联系统结构与建模

2.1 VSG 功频小信号模型的等效二端网络

为了解决传统模型分析复杂且物理意义不直观的局限性,本文提出并构建了一种结构简洁、能全面描述多VSG并联系统动态响应特性且具有良好的扩展性的导纳模型。由图1可得VSG并入交流母

线时的有功闭环等效控制结构^[25-26]如图2所示, K 为VSG的同步电压系数, ω_e 为公共连接点角频率, δ 为功率因数角, ΔP_{ref} 为VSG参考有功功率设定值的扰动分量, ΔP_e 为VSG输出电磁功率的扰动分量, $\Delta \omega$ 为VSG转子角频率的扰动分量, $\Delta \omega_e$ 为公共连接点电压角频率的扰动状态, D 为VSG虚拟阻尼系数, J 为VSG虚拟转动惯量, $\Delta \delta$ 为VSG转子角功率偏离其稳定值的微小扰动量。

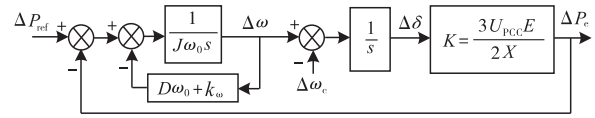


图2 VSG与交流母线连接的有功闭环控制结构

Fig.2 Active power closed-loop control structure for grid-connected VSG

由图2可知,VSG的转子运动方程为:

$$\begin{cases} \Delta P_{ref} - \Delta P_e - (D\omega_0 + k_\omega)\Delta\omega = J\omega_0 \frac{d\Delta\omega}{dt} \\ \frac{1}{K} \frac{d\Delta P_e}{dt} = \Delta\omega - \Delta\omega_e \end{cases} \quad (1)$$

在图3所示的电路网络中, i_s 为电流源, u 为支路端电压, L 为电感, C 为电容, R 为电阻, i_L 为电感电流, u_c 为端电压,它们存在如式(2)所示的电压、电流关系。此电路模型为下文应用机电比拟原理提供了明确的数量形式和拓扑参照。

$$\begin{cases} i_s - i_L - \frac{1}{R}u = C \frac{du}{dt} \\ L \frac{di_L}{dt} = u - u_c \end{cases} \quad (2)$$

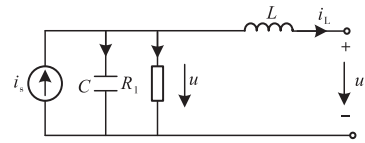


图3 机电比拟的电路参照模型

Fig.3 Electrical reference model for electromechanical analogy

依据表1的机电比拟原理类比关系^[24],可得到图4所示的等效功频特性模型。其中, Y_a , Y_b 为导纳参数。基于该等效网络,可进一步运用电路理论对系统的功频特性进行分析。

表1 机电类比关系

Table 1 Electromechanical analogy

机械网络	RLC电路
ΔP	i
$\Delta \omega$	u
J	C
D, k_ω	$1/R$
K	$1/L$

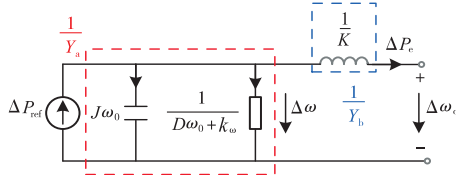


图4 等效功频特性模型

Fig.4 Equivalent model for power-frequency characteristic analysis

本文在 MATLAB/SIMULINK 平台上分别搭建了图1的传统 VSG 模型与图4等效功频特性模型,并对这2个模型施加扰动:在5 s时进行有功功率阶跃;在8 s时进行电网频率阶跃。图5给出了2种模型在该扰动下的仿真结果对比,说明所建机械导纳模型具有较高的精度。

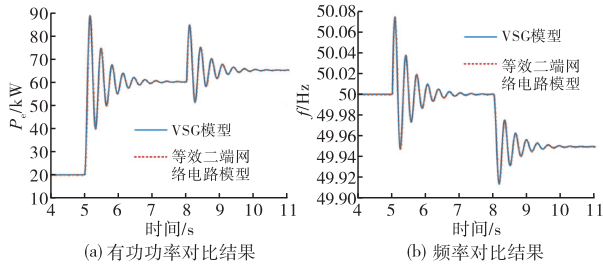


图5 等效功频特性模型的仿真验证

Fig.5 Simulation verification of equivalent power-frequency characteristic model

2.2 多 VSG 并联系统机械导纳模型

图6所示为将图4依次连接后的多VSG并联系统简化模型。其中: P_c 为负载功率。为了建立可适用于多种控制策略的导纳模型,定义第一导纳 Y_{am} 为从第 m 台VSG的参考有功功率设定值的扰动分量 ΔP_{refm} 到第 m 台VSG的转子角频率的扰动分量 $\Delta\omega_m$ 的开环传递函数的倒数,第二导纳 Y_{bm} 为从 $\Delta\omega_m$ 与公共连接点电压角频率的扰动状态的差($\Delta\omega_m - \Delta\omega_c$)到 ΔP_{em} 的开环传函, ($m \in [1, n]$),其具体表达式如式(3)所示。

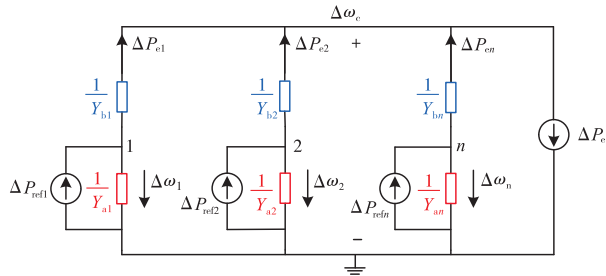


图6 多VSG并联系统的机械导纳简化模型

Fig.6 Simplified mechanical admittance model of a parallel multiple-VSG system

$$\begin{cases} Y_a = \frac{\Delta P_{ref}}{\Delta \omega} = J\omega_0 s + D\omega_0 + k_\omega \\ Y_b = \frac{\Delta P_e}{\Delta \omega - \Delta \omega_c} = \frac{K}{s} \end{cases} \quad (3)$$

依据图6所示的节点编号(1,2,...,n),系统节点导纳矩阵 Y 如式(4)所示。对于系统中的第 m 台VSG,其在节点导纳矩阵中对应的非零元素应如式(5)所示。

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & 0 & Y_{1(n+1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & Y_{nn} & Y_{n(n+1)} \\ Y_{(n+1)1} & \cdots & Y_{(n+1)n} & Y_{(n+1)(n+1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_1(s) \\ \vdots \\ \Delta \omega_n(s) \\ \Delta \omega_c(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_{ref1}(s) \\ \vdots \\ \Delta P_{refn}(s) \\ \Delta P_c(s) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{cases} Y_{mm} = Y_{am} + Y_{bm} \\ Y_{(n+1)(n+1)} = \sum_{i=1}^n Y_{bi} \\ Y_{m(n+1)} = Y_{(n+1)m} = -Y_{bm} \end{cases} \quad (5)$$

利用所构建的系统节点导纳矩阵,并结合图6,可计算第 m 台VSG的有功功率 P_{em} ,其表达式如式(6)所示:

$$\Delta P_{em}(s) = Y_{bm}(\Delta \omega_m - \Delta \omega_c) = Y_{bm} \frac{\Delta P_{refm} - Y_{am} \Delta \omega_c}{Y_{am} + Y_{bm}} \quad (6)$$

式中: ω_m 为第 m 台VSG角频率。

结合式(4)与式(6)并进行化简,可得到第 m 台VSG的有功功率 P_{em} 以及角频率 ω_m 的具体表达,如式(7)一式(9)所示。其中下标 i 表示并系统除第 m 台VSG自身外的任意一台VSG。

$$\begin{cases} \Delta P_{em} = M_{pm} \Delta P_{refm} - \sum_{k=1, k \neq m}^n F_{pm,k} \Delta P_{refk} - S_{pm} \Delta P_c \\ \Delta \omega_m = M_{\omega m} \Delta P_{refm} + \sum_{k=1, k \neq m}^n F_{\omega m,k} \Delta P_{refk} + S_{\omega m} \Delta P_c \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} M_{pm}(s) = \frac{Y_{bm}}{Y_{am} + Y_{bm}} \frac{\sum_{i=1, i \neq m}^n Y_{ai} \| Y_{bi}}{\sum_{i=1}^n Y_{ai} \| Y_{bi}} \\ F_{pm,k}(s) = \frac{Y_{am} Y_{bm}}{Y_{am} + Y_{bm}} \frac{Y_{bk} / (Y_{ak} + Y_{bk})}{\sum_{i=1}^n Y_{ai} \| Y_{bi}}, (k \in [1, n], k \neq m) \end{cases} \quad (8)$$

$$S_{\omega m}(s) = \frac{Y_{am} Y_{bm}}{Y_{am} + Y_{bm}} \frac{1}{\sum_{i=1}^n Y_{ai} \| Y_{bi}}$$

$$M_{\omega m}(s) = \frac{1}{Y_{am} + Y_{bm}} \frac{Y_{bm} Y_{bm} / (Y_{am} + Y_{bm}) + \sum_{i=1, i \neq m}^n Y_{ai} \| Y_{bi}}{\sum_{i=1}^n Y_{ai} \| Y_{bi}}$$

$$F_{\omega m,k}(s) = \frac{Y_{bm}}{Y_{am} + Y_{bm}} \frac{Y_{bk} / (Y_{ak} + Y_{bk})}{\sum_{i=1}^n Y_{ai} \| Y_{bi}}, (k \in [1, n], k \neq m) \quad (9)$$

$$S_{\omega m}(s) = \frac{Y_{bm}}{Y_{am} + Y_{bm}} \frac{1}{\sum_{i=1}^n Y_{ai} \| Y_{bi}}$$

式中: M_{pm} , $M_{\omega m}$ 分别为自身有功参考对自身有功功率、角频率的响应系数; $F_{pm,k}$, $F_{\omega m,k}$ 分别为其他VSG有功参考对自身有功功率、角频率的响应系数; S_{pm} , $S_{\omega m}$ 分别为负载对自身有功功率、角频率的响应系数。

由于每类响应系数对应的特征多项式都存在差异,这表明并联VSG在不同扰动影响下的动态响应各不相同。通过分析各个响应系数的传递函数,即可深入探讨多VSG并联系统中不同扰动下功频振荡的形成机理及特性,为系统动态稳定性研究提供理论支持和分析依据。

3 多VSG并联系统功频振荡特性分析

在忽略各VSG参数差异的前提下,基于第2.2.2节的式(7),本节将采用频域方法对多VSG并联系统在不同参数下的功频振荡特性进行分析。图7与图8分别为第 m 台VSG有功功率 P_{em} 响应3类系数与角频率 ω_m 响应3类系数的伯德图。各台并联VSG的参数如表2所示。

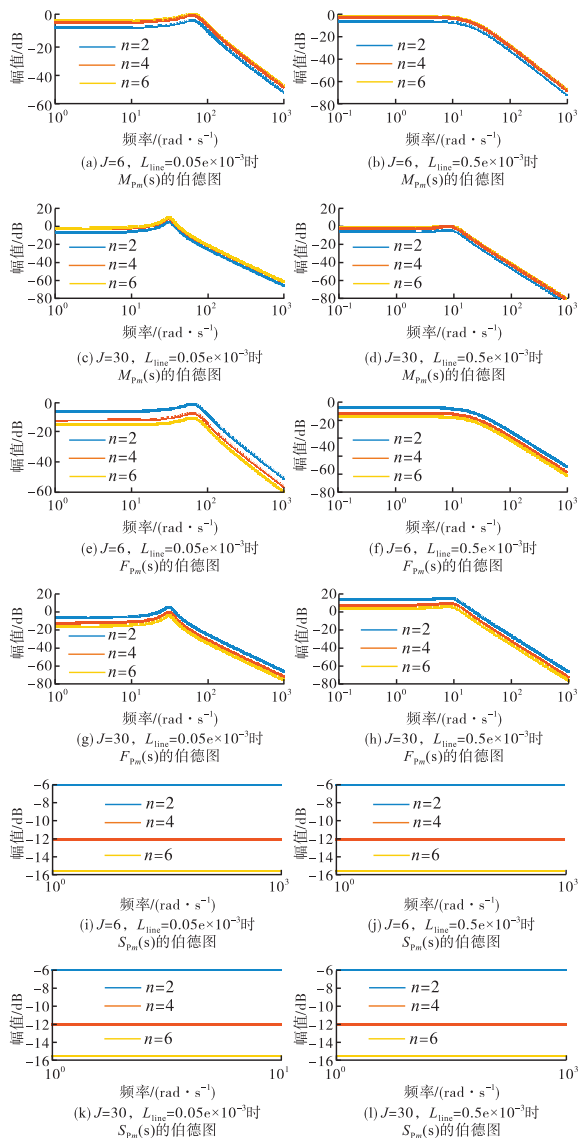


图7 有功功率响应系数的伯德图

Fig. 7 Bode diagram of active power response coefficient

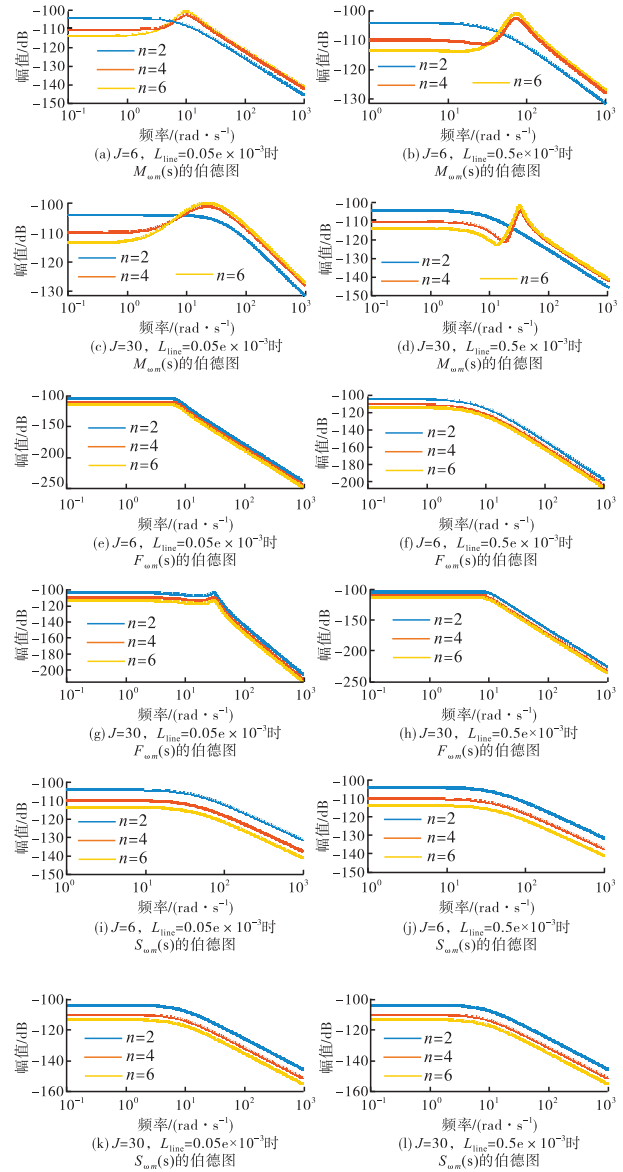


图8 角频率响应系数的伯德图

Fig. 8 Bode diagram of angular frequency response coefficient

表2 VSG关键运行参数

Table 2 Key operating parameters of VSG

参数	数值
U_{PCC}/V	311
E/V	311
$\omega_0/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	314.16
L_f/mH	0.56
$C_f/\mu\text{F}$	270
$D/(\text{J} \cdot \text{rad}^{-1})$	50.66
$k_q/(\text{V} \cdot \text{Var}^{-1})$	1.4×10^{-4}
$k_\omega/(\text{J} \cdot \text{rad}^{-1})$	15 915.5

根据图7(a)—图7(d)可以看出,第 m 台VSG的有功功率在自身有功参考扰动时,随着并联VSG

数量的增加,系数 $M_{pm}(s)$ 的伯德图幅值曲线增益逐渐增大、谐振峰值上升,进而导致第 m 台VSG有功功率的振荡与超调程度加剧。当保持 J 不变,线路电感 L_{line} 增加时,系数 $M_{pm}(s)$ 的谐振峰逐渐减小,表明第 m 台VSG有功功率的振荡与超调随 L_{line} 的增加而减小。当保持 L_{line} 不变, J 增加时,谐振峰进一步上升,说明此时第 m 台VSG有功功率的振荡与超调会随 J 的增加而增加。根据图7(e)—图7(h)可以看出,系数 $F_{pm,k}(s)$ 的伯德图变化趋势除VSG台数变化外,与系数 $M_{pm}(s)$ 的伯德图变化趋势相同,即在第 k 台VSG有功参考扰动时,增加VSG台数、增加 L_{line} 与减小 J 能抑制第 m 台VSG的有功功率的振荡与超调。根据图7(i)—图7(l)可以看出,随着并联VSG数量的增加,系数 $S_{pm}(s)$ 的伯德图幅频曲线向下平移。在 J 与 L_{line} 变化时, $S_{pm}(s)$ 的伯德图基本无变化。说明第 m 台VSG的有功功率在负载扰动时大小受台数影响,基本不受 J 与 L_{line} 变化的影响。

根据图8(a)—图8(d)可以看出,第 m 台VSG的角频率在自身有功参考扰动时,随着并联VSG数量的增加,系数 $M_{om}(s)$ 的谐振峰幅值上升,使得第 m 台VSG角频率的振荡与超调变大。在保持 J 不变, L_{line} 增加与保持 L_{line} 不变, J 增加时,系数 $M_{om}(s)$ 的幅相曲线波动性加大,说明增加 J 与 L_{line} 对第 m 台VSG角频率的影响较大。如根据图8(e)—图8(h)可以看出,第 m 台VSG的角频率在第 k 台VSG有功参考扰动时,增加VSG台数与保持 J 不变, L_{line} 增加时,系数 $F_{om,k}(s)$ 的幅频曲线谐振峰幅值减小。保持 L_{line} 不变, J 增加时,系数 $F_{om,k}(s)$ 的幅频曲线谐振峰值变大,说明第 m 台VSG角频率的振荡与超调随VSG台数的增加、 L_{line} 的增加与 J 的减小而减小。根据图8(i)—图8(l)可以看出,系数 $S_{om}(s)$ 的伯德图无谐振峰,随着并联VSG数量的增加,幅相曲线向下平移。在保持 L_{line} 不变, J 增加时,系统伯德图转折频率前移,带宽变小。在保持 J 不变, L_{line} 增加时,系统伯德图基本无变化。说明在负载扰动时,第 m 台VSG角频率既无超调也无振荡,幅值受台数影响,响应速度随 J 增加而变慢,基本不受 L_{line} 变化的影响。

4 仿真与实验验证

4.1 仿真验证

为验证所述机械导纳模型分析多VSG并联系

统的正确性,基于MATLAB/SIMULINK搭建仿真平台,该仿真平台包含6台VSG并联运行。系统参数设置信息参见表2。

在初始时刻,2台、4台、6台VSG并联共同带动90 kW的阻性负载,系统保持稳定运行。在第5 s时,施加额外30 kW的阶跃阻性负载,并于5.6 s将该负载切除,使系统再次恢复稳定。随后,在第6 s时,第1台VSG的有功功率指令突然增加20 kW。基于上述情况,设置了如下仿真工况以分析系统动态响应。

设置仿真工况1: $J=6, L_{line}=0.05$;设置仿真工况2: $J=6, L_{line}=0.5$;设置仿真工况3: $J=30, L_{line}=0.05$;设置仿真工况4: $J=30, L_{line}=0.5$ 。在不同参数下第 m 台VSG的 P_{em} 及 f_m 的仿真结果对比如图9所示。

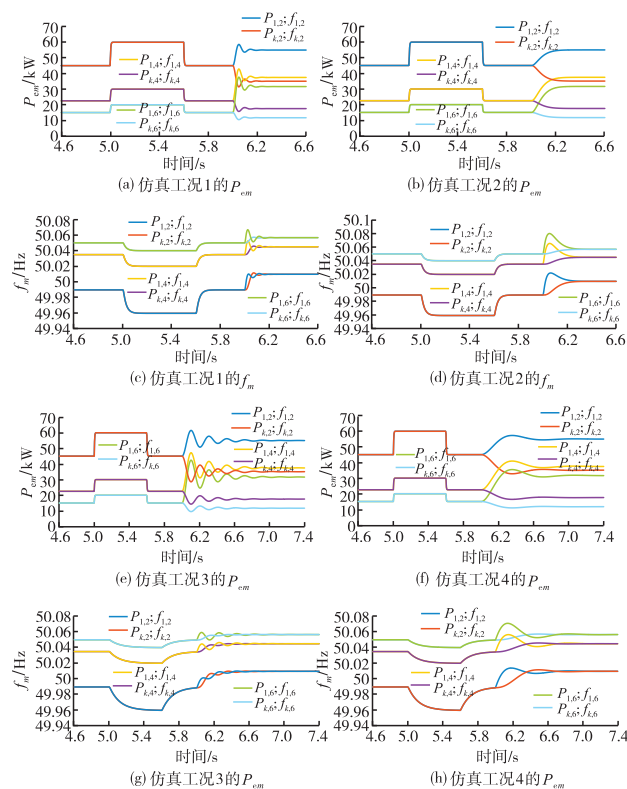


图9 仿真结果对比

Fig.9 Comparison of simulation results

由图9(图中不同颜色曲线分别对应2台、4台与6台VSG并联运行工况)可以看出,在第5 s及5.6 s的负载阶跃扰动过程中,由于不考虑各台VSG的差异性,无论系统为2台、4台还是6台VSG并联运行,所有VSG的有功功率与频率曲线几乎完全重合,表现出高度一致的动态响应。负载扰动阶段, L_{line} 的增大对 f_m 的影响很小,而 J 的增大则会显著延长 f_m 的响应时间。在第7 s时,由于第1台VSG有功指令突变,参数变化下第 m 台VSG的 P_{em} 与 f_m 响应均出现一

定程度的振荡与超调。具体而言,随着台数的增加,系统的 P_{em} 超调幅值略有减小,而 f_m 超调幅值增加。当保持 J 不变, L_{line} 由0.05增加至0.5, P_{em} 的振荡与超调幅值减小,而 f_m 的振荡减小,超调幅值加大;当保持 L_{line} 不变, J 由6增加至30, P_{em} 的振荡与超调幅值加剧, f_m 超调幅值减小、振荡加剧,且二者的调节时间延长。

综上所述,在负载扰动时,系统 P_{em} 基本不受其他参数变化影响,而 f_m 受 J 影响, J 越大调节时间越长;在第1台VSG有功指令扰动时,增加 n 会起到一定的阻尼作用,可以减小功率超调,但会加剧频率超调,增加 L_{line} 也会起到一定的阻尼作用,有助于减小扰动引起的功率与频率超调,而 J 的增大虽然增强了系统的惯性响应,但同时也可能加剧短时内的功率与频率波动并减小响应速度,应在设计中合理权衡。

4.2 实验验证

为进一步验证所述机械导纳模型分析多VSG并联系统的正确性,搭建图10所示的2台VSG并联系统的实验平台^[26]。该实验平台主要由2台100 kVA-VSG, 2台为100 kVA-VSG提供稳定直流电压的双向可控整流器、1套250 kW电阻负载箱与配电网等组成。且实验参数与4.1节中的仿真所用参数保持一致,并设置2台100 kVA-VSG在初始阶段共同拖动90 kW的负载稳定运行,在4.6 s时额外投入30 kW的负载,并在6.6 s时切除。

设置实验工况1: $J=6, L_{line}=0.05$;设置实验工况2: $J=6, L_{line}=0.5$;设置实验工况3: $J=30, L_{line}=0.05$;设置实验工况4: $J=30, L_{line}=0.5$ 。



图10 微网系统实验平台

Fig.10 Experimental platform of microgrid system

图11为2台100 kVA-VSG在4种实验工况下 P_{em} 与 f_m 的实验对比结果。由图11可以看出,当 L_{line} 变大时,系统的 P_{em} 与率 f_m 基本无变化,而在 J 变大时系统 f_m 响应速度变慢, P_{em} 则基本无变化。实验结果与图7、图8与图9所示的频域分析、仿真对比结果一一对应。

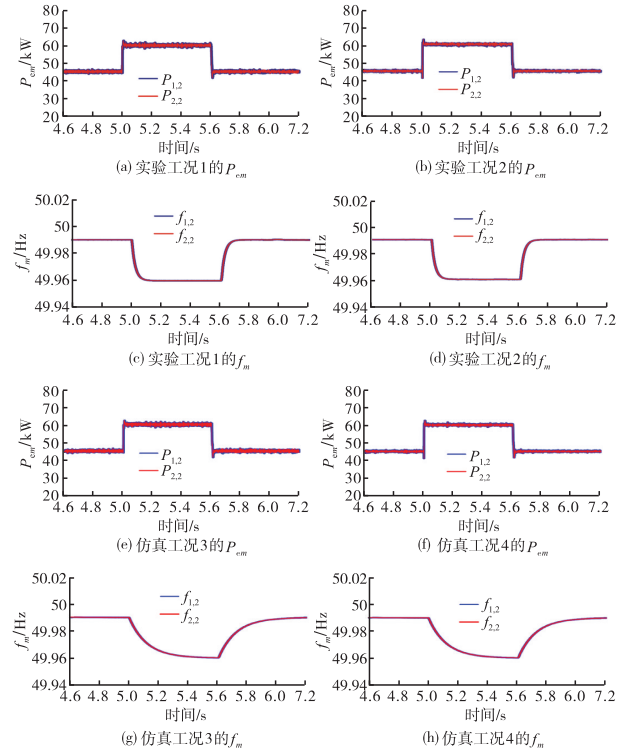


图11 实验与仿真结果对比

Fig. 11 Comparison of experimental and simulation results

5 结论

为揭示多VSG并联系统的功频响应特性,本文基于机电比拟原理,提出并建立多VSG并联系统的机械导纳模型。通过频域仿真与实验验证,得到以下主要结论:

- 1)通过所建立的多VSG并联系统机械导纳模型,可以便捷地推导出各台VSG的有功功率与角频率的传递函数。
- 2)在有功指令扰动下,增加VSG并联台数能减小系统有功功率超调,增加线路等效电感有助于抑制系统功频振荡,但均会增加系统频率的超调,增加虚拟惯量则会加剧系统功频振荡;在负载扰动下,系统有功功率响应性能受参数的影响较小,增加虚拟惯量会延长频率的响应时间。

3)所建机械导纳模型可方便应用于多VSG并联系统领域的功频振荡特性分析和响应性能优化方面的研究。

值得指出的是,本研究所提模型主要在并联系统下进行了建模与验证。因此,未来研究将进一步扩展该模型在不同工况与控制策略下的统一建模。

参考文献

- [1] 陶劲宇,秦川,金宇清,等.面向新型电力系统的负荷模型研究综述[J].电力系统保护与控制,2025,53(5):168-187.
TAO Jinyu, QIN Chuan, JIN Yuqing, et al. A review of load models for new power systems[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(5): 168-187.
- [2] 王文坚,陈飞雄,林世琦.新型电力系统下调频容量需求计算与储-荷调频方法研究综述[J].智慧电力,2025,53(12):1-12.
WANG Wenjian, CHEN Feixiong, LIN Shiqi. A review of frequency regulation capacity demand calculation and energy storage-load frequency regulation methods in new-type power systems[J]. Smart Power, 2025, 53(12): 1-12.
- [3] 石荣亮,黎俊铭,董政,等.构网型虚拟同步机中暂态阻尼的作用、实现与研究前景分析[J].东北电力大学学报,2025,45(1):22-34.
SHI Rongliang, LI Junming, DONG Zheng, et al. Analysis of the role, realization and research prospects of transient damping in grid-forming virtual synchronous generator[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2025, 45(1): 22-34.
- [4] 王雪,刘林,卓庆东,等.基于虚拟惯量控制的新型电力系统功率差前馈振荡抑制方法[J].中国电力,2024,57(4):68-76.
WANG Xue, LIU Lin, ZHUO Qingdong, et al. Power difference feed-forward oscillation suppression method for new power system based on virtual inertial control[J]. Electric Power, 2024, 57(4): 68-76.
- [5] FU S Q, SUN Y, LI L, et al. Power oscillation suppression in multi-VSG grid by adaptive virtual impedance control[J]. IEEE System Journal, 2022 16(3): 4744-4755.
- [6] 石荣亮,兰才华,张群英,等.储能VSG并联组网系统的有功振荡特性分析及其改进策略[J].电力自动化设备,2024,44(5):51-57.
SHI Rongliang, LAN Caihua, ZHANG Qunying, et al. Review of virtual oscillator control techniques for parallel operation of inverters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(5): 51-57.
- [7] MD A H, HEMANSHU R P, et al. Evolution of microgrids with converter-interfaced generations: Challenges and opportunities[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019 109: 160-186.
- [8] 秦本双,徐永海.多虚拟同步机并网系统功频振荡模态分析[J].中国电机工程学报,2021,41(19):6570-6581.
QIN Benshuang, XU Yonghai. Modal analysis of multi-virtual synchronous machine grid-connected power-frequency oscillation [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(19): 6570-6581.
- [9] 涂春鸣,谢伟杰,肖凡,等.多虚拟同步发电机并联系统控制参数对稳定性的影响分析[J].电力系统自动化,2020,44(15):77-86.
TU Chunming, XIE Weijie, XIAO Fan, et al. Influence analysis of control parameters of parallel system with multiple virtual synchronous generators on stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15): 77-86.
- [10] WANG R, WANG Y B, ZHANG P J, et al. System modeling and robust stability region analysis for multi-inverters based on VSG[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2024, 12(6): 6042-6052.
- [11] LI X P, HUANG S, WANG Z L, et al. Decentralized frequency restoration and power oscillation damping control for islanded microgrids with multiple VSGs[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2025, 13(2): 564-573.
- [12] 石荣亮,兰才华,王国斌,等.基于有功前馈补偿的储能VSG并网有功振荡抑制策略[J].电力系统保护与控制,2023,51(14):118-126.
SHI Rongliang, LAN Caihua, WANG Guobin, et al. Grid-connected active power oscillation suppression strategy of an energy storage VSG based on active power feed-forward compensation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 118-126.
- [13] 冯夏云,汪飞,李玉菲,等.下垂控制逆变器输出阻抗抗外特性建模及参数敏感性分析[J].中国电机工程学报,2020,40(21):7012-7022.
FENG Xiayun, WANG Fei, LI Yufei, et al. Modelling and sensitivity analysis for the output impedance profile of droop controlled inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 7012-7022.
- [14] 王颖杰,刘涵,张箫,等.多逆变器交流分布式并联系统谐波交互分析方法[J].电力系统自动化,2025,49(5):164-175.
WANG Yingjie, LIU Han, ZHANG Xiao, et al. Harmonic interaction analysis method for AC distributed parallel system with multiple inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(5): 164-175.
- [15] WU W H, CHEN Y D, ZHOU L M, et al. Sequence impedance modeling and stability comparative analysis of voltage-controlled VSGs and current-controlled VSGs[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 6460-6472.
- [16] HONG L C, SHU W T, WANG J H, et al. Harmonic resonance investigation of a multi-inverter grid-connected system using resonance modal analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 63-72.
- [17] SUN K, YAO W, FANG X M, et al. Impedance modeling and stability analysis of grid-connected DFIG-based wind farm with a VSC-HVDC[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1375-1390.
- [18] WANG S K, LIU Z, LIU J J, et al. Small-signal modeling and stability prediction of parallel droop-controlled inverters based on terminal characteristics of individual inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 1045-1063.
- [19] 文天舒,张纯江,张恺轩,等.异构变流器并联系统全频段振荡抑制策略研究[J].高压电器,2025,61(11):118-128.
WEN Tianshu, ZHANG Chunjiang, ZHANG Kaixuan, et al. Research on full-band oscillation suppression strategy for hybrid grid-forming/grid-following converter systems[J]. High Voltage Engineering, 2025, 61(11): 118-128.

- [20] 张平,蔡环宇,石健将,等.应用 $P/w(Q/E)$ “导纳”的逆变器并联系统稳定性分析方法[J].中国电机工程学报,2016,36(9):2486-2493.
- ZHANG Ping, CAI Huanyu, SHI Jianjiang, et al. Stability analysis of parallel inverter systems using a $P/w(Q/E)$ “admittance” [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 26(9): 2486-2493.
- [21] 颜湘武,贾焦心,王德胜,等.基于 P/ω “导纳”的并联虚拟同步机功频响应建模与分析[J].电工技术学报,2020,35(15):3191-3202.
- YAN Xiangwu, JIA Jiaoxin, WANG Desheng, et al. Modeling and analysis of active power-frequency response of parallel VSGs using a P/ω “admittance” [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(15): 3191-3202.
- [22] 兰征,王海晖,曾进辉,等.引入分散互阻尼暂态补偿的多VSG系统振荡抑制策略[J].智慧电力,2024,52(10):1-8.
- LAN Zheng, WANG Haijun, ZENG Jinhui, et al. Oscillation suppression strategy for multi-vsg system with decentralized mutual damping transient compensation[J]. Smart Power, 2024, 52(10): 1-8.
- [23] 王杨,廖鹏,杨孟凌,等.多类型无功控制下VSG的有功响应特性分析与功率耦合强度量化[J].智慧电力,2025,53(10):61-69.
- WANG Yang, LIAO Peng, YANG Mengling, et al. Analysis of active power response characteristics and quantification of power coupling strength in VSG under multiple types of reactive power control[J]. Smart Power, 2025, 53(10): 61-69.
- [24] FIRESTONE F A. A new analogy between mechanical and electrical systems[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1933, 4(3): 249-267.
- [25] 秦本双,徐永海,贾焦心.基于机械导纳法的SGs/VSGs转矩-频率动力学建模与分析[J].中国电机工程学报,2020,40(21):6903-6913.
- QIN Benshuang, XU Yonghai, JIA Jiaoxin. Modeling and analysis of SGs/VSGs torque-frequency dynamics based on mechanical admittance method[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6903-6913.
- [26] LIANG C F, SHI R L, JU C W, et al. Small-signal modeling and characteristic comparative analysis for a single grid-connected grid-forming VSG with full-order and second-order[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2024, 59: 101879.

(责任编辑 杨海波)

收稿日期:2025-06-07; 修改日期:2026-04-07

作者简介:黎俊铭(1999),男,广西梧州人,硕士研究生,主要研究方向为分布式发电及其控制技术。E-mail:2120231336@glut.edu.cn

石荣亮(1987),男,通信作者,上海人,博士,副教授,主要研究方向为分布式发电技术、虚拟同步机应用与控制技术。E-mail:shirl163@163.com

Modeling and Analysis of Power-frequency Oscillation in Multi-virtual Synchronous Generator Parallel Systems

LI Junming¹, SHI Rongliang^{1,2}, LI Junhui², BAI Xinyuan¹, LAI Zhenhui¹

(1.Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Automation Technology in Guangxi Universities, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China; 2.Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education(Northeast Electric Power University) Jilin 132012, China)

Abstract: Multi-virtual synchronous generator (VSG) parallel systems face the risk of power and frequency oscillations, which threaten the safety and stability of system operation. Existing small-signal modeling methods are structurally complex and cannot fully reveal the power-frequency response characteristics of the system under different disturbances. To address this issue, first, based on the electromechanical analogy principle, a mechanical admittance model of a multi-VSG parallel system is constructed under different disturbance conditions, and the transfer function of the system's power-frequency response is derived. Second, the frequency-domain response results based on this transfer function are compared and analyzed with time-domain simulation results from MATLAB/Simulink, revealing and validating the power-frequency oscillation characteristics and their variation laws of the multi-VSG parallel system under different parameters. Finally, experiments on a two-unit 100 kVA VSG parallel system further verify the correctness of the established mechanical admittance model and the associated theoretical analysis.

Key words: multi-virtual synchronous generator parallel system; power-frequency response; mechanical admittance model; transfer function; power-frequency oscillation