



Cooperative Adaptive Control of Multi-Parameter Based on Dual-Parallel Virtual Synchronous Generators System (IEEE Transactions on Energy Conversion)

作者：王振浩 孟繁宇 张越 王尉 李国庆 葛津铭



目录

- 1、研究意义和现状
- 2、研究技术路线和具体步骤
- 3、数学模型的推导及仿真模型的搭建
- 4、仿真比对结果及其半实物验证

2023/7/4



1、研究意义和现状

高比例新能源接入电网，电力系统逐渐从集中式发电转变为分布式发电，由于传统同步发电机容量占比减少，传统逆变器缺乏传统电机所具有惯量和阻尼，导致电力系统更容易受到功率波动和系统故障的影响，电力系统将会面临严重的稳定性问题。

传统VSG控制策略	单一参数调整的VSG控制策略
• 需要针对不同工况进行VSG控制参数调整 • 无法兼顾VSG并网系统发生暂态扰动下的调节时间及稳定性	• 无法兼顾VSG控制的多参数协同调整 • VSG并网系统暂态扰动下，其调节时间及超调量等指标具有较大提升空间

双机VSG并网系统，采用多种参数协同自适应控制，可以有效改善上述情况，更好的抑制暂态过程中频率和有功功率的波动并且减少暂态时间。

2023/7/4



2、研究技术路线和具体步骤

主要研究目标：采用多参数协同自适应控制改善双机并联VSG并网系统暂态扰动下的系统动态特性。

1、建立双机并联VSG并网模型、分析VSG控制参数摄动影响	得出虚拟惯量 J 、阻尼系数 D 和 P/ω 下垂系数 m 可以任意调整
	建立双机并联VSGs的系统小信号模型分析虚拟惯量、阻尼系数和 P/ω 下垂系数对系统稳定性的影响
	通过阻尼比、幅值裕度 K_g 和相角裕度限制和调节时间限制，得出参数可调节范围
2、建立多参数协同自适应控制，分析对比不同控制策略的控制效果及实验验证	根据 ω 、 $d\omega/dt$ 和 $\Delta\omega$ 的变化规律，总结虚拟惯量 J 、阻尼系数 D 和 P/ω 下垂系数 m 自适应控制算法
	MATLAB/Simulink仿真实验验证
	HIL半实物平台验证

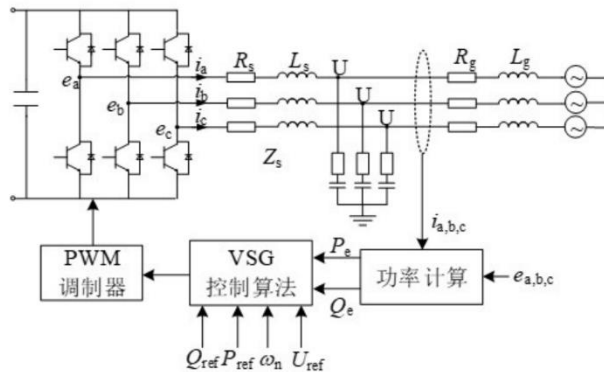
2023/7/4



3、数学模型的推导及仿真模型的搭建

3.1 双机并联VSG并网系统数学模型的推导和仿真模型搭建

虚拟同步机电路拓扑及控制如图所示，其中 Z_s 是滤波阻抗； $i_{a,b,c}$ 是逆变器输出电流； $e_{a,b,c}$ 是逆变器桥臂中点电势。以上三个变量分别可以视为同步机定子绕组阻抗等效、定子电流等效和虚拟同步机内电势等效。



$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D \Delta\omega \\ T_m - T_e = \frac{P_m}{\omega_0} - \frac{P_e}{\omega_0} \\ \Delta\omega = \omega - \omega_0 \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \\ \frac{d\omega}{dt} = \theta \\ E = U_{ref} + \frac{1}{k_q s} (Q_{ref} - Q_e) \end{cases}$$

2023/7/4



3、数学模型的推导及仿真模型的搭建

根据 ω ， $d\omega/dt$ 和 $\Delta\omega$ 的变化规律，总结虚拟惯量 J 、阻尼系数 D 和 P/ω 下垂系数 m 自适应控制算法：

$$J = \begin{cases} J_0 + \alpha_J \cdot \text{sign}\left(\frac{d\omega}{dt} \Delta\omega\right) \cdot \left|\Delta\omega \frac{d\omega}{dt}\right| & |\Delta\omega| > 2\pi f_{\max} \\ J_0 & \text{others} \end{cases}$$

$$D = \begin{cases} D_0 - \text{sign}\left(\frac{d\omega}{dt} \Delta\omega\right) \cdot \left|\beta_D \cdot \left(\frac{J}{J_0} - 1\right)\right| & |\Delta\omega| > 2\pi f_{\max} \\ D_0 & \text{others} \end{cases}$$

$$m = \begin{cases} m_0 + k_m \cdot \text{sign}\left(\frac{d\omega}{dt} \Delta\omega\right) \cdot |\Delta\omega| & |\Delta\omega| > 2\pi f_{\max} \\ m_0 & \text{others} \end{cases}$$

$$\text{采集系统参数，根据 } J_0 = \frac{HS_n}{\omega_0^2} \quad D_0 = \begin{cases} D_{\max} & 0 \leq J \leq J_1 \\ \frac{D_{\min} + D_{\max}}{2} & J_1 \leq J \leq J_2 \\ D_{\min} & J_2 \leq J \leq J_3 \end{cases} \quad m_0 \leq \Delta P_{\max} / \Delta \omega_{\max} \quad \text{计算参数初值，}$$

如：虚拟惯量 J_0 、阻尼系数 D_0 和 P/ω 下垂系数 m_0 。

2023/7/4

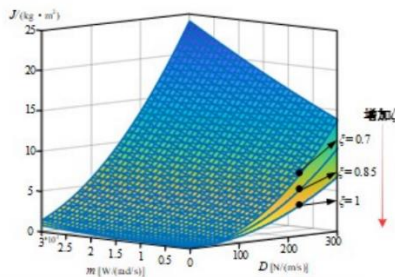


3、数学模型的推导及仿真模型的搭建

通过建立双机并联VSGs的系统小信号模型，分析虚拟惯量、阻尼系数和 P/ω 下垂系数对系统稳定性的影响，通过阻尼比、幅值裕度 K_g 和相角裕度限制和调节时间限制所得图如下，可计算出如下式：

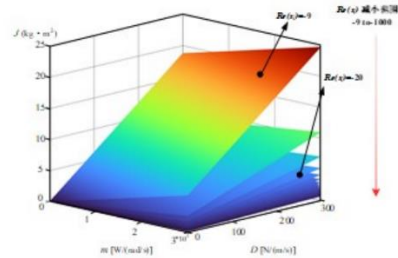
$$D_{\max} = \frac{2}{\omega_0 \sqrt{\frac{X_{v1}X_{v2}M}{6E_1E_2J\omega_0 \sin \theta_M}}} - \frac{m}{\omega_0}$$

$$m_{\max} = \frac{2}{\sqrt{\frac{X_{v1}X_{v2}M}{6E_1E_2J\omega_0 \sin \theta_M}}} - D\omega_0$$



$$D_{\min} = \begin{cases} \frac{1.4}{\omega_0 \sqrt{\frac{X_{v1}X_{v2}M}{6E_1E_2J\omega_0 \sin \theta_M}}} - \frac{m}{\omega_0} & 0 \leq J \leq J_1 \\ 16J - \frac{m}{\omega_0} & J_1 \leq J \leq J_2 \end{cases}$$

$$m_{\min} = \frac{1.4}{\sqrt{\frac{X_{v1}X_{v2}M}{6E_1E_2J\omega_0 \sin \theta_M}}} - D\omega_0$$



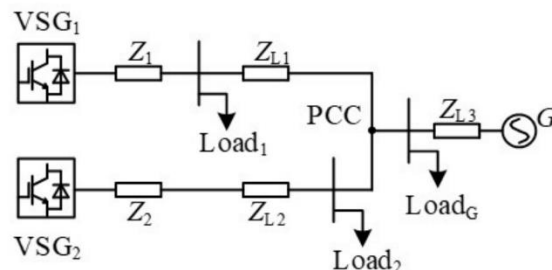
2023/7/4



3、数学模型的推导及仿真模型的搭建

根据同步发电机的本体模型、有功调频和无功调压等特性，在逆变器上模拟出与之相似的运行机制与输出外特性，从而引出虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)。当VSG发生频率瞬时波动时，将频率偏差和频率变化率与虚拟惯性、阻尼系数和 P/ω 下垂系数相结合，形成一个自适应控制系统。其次建立了双并联VSG的小信号模型，分析了各阶段参数对系统稳定性的影响，进一步确定了虚拟惯量、阻尼系数、 P/ω 下垂系数和虚拟惯量调整系数等参数的边界条件。

利用MATLAB/Simulink仿真平台搭建双机并联VSG并网模型，设置不同工况，验证本文所提控制策略的控制效果。



2023/7/4



4、仿真对比结果及半实物验证

4.1 Matlab/Simulink平台仿真结果对比:

工况1 VSG双机并联共带负荷3运行, 1.5s时带负荷1运行, 2.7s切断负荷1; 4s时带负荷2, 仿真时长5s。图1为系统发生负荷扰动时不同方法下的暂态频率波动对比。

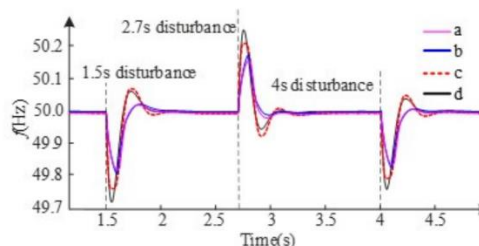


图1

表为不同控制策略下的频率偏移量及调节时间

表1

Schemes	1.5s f_m	t_r	2.7s f_m	t_r	4s f_m	t_r
b	0.03Hz	0.09s	0.04Hz	0.05s	0.02Hz	0.03s
c	0.07Hz	0.13s	0.09HZ	0.11s	0.06Hz	0.08s
d	0.13Hz	0.25s	0.12Hz	0.20s	0.11Hz	0.11s

2023/7/4



4、仿真对比结果及半实物验证

4.1 Matlab/Simulink平台仿真结果对比:

工况2 VSG并网运行并带负荷3运行, VSG出力为30kW, 0.8s出力降低为20kW, 2s时出力恢复到25kW, 仿真时长3s。图2为系统发生出力扰动时不同方法下的暂态频率波动对比。

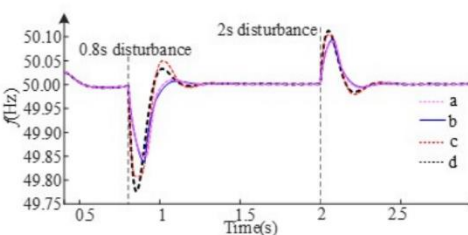


图2

表为不同控制策略下的频率偏移量及调节时间

表2

Schemes	0.8s f_m	t_r	2s f_m	t_r
b	0.02Hz	0.07s	0.04Hz	
c	0.08Hz	0.12s	0.10HZ	
d	0.14Hz	0.22s	0.13Hz	

2023/7/4



4、仿真对比结果及半实物验证

4.1 Matlab/Simulink平台仿真结果对比：

工况3 VSG并网运行并带负荷3运行，此时电网侧阻抗为 Z_{L3} 。交流侧双回路单桥线路分别在1s和2.3s下发生故障，电网侧阻抗为 Z_{L3} 分别切换为 Z_{L4} 、 Z_{L5} ，仿真时长3.5s。图3为系统发生线路故障时不同方法下的暂态频率波动对比。

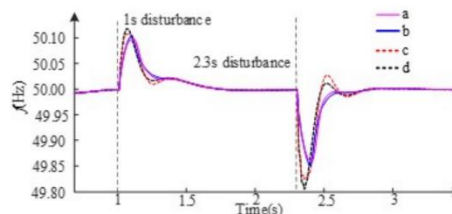


图3

表为不同控制策略下的频率偏移量及调节时间

表3

Schemes	1s f_{max}	t_r	2.3s f_{max}	t_r
b	0.03Hz	0.09s	0.03Hz	0.11s
c	0.10Hz	0.19s	0.07Hz	0.23s
d	0.16Hz	0.23s	0.11Hz	0.24s

2023/7/4



4、仿真对比结果及半实物验证

4.2 HIL硬件在环平台验证：

实验平台如图4所示，主电路由上位机通过Starsim HIL软件导入到实时仿真器机箱(上海远宽能源科技有限公司 MT 3200)的FPGA中，与DSP (德州仪器TMS320F28335) 控制器通过接线箱闭环连接运行，波形输出由示波器 (Tektronix MSO3034) 呈现，系统参数与仿真参数一致，工况设置为在PCC处投入 (切除) 电阻负载。

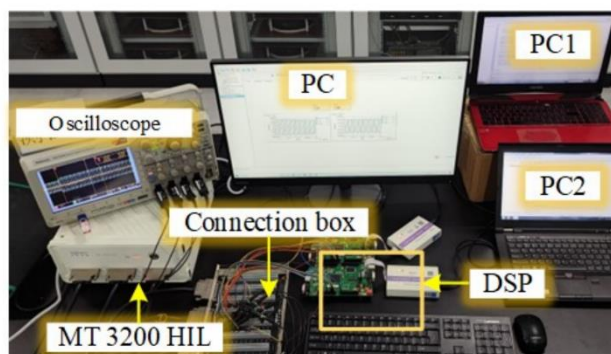


图4

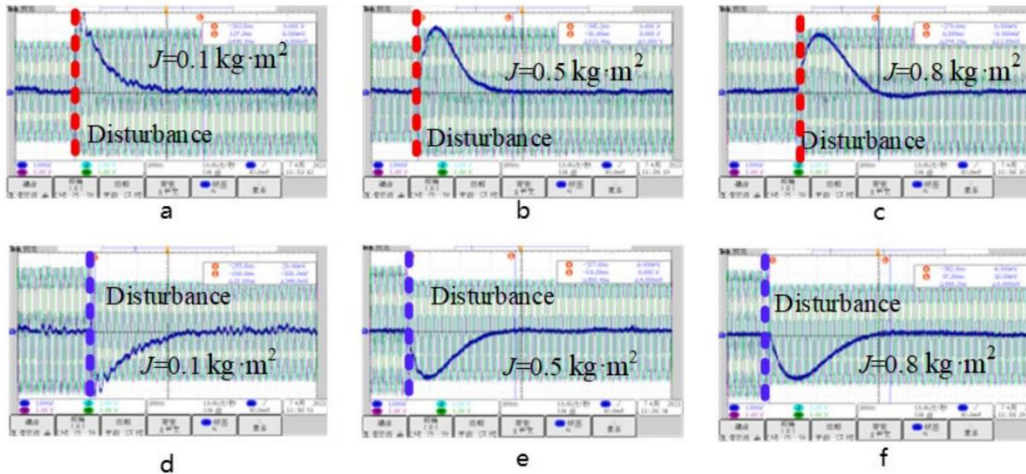
2023/7/4



4、仿真对比结果及半实物验证

4.2 HIL硬件在环平台验证:

VSGs空载并网运行, 某一时刻系统切除 (增加) 负载LoadR (0.71Ω), 观察虚拟惯量 J 对输出频率的影响, 如图a-f所示。



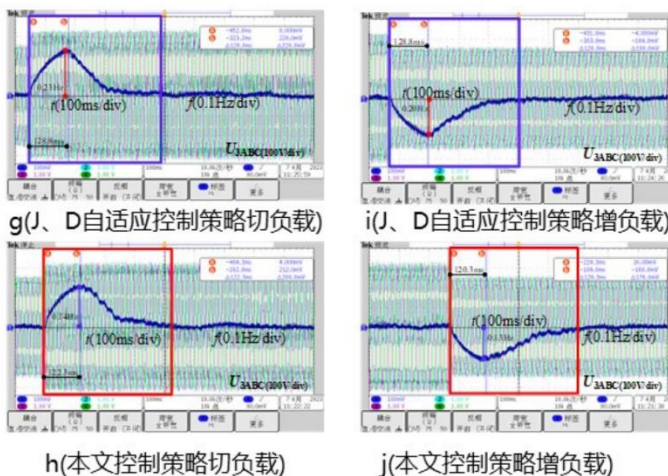
2023/7/4



4、仿真对比结果及半实物验证

4.2 HIL硬件在环平台验证:

VSGs并网运行, 某一时刻系统增加 (切除) 负载LoadR。如图所示, 观察本文所提控制策略和 J 、 D 自适应控制对VSG输出频率的影响。



本文所提控制策略相对于 J 、 D 参数自适应控制, 本文所提控制策略频率超调量优化77.78%, 可以在较短的调节时间内, 使频率平滑的恢复至稳定值, 有效降低系统频率超调量, 优化调节时间, 抑制频率增长速率, 改善频率响应特性。

2023/7/4



作者简介:



王振浩 男，教授，博士生导师，研究方向为新能源的电网控制，输变电设备运行状态的监测和诊断，以及配电系统的节能和优化运行。



孟繁宇 男，硕士研究生，研究方向为光伏逆变器及其控制策略。



张越 男，硕士研究生，研究方向为虚拟同步发电机及其控制策略的优化。

2023/7/4



作者简介:



王尉 男，博士研究生，研究方向为并网变流器的建模及其控制策略。



李国庆 男，教授，博士生导师，研究方向电力系统安全性与稳定性分析，输变电设备运行监测、保护与控制，柔性直流输电技术，可再生能源消纳



葛津铭 男，硕士生导师，研究方向为光学电流传感器和新能源并网运行分析。

2023/7/4