



湖南工业大学- 考虑超调的虚拟同步发电机暂态功率振荡抑制策略

用户与研究成果简介：

湖南工业大学兰征老师所在的科研团队提出了 2 种基于有功暂态补偿的 VSG 功率振荡抑制策略：暂态前馈补偿和暂态反馈补偿。2 种改进策略均可以提升系统的暂态阻尼，有效抑制 VSG 有功振荡，既不会增大稳态偏差，又能大大减小超调。研究利用上海远宽的 StarSim 实时仿真器进行实验，通过实验结果验证了研究过程中理论分析的正确性和所提策略的有效性，并把成果总结发表于《电力系统自动化》：

兰征,龙阳,曾进辉,涂春鸣,肖凡,郭祺.考虑超调的虚拟同步发电机暂态功率振荡抑制策略[J/OL].

课题研究背景

研究意义和现状

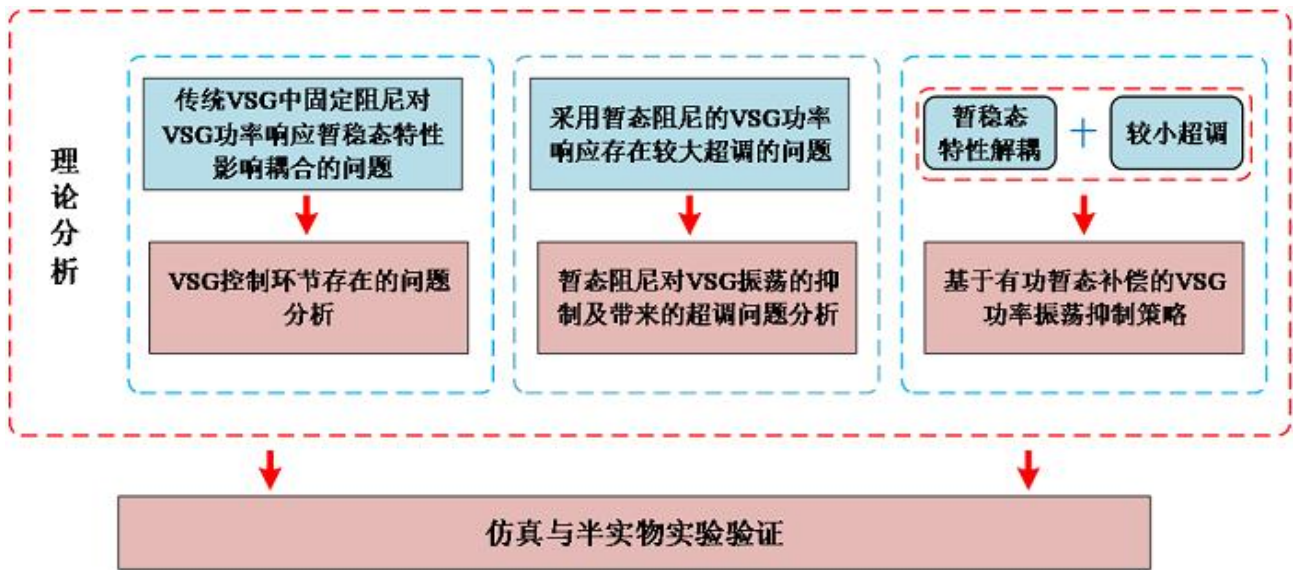
近年来，为降低碳排放，以风能、太阳能为代表的新能源发电得到了快速的发展。新能源多通过电力电子装置与电网连接，虽然具有控制灵活、响应速度快的特点，但也缺乏传统同步发电机的惯量特性，存在稳定性较差的问题。为此，学者们提出了虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)及其控制策略。VSG 通过模拟同步发电机的转子运动方程，增加了新能源并网系统惯性，但是这也带来了电网扰动下的有功振荡问题。发展新能源发电已成为全球保护环境、减少碳排放的有力措施，VSG 作为一种能为新能源电力系统提供惯量支撑的逆变器控制技术，能够为未来新能源持续大规模并网提供保障，进一步深入研究 VSG 技术，具有极其重要的意义。

现有 VSG 功率振荡抑制方法中，增大固定阻尼能很好的抑制这种振荡、减小超调，但会增大稳态偏差。暂态阻尼方式可以抑制振荡、避免稳态偏差，但存在较大超调问题，过大超调可能造成电流越限，引发过流保护，相关特性暂未明晰。

研究重要内容和创新点

研究框架和具体步骤

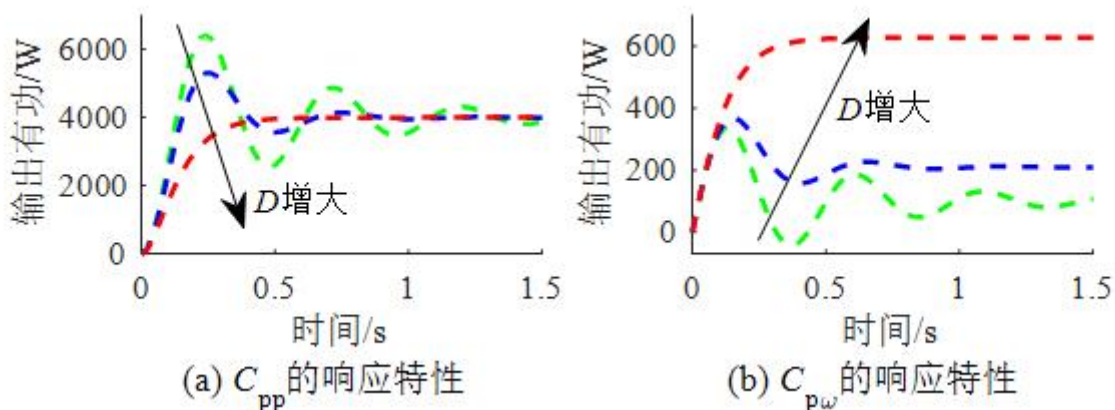
兰征老师团队围绕 VSG 暂态功率振荡问题，考虑有功指令扰动和电网频率扰动两种工况，首先分别对固定阻尼和暂态阻尼下 VSG 的功率响应特性进行分析，然后提出 2 种基于有功暂态补偿的 VSG 功率响应振荡抑制策略。最后，通过 MATLAB/Simulink 仿真及 StarSim 硬件在环半实物实验验证理论分析的正确性及所提策略的有效性。研究框架如下图所示：



理论建模与分析

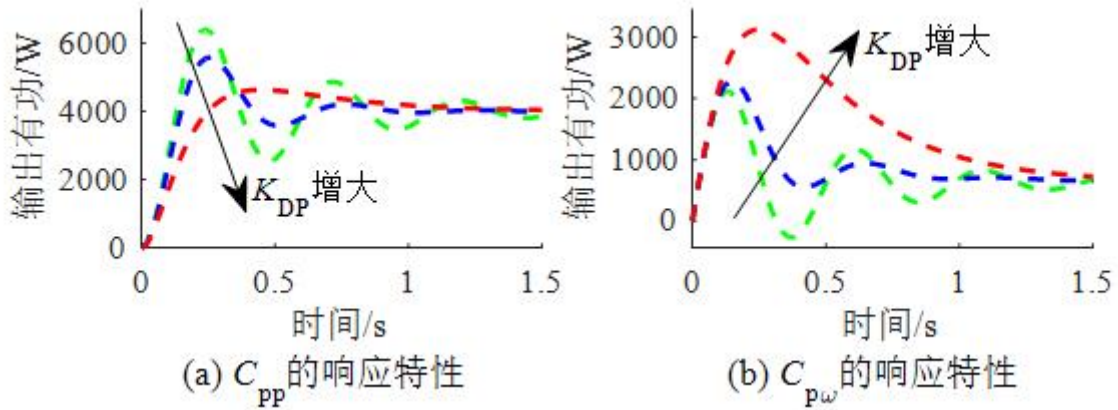
湖南工业大学兰征老师的科研团队首先对传统 VSG 有功控制环节存在的问题以及暂态阻尼对 VSG 振荡的抑制及带来的超调问题进行了分析。通过建立对应 VSG 的小信号模型，进行小信号模型对比、根轨迹和零点分布分析，得到如下结论：

①对于传统固定阻尼 VSG，通过增大固定阻尼系数，可以有效抑制 VSG 有功振荡，并且输出无超调，但是固定阻尼系数下垂系数增大，当电网频率偏离额定频率时，VSG 有功输出稳态偏差变得非常大。有功指令和电网频率阶跃下，传统固定阻尼 VSG 有功响应如下图所示：（其中， C_{pp} 为 VSG 在有功指令扰动下的输出有功响应； $C_{p\omega}$ 为 VSG 在电网频率扰动下的输出有功响应）

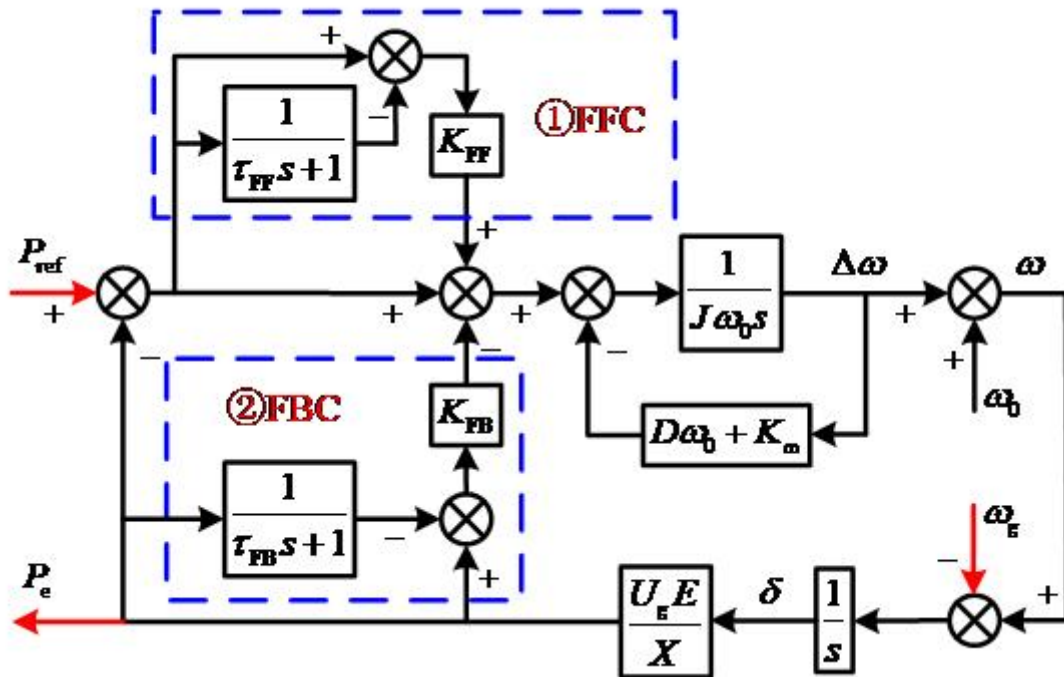


②对于暂态阻尼 VSG（DPC-VSG），通过增大暂态阻尼补偿系数，可以有效抑制 VSG 输出有功振荡，且不会影响稳态输出，但是输出超调非常大。超调原因：DPC 给 VSG 增加的零点非

常靠近虚轴，且在电网频率扰动下，超调大小与暂态阻尼补偿系数正相关，因为随着补偿系数的增大，其零点对超调的增大作用还大于极点对超调的减小作用，抑制振荡的同时超调变得非常大。有功指令和电网频率阶跃下，暂态阻尼 VSG 有功响应如下图所示：



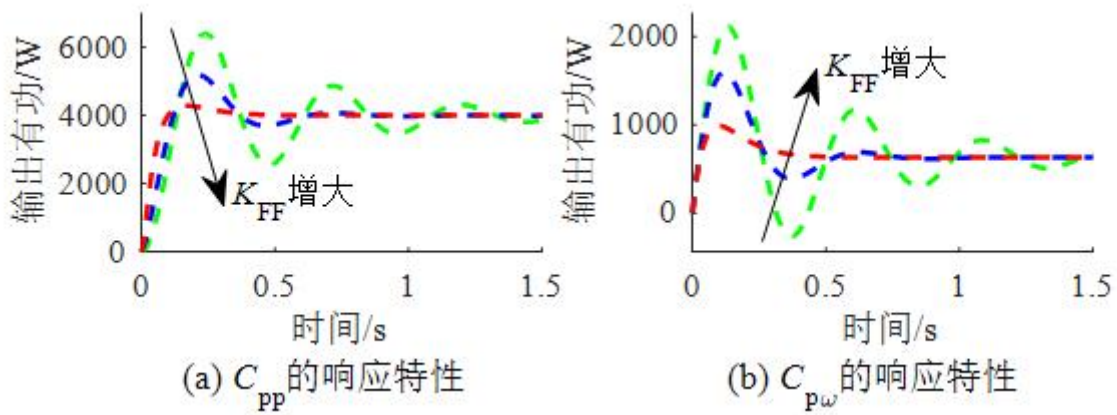
为实现在不影响 VSG 输出有功稳态偏差的同时，超调也较小，兰征老师团队进一步提出了两种基于有功暂态补偿的 VSG 功率响应振荡抑制策略：暂态前馈补偿策略（FFC）和暂态反馈补偿策略（FBC），如下图所示：



所提暂态前馈补偿 VSG 的有功小信号模型如下式所示：

$$\begin{cases} C_{pp,FFC-VSG} = \frac{K[\tau_{FF}(K_{FF} + 1)s + 1]}{\tau_{FF}J\omega_0s^3 + m_2s^2 + n_2s + K} \\ C_{p\omega,FFC-VSG} = \frac{-K(J\omega_0s + D\omega_0 + K_\omega)(\tau_{FF}s + 1)}{\tau_{FF}J\omega_0s^3 + m_2s^2 + n_2s + K} \end{cases}$$

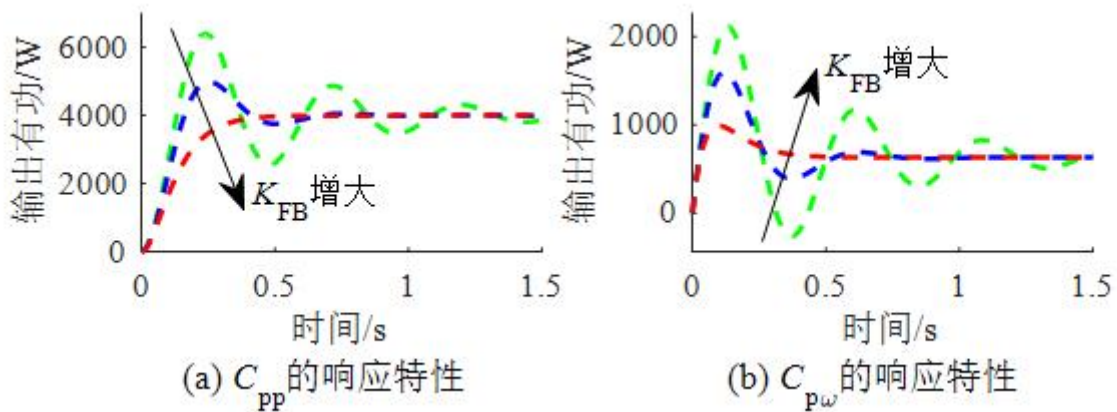
对应有功指令和电网频率阶跃下的阶跃响应如下图所示：



所提暂态前馈补偿 VSG 的有功小信号模型如下式所示：

$$\begin{cases} C_{pp,FBC-VSG} = \frac{K(\tau_{FB}s + 1)}{\tau_{FB}J\omega_0s^3 + m_3s^2 + n_3s + K} \\ C_{p\omega,FBC-VSG} = \frac{-K(J\omega_0s + D\omega_0 + K_\omega)(\tau_{FB}s + 1)}{\tau_{FB}J\omega_0s^3 + m_3s^2 + n_3s + K} \end{cases}$$

对应有功指令和电网频率阶跃下的阶跃响应如下图所示：



所提暂态前馈补偿 VSG 和暂态反馈补偿 VSG 拥有特性如下：

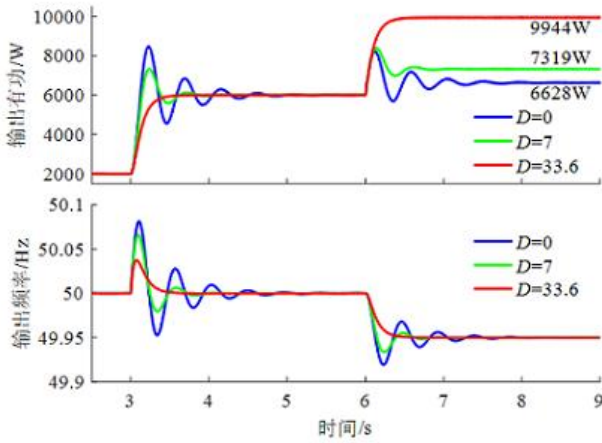
提出的暂态前馈补偿、暂态反馈补偿两种策略均能够有效抑制 VSG 有功振荡，且既不会增大稳态偏差，也不存在大的超调。两者在电网频率扰动下的响应一致，仅存在较小的超调。在有功指令扰动下，前馈补偿方式有功响应更快，但存在较小超调和一定的频率过冲风险，实际应用时可能需要折衷考虑，反馈补偿方式则可实现无超调输出，补偿效果更优。

注：具体的理论建模与分析过程详见湖南工业大学兰征老师团队发表的文章。

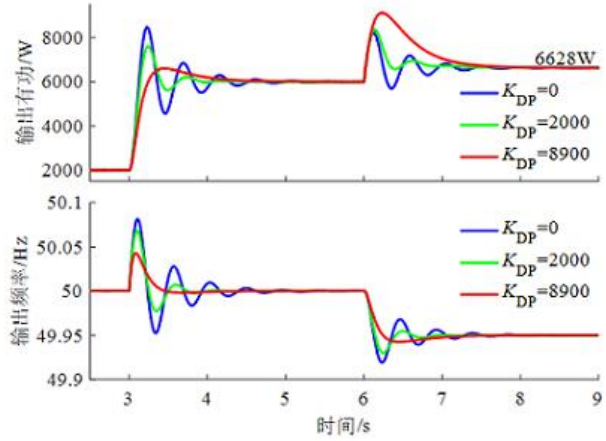
基于实时仿真器的算法验证

仿真与半实物实验验证

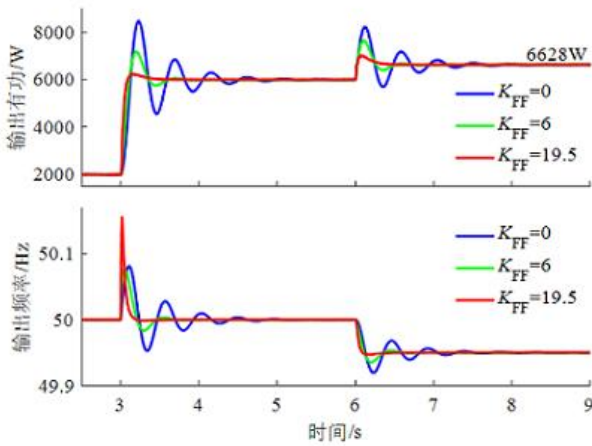
兰征老师团队通过 MATLAB/Simulink 依次建立了固定阻尼 VSG、暂态阻尼 VSG、暂态前馈补偿 VSG、暂态反馈补偿 VSG 的仿真模型，验证了理论分析的正确性。仿真过程中，3s 时有功指令突增 4000W，6s 时电网频率突降 0.05Hz，仿真结果如下所示：



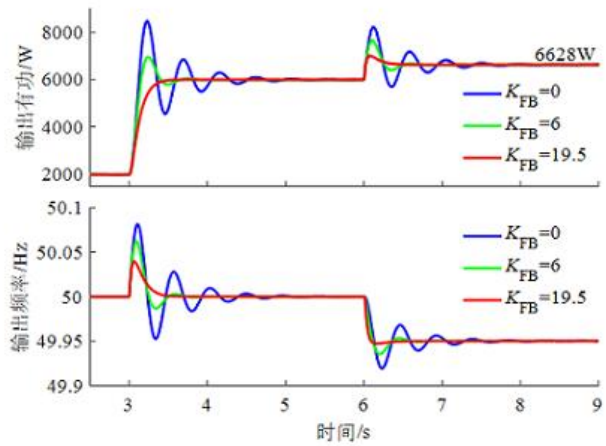
固定阻尼VSG



暂态阻尼VSG



暂态前馈补偿VSG



暂态反馈补偿VSG

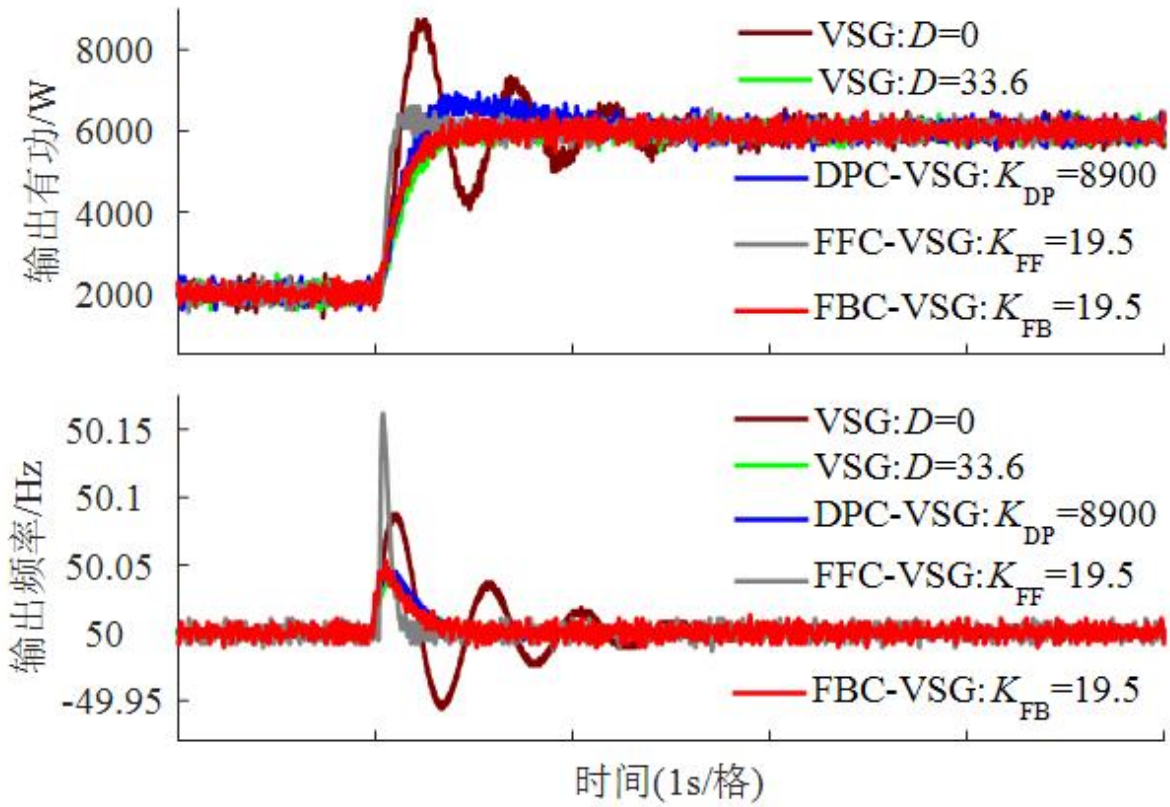
由于 MATLAB/Simulink 离线仿真无法接入真实控制器，较难反应出真实控制器中的延迟和有限精度，实时仿真器则可以同真实控制器连接，又不会有故障的问题，是控制方法验证的理想测试设备。

远宽能源 (www.modeling-tech.com) 提供的 StarSim 实时仿真器，基于电力电子器件的细节模型，利用最新的 FPGA 技术，可以实现 1 微秒步长、任意拓扑、任意工况的电力电子系统实时仿真，被广泛应用于牵引供电系统故障诊断、控制策略验证、可再生能源并网、电机驱动等的实时仿真中；湖南工业大学兰征老师的科研团队就采用了 StarSim 实时仿真器来进行所提出暂态前馈补偿 VSG、暂态反馈补偿 VSG 以及其它相关研究的试验验证。

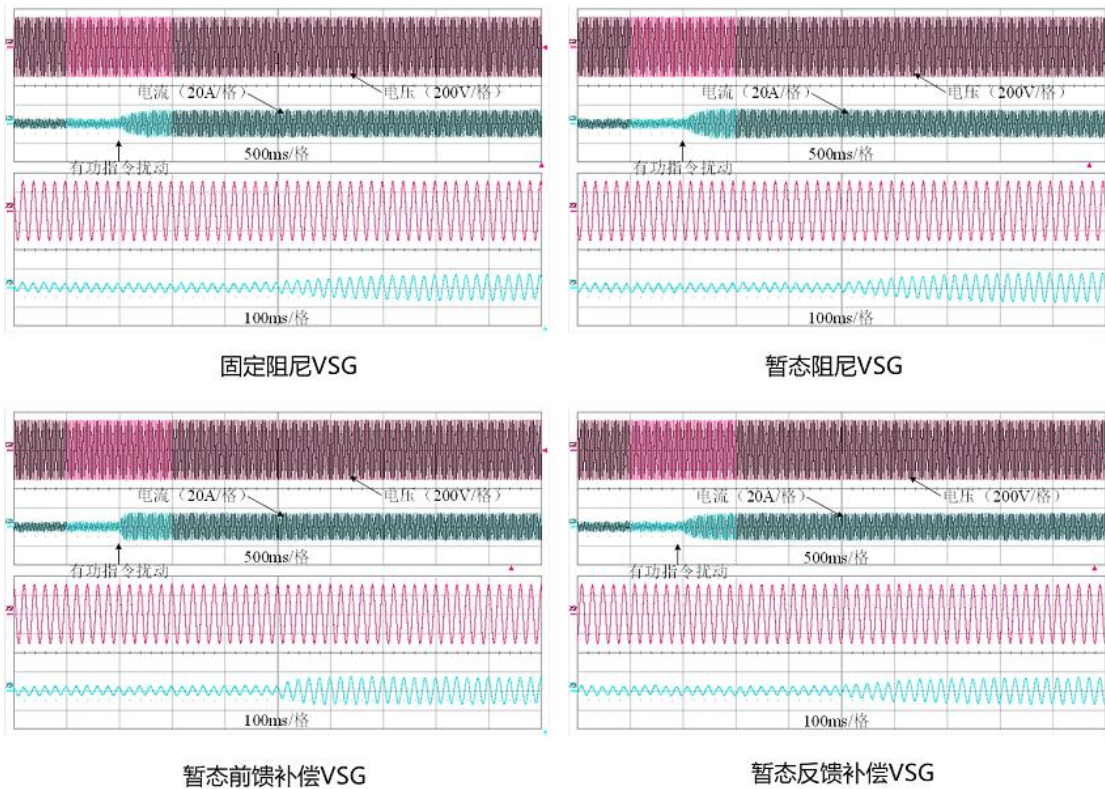
下图是 HIL+DSP 测试平台示意图，其包括实时仿真系统 HIL 和 DSP 控制器，其中电力电子系统是利用 StarSim FPGA Solver 按 1 微秒的步长实时仿真；控制算法模型运行 DSP 控制器上，实时仿真器与 DSP 控制器通过接线箱闭环连接运行，示波器用于波形输出。



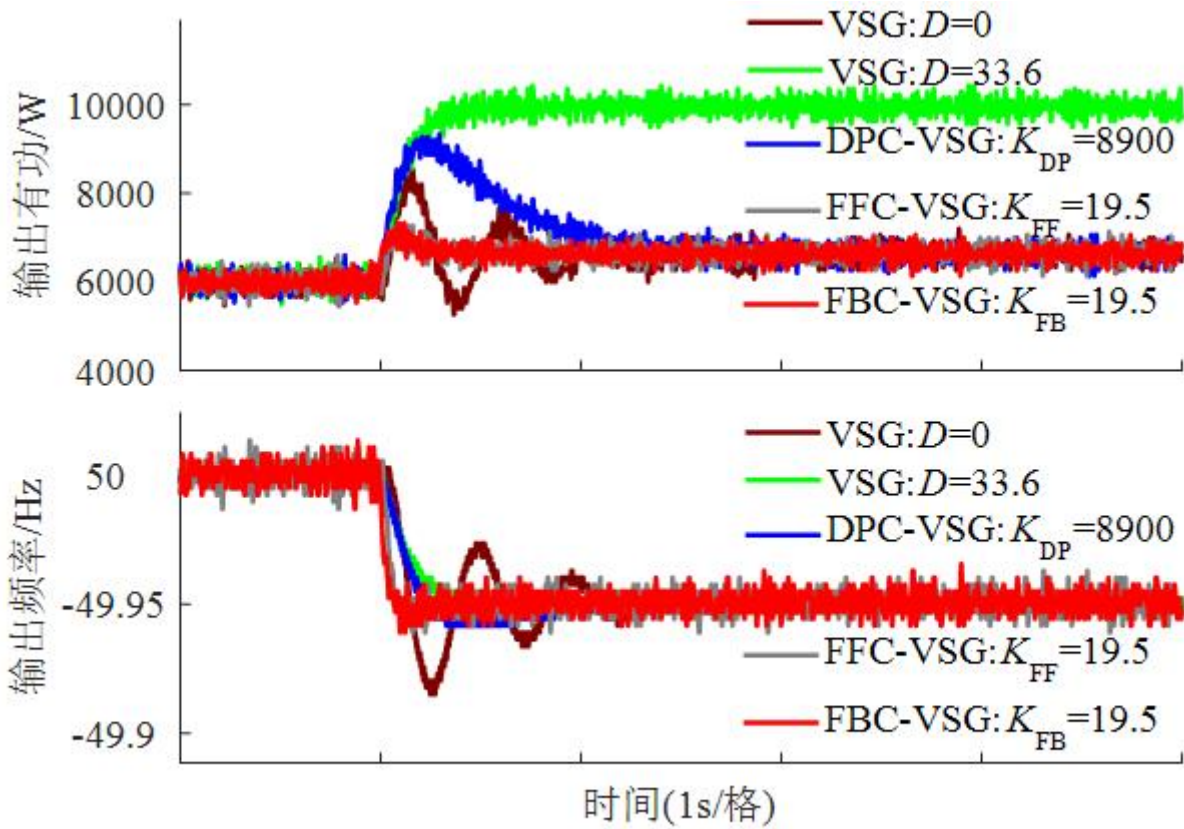
下图为有功指令扰动下，固定阻尼 VSG、暂态阻尼 VSG、暂态前馈补偿 VSG、暂态反馈补偿 VSG 的实验结果：



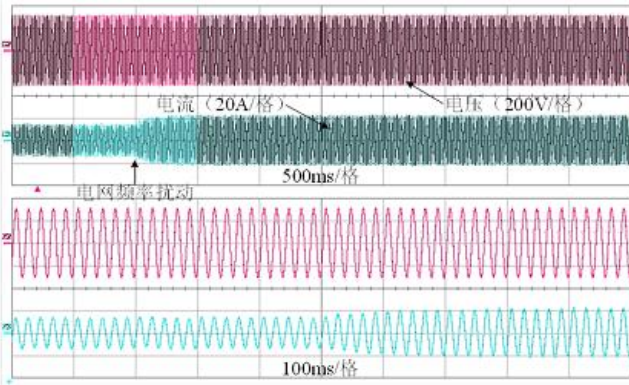
有功指令扰动下对应的 A 相电压电流实验波形如下：



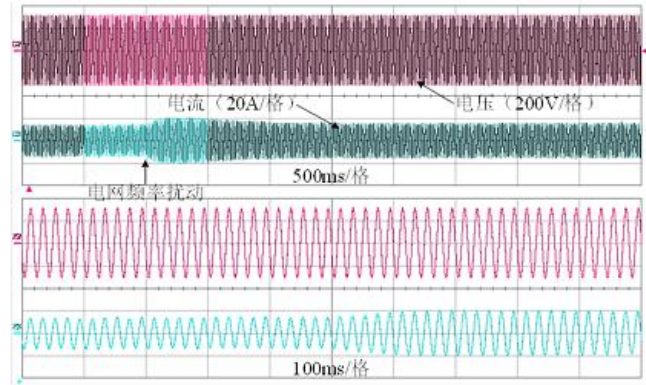
下图为电网频率扰动下，固定阻尼 VSG、暂态阻尼 VSG、暂态前馈补偿 VSG、暂态反馈补偿 VSG 的实验结果：



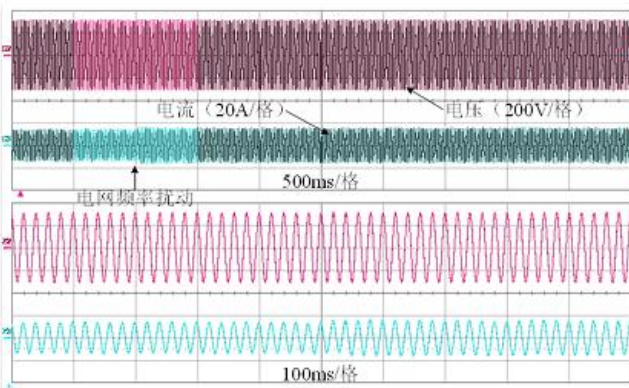
电网频率扰动下对应的 A 相电压电流实验波形如下：



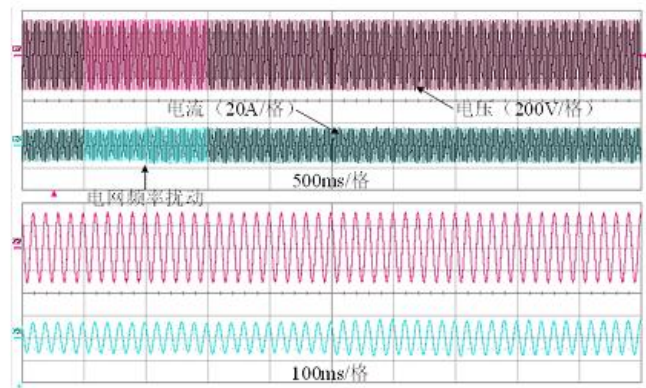
固定阻尼VSG



暂态阻尼VSG



暂态前馈补偿VSG



暂态反馈补偿VSG

仿真与实验结果均与理论分析一致，固定阻尼在抑制 VSG 有功振荡的同时，稳态偏差变得非常大，暂态阻尼在抑制 VSG 有功振荡的同时不会增大稳态偏差，但存在较大超调，提出的暂态前馈补偿、暂态反馈补偿两种策略均能够有效抑制 VSG 有功振荡，且既不会增大稳态偏差，也不存在大的超调，验证了理论分析的正确性和所提策略的有效性。