



SFU-

极弱电网下的逆变器控制：精确动态建模、小信号
分析和稳定性改进

用户与研究成果简介：

SFU（西蒙弗雷泽大学）Wang Jiacheng 教授科研团队，针对矢量控制电压源转换器（VSC）接入弱电网（WG）可能引起系统震荡不稳定的问题，提出了一种新颖的补偿方法来减轻接入弱电网的 VSC 动态不稳定性。该方法通过小信号分析方法搭建了 VSC-WG 系统的全阶状态空间模型，然后对系统进行模态分析，确定参与影响因子以表征系统主导模态的影响状态，最后进行灵敏度分析，评估矢量控制增益和其他参数对主导模态的影响。该研究利用上海远宽的 Starsim 电力电子小步长实时仿真器进行半实物仿真实验，通过实验结果验证了小信号分析的正确性，验证了所提出的补偿方法的有效性，并把成果总结发表于 SCI 3 区《IEEE Access》：

Rezaee S, Radwan A, Moallem M, Jiacheng Wang. Voltage Source Converters Connected to Very Weak Grids: Accurate Dynamic Modeling, Small-Signal Analysis, and Stability Improvement[J]. IEEE Access, 2020, 8:201120-201133. (已见刊)

课题研究背景

弱电网下电压源变流器并网控制技术研究意义与现状

随着社会对能源需求的不断增长、人民环境保护意识的不断增强以及电力市场经济的崛起，使得采用分布式发电（DG）系统得到大力发展并可能最终取代传统发电厂。其中分布式发电系统中关键核心技术就是电压源变流器的并网控制技术，由于具备高开关频率能力和独立调节双向有功、无功功率的能力，两电平三相电压源换流器技术是将 DG 连接到电网的最先进技术，其中矢量控制方法也是业界广泛应用的控制策略。

通常 DG 接入电网可以等效成无穷大系统，这时两电平三相电压源换流器（VSC）可以工作在设定的工作状态且运行良好。若电压源换流器接入一个弱电网(WG)时，可能存在以下问题：（1）与电压源换流器的矢量控制之间产生相互作用的低频振荡可能导致弱电网下并网系统不稳定；（2）弱电网下锁相环动态也会引起系统的不稳定；（3）弱电网条件下只能进行有限的功率传输。目前已经有许多文献研究如何提高弱电网下电压源换流器并网系统的稳定性，比如通过减小锁相环的带宽来改进传统矢量控制或通过在电流控制环中增加前馈控制来改变 VSC 输出阻抗的幅度或相位角，但这些方法均难以解决在非常弱电网（短路比为 1 情况）下并网系统稳定性问题。

研究重要内容和创新点

根据上述所述方法的不足之处，本文提出了一种在非常弱电网条件下减轻基于电压源换流器并

网不稳定问题的简单方法，可以轻松地与现有的矢量控制方法相结合，该方法不仅不需要改变 VSC 的控制参数，同时能保证 VSC 的稳态测量值不变，可以有效的减轻非常弱电网下电压源换流器并网系统的不稳定性。

VSC-WG 系统的动态建模

图 1 为 VSC-WG 系统。其中图 1(a) 表示带有 LC 滤波器的 VSC 通过升压变压器和电网阻抗连接到电网的拓扑电路；图 1(b) VSC 控制电路。

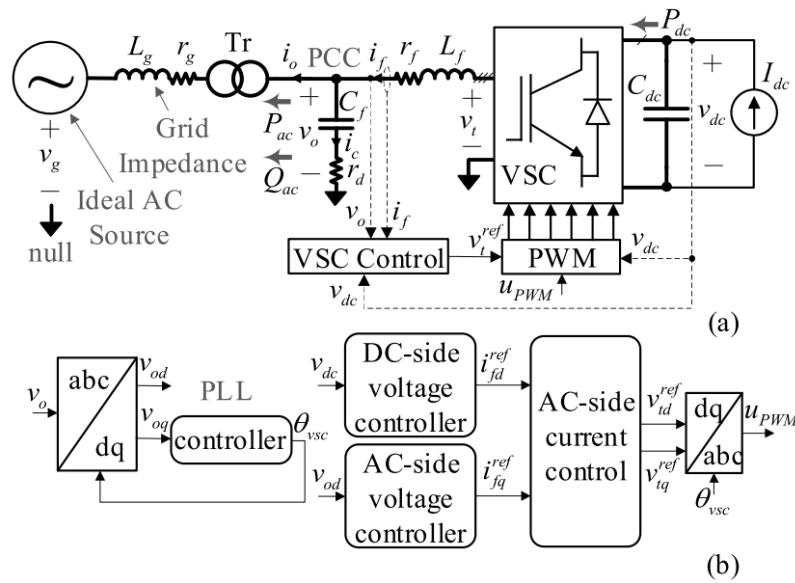


图 1 VSC-WG 系统

小信号稳定性评估

未补偿 VSC-WG 系统的状态空间表示为

$$\frac{d}{dt} \tilde{\mathbf{X}}_{uc} = \mathbf{A}_{uc} \tilde{\mathbf{X}}_{uc}$$

$$\tilde{\mathbf{X}}_{uc} = \begin{bmatrix} \tilde{d} & \tilde{v}_{od}^c & \tilde{v}_{oq}^c & \tilde{i}_{fd}^c & \tilde{i}_{fq}^c & \tilde{v}_{dc}^c & \tilde{i}_{fd} & \tilde{i}_{fq} & \tilde{v}_{cd} \\ \tilde{v}_{cq} & \tilde{i}_{od} & \tilde{i}_{oq} & \tilde{v}_{dc} \end{bmatrix}^T,$$

下表 1 中总结的强电网 (SG) 和弱电网 (WG) 案例的主要模式中不同状态下稳定性表示。在 SG 的情况下，有两个真正的稳定特征值， λ_1 和 λ_2 ，分别主要对应于 PCC 电压的 PLL 和控制状态。然而，在 WG 的情况下，有两个真正的稳定特征值， λ_1 和 λ_4 ，它们分别主要受 PLL 和 DVC 的状态影响。此外，还有一对不稳定的复特征值， λ_{3-4} ，对应于电网阻抗、PLL、DVC 和 AVC 的状态。这表明 VSC 控制系统状态和 WG 阻抗之间的交叉耦合是 VSC-WG 系统不

稳定的主要来源。此外，还有一对稳定的复特征值， λ_{5-6} ，它们对应于 PLL、直流链路和类似于 λ_{3-4} 的电网阻抗的状态。正如将要显示的，随着控制增益的变化，这对可以导致向虚轴靠近。

Sub system	State	Eigenvalues of \mathbf{A}_{uc}					
		SCR = 10		SCR = 1			
		$\lambda_1 = -5.1$	$\lambda_2 = -4.7$	$\lambda_{5-6} = -69.1 \pm 2362.3j$	$\lambda_2 = -47.4$	$\lambda_1 = -5.1$	$\lambda_{3-4} = 41.1 \pm 60.8j$
LCL Circuit	\tilde{i}_{od}	~0	~0	0.25	~0	~0	0.11
	\tilde{i}_{oq}	~0	~0	0.42	0.05	~0	0.17
	\tilde{v}_{cd}	~0	~0	0.12	~0	~0	~0
	\tilde{v}_{cq}	~0	~0	0.21	~0	~0	~0
PLL	$\tilde{\delta}$	0.03	~0	0.12	0.01	0.02	0.12
	\tilde{v}_{oq}^c	0.98	0.05	~0	~0	1.02	0.02
DVC	\tilde{v}_{dc}	~0	~0	0.08	0.01	~0	0.16
	\tilde{v}_{dc}^c	~0	~0	~0	0.79	~0	0.16
	\tilde{i}_{fd}	~0	~0	0.05	~0	~0	0.2
AVC	\tilde{i}_{fq}	~0	~0	0.12	~0	~0	0.06
	\tilde{v}_{od}^c	0.05	0.95	0.06	0.16	~0	0.54

表 1 主导模式下 VSC-WG 的参与因子

VSC-WG 主动补偿方法

补偿 VSC-WG 系统的状态空间表示为

$$\frac{d}{dt} \tilde{\mathbf{X}}_{cp} = \mathbf{A}_{cp} \tilde{\mathbf{X}}_{cp}$$

$$\tilde{\mathbf{X}}_{cp} = [\tilde{\mathbf{X}}_{uc} \quad x_{cp}]^T$$

主要特征值的频谱如图 2、3 所示

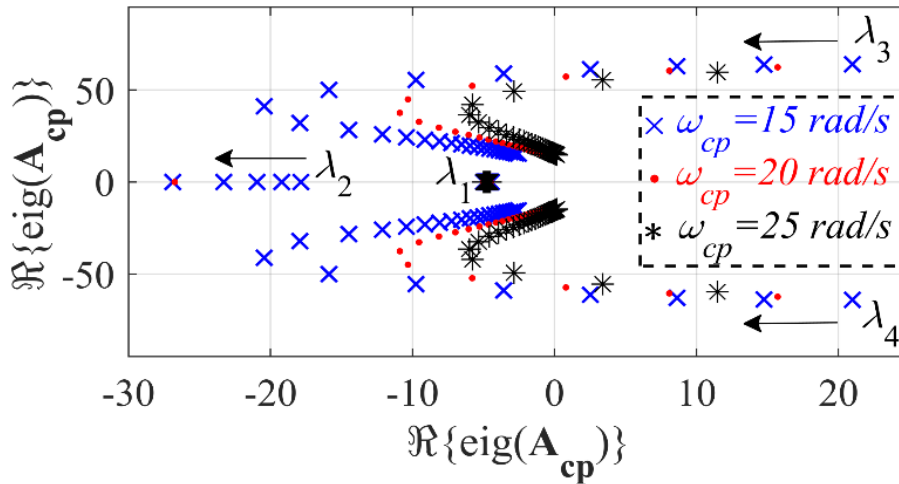


图 2 K_{cp} 的变化为 0.3 到 3

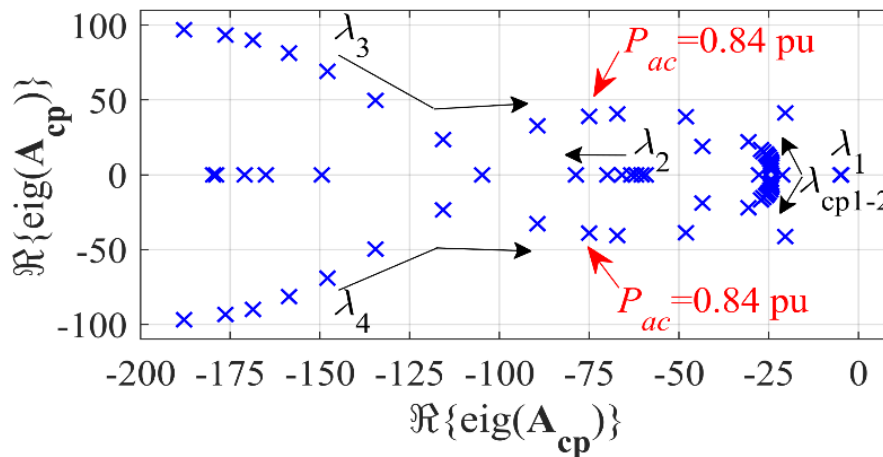


图 3 P_{ac} 在 0.35 到 1 pu 之间变化。

基于实时仿真器的算法验证

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，被广泛应用于可再生能源并网、电机驱动等实时仿真中。为了验证所建立的动态模型、小信号分析和所提出的补偿方法的有效性，SFU 科研团队采用了 StarSim 电力电子实时仿真器来对所提出的补偿方法进行验证。

下图 4 是 HIL+RCP 测试平台示意图，其包括实时仿真系统 HIL 和快速原型控制器 RCP，其中 VSC-WG 系统是利用 StarSim FPGA Solver 按 1 微秒的步长实时仿真；控制算法模型运行在 RCP 控制器上，实时仿真器和快速原型控制器通过真实的物理 IO 互连。

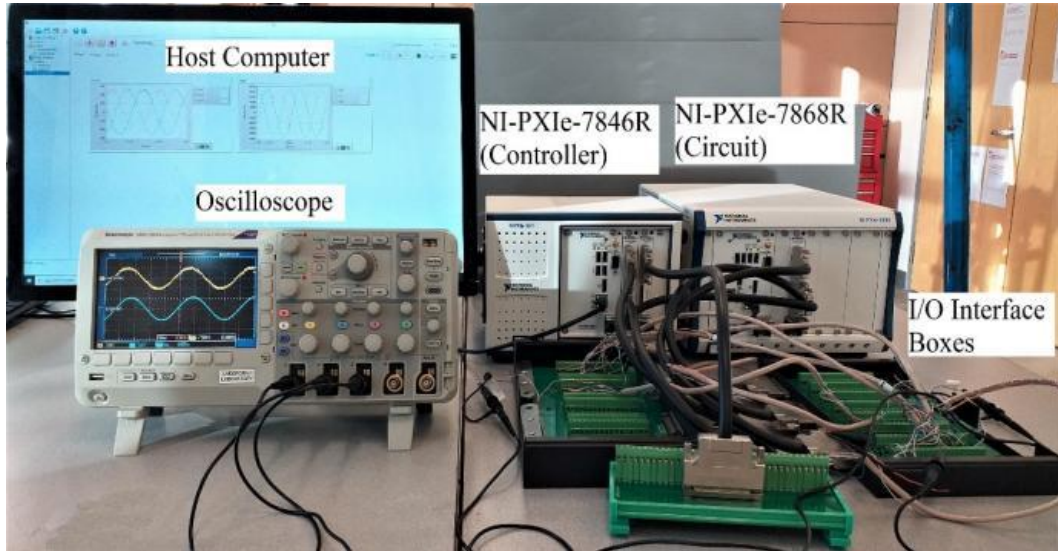
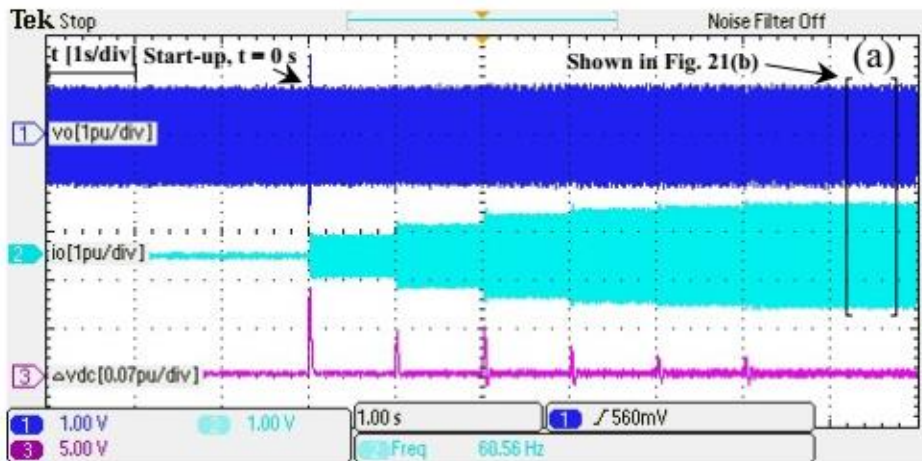


图 4 实时仿真测试平台

下图 5 为在 $t=[0, 1, 2, 3, 4, 5]$ s 时, VSC 直流电源 P_{dc} 遵循 $[0.4, 0.6, 0.8, 0.9, 0.95, 1]$ pu 曲线进行了一系列实验。其中图 5(a) 表示 VSC 响应 v_o 、 i_o 以及与 Δv_{dc} 的直流电压差。由图 5(a)可知, v_o 和 i_o 在所有条件下都得到了良好的阻尼和调节。此外, 由于 Δv_{dc} 由直流电压控制调节, 在稳态的情况下 Δv_{dc} 基本为零, 每个步骤初始瞬间波形中都存在一定的过冲, 其中启动瞬间小于 0.15 pu, 后续步骤小于 0.1 pu。图 5(b)为稳定状态下 v_o 和 i_o 的放大视图。可以得到 v_o 的总谐波失真为 5% , 是符合 IEEE 标准的。



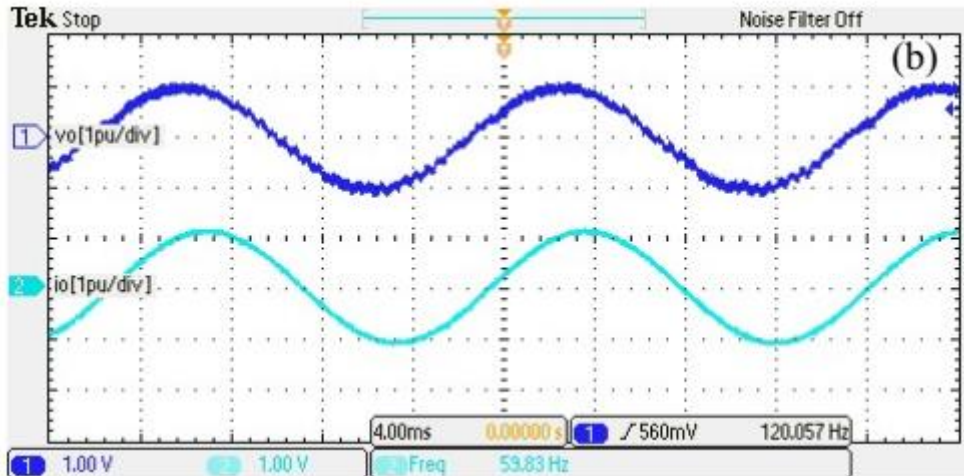


图 5 启动瞬态和 Pdc 中阶梯变化期间 VSC 的电压和电流响应

图 6(a)表示 VSC 注入的有功功率 P_{ac} 的增加阶梯图。在每一步功率的增加时都会有小的超调，直到 $t > 5s$ 时 P_{ac} 达到 1pu。根据图 6(b)所示，在 P_{ac} 中的每次增加后，PCC 和电网相电压之间的相位角差 $|\delta|$ 幅值不断增加。图 6(c)表示了所提出的补偿信号 u_{cp} 的变化，补偿信号仅在瞬态条件下激活，以减轻潜在的不稳定性，在稳态条件下是没有影响的。

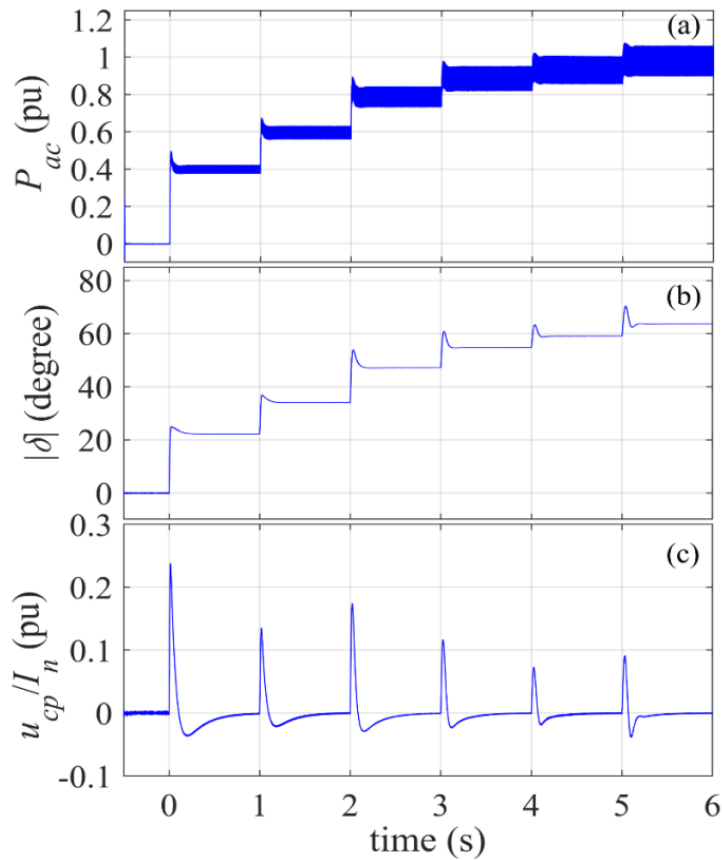


图 6 Pdc 中阶梯变化期间的 VSC 有功功率、相位角差和补偿信号响应