



上海交通大学-
非理想电网条件下新能源接入并网逆变器鲁棒电流
控制策略

用户与研究成果简介：

上海交通大学李国杰教授、汪可友教授科研团队，针对电网阻抗不确定性及电网电压扰动等非理想电网条件，从并网逆变器控制的角度出发，提出了基于滤波跟踪误差的三相并网逆变器鲁棒电流控制器的设计，以增强并网逆变器在非理想电网条件下的鲁棒性。所提控制器具有良好的电流跟踪性能，可直接控制输入电网的三相平衡电流，同时由于消除了所有锁相环和多环控制器，进一步确保了高动态和跟踪性能。利用李雅普诺夫函数证明了系统的稳定性，可改善入网电流品质，实现孤立微电网电能质量的主动提升。

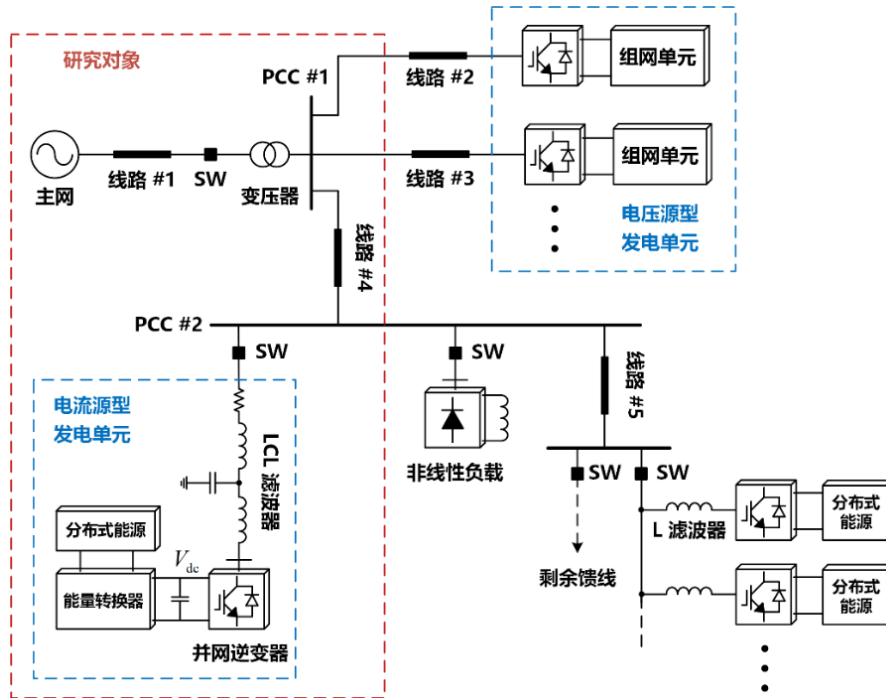
该研究利用离线仿真和硬件在环实验（基于上海远宽 StarSim 系列软硬件的半实物仿真）验证了所提控制策略的性能和有效性，并将相应成果总结发表于 SCI 重点期刊《IEEE Transactions on Sustainable Energy》：

Xin Huang, Keyou Wang, Bo Fan, et al. Robust Current Control of Grid-tied Inverters for Renewable Energy Integration under Non-Ideal Grid Conditions[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(1): 477-488. DOI: 10.1109/TSTE.2019.2895601

课题研究背景

当前典型微电网结构呈现出以下特征：

- (1) 并网逆变器作为电流型发电单元，负责电能传送；
- (2) 微电网在并网/孤立运行时，公共母线（PCC#1）处的电压、频率分别由主网/多并联组网单元来维持；
- (3) 公共母线与主网/组网逆变器之间都含有一定的电网阻抗；
- (4) 大量随机分布的并网逆变器/本地负荷，使接入点（PCC#2）与公共母线（PCC#1）之间也存在着一定的线路阻抗。



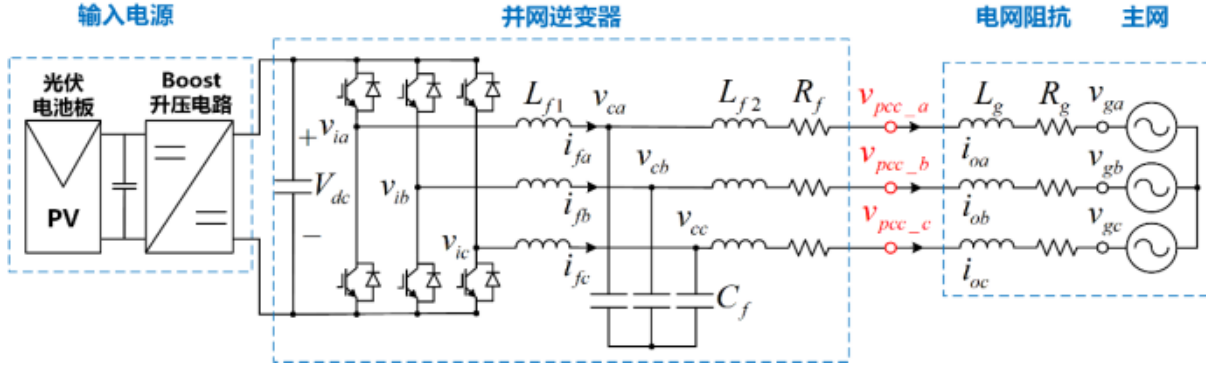
受此影响，在一些非理想电网条件下，微电网将存在电能质量问题。具体包括两种情况，一是电网阻抗导致的并网逆变器不稳定运行。微电网中电网阻抗，受诸多因素影响在较大范围内变化，造成并网逆变器原控制器参数不再适用，从而降低控制性能，并削弱原阻尼效应，导致并网电流发生畸变乃至系统失稳。二是电网电压的背景谐波及不平衡分量引起的并网电流畸变。一般是由非线性、不平衡负荷产生的谐波、不平衡电流流经电网阻抗，引起母线电压畸变，此外由于系统惯性较小，大功率负荷切换也会引起系统电压波动，导致并网电流畸变，影响设备运行和系统稳定。将上述影响微电网电能质量及分布式电源稳定运行的因素统称为非理想电网条件。

研究重要内容和创新点

考虑电网阻抗不确定性及电压扰动的系统建模

考虑如下图三相 LCL 型光伏并网逆变器电路，可在 $\alpha\beta$ 坐标系下建立系统动态模型为

$$\begin{aligned} \dot{i}_o &= \frac{1}{L_o} [-R_o i_o + v_c - v_g] \\ \dot{i}_f &= \frac{1}{L_{f1}} (v_i - v_c) \\ \dot{v}_c &= \frac{1}{C_f} (i_f - i_o) \end{aligned}$$



在控制器的设计过程中有必要考虑模型的不确定性及可能存在的扰动。

首先，考虑电网阻抗的不确定性，可将实际系统中的 L_o ， R_o 分别表示为：

$$\begin{cases} \frac{1}{L_o} = \frac{1}{\bar{L}_o} + \frac{1}{\Delta L_o} \\ R_o = \bar{R}_o + \Delta R_o \end{cases}$$

此时系统模型将变为

$$\dot{\mathbf{i}}_o = \left(\frac{1}{L_o} + \frac{1}{\Delta L_o} \right) [\mathbf{v}_c - (\bar{R}_o + \Delta R_o) \mathbf{i}_o - \mathbf{v}_g]$$

进一步考虑电压扰动，并引入 θ 表示与电网阻抗相关的不确定项， \mathbf{z} 作为系统中的可测量项， \mathbf{d} 认为是与电网/公共母线电压及其扰动相关的未知干扰项，则上述模型可进一步修正为如下表示：

$$\dot{\mathbf{i}}_o = \frac{1}{L_o} (\mathbf{v}_c - \bar{R}_o \mathbf{i}_o) - \theta^T \mathbf{z} - \mathbf{d}$$

可定义系统中的状态变量为 $[\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3, \mathbf{u}]^T = [\mathbf{i}_o, \mathbf{v}_c, \mathbf{i}_f, \mathbf{v}_i]^T$ ，并列写系统状态方程为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_1 &= -B_1 \mathbf{x}_1 + B_2 \mathbf{x}_2 - \theta^T \mathbf{z} - \mathbf{d} \\ \dot{\mathbf{x}}_2 &= -B_3 \mathbf{x}_1 + B_3 \mathbf{x}_3 \\ \dot{\mathbf{x}}_3 &= -B_4 \mathbf{x}_2 + B_4 \mathbf{u} \end{aligned}$$

基于上述模型，所提控制策略的控制目标即考虑未知量 θ 以及扰动量 \mathbf{d} 的条件下，通过调整逆变器的输入信号 \mathbf{u} ，使 \mathbf{x}_1 能够快速、准确地跟踪理想参考波形 \mathbf{x}_1^* 。

基于滤波跟踪误差的鲁棒电流控制策略

首先，进行鲁棒电流控制律设计。如前文所述，控制器的主要目标即使并网电流在电网阻抗变化及电压扰动的条件下跟踪给定的参考电流波形，保证入网电流三相平衡且正弦。那么，定义动态跟踪误差、滤波跟踪误差分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{e} &= \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_1^* & \mathbf{E} &= \mathbf{q}\mathbf{e} + \dot{\mathbf{e}} \\ & & &= \mathbf{q}\mathbf{x}_1 - \mathbf{q}\mathbf{x}_1^* + \dot{\mathbf{x}}_1 - \dot{\mathbf{x}}_1^* \end{aligned}$$

再结合李雅普诺夫函数，可以最终设计鲁棒电流控制律为

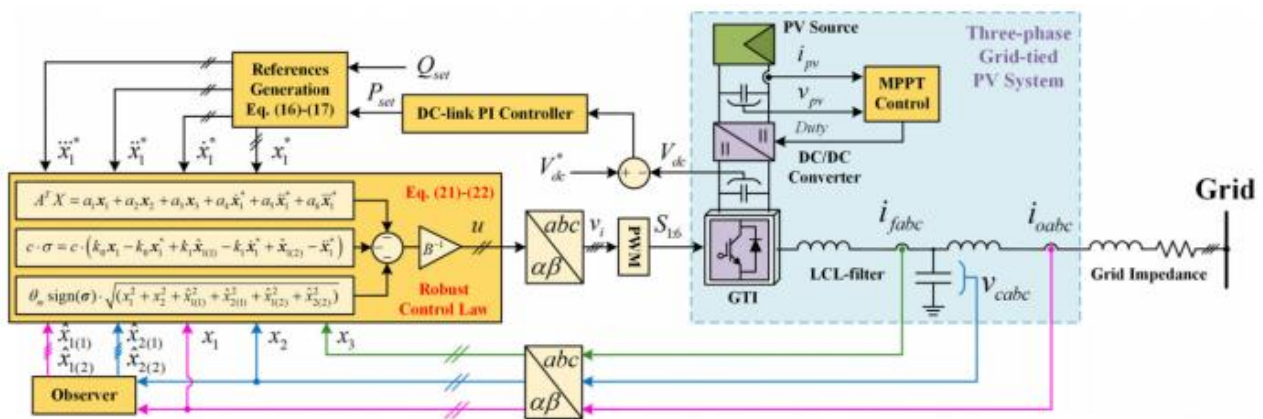
$$\mathbf{u} = \mathbf{B}^{-1}[-\mathbf{c}\boldsymbol{\sigma} - \mathbf{A}^T \mathbf{X} - \theta_m \|\mathbf{Z}\| \text{sign}(\boldsymbol{\sigma})]$$

然后，进行闭环系统稳定性分析。为保证并网逆变系统在所提控制律下的稳定性，定义李雅普诺夫函数并求导，再代入所提控制率，可将李雅普诺夫函数表示为

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -c\|\boldsymbol{\sigma}\|^2 + \boldsymbol{\sigma}^T (\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{Z}) - \theta_m \|\mathbf{Z}\| \cdot \|\boldsymbol{\sigma}\| - \boldsymbol{\sigma}^T \mathbf{f} \\ &\leq -c\|\boldsymbol{\sigma}\|^2 + \|\boldsymbol{\sigma}\| \theta_m \|\mathbf{Z}\| - \theta_m \|\mathbf{Z}\| \cdot \|\boldsymbol{\sigma}\| - \boldsymbol{\sigma}^T \mathbf{f} \\ &\leq -c\|\boldsymbol{\sigma}\|^2 + \|\boldsymbol{\sigma}\| \cdot \|\mathbf{f}\| \end{aligned}$$

若要保证系统的全局稳定性，需在一定的条件下满足 $\dot{V} < 0$ ，在此基础上，需证明所提控制策略可实现以下控制目标：1) 控制变量 \mathbf{x}_1 ，即并网电流能够快速跟踪参考波形，并且能将跟踪误差控制在极小的范围内；2) 闭环系统中的所有信号都有界。而结合李雅普诺夫稳定性定理，上述两点均可得证。由此可知，所提控制律可保证并网电流快速跟踪理想电流参考波形。

最后，实现鲁棒电流控制策略。所提控制策略适用于各种新能源并网逆变器的控制，可视为非理想电网条件下的通用型控制策略。以光伏并网逆变器为例，基于所提控制策略的控制框图如下图所示。



鉴于所提控制策略的控制目标即在电网阻抗变化及电网/公共母线电压存在扰动（谐波、三相不平衡）的条件下实现对理想电流波形的跟踪控制，因此需根据特定的有功、无功功率指令，生成相应的三相平衡且正弦的电流参考轨迹。假设逆变器不含功率损耗，即功率设定值等于逆变器实际输出功率，根据瞬时无功理论，在 $\alpha\beta$ 坐标系下逆变器输出的有功、无功功率可表示为：

$$\begin{bmatrix} P_{inv} \\ Q_{inv} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} v_{pcc1_alpha} & v_{pcc1_beta} \\ v_{pcc1_beta} & -v_{pcc1_alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{o\alpha} \\ i_{o\beta} \end{bmatrix}$$

进而推导逆变器注入电网的电流为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_{o\alpha} \\ i_{o\beta} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} i_{o\alpha_p} \\ i_{o\beta_p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{o\alpha_q} \\ i_{o\beta_q} \end{bmatrix} \\ &= \frac{2}{3} \frac{P_{inv}}{v_{pcc1_alpha}^2 + v_{pcc1_beta}^2} \begin{bmatrix} v_{pcc1_alpha} \\ v_{pcc1_beta} \end{bmatrix} + \frac{2}{3} \frac{Q_{inv}}{v_{pcc1_alpha}^2 + v_{pcc1_beta}^2} \begin{bmatrix} v_{pcc1_beta} \\ -v_{pcc1_alpha} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

再考虑并网点电压三相不平衡，将电压分解为正、负序分量，获取电流参考值：

$$\begin{cases} i_{o\alpha_p}^* = \frac{2}{3} \frac{P_{set} \cdot (v_{pcc1_alpha}^+ + k_p v_{pcc1_alpha}^-)}{[(v_{pcc1_alpha}^+)^2 + (v_{pcc1_beta}^+)^2] + k_p [(v_{pcc1_alpha}^-)^2 + (v_{pcc1_beta}^-)^2]} \\ i_{o\beta_p}^* = \frac{2}{3} \frac{P_{set} \cdot (v_{pcc1_beta}^+ + k_p v_{pcc1_beta}^-)}{[(v_{pcc1_alpha}^+)^2 + (v_{pcc1_beta}^+)^2] + k_p [(v_{pcc1_alpha}^-)^2 + (v_{pcc1_beta}^-)^2]} \\ i_{o\alpha_q}^* = \frac{2}{3} \frac{Q_{set} \cdot (v_{pcc1_beta}^+ + k_q v_{pcc1_beta}^-)}{[(v_{pcc1_alpha}^+)^2 + (v_{pcc1_beta}^+)^2] + k_q [(v_{pcc1_alpha}^-)^2 + (v_{pcc1_beta}^-)^2]} \\ i_{o\beta_q}^* = \frac{2}{3} \frac{Q_{set} \cdot (-v_{pcc1_alpha}^+ - k_q v_{pcc1_alpha}^-)}{[(v_{pcc1_alpha}^+)^2 + (v_{pcc1_beta}^+)^2] + k_q [(v_{pcc1_alpha}^-)^2 + (v_{pcc1_beta}^-)^2]} \end{cases}$$

根据注入电网的有功、无功功率指令 P_s ， Q_s ，通过上式生成相应的入网电流参考值，进而根据采集的负荷电流，生成控制器的电流参考指令，从而实现对非线性及不平衡负荷电流的补偿。实际采用的控制律可表示为

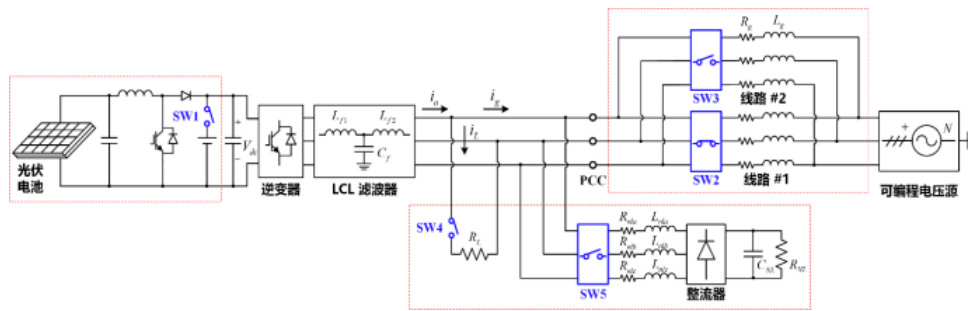
$$\mathbf{u} = B^{-1}[-c\hat{\sigma} - A^T X - \theta_m \|\hat{Z}\| \text{sat}(\hat{\sigma})]$$

由此，可得到并网逆变器在 $\alpha\beta$ 坐标系下的调制波信号为 $\mathbf{v}_i = \mathbf{u}$ ，进而可通过坐标反变换，可生成三相静止坐标系下的调制波信号，用于逆变器的 PWM 控制。

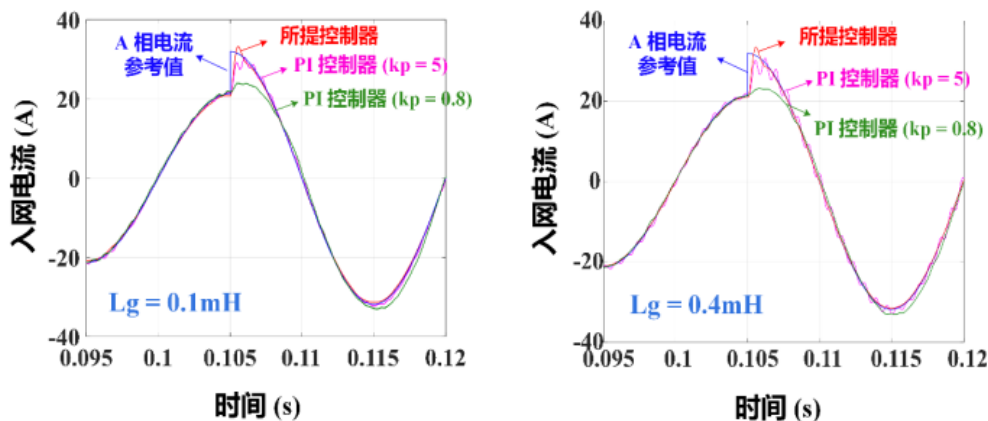
基于实时仿真器的算法验证

仿真分析与半实物验证

将所提鲁棒电流控制算法分别在 Matlab/Simulink 离线环境及基于 NI-PXI 的硬件在环 (HIL) 实验中进行测试。用于仿真及 HIL 实验的测试系统示意图如下图所示，其中 PV 电池板及 Boost 升压电路作为并网逆变器的前级；逆变器的直流母线上还连接有储能装置（如蓄电池等），在适当的控制下可将其视为理想直流源。在该系统上通过调节开关（SW）的开通/关断可模拟不同的逆变器运行模式及工况，例如 SW1 断开时逆变器将工作于 MPPT 模式，而当 SW1 闭合时逆变器将接受调度指令并运行于理想直流电源模式；通过控制 SW2 和 SW3 的闭合或关断可分别在线路#1 和线路#2 之间进行切换，用于模拟电网阻抗变化的场景；此外，本地负荷可通过 SW4、SW5 接入该系统。网侧电压存在的扰动（谐波、三相不平衡等）均通过可编程电压源进行模拟。



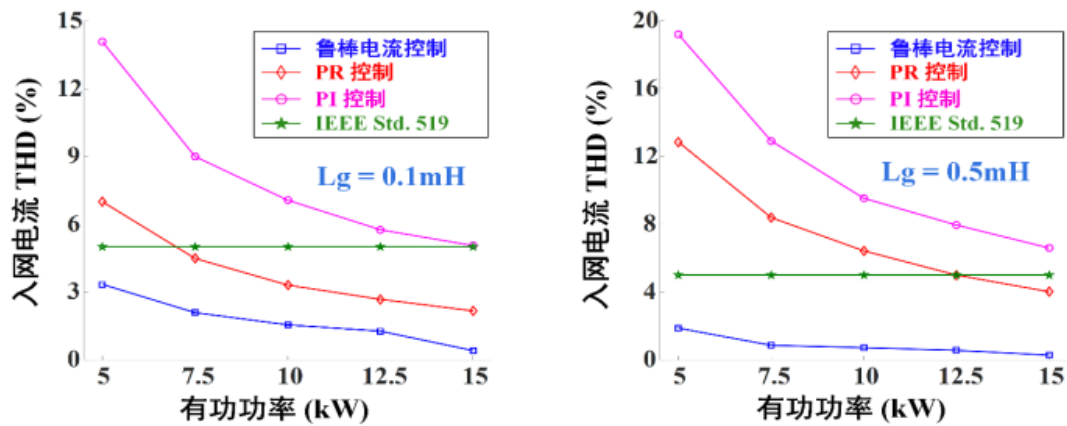
进行电流跟踪性能测试。考虑不同电网阻抗条件下，电流参考波形发生阶跃，对比不同参数 PI 控制器，结果如下图所示。



由图可见，所提控制策略下的电流控制器能够在电网阻抗变化下同时兼顾动态跟踪性能及鲁棒性。

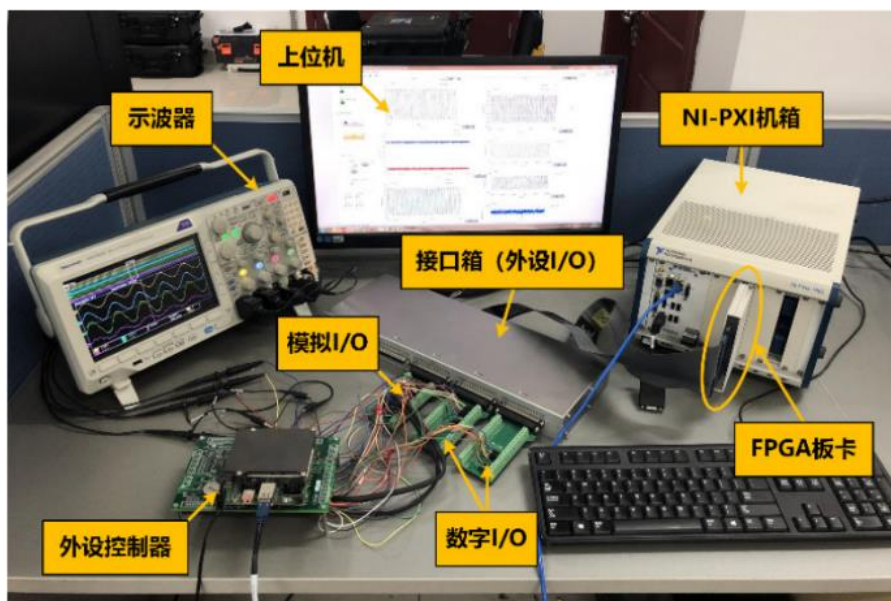
进行谐波抑制能力测试。分析电网电压谐波干扰下所提控制器入网电流的总谐波失真 THD，并

对比相同条件下的 PI、 PR 控制器入网电流波形质量，结果如下图所示。

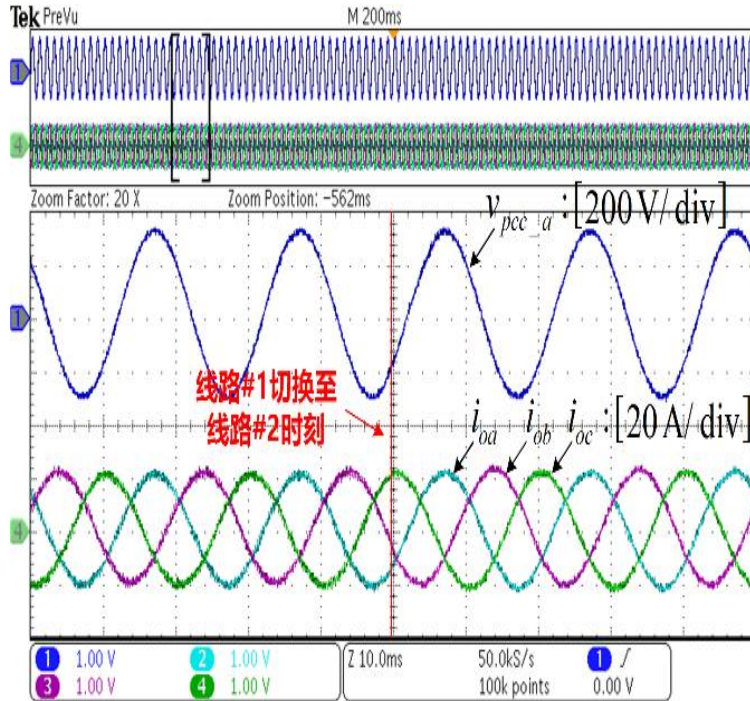


由图可见，所提鲁棒电流控制策略能够适应较大范围的电网阻抗变化，且入网电流的质量最高。

进一步进行半实物仿真实验验证。搭建如下图所示硬件在环测试平台，利用 Starsim 仿真软件搭建一次系统模型，外设控制器（控制算法）+ NI-PXI 机箱 FPGA（Starsim HIL 电路仿真），经外设 IO 形成硬件在环闭环系统，上位机进行程序在线调试和运行结果实时观测，示波器记录实时波形。



考虑电网阻抗变化，仿真结果如下图。由结果可见，对比 PI / PR 控制器下 PCC 电压含有大量的谐波而造成了入网电流产生畸变，所提控制策略能够在电网阻抗变化范围较大时仍能维持逆变器稳定运行并保证入网电流质量。



通过仿真实验可进一步验证：在谐波及三相不平衡扰动下，所提控制器可保障入网电流三相平衡且正弦；考虑电网频率及相位偏移，所提控制器可保证在频率变化及相位偏移条件下的控制系统鲁棒性。

最后，考虑不平衡/非线性负载，仿真结果如下图。由结果可见，在负荷变化的情况下，逆变器能够提供本地负荷所需的相应无功、负序及谐波电流进行补偿，也即验证了所提控制策略的鲁棒性及改善微电网电能质量的能力。

