

Grid-Forming Inverter Primary Control Using Robust-Residual-Observer-Based Digital-Twin Model

用户与研究成果简介：

北方工业大学史运涛老师所在的科研团队针对构网型（Grid-forming, GFM）逆变器系统中的 LC 滤波器固有的参数漂移现象和负载侧的扰动等问题，提出了一种基于鲁棒残差观测器的数字孪生模型(RRODTM)，基于 RRODTM 设计了一次主动容错控制（PAFTC）策略用于实现构网型逆变器的一次控制。RRODTM 由鲁棒残差观测器和残差补偿控制器组成。其中，残差补偿控制器是采用数据驱动的方式实现求解和动态更新的。同时，设计了基于稳定裕度的控制性能监测指标，构建了数据驱动的事件触发机制，实现了残差补偿控制器的即插即用功能。基于此，PAFTC 策略根据乘性故障的严重程度可在线提高控制性能。同时，基于模型匹配原理构建广义系统模型，基于 LMI 方法实现了扰动补偿控制器的求解，实现了扰动抑制的目标。研究利用上海远宽能源的 StarSim 实时仿真器进行实验，验证了所提出的 PAFTC 控制策略的控制性能，并把成果总结发表于《IEEE Transactions on Industrial Informatics》：

S. Zhang, C. Liu, Y. Shi, X. Yin, and T. Cheng, "Grid-Forming Inverter Primary Control Using Robust-Residual-Observer-Based Digital-Twin Model," IEEE Transactions on Industrial Informatics, doi: 10.1109/TII.2023.3268770.

一、研究意义和现状

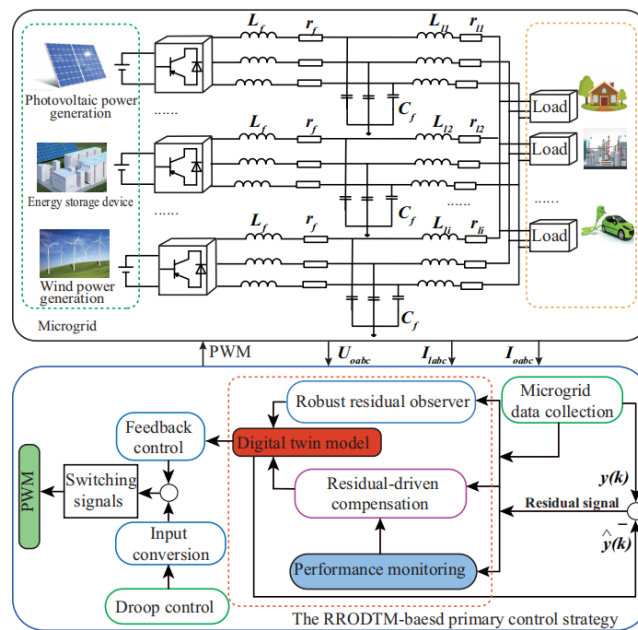
构网型(Grid-forming, GFM)逆变器最初是为微电网和孤岛电网应用引入的。它用于设定系统电压和频率，并为负载提供有功和无功功率。目前，它已被提出作为一种可行的解决方案，以提高系统的稳定性和弹性。这对 GFM 逆变器的暂态和稳态性能提出了很高的要求。提高 GFM 逆变器的工作性能具有重要意义。

对于 GFM 逆变器，由于开关器件的通断，往往会有一部分高次谐波混入并网电流中。为了解决这个问题，通常引入一个 LC 滤波器来连接逆变器和电网。然而，LC 滤波器的固有共振、击穿和老化会改变系统的响应特性。电感与电容的参数漂移以及故障会导致实际模型与标称模型之间存在偏差，这在一定程度上会降低控制器的控制性能。同时，源荷侧的多源不确定性会引入的扰动信号，会影响构网型逆变器的输出电能质量。另外，当多台逆变器并网运行时，电网对逆变器的即插即用与功率分配需求均对 GFM 逆变器的性能

提出了较高要求。特别是随着电路元器件的故障演化，系统的内部不确定性增加，传统的基于标称模型设计的控制器控制性能会严重下降。由于传统的内环结构由电压环和电流环组成，难以分离乘性不确定性。因此，在处理乘性不确定性时，部分文献直接假定乘性故障的范围，这在一定程度上降低了正常情况下的控制器的控制性能，且无法在故障情况下实现对系统性能的有效监测。如何根据乘性故障的程度及时有效的优化控制策略并实现扰动抑制对于提高 GFM 逆变器的性能具有重要意义。

二、研究技术路线和具体步骤

史运涛老师团队围绕 GFM 逆变器在运行过程中存在乘性不确定性和扰动等方面的问题采用基于观测器的状态反馈框架设计了一次控制策略。通过采用互质分解技术和 Youla 参数化理论对乘性不确定性进行了表征，并以此为基础设计了残差补偿控制器，构建了由鲁棒残差观测器和残差补偿控制器组成的数字孪生模型，通过对控制性能监测指标的计算，实现数字孪生模型的动态更新。同时，在此基础上，基于模型匹配原理构建了 GFM 逆变器的广义系统模型，并基于 LMI 方法实现了扰动补偿信号的求解。研究框架如下图所示：



具体包括数学模型的构建和一次控制策略的设计两个方面的内容：

- (1) 数学模型的构建包括：GFM 逆变器基础数学模型的构建以及乘性故障导致的乘性不确定性的建模；
- (2) 一次控制策略的设计要实现三方面的控制性能：在保障跟踪控制的同时提高动态性能，实现对乘性故障的容错控制，实现对抗动信号的补偿控制：
 - 1) 跟踪控制：将 PI 控制与 LQR 控制相结合构建一次基础控制结构；
 - 2) 容错控制：将残差观测器与残差补偿控制器和动态控制性能监测触发机制相结合构建数字孪生模型；
 - 3) 扰动抑制：基于模型匹配原理构建广义系统模型，采用 LMI 方法求解扰动补偿信号。

三、数学模型的推导及仿真模型的搭建

首先，采用经典的逆变器建模方法，对 LC 滤波电路进行建模：

$$\begin{cases} \frac{di_{Ld}}{dt} = -\frac{r_f}{L_f} i_{Ld} + \omega i_{Lq} - \frac{1}{L_f} u_{od} + \frac{1}{L_f} u_{id} \\ \frac{di_{Lq}}{dt} = -\frac{r_f}{L_f} i_{Lq} - \omega i_{Ld} - \frac{1}{L_f} u_{oq} + \frac{1}{L_f} u_{iq} \\ \frac{du_{od}}{dt} = \frac{1}{C_f} i_{Ld} + \omega u_{oq} - \frac{1}{C_f} i_{dd} \\ \frac{du_{oq}}{dt} = \frac{1}{C_f} i_{Lq} - \omega u_{od} - \frac{1}{C_f} i_{dq} \end{cases}$$

其中，系统状态，输出，控制输入以及扰动表示为

$$x = [i_{Ld}, i_{Lq}, u_{od}, u_{oq}]^T, \quad u = [u_{id}, u_{iq}]^T$$

$$d = [i_{dd}, i_{dq}]^T, \quad y = [i_{Ld}, i_{Lq}, u_{od}, u_{oq}]^T$$

离散化后的系统状态空间模型表示为

$$\begin{cases} x(k+1) = A_z x(k) + B_z u(k) + E_z d(k) \\ y(k) = Cx(k) + Du(k) \end{cases}$$

当电系统发生乘性故障，即电感电容参数发生漂移时：

$$A_{z\Delta} = \begin{bmatrix} -\frac{r_f}{L_f + \Delta L_f} & \omega_0 & -\frac{1}{L_f + \Delta L_f} & 0 \\ -\omega_0 & -\frac{r_f}{L_f + \Delta L_f} & 0 & -\frac{1}{L_f + \Delta L_f} \\ \frac{1}{C_f + \Delta C_f} & 0 & 0 & \omega_0 \\ 0 & \frac{1}{C_f + \Delta C_f} & -\omega_0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_{z\Delta} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f + \Delta L_f} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f + \Delta L_f} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

此时，对于 GFM 逆变器而言，系统内既包含电感和电容在实际工况中因参数漂移、老化、故障等，引发乘性故障导致系统存在乘性不确定性，同时还包含负载投切、不平衡负载以及非线性负载接入情况下的扰动信号，

- ※ 如何表示乘性不确定性并实现对控制性能的监测？
- ※ 如何实现对乘性故障的容错控制以提高系统性能？
- ※ 如何在多源扰动存在的情况下实现扰动抑制？

针对以上问题，首先基于 Youla 参数化理论对闭环系统进行互质分解处理，即

$$G(z) = \hat{M}_0^{-1}(z) \hat{N}_0(z) = N_0(z) M_0^{-1}(z)$$

$$K(z) = -X_0^{-1}(z)Y_0(z) = -\hat{Y}_0^{-1}(z)\hat{X}_0^{-1}(z)$$

以上系统和控制器对应的互质分解因子的状态空间形式可表示为

$$\begin{aligned} M_0(z) &= (A_F, B_z, F, I), N_0(z) = (A_F, B_z, C + DF, D) \\ \hat{X}_0(z) &= (A_F, L, C + DF, I), \hat{Y}_0(z) = (A_F, -L, F, 0) \\ \hat{M}_0(z) &= (A_L, -L, C, I), \hat{N}_0(z) = (A_L, B_z - LD, C, D) \\ X_0(z) &= (A_L, -B_z + LD, F, I), Y_0(z) = (A_L, -L, F, 0) \end{aligned}$$

基于此，采用间隙度量的方式表示故障系统与标称系统之间的距离关系，并通过互质分解因子来表征乘性故障导致的乘性不确定性，即

$$\begin{aligned} G_f &= \begin{bmatrix} A_{z\Delta} & B_{z\Delta} \\ C & D \end{bmatrix} = \hat{M}^{-1}(z)\hat{N}(z) \\ G_f &= (\hat{M}_0 + \Delta_{\hat{M}})^{-1}(\hat{N}_0 + \Delta_{\hat{N}}). \\ [-\Delta_{\hat{N}_0} \quad \Delta_{\hat{M}_0}] &= [\hat{N}_0 \quad -\hat{M}_0] - \mathcal{L}^*[\hat{N} \quad -\hat{M}]. \\ \mathcal{L}^* &= \arg \inf_{\mathcal{L} \in \mathcal{RH}_\infty} \|[\hat{N}_0 \quad -\hat{M}_0] - \mathcal{L}[\hat{N} \quad -\hat{M}]\|_\infty \end{aligned}$$

基于以上对乘性故障导致的乘性不确定性分离来设计一次控制策略。主要包括两个部分，一部分是参考信号转换部分，一部分是数字孪生模型的构建以及性能监测机制的构建部分。

在参考信号转化部分，涉及到下垂控制、PI 控制和扰动补偿三个环节。下垂控制部分用于根据功率需求产生参考电压信号，

$$\begin{cases} f_{ri} - f_0 = -m(P_{ri}^* - P_i) \\ u_{ori} - u_0 = -n(Q_{ri}^* - Q_i) \end{cases}$$

PI 控制部分用于根据参考电压生成参考电流信号，

$$\begin{cases} i_{rd} = (u_{ord} - u_{0d}) \left(k_{pv} + \frac{k_{iv}}{s} \right) + d_{rd} \\ i_{rq} = (u_{orq} - u_{0q}) \left(k_{pv} + \frac{k_{iv}}{s} \right) + d_{rq} \end{cases}$$

其中，扰动补偿电流是由扰动补偿控制器获得的。基于模型匹配原理构建以扰动电流为广义系统模型的输入，使其输出趋近于零的设计思路，通过采用 LMI 理论实现求解，即

$$\begin{aligned} \min_{T_d(z) \in \mathcal{RH}_\infty} & \| [G_d(z) - G_{rd}(z)T_d(z)G(z)] \|_\infty \\ G_{rd} &= \left[\frac{A_z - LC}{C} \middle| \frac{E_z}{D} \right] \quad G_T = G_d = \left[\frac{A_z}{C} \middle| \frac{E_z}{D} \right] \end{aligned}$$

在数字孪生模型的构建部分，首先，基于对偶理论，采用 LQR 方法求解标称系统对应的观测器增益 L ，

并构建残差生成器，即

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = A_z \hat{x}(k) + B_z u(k) + Lr(k) \\ r(k) = y(k) - C\hat{x}(k) - Du(k) \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_L(k+1) = A_z^T x_L(k) + C^T u_L(k) \\ y_L(k) = B_z^T x_L(k) \end{cases}.$$

$$u_L(k) = L^T x_L(k).$$

$$J_L = \sum_{k=0}^{N-1} (x_L(k)^T Q_L x_L(k) + u_L(k)^T R_L u_L(k))$$

然后，通过采集系统的输入输出信号构建数字矩阵，并采用数据驱动的方式实现残差补偿控制器的求解，即

$$\bar{Y}_{k,s} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{k,s}^1 \\ \bar{Y}_{k,s}^2 \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{(s+1)m \times N}$$

$$\bar{Y}_{k,s} = \Gamma_s X_{k-s} + H_{u,s} U_{k,s} \in \mathcal{R}^{(s+1)m \times N}$$

$$R(z) = F^+ \arg \inf_{Q \in RH_\infty} |\Pi_1 - \Pi_2 Q^*|_\infty.$$

$$\Pi_1 = \mathcal{L}^*(\hat{N}\hat{Y}_0 + \hat{M}\hat{X}_0) - I, \quad \Pi_2 = \mathcal{L}^*(\hat{N}M_0 + \hat{M}N_0).$$

$$\Pi_1 = \mathcal{L}^*(\hat{N}\hat{Y}_0 + \hat{M}\hat{X}_0) - I$$

$$\Pi_2 = \mathcal{L}^*(\hat{N}M_0 + \hat{M}N_0).$$

其中乘性故障系统的互质分解因子在线求解算法为

Towards data-driven realization of SKR	
1: Do LQ-factorization	
$\begin{bmatrix} Z_{k-s-1,\rho-1} \\ U_{k,s} \\ Y_{k,s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & 0 & 0 \\ R_{21} & R_{22} & 0 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix}$	
$\begin{bmatrix} U_{k,s} \\ Y_{k,s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{21} & R_{22} \\ R_{31} & R_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ R_{33}Q_3 \end{bmatrix}$	
2: Do SVD of	
$\begin{bmatrix} U_{k,s} \\ Y_{k,s} \end{bmatrix} \frac{Z_{k-s-1,s}^T}{N-1} = [U_1 \quad U_2] \begin{bmatrix} \Sigma_1 & 0 \\ 0 & \Sigma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{bmatrix}$	
3: Through the parity vector method get A_z, B_z, C_z, D_z	
4: Calculate $\hat{M}, \hat{N}$	
$\hat{M} = (A_z, L_z, -C_f, I), \quad \hat{N} = (A_z, B_z, C_f, D_f)$	

数据驱动的残差补偿控制器是数字孪生模型构建的关键，但其更新过程取决于系统的乘性故障程度，因此引入了系统性能监测指标，来实现残差补偿控制器的即插即用性能。控制性能指标的计算过程为：

1:Online collecting the measurement data $r(k), v^-(k)$
 2:Constructing the Hankel matrices

$$R_{k,l,N} = \begin{bmatrix} r(k-l) & \cdots & r(k-l+N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r(k) & \cdots & r(k+N) \end{bmatrix}$$

$$\bar{V}_{k,l,N} = \begin{bmatrix} \bar{v}(k-l) & \cdots & \bar{v}(k-l+N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{v}(k) & \cdots & \bar{v}(k+N) \end{bmatrix}$$

3:Recursively computing the maximal singular value

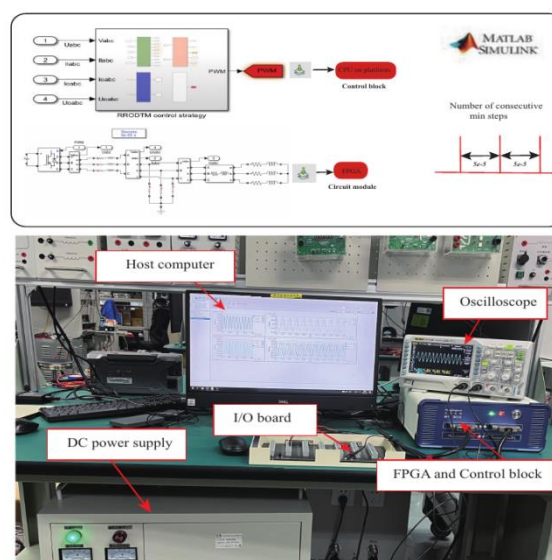
$$J(K) = \sigma_{\max} \left(R_{k,l,N} \bar{V}_{k,l,N}^T \left(\bar{V}_{k,l,N} \bar{V}_{k,l,N}^T \right)^{-1} \right)$$

基于以上过程通过构建残差生成器和残差补偿控制器实现了基于鲁棒残差观测器的数字孪生模型的构建。

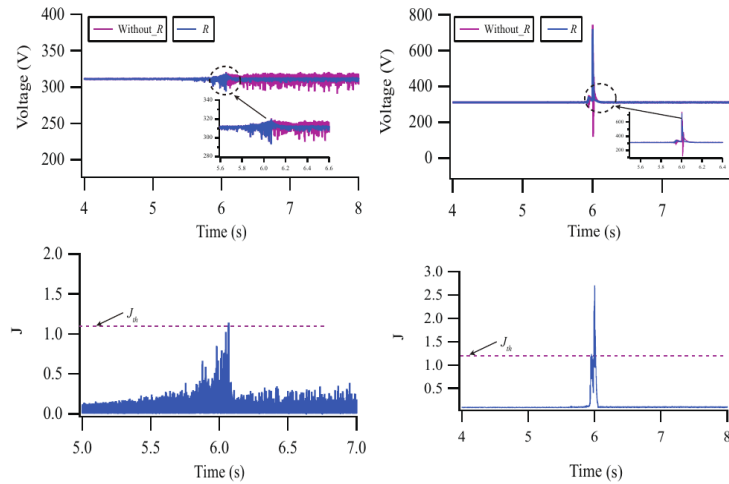
具体的理论建模与分析过程详见史运涛老师团队发表的文章。

四、仿真与半实物实验验证

史运涛老师团队在远宽能源的实验平台上验证了提出的一次控制策略的对乘性故障的容错能力、扰动的抑制能力和功率分配准确性等方面的性能。实验在电磁瞬变仿真软件 Star Sim 中建立相应的电路拓扑，并在基于 Xilinx Zynq-7100 FPGA 的实时半在环测试(HIL)系统中运行，时间间隔为 0.5 微秒。控制器基于双核 ARM CPU，通过数字 I/O 接口与实时模拟器进行交互。团队分别进行了 1 台逆变器、2 台逆变器、3 台逆变器并网的相关实验。实验平台如下所示：

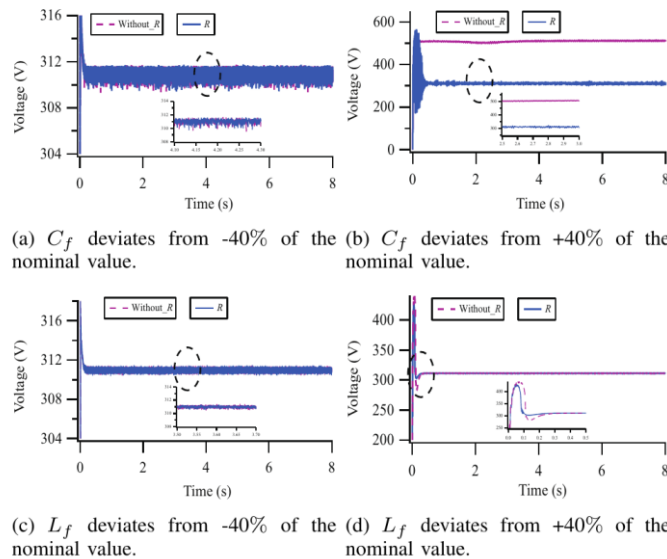


在 1 台逆变器的实验中，首先，验证了电感饱和、电容参数漂移情况下的电容端电压情况和与之相对应的性能监测指标变化情况以及性能监测指标超出阈值时的触发机制的有效性，实验结果如下图所示



(a) Capacitor operates in high temperature. (b) Inductance saturation process.

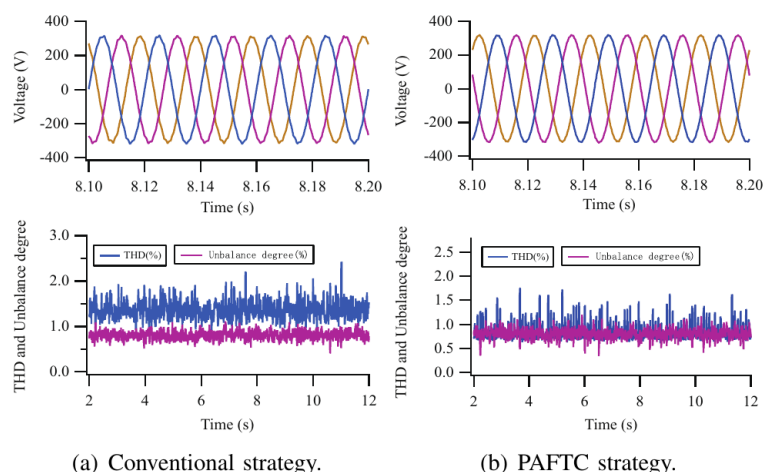
实验结果表明, 当乘性故障演化到一定程度时, 超出设定的性能指标的阈值, 此时数据驱动的残差补偿控制器动作, 保障了电容端电压的稳定性。然后, 针对电感电容参数保持偏标称值+40%和-40%情况下, 完成了残差补偿控制器控制性能有效性的验证, 实验结果如下图所示:



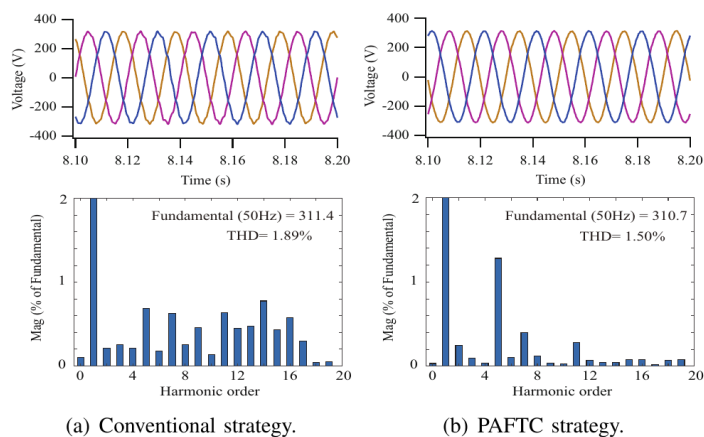
(a) C_f deviates from -40% of the nominal value. (b) C_f deviates from +40% of the nominal value.
(c) L_f deviates from -40% of the nominal value. (d) L_f deviates from +40% of the nominal value.

实验结果表明, 当电感电容参数分别偏离系统标称值+40%和-40%情况下, 残差补偿控制器依然可以保障 GFM 逆变器的稳定运行, 保障电容端电压在一定范围之内波动。

然后, 在 1 台逆变器的实验中, 验证了负载侧分别接入不平衡负载和非线性负载情况下, 所提出的 PAFTC 一次控制策略的有效性。不平衡负载 ($R_A=R_B=R_C=5\Omega$, C 相断开) 接入的实验结果如下:

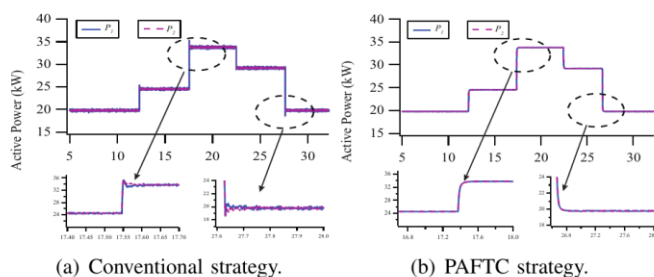


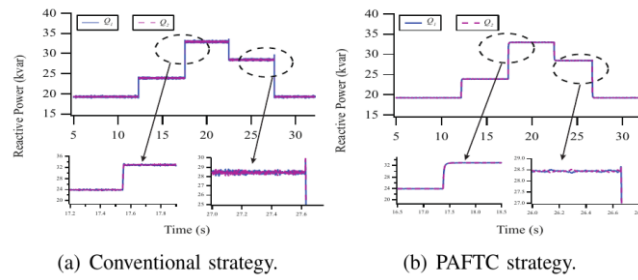
30kW 非线性负载接入的实验结果如下:



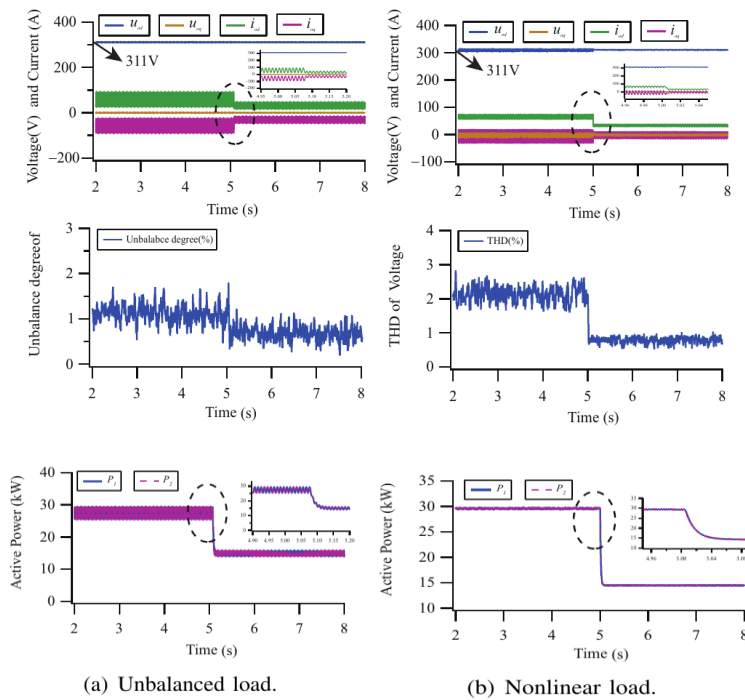
以上两个实验表明, 所提出的 PAFTC 一次控制策略对于非线性负载和不平衡负载产生的扰动电流具有较好的抑制作用。

在 2 逆变器的实验中, 首先验证了所提出的 PAFTC 一次控制策略的有功和无功功率分配性能, 实验结果如下:



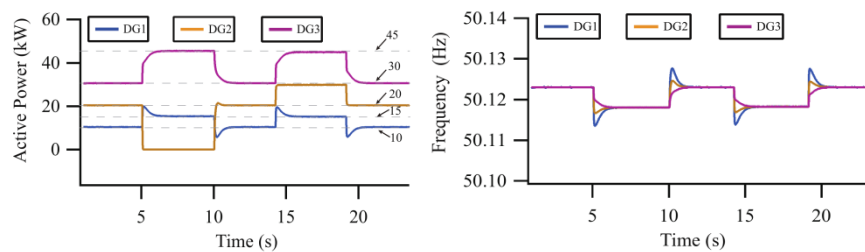


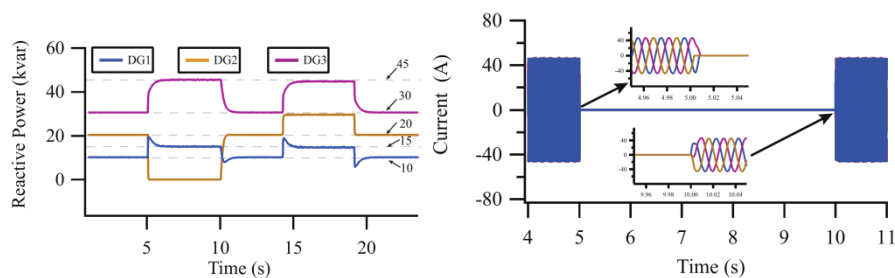
然后，在负载侧全部接入非线性负载和不平衡负载的情况下，验证了一次控制策略的扰动抑制性能和功率分配的精确性，实验结果如下：



实验结果表明所提出的 PAFTC 一次控制策略在 2 台逆变器并网运行的情况下表现出了较好的扰动抑制性能和功率分配性能。

最后在 3 台逆变器的实验中验证了 PAFTC 策略的功率分配性能以及逆变器的即插即用性能，实验结果如下：





五、结论

史运涛老师团队提出的 PAFTC 一次控制策略，利用互质分解技术和 Youla 参数化理论实现了由乘性故障引起的乘性不确定性的分离；通过分离乘性不确定性，设计了一个具有即插即用性能的残差驱动的补偿控制器；构造了一种结合鲁棒残差观测器和残差驱动补偿控制器的数字孪生模型。基于 RRODTM 数字孪生模型，一次控制策略不依赖于精确的系统模型，可在线提升控制性能；在远宽实验平台上完成了半实物实验验证，实验结果表明，PAFTC 一次控制策略实现了对乘性故障的容错控制，抑制了负载侧扰动，保证了功率分配的准确性。