



## 合肥工业大学- 基于 Sobol 拟随机脉宽调制的电网阻抗检测方法

## 用户与研究成果简介：

合肥工业大学杜燕副教授的科研团队提出了一种基于 Sobol 拟随机脉宽调制 (SQRPWM) 的电网阻抗检测方法，利用随机脉宽调制的频谱搬移和 Sobol 拟随机序列的均匀性进行宽频阻抗测量，并根据系统带宽和稳定性约束等条件优化设计了 SQRPWM 频率边界。研究利用上海远宽的 StarSim 电力电子小步长实时仿真器进行实验，通过实验结果验证了所提出的阻抗测量方案具有扰动小、高频段测量精度高的优点，可与基于电流扰动的阻抗测量方案联合使用，并把成果总结发表于《电力系统自动化》：

杜燕，吴厚博，杨向真，蒋伟，苏建徽. 基于 Sobol 拟随机脉宽调制的电网阻抗检测方法[J]. 电力系统自动化. 已录用。

## 课题研究背景

### 阻抗测量研究意义与现状

随着配电网中光伏发电、风力发电及其他分布式发电的广泛渗透，电网阻抗特性呈现时变性，实时获取电网阻抗信息有助于增强电网的透明性和可控性，提高并网设备和电网调控的智能化水平，因此电网阻抗在线检测已受到越来越多的关注。

基于逆变器的主动测量方法中，扰动信号一般施加于电流控制环路，阻抗测量频段受到控制器带宽和开关频率的影响，控制带宽以上的数千赫兹的高频段阻抗测量效果不佳，这限制了基于逆变器的电网阻抗测量频段。

由于频段较高，高频谐波阻抗测量具备扰动能量低、测量速度快的优点，在并网逆变器的弱电网稳定性研究、微电网线路阻抗检测、孤岛检测等方面可用于获取电感、电阻信息，改善系统的控制效果。而随着分布式发电渗透率的升高，电网的阻抗特征趋向高阶、非线性特征，高频谐波阻抗测量可获取电网的数千赫兹的宽频阻抗信息，应用于宽频失真失稳特性估计、故障特征诊断等方面。

## 研究重要内容和创新点

### 阻抗测量结构与原理

基于逆变器的电网阻抗主动测量方案如图 1 所示，其中：PLL 表示锁相环；FFT 表示快速傅里叶变换；Vdc 为直流输入电压，L1、C 和 L2 构成 LCL 型输出滤波器，upcc(s)为公共连接点 (point

of common coupling, PCC) 电压, 逆变器采用电流控制,  $i_{ref}(s)$ 为指令电流,  $G_c(s)$ 为电流调节器, 并网电流  $i_{pcc}(s)$ 与滤波电容电流  $i_c(s)$ 的采样系数分别为  $k_i$  和  $k_c$ ; 电网由理想电压源  $u_g(s)$ 加串联电网阻抗  $Z_g(s)$ 的戴维南电路表示。通常, 注入的扰动信号位于电流参考值 (A 点), 本文所提方案扰动位于控制环节的输出处 (B 点)。

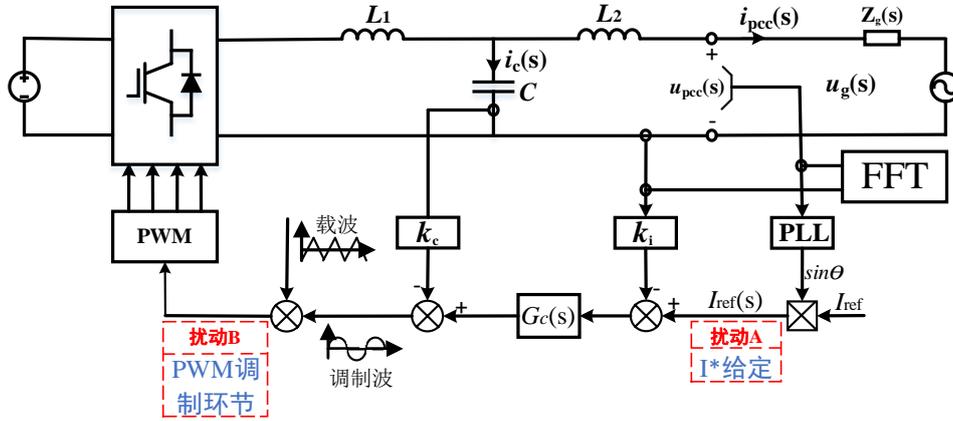


图 1 基于逆变器的电网阻抗主动测量方案

在图 1 所示的测量方案中, 电网在角频率  $\omega$  处的阻抗  $Z(j\omega)$ 由式(1)获得。

$$Z(j\omega) = \frac{\Delta u_{pcc}(j\omega)}{\Delta i_{pcc}(j\omega)} = \frac{u_{pcc,k}(j\omega) - u_{pcc,k-1}(j\omega)}{i_{pcc,k}(j\omega) - i_{pcc,k-1}(j\omega)} \quad (1)$$

式中:  $u_{pcc,k-1}(j\omega)$ ,  $i_{pcc,k-1}(j\omega)$ 和  $u_{pcc,k}(j\omega)$ ,  $i_{pcc,k}(j\omega)$ 分别为扰动前(k-1)时刻和扰动(k)时刻的 PCC 处电压及电流。

### SQRPWM 阻抗测量法设计与结果

由于常用的线性同余伪随机序列虽在无限时间段中可近似服从均匀分布, 但有限时间段中, 会出现随机数聚集, 即连续多个随机数大于或小于数学期望, 从而破坏开关频率的均匀性, 影响在有限时间条件下扰动信号的频谱分布。合工大杜燕团队提出基于 Sobol 序列随机 PWM 调制的阻抗测量方法, 随机数  $R_k$  满足:

$$R_k = (2^{-1} \dots 2^{-M_B}) [(a_0(i_k) \dots a_{M_B-1}(i_k))^T] = \sum_{l=0}^{M_B-1} a_l(i_k) \cdot 2^{-l-1} \quad (2)$$

式中: T 表示矩阵转置; 整数  $i_k$  可用式 (3) 表示。

$$i_k = \sum_{l=0}^{M_B-1} a_l(i_k) 2^l \quad i_k = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

式中： $ik$  为自然序列； $a_l(ik)$  为将  $i$  转换为二进制后的第  $l+1$  位系数； $MB$  为将  $i$  表示为二进制后的数位总数。

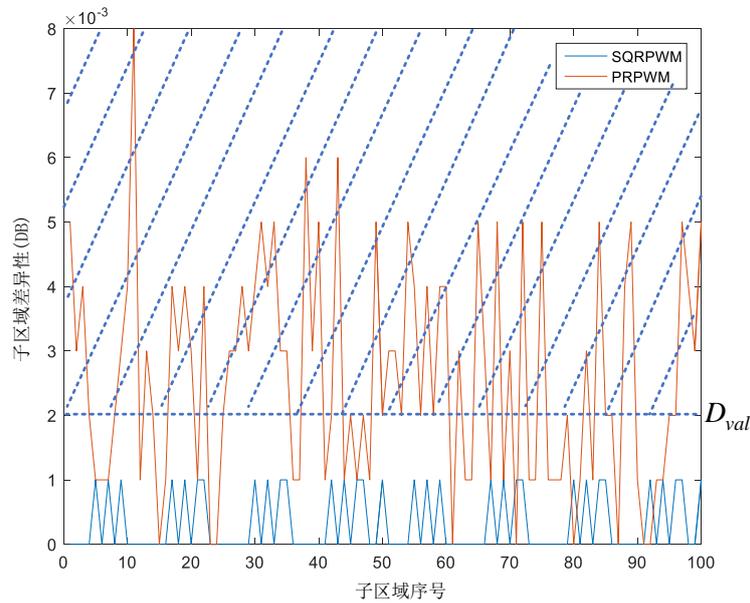


图 2 SQRPWM 和 LRPWM 的差异度对比

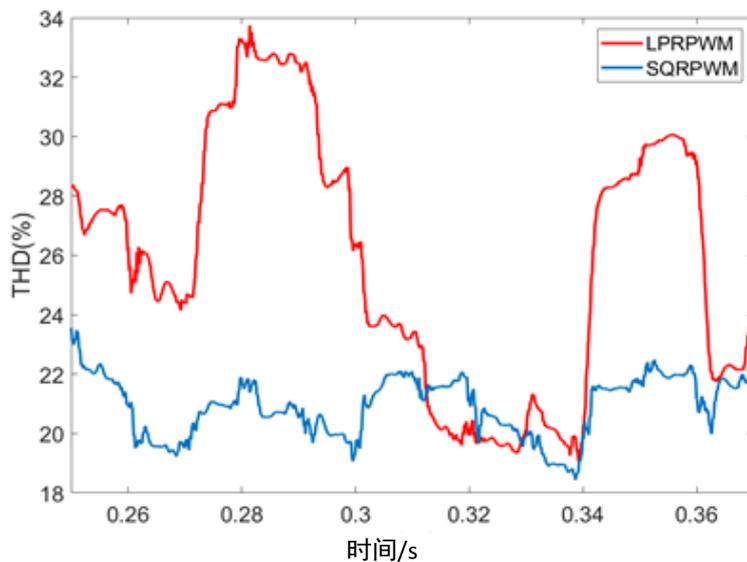


图 3 2 种随机序列对输出电流 THD 的影响

根据差异度对比了拟随机序列和伪随机序列的均匀性（图 2），并分析二者对电能质量的影响（图 3），结果表明 Sobol 拟随机序列具有更好的均匀性，且对电能质量影响更小。方案的设计约束详细推导详见合肥工业大学大学科研团队发表的文章。

## 基于实时仿真器的算法验证

### 基于任意拓扑小步长实时仿真的阻抗方法验证

研究在实验验证阶段，测试不同扰动下电能质量的变化情况和阻抗测量的精度及有效频段，并验证了所提阻抗检测方法的可行性和有效性。一般来说，阻抗测量这种实验需要复杂的编程实现 FFT 分析和输出结果拟合，同时扰动会破坏电网电能质量一般较难在实物系统上实现；纯软件仿真又难以模拟采样精度和实际中数字延时对所提方案的影响。实时仿真器可以模拟主电路的同时复现数字控制器实现方案的效果，又不会有扰动实验破坏并网系统电能质量和稳定性的问题，是阻抗测量方法验证的理想测试设备。

### 任意拓扑小步长实时仿真对于阻抗测量方法验证的重要性

电力电子系统通常含有高速动作的开关元件，其实时仿真有一定挑战，通常有两种方法来实现电力电子系统的实时仿真，一种是基于 PWM 占空比测量的平均值大步长方法，一种是基于细节模型的小步长实时仿真。对于实时阻抗检测实验来说，它需要以较快的采样频率对 PCC 点处的电压和电流信号进行实时采样和 FFT 分析，而不是经过大步长平均的信号。

远宽能源 ([www.modeling-tech.com](http://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；合肥工业大学科研团队就采用了 StarSim 电力电子实时仿真器来进行所提出的基于 Sobol 拟随机脉宽调制的电网阻抗检测方法的试验验证。

图 4 是 HIL+HIL 测试平台示意图，实验中使用了两台实时仿真系统 HIL，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；其中主电路和 FFT 分析运行于一台 HIL 上，另一台 HIL 用于实现随机 PWM 调制和控制环路。

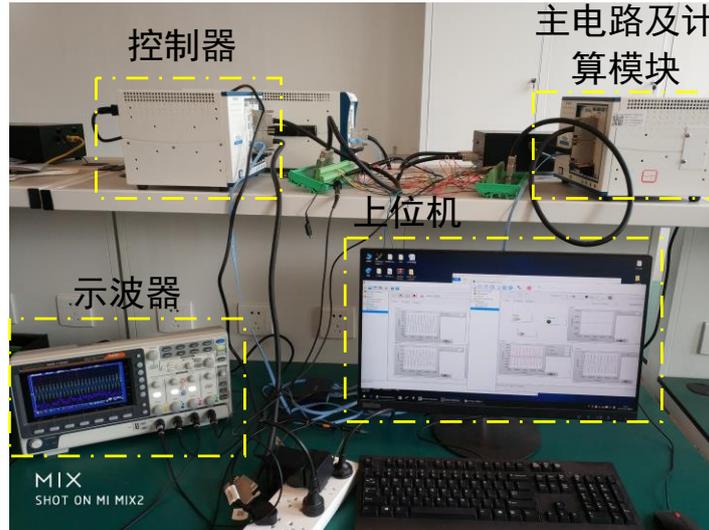
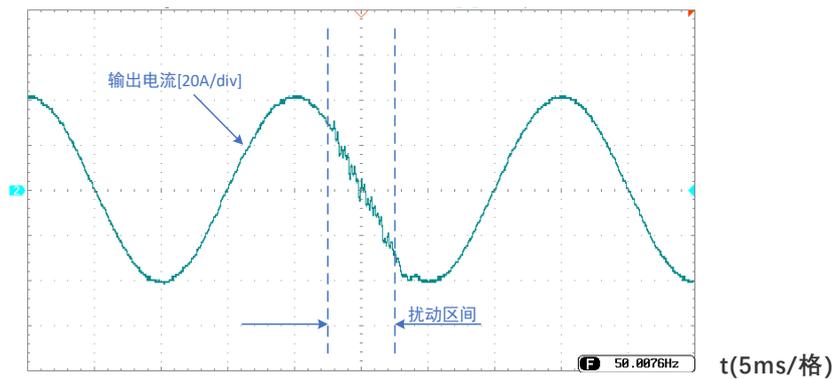
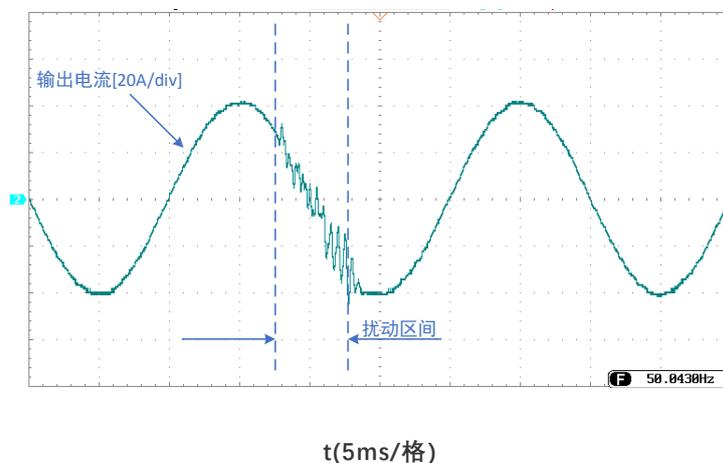


图 4 基于 Starsim 的实时阻抗测量实验平台

下图为在小步长实时仿真实验平台上不同随机序列的 RPWM 对电能质量的影响波形及阻抗测量结果图。

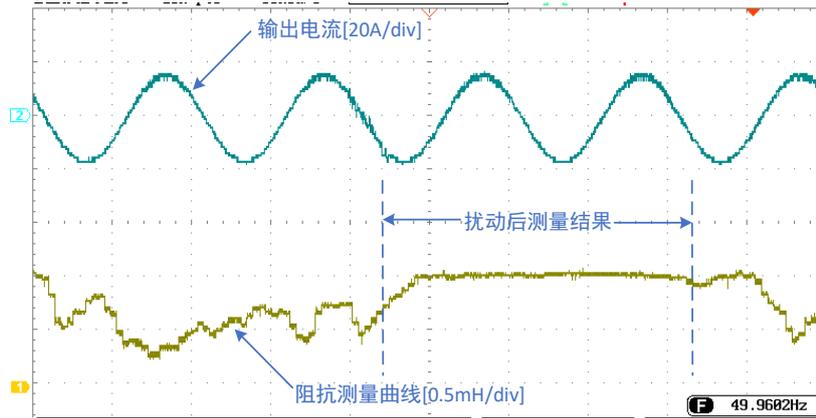


(a)SQRPWM 扰动输出电流波形



(b)LRPWM 扰动输出电流波形

图 5 SQRPWM(a)与 LRPWM(b)输出电流波形



t(10ms/格)

图 6 SQRPWM 扰动测量结果

由图 5(a)和(b)可以看出，基于 SQRPWM 的扰动方式具有更好的输出电流电能质量。图 6 为对 1mH 感性负载的测量结果，图中所示在使用 SQRPWM 扰动后的测量曲线稳定在理论值 1mH 附近，验证了所提阻抗测量方法的有效性。