



西南交通大学 - 车网低频振荡阻抗分析

用户与研究成果简介：

西南交通大学刘志刚教授的科研团队提出的基于谐波线性化(harmonic linearization)的单相并网逆变器阻抗模型，利用上海远宽的 StarSim 电力电子小步长实时仿真器进行硬件在环仿真实验，通过实验结果验证所提出的阻抗模型，已把成果总结发表文章：

IEEE Transactions on Power Electronics. Han Zhang, Zhigang Liu, Siqi Wu, Zhiyuan Li, Input Impedance Modeling and Verification of Single-Phase Voltage Source Converters Based on Harmonic Linearization[], IEEE Transactions on Power Electronics.

In press (DOI 10.1109/TPEL.2018.2883470)

课题研究背景

研究意义和现状

随着我国高速铁路的飞速发展，大量以电压源型逆变器同电网接口的新型交直动车组投入使用，牵引供电系统出现了逆变器同牵引网之间的低频振荡现象，这些低频振荡大多发生在列车升弓整备的时刻，多高铁站发生过动车组启动时出现低频振荡而引起牵引封锁状况，造成列车无法启动，对高铁的正常运营造成影响。高铁动车组的并网部分为单相并网逆变器，振荡问题机理复杂。

阻抗分析方法将牵引网和逆变器看作两个子系统，利用每个子系统的阻抗模型，通过频域分析的方法来分析稳定性，较好的揭示了振荡问题的本质机理，如当逆变器系统在一些频率点对牵引网呈现容性阻抗时，易发生振荡现象，因此阻抗分析方法近年来受到越来越多的关注。传统的单相逆变器的阻抗分析一般没有考虑直流电压控制环的影响，以及镜像频率的耦合效应 (mirror-frequency coupling effects)，西南交通大学刘志刚教授的科研团队提出的理论模型里则考虑了这些因素，并推导得到了对应的阻抗模型。阻抗有两种方法得到：

理论分析，即对并网逆变器或牵引网单相逆变器模型做线性化或简化，得到阻抗的数学模型。

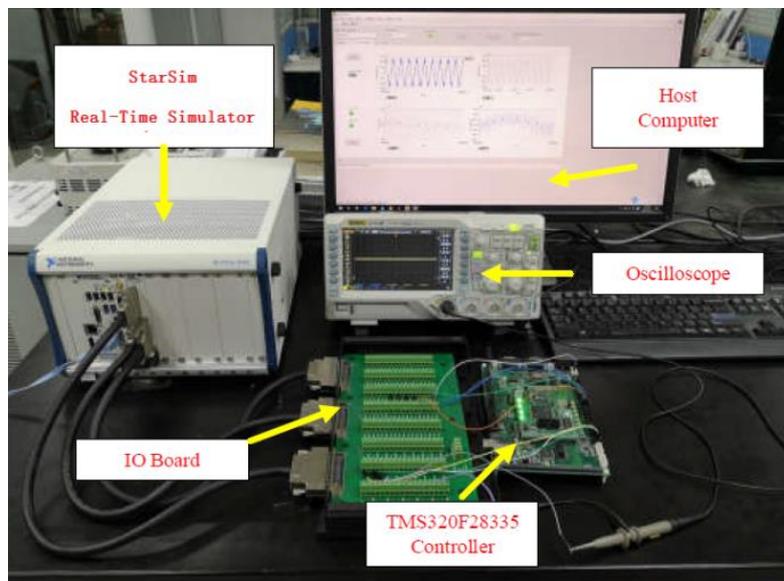
实验方法，通过施加测点频率的小扰动，再测得电流响应后通过 FFT 以及阻抗的定义 (V/I) 计算得到对应频点的阻抗。

实验测得的阻抗数据可以用来验证理论分析得出的阻抗模型。通过实验测阻抗一般是用叠加小扰动的方法，即在每个频率测点，在电网电压中叠加一个对应频率的小扰动，然后测得对应频率的电流响应，再根据电压激励和电流响应计算得到这个频率下的阻抗。最后通过扫频的方法重复这个过程把整个频段的阻抗测量得到。这样精确叠加小扰动的实验一般较难在实物系统上

实现, 而由真实控制器与实时仿真器构成硬件在环仿真系统可以精确地控制叠加小扰动的频率和幅度, 也可以准确地得到响应电流; 同时对于阻抗分析来说, 需要小步长仿真来反映系统频率响应的高频部分。

研究重要内容和创新点

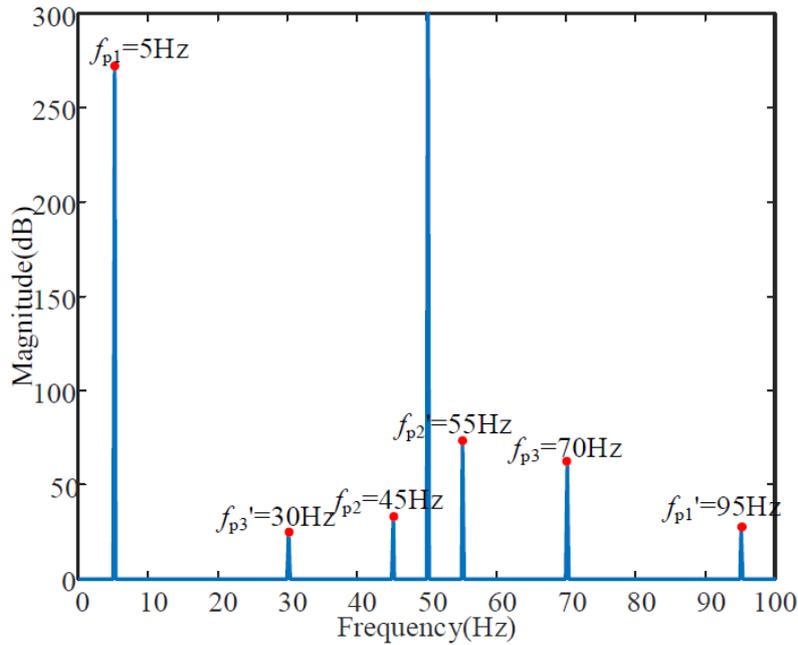
上海远宽能源科技有限公司提供的 StarSim 硬件在环实时仿真系统, 基于电力电子器件的细节模型, 同时利用最新的 FPGA 技术, 可以实现 1 微秒小步长、任意拓扑、任意工况的电力电子系统实时仿真, 并能实现小扰动的精确叠加, 是阻抗实验测量的理想方法, 西南交通大学实验阻抗测试平台如下图:



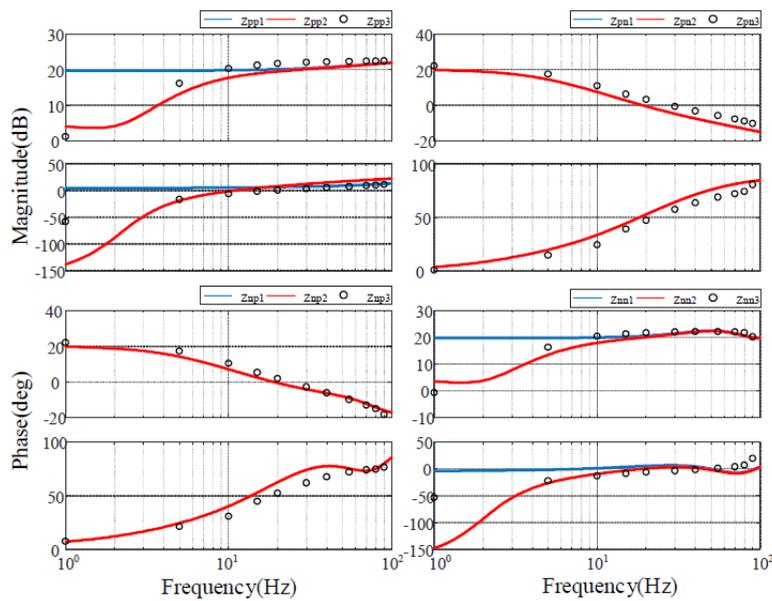
左边白色的机箱是运行着单相全控整流桥模型的实时仿真器, 其中电力电子系统是利用 StarSim Solver 在 FPGA 上按 1 微秒的步长实时仿真; 最右边绿色板子的是单相全控桥的 DSP 控制器, DSP 控制器和电力电子实时仿真器通过 IO 通道构成闭环系统。

基于实时仿真器的算法验证

实验验证发现, 当注入 f_1+f_p 频率的电压扰动时, 电流响应中总是同时出现 f_1+f_p 和 f_1-f_p 的两个频率成分, 其中 f_1 为电网基频 50Hz, 这样关于 f_1 对称的两个频率的电流成分在此定义 mirror-frequency signals; 镜像频率成分的出现同直流电压的波动(ripple)有关, 见下图:



下图是在实时仿真实验平台上通过小扰动测得的实验阻抗与理论分析得到的阻抗的对比：



其中蓝色是传统的阻抗理论分析方法得到的阻抗模型的频率响应，红色是西南交大刘志刚教授团队提出的考虑镜像频率耦合效应以及直流电压控制环影响的方法得到的阻抗模型的频率响应，黑色的圈是实时仿真试验测得的阻抗，可以看到红色的曲线和实验阻抗更吻合，也验证了考虑镜像频率耦合效应和直流电压控制环的阻抗建模的准确性和优越性。