



哈尔滨工业大学(深圳)- 基于线路阻抗补偿的互联变流器控制策略

用户与研究成果简介：

哈尔滨工业大学（深圳）王灿副教授的科研团队提出一种基于线路阻抗补偿的互联变流器控制策略。该方法通过注入谐波的方式获取线路阻抗，并对线路压降进行补偿，可在无互联通信的条件下实现交直流混合微网网间功率的准确传输；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控制方法的正确性，并把成果总结发表于《电力系统自动化》：

王灿，邓灿，潘学伟，梁亮. 基于线路阻抗补偿的互联变流器控制策略[J/OL].

课题研究背景

互联变流器控制策略研究意义与现状

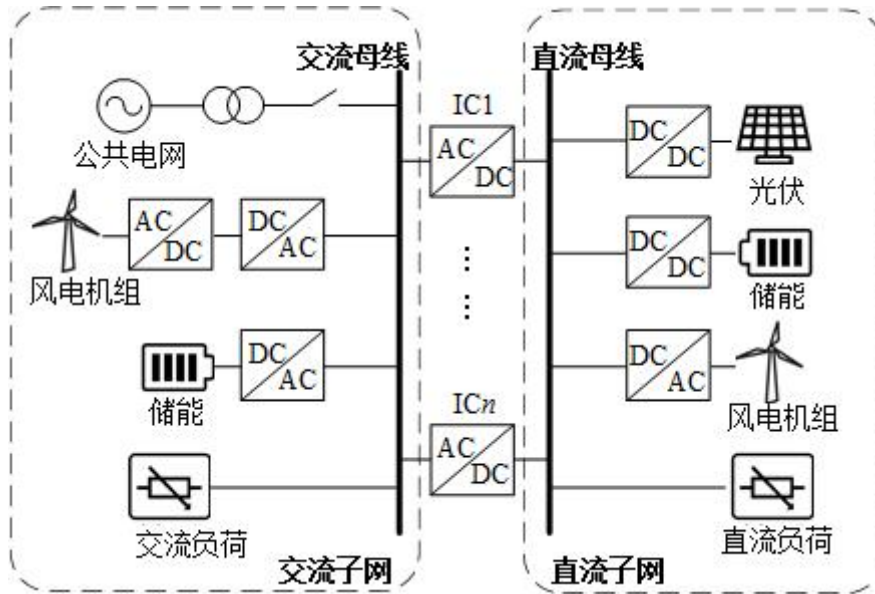
微电网通常应用于低压场所，线路阻抗比（ R/X ）较大，因此传统高压输电系统中的 P-f、Q-V 下垂特性无法直接应用于交直流混合微网。虽然采用虚拟阻抗的方法可重塑逆变器的输出阻抗特性，但是较大的虚拟电感将不可避免地导致逆变器输出电压跌落的问题。为了更好地适用于低压场所，在交直流混合微网的交流子网中可采用 P-V、Q-f 下垂，从而避免线路阻抗比（ R/X ）较大带来的影响。在交流子网采用 P-V 下垂后，电压将表征交流子网的有功变化。但是与传统 P-f 下垂不同，电压量并非全局变量，线路阻抗的存在将使互联变流器端口电压与交流母线电压存在差异，因而仅依靠互联变流器（Interlinking Converter, IC）端口电压将无法准确表征交流子网的有功功率，导致网间功率无法准确传输。

为了实现网间功率的准确传输，需要获取线路阻抗并补偿线路压降。当前线路阻抗测量方法通常运用于并网逆变器的稳定性分析，不适宜混合微电网中 IC 端口至交流母线处线路阻抗的检测，因此，用 IC 的线路阻抗检测方法有待研究。

研究重要内容和创新点

交直流混合微网拓扑结构与 IC 控制原理

交直流混合微网拓扑如下所示：

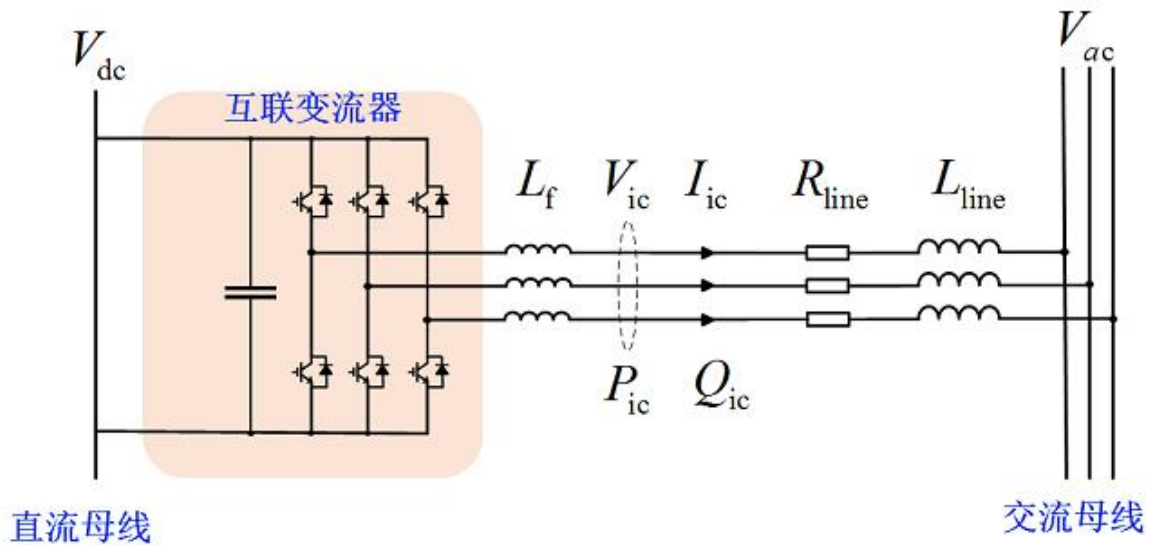


从图中可以看出，交直流混合微网可工作在并网模式和孤岛模式两种状态下。在并网模式下，大电网为混合微网提供支撑。在孤岛模式下，交直流混合微网失去大电网的支撑，当微网内部负荷波动时，需要通过 IC 的控制协调两侧子网中微源，实现混合微网的功率平衡。

为实现交直流混合微网的自治运行控制，IC 通常采用标么化下垂控制。分别将交流侧电压 V_{ac} 和直流母线电压 V_{dc} 进行标么处理，并将两者做差送入 PI 控制器从而得 IC 的有功功率参考值。但是，线路压降使得 IC 端口电压与交流母线电压 V_{ac} 不一致，无法准确传输网间功率。

线路阻抗补偿方法设计

传统的互联变流器控制策略都是忽略线路阻抗或是借助通信设施来实现功率的准确传输，哈工大（深圳）王灿团队提出的互联变流器控制策略综合考虑了线路阻抗对网间传输功率的影响，通过注入谐波的方式获取线路阻抗，并对线路压降补偿从而实现无互联通信条件下网间功率的准确传输。



上图为 IC 端口示意图。由于低压线路中 R/X 较大，因此对线路电抗近似忽略。仿照常规输电系统里的 P-f 下垂，构造 f_h - V_{ac} 的函数关系。在交流母线处，借助微源的 AC/DC 变换器向 IC 注入谐波 f_h ，并在 IC 交流侧通过滤波器和锁相环得到该谐波的频率。由于频率是全局变量，不受线路阻抗的影响，因此在 IC 处得到谐波 f_h 即可根据 f_h - V_{ac} 的对应关系得到注入时刻的交流母线电压，从而获取线路电阻。

注：线路电抗对计算结果的影响以及注入谐波信号的选取详见哈尔滨工业大学（深圳）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控制方法验证

研究在实验验证阶段，分别对不同阻值的线路、不同阻抗性质的情况下线路阻抗测量的精度以及网间功率传输的准确性进行了验证。由于实验条件复杂，实物系统上难以模拟多种阻值、多种性质的线路阻抗。纯软件仿真又有无法接入真实控制器的缺点，较难反应出真实控制器中的延迟和有限精度。实时仿真器则可以同真实控制器连接，实验易于实现，又不会存在实验危险的问题，是交直流混合微网控制方法的理想测试设备。

任意拓扑小步长实时仿真对于交直流混合微网控制方法验证的重要性

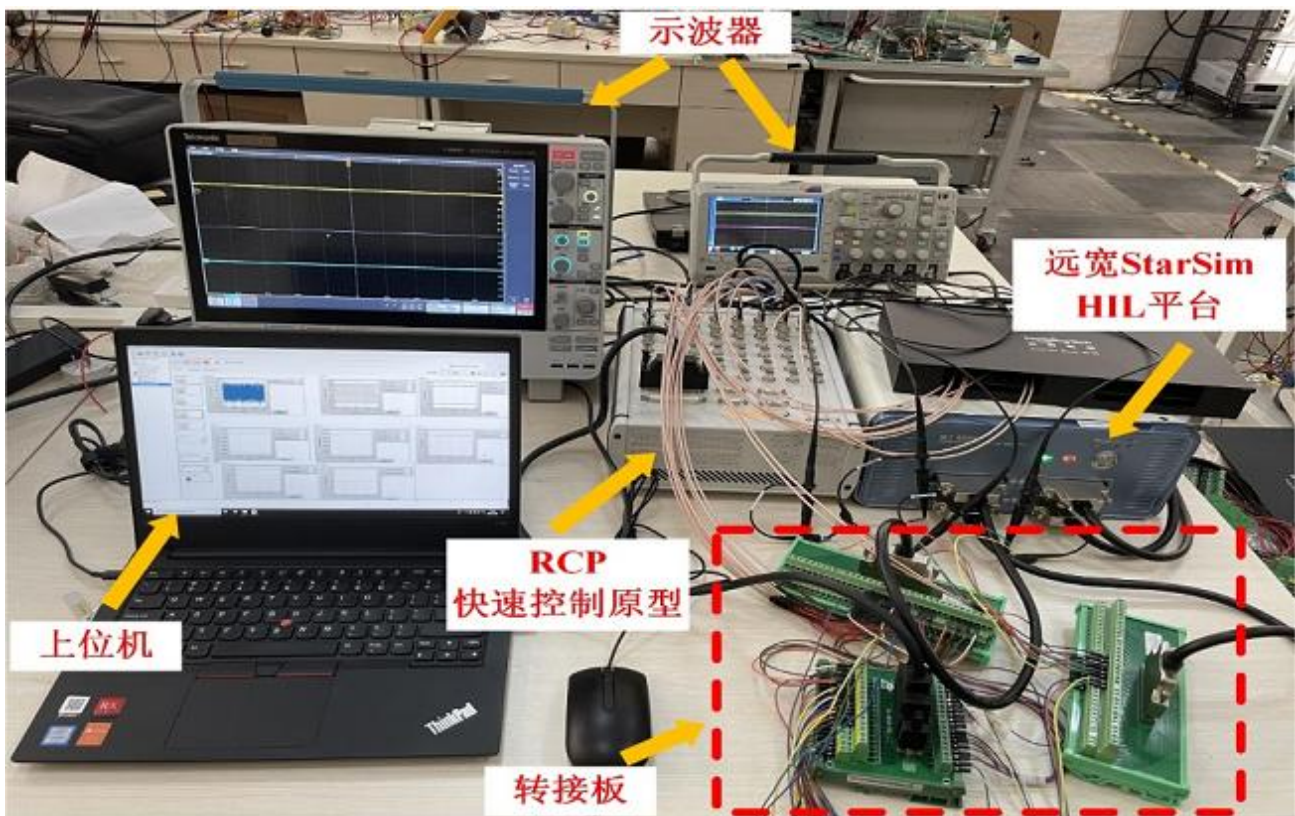
电力电子系统通常含有高速动作的开关元件，其实时仿真有一定挑战，通常有两种方法来实现电力电子系统的实时仿真，一种是基于 PWM 占空比测量的平均值大步长方法，一种是基于细

节模型的小步长实时仿真。

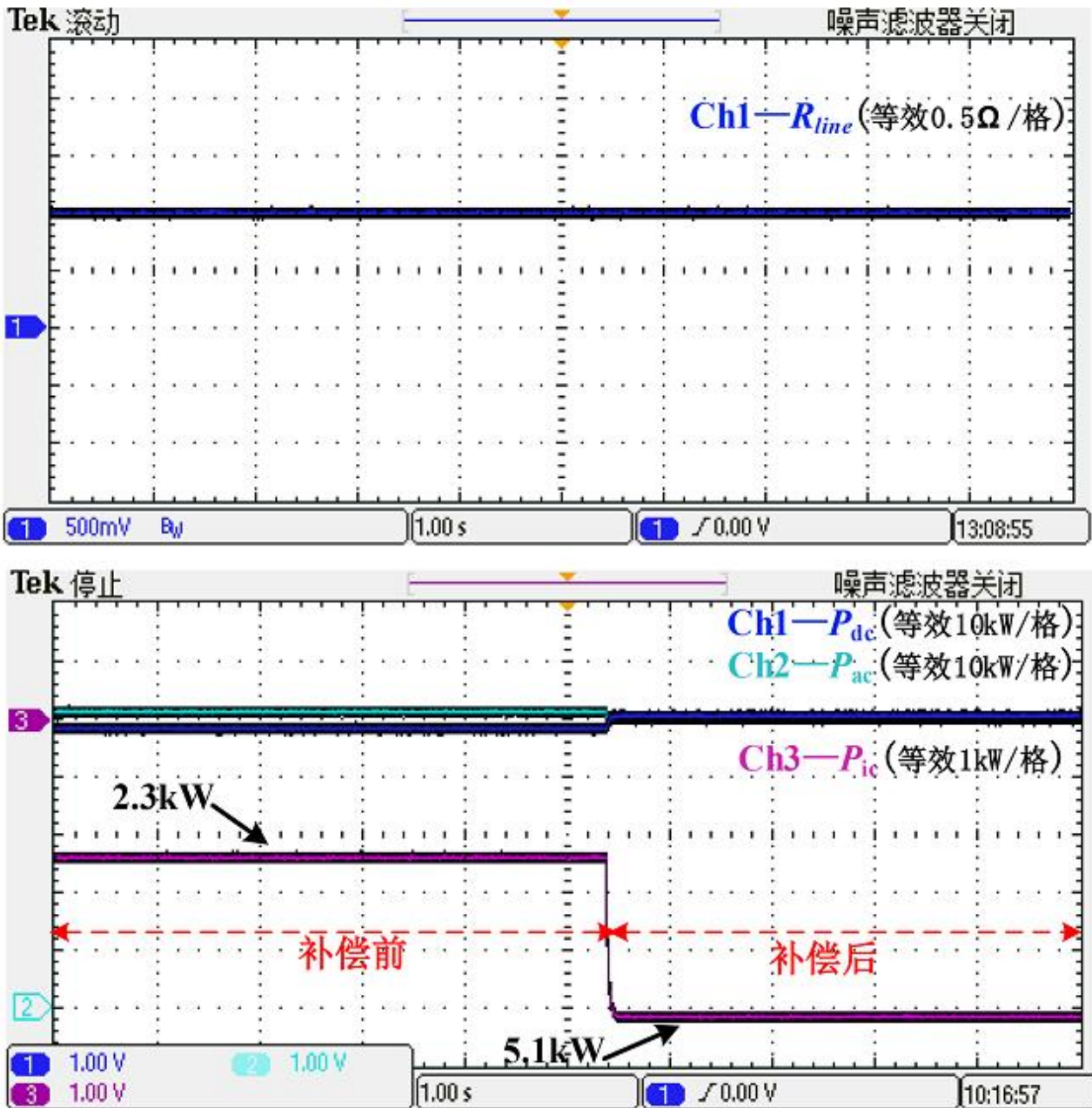
对于交直流混合微网来说，它需要检测到瞬时电路反应，而不是经过大步长平均的信号，因此基于 PWM 占空比的平均值大步长方法不适用于此研究。同时实时仿真器要能够仿真各种不同线路阻抗，不同拓扑结构，甚至是故障工况；一些只能仿真正常工况的实时仿真器也不适用。

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，被广泛应用于微电网研究、控制策略验证、可再生能源并网、电机驱动等的实时仿真中；哈尔滨工业大学（深圳）的科研团队就采用了 StarSim 电力电子实时仿真器来进行所提出的基于线路阻抗补偿的互联变流器控制策略的试验验证。

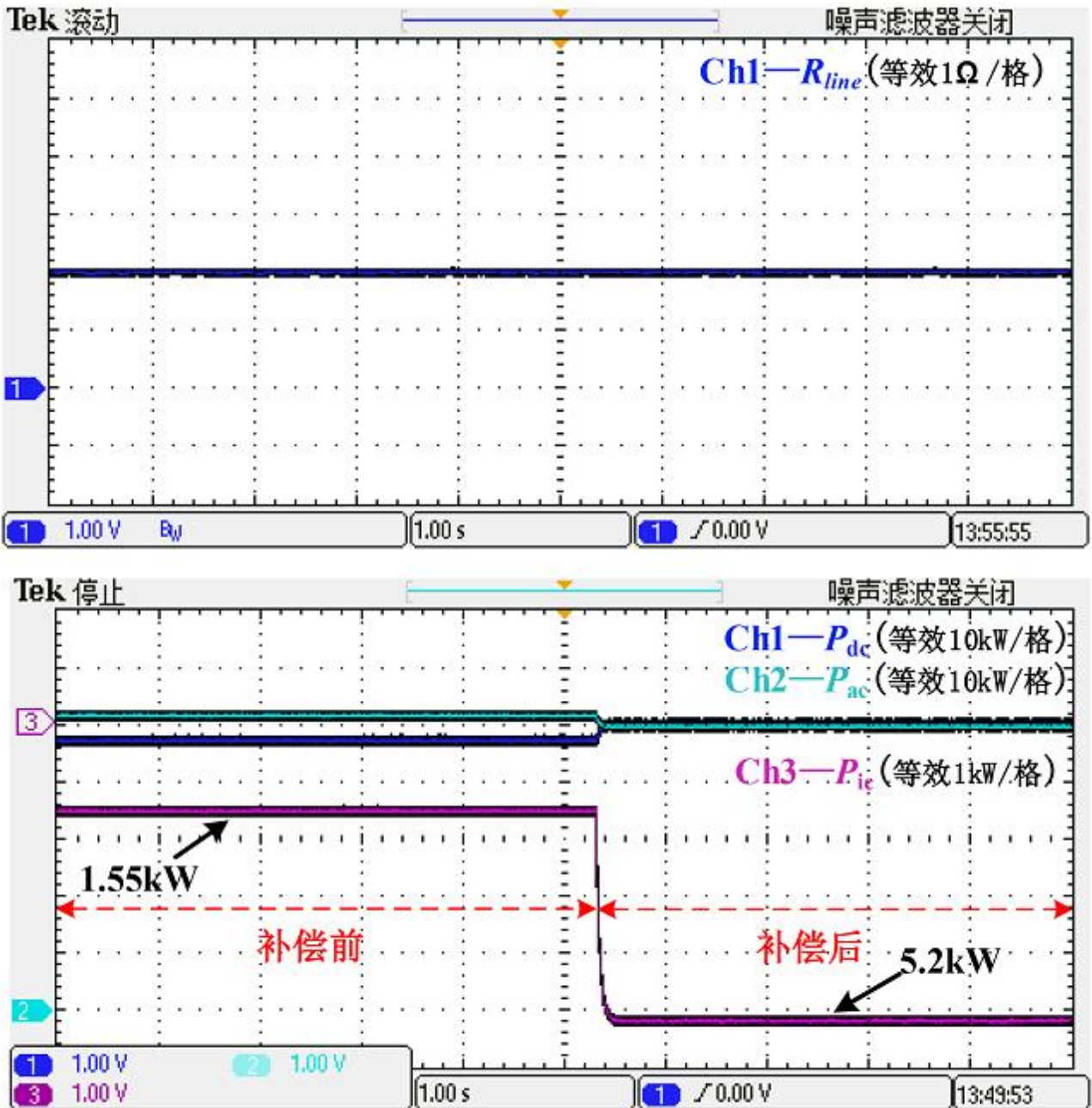
下图是 HIL+RCP 测试平台示意图，其包括实时仿真系统 HIL 和快速原型控制器 RCP，其中电力电子系统是利用 StarSim FPGA Solver 按 1 微秒的步长实时仿真；控制算法模型运行在 RCP 控制器上，实时仿真器和快速原型控制器通过真实的物理 IO 互连。



下图为在小步长实时仿真实验平台上不同线路阻抗检测、网间有功传输的实验波形。



(a) 线路阻抗 0.5 欧姆



(b) 线路阻抗 2 欧姆

由图(a)和(b)可以看出，对于不同阻值的线路电阻，通过注入谐波的方式均可准确获取线路电阻；在根据测量阻值补偿线路压降后，可实现交直流混合微网网间功率的准确传输，验证了所提控制方法的有效性。