



浙江大学 -
三相四臂式 MMC 有限控制集模型预测控制

用户与研究成果简介：

应用实时仿真技术，浙江大学方攸同教授的科研团队已将成果总结并发表文章：IEEE Transactions on Power Electronics.Xing Liu, Lin Qiu, Yutong Fang, et al., Finite-Level-State Model Predictive Control for Sensorless Three-Phase Four-Arm Modular Multilevel Converter[J], IEEE Transactions on Power Electronics. DOI 10.1109/TPEL.2019.2944638

课题研究背景

MMC 结构由于其高效率、优越的可用性和低谐波失真率等优点，被誉为适合高电压高功率应用的新一代变流器拓扑结构。然而，此结构也存在很多弊端：

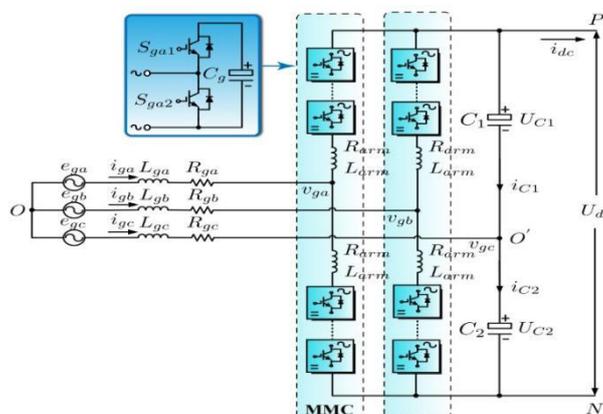
传统 MMC 结构对于系统 DC 总线故障（短路、断路情况）的穿越能力较差；

维持 MMC 正常工作需要的传感器过多，当传感器故障时变流器控制系统易发生内部紊乱，导致整体变流器的稳定性较差；

所需电力电子元器件较多，花费较高等。

为此，对于 MMC 稳定性和故障穿越能力的研究，以及新型 MMC 结构的应用，正成为电力电子界的热点。目前为止，对于整体桥臂故障以及与此同时的传感器故障对于 MMC 结构运行方面的研究并没有引起过多的重视。

浙江大学方攸同教授的科研团队，提出了一种三相四臂式 MMC 拓扑结构，并提出了针对此 MMC 结构的新型控制策略——结合基于自适应线性神经元的子模块电压预测方案与基于无电流排序的电容电压平衡方法（FLS-MPC）。此项研究增强了 MMC 系统对传感器故障的应对能力，降低了 MMC 控制策略的复杂性，也有利于降低 MMC 系统整体成本，具体结构拓扑如下图所示：



为了验证该研究方法的有效性和可行性，需要选择合适的实验平台，这种实验一般较难在实物系统上直接实现，实物系统功率大具有一定危险性且较难实现任意工况的验证。而半实物实时仿真技术，能有效满足该研究所需的工况验证、结果观测要求。

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 实时仿真平台，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，浙江大学方攸同教授的科研团队利用上海远宽的 StarSim 仿真平台验证了研究的有效性和可行性，该平台的小步长、可仿真任意工况等特点帮助用户解决了以下问题：

用户的研究设计了一种新型“三相四臂式 MMC”结构来模拟整体桥臂的故障，所含电力电子系统含有高速动作的开关元件，带来了一系列难以仿真的高频信号，小步长技术帮助客户实现了高频信号的准确仿真。

研究在实验验证阶段，需要模拟 MMC 结构无电压、电流传感器（所有传感器故障）的情况，另外同时模拟网侧电感的不匹配情况，验证所提控制策略的可行性和鲁棒性，这些都是非正常工况，StarSim 仿真器有效地模拟了这些工况并得到了准确的波形。

具体仿真系统如下图所示：



1——控制器，用于实现验证实验中需要用到的控制算法，发出控制信号给实时仿真器，构成闭环的实验系统，为客户自己的实物控制器。

2——实时仿真器，可将用 StarSim 建模环境搭建的被控对象（仿真电路模型）在机箱配置的 FPGA 硬件上进行准确的实时仿真，将被控对象的特性仿真出来并将响应信号发送给控制侧，完成实验系统的闭环，同时与上位机进行参数、显示数据的交互。

3——上位机，可以通过 Starsim HIL 软件与实时仿真器进行数据交互，进行在线调参模拟任意

工况和实时观测波形。

基于实时仿真器的算法验证

下列各图是在实时仿真实验平台上对于所提出结构和控制策略的验证结果：

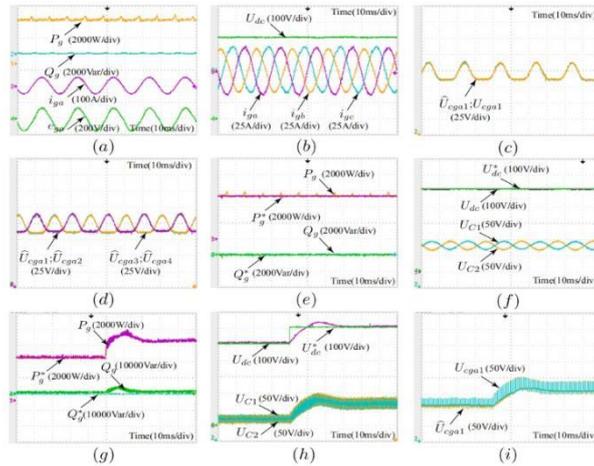
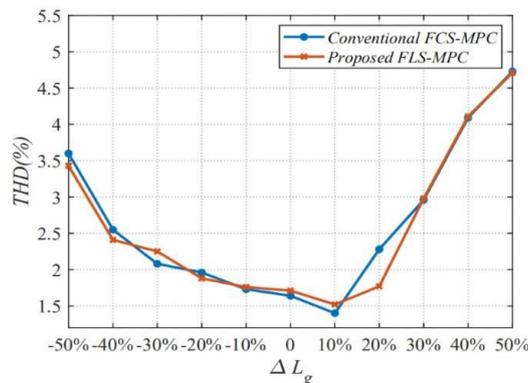


图 (a) 反映了有功功率和无功功率在稳态时的稳定状态；图 (b) 呈现了对于 DC 电压控制的准确性和三相网侧电流的实时波形；图 (c) 和 (d) 展示了稳态下子模块电容电压的估测电压和测量电压；图 (e) 至 (h) 展现了控制策略在稳态和暂态的真实控制效果；最后，图 (i) 对比了电容电压测量值和基于自适应线性神经元的子模块电容电压估测方法得到的估算值，从波形上可以验证电压估测算法的准确性。

下图对比了本文所提改进型 FLS-MPC (Finite-Level-State Model Predictive Control) 与传统 FCS-MPC (Finite-Control-Set Model Predictive Control) 对于网侧电感不匹配情况下的整体谐波比例，进一步诠释了所提控制策略的鲁棒性：



综上，浙江大学方攸同教授的科研团队所提方案的可行性和准确性都达到预期，证明了无传感器有限开关状态模型预测控制策略对于所引用的三相四臂式 MMC 结构控制的有效性。