



上海电力大学-

基于占空比调制的模块化多电平换流器模型预测控制

用户与研究成果简介：

上海电力大学杨兴武老师的科研团队，以模块化多电平换流器的模型预测控制为研究对象，提出一种基于占空比调制的模型预测控制方法，根据交流输出电流和环流的控制目标，逆向推导得到桥臂电压差值与和值的参考值，直接换算为上下桥臂投入模块数的占空比，再利用载波进行调制并结合所提子模块电容电压平衡方法，实现了 MMC 定频控制。该方法无需对目标函数遍历寻优与权重系数调节，计算量低且与子模块数量无关，且该方法容易实现子模块故障容错。Simulink 仿真和基于 Starsim 电力电子实时仿真器的实验验证了所提方法的有效性和正确性。并将成果总结发表于 EI 期刊《电力系统自动化》。

杨兴武，杨帆，薛花，江友华，鲍伟，张建文：基于占空比调制的模块化多电平换流器模型预测控制[J/OL]. 电力系统自动化.

<https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20210514.1428.022.html>

课题研究背景

模块化多电平换流器控制的研究意义与现状

模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)因其模块化、可扩展、易组装等优点在中高压电力电子领域得到广泛的应用。如海上风电并网，高压直流输电，中压电机驱动和电力电子变压器等。MMC 模块化的特点有利于故障后的修复，并可通过增减子模块的数量改变额定电压。与两电平电压源型换流器相比，MMC 除了需要控制功率与交流输出电流外，还需考虑子模块电容电压的平衡和环流抑制。PI 与 PR 控制等线性控制方法已被用于控制 MMC，但 MMC 系统具有较强的非线性和多变量耦合性，多个控制器参数整定困难，系统的动态性能较差，稳定运行范围小。

模型预测控制(model predictive control, MPC)与线性控制相比，具有动态响应快、可对多目标协同控制、易于实现等优点，已被广泛应用于 MMC 的控制。现有 MPC 方法的每个控制周期内仅有一种开关状态被选中，需要较高的采样频率保证良好的控制效果，且开关频率不均会导致稳态性能下降和器件散热损耗等问题。

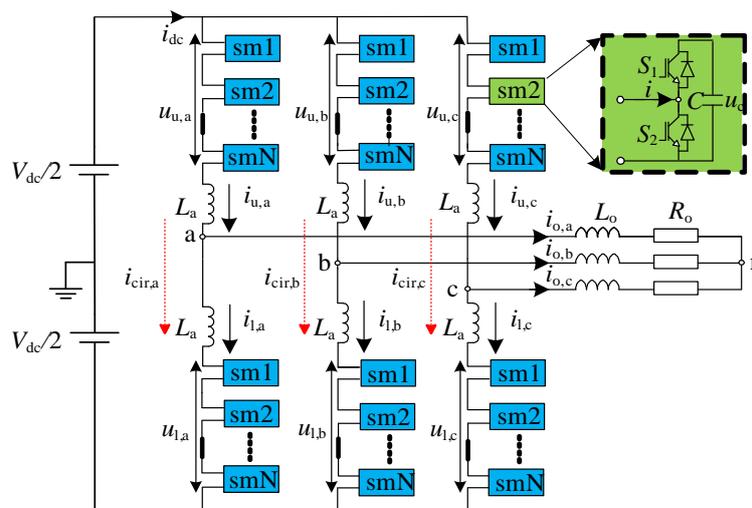
研究重要内容和创新点

模块化多电平换流器拓扑结构与原理

MMC 拓扑通常有三相, 每相有上下两个桥臂, 每个桥臂包含 N 个串联子模块与一个桥臂电感。根据不同的应用需要学者们提出了多种不同的子模块拓扑结构, 其中最常见的是半桥子模块。半桥子模块由两个全控型开关和反并联二极管及一个储能电容组成, 两个开关 S_1 与 S_2 为互补模式, 当 S_1 闭合 S_2 断开时, 子模块处于投入状态其输出电压为电容电压; 当 S_2 闭合 S_1 断开时, 子模块处于切除状态其输出电压为 0。半桥式子模块可输出两个电平, 电力电子器件少成本较低, 在柔性直流输电和风电场接入应用场合通常采用半桥子模块结构。

本文提出一种基于占空比调制的 MPC 方法。该方法通过交流输出电流与环流的参考值推导出上下桥臂电压和与差, 计算出子模块的占空比, 经调制产生开关信号。通过载波相移脉宽调制将能量平均分配到每个子模块, 具有利于子模块电容电压的平衡和子模块开关频率相等的优点。

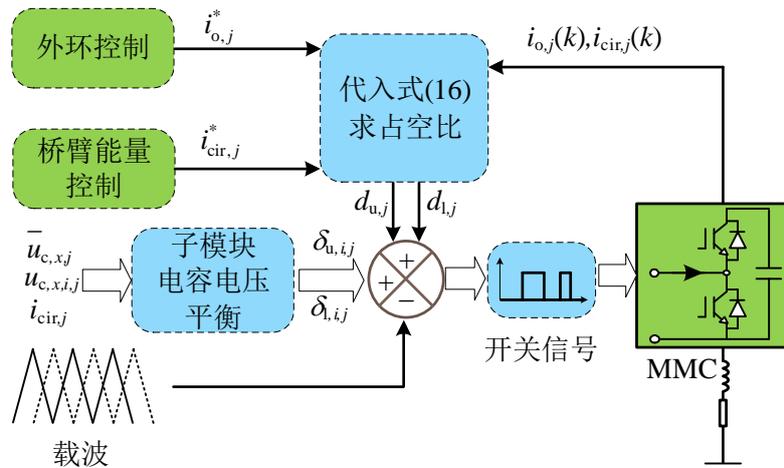
在此研究中, 主电路模型如图所示:



基于占空比调制的 MPC 方法设计与结果

传统 MPC 方法的每个控制周期内仅有一种开关状态被选中, 需要较高的采样频率保证良好的控制效果, 且开关频率不均会导致稳态性能下降和器件散热损耗等问题。上海电力大学杨兴武团队提出一种基于占空比调制的 MPC 方法。该方法通过交流输出电流与环流的参考值推导出上下桥臂电压和与差, 计算出子模块的占空比, 经调制产生开关信号。同时, 将 MPC 方法与容错策略相结合, 通过载波相移脉宽调制将能量平均分配到每个子模块, 具有利于子模块电容电压的平衡和子模块开关频率相等的优点, 提高了 MMC 在子模块故障情况下运行的可靠性与电能质量。

该方法的控制结构如下图所示：



$i_{o,j}^*$ 可由外环的功率控制或直流电压控制得到； $i_{cir,j}^*$ 由附录 A 图 A2 所示的桥臂能量控制得到。

$i_{o,j}^*$ 和 $i_{cir,j}^*$ 与实际测量值 $i_{o,j}(k)$ 和 $i_{cir,j}(k)$ 代入式(16)计算得出上下桥臂子模块的占空比，经过简化子模块电容电压平衡策略加入调节信号后计算出每个子模块对应占空比，最终与载波比较后得到脉冲信号控制子模块的投切。

基于占空比调制的模型预测控制方法的详细介绍详见上海电力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故障诊断方法验证

研究在实验验证阶段，在交流侧参考电流跳变情况下，对交流侧输出电流、上下桥臂输出电压、上下桥臂电流及环流、电容电压的实验波形进行了分析，并验证了所提预测模型控制方法的控制效果和可靠性。纯软件仿真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。实时仿真器可以同真实控制器连接，不会存在硬件实验危险的问题，是 MMC 控制方法验证的理想测试设备。

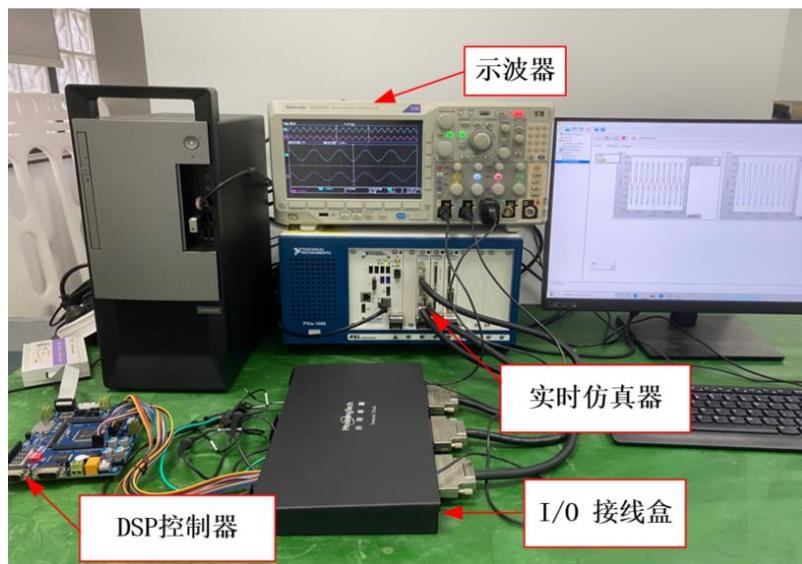
任意拓扑小步长实时仿真对于 MMC 模型预测控制方法验证的重要性

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。

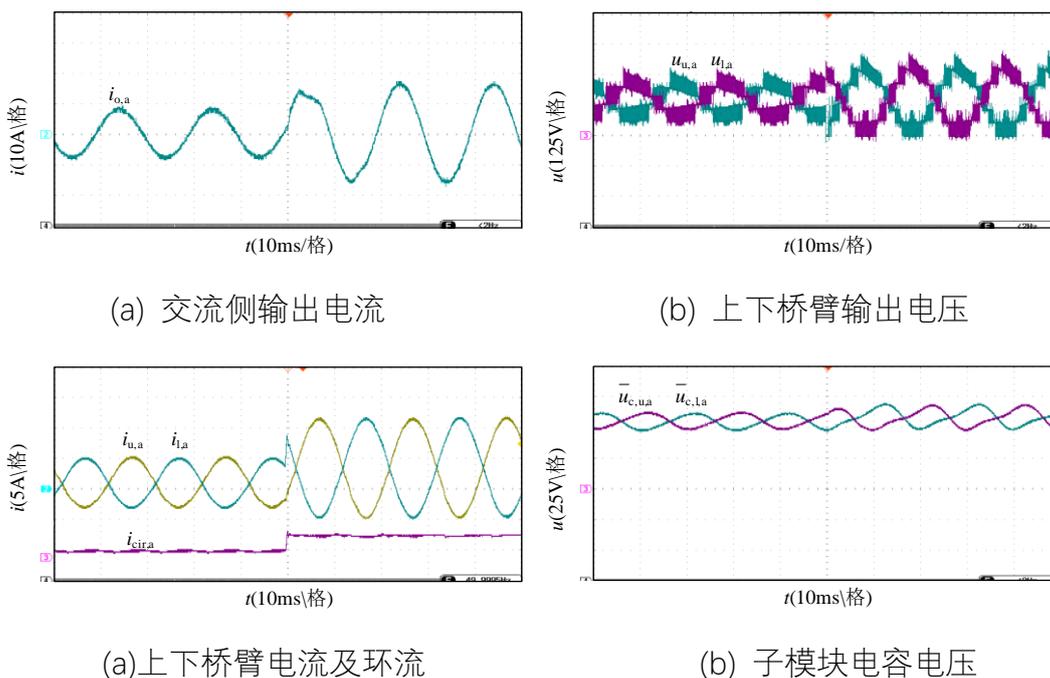
对于 MMC 的模型预测控制来说，需要实时检测电流等信号，对采样频率要求较高，一些只能仿真正常工况的实时仿真器也不适用。

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；上海电力大学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占空比调制的模块化多电平换流器模型预测控制的试验验证。

下图是实验测试平台示意图，其包括实时仿真系统 HIL 和控制器，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；实时仿真器和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 MMC 的交流侧输出电流、上下桥臂输出电压、上下桥臂电流及环流、子模块电容电压的实验波形。



由以上波形图可以看出，交流侧输出电流、上下桥臂输出电压、上下桥臂电流及环流、子模块电容电压在跳变前后可输出稳定良好的波形，稳态与动态性能良好，验证了基于占空比调制的模型预测方法的有效性。