



西南交通大学-

基于模糊比例积分控制的高速列车牵引变流器的设计与硬件在环实现

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了一种针对车网耦合系统低频振荡问题的模糊比例积分控制（以下简称：模糊 PI 控制）策略，该方法将误差信号及其关于时间的偏导设为输入信号，将 PI 控制器的 PI 参数设为输出信号，设计了模糊控制器，实现了对 PI 控制参数的优化和实时调整，进一步提高了变流器的控制效果。研究利用上海远宽的 StarSim 电力电子小步长实时仿真器进行试验，通过实验结果验证了所提出的基于高速铁路牵引变流器的模糊 PI 控制方法的有效性，并把成果总结发表于《Energies》。

Qixiang Yan, Yan, Ibrahim Adamu Tasiu, Hong Chen, Yuting Zhang, Siqi Wu, Zhigang Liu. Design and hardware-in-the-loop implementation of fuzzy-based proportional-integral control for the traction line-side converter of a high-speed train [J]. Energies, 2019, 12(21): 24.

课题研究背景

车网低频振荡抑制措施的研究意义与现状

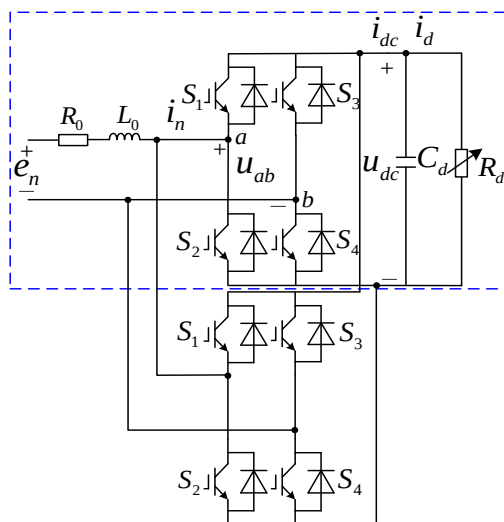
车网低频振荡现象在全球范围内出现，例如美国，瑞典，挪威等。2018 年 1 月，我国大秦线湖东机务段在多台机车同时升弓整备时第一次出现车网低频振荡现象，机车出现保护动作导致牵引封锁，具体表现为：牵引网电压电流之间出现相位差，且波形瞬态值的包络线表现为周期性波动。一旦振荡幅度太大，可能造成牵引封锁，严重地，可能会击穿机车避雷器，损坏高压设备等。

根据已有研究可知，车网低频振荡的抑制措施主要分为两类：牵引网侧和机车侧。其中，优化机车控制策略实际操作性更强，具有更高的经济性。牵引传动系统通常采用传统比例-积分（以下简称：PI）控制方法，其控制参数不易整定，且对系统扰动较敏感。而四象限变流器是一个典型的非线性、多变量强耦合系统，对外界扰动和系统自身参数变化较为敏感，采用传统的线性控制方法已达不到理想的控制效果。因此，有必要将非线性控制方法引入到四象限变流器的控制中，模糊控制不需要精确的数学模型，并且对于过程参数改变不灵敏，鲁棒性较好，同时系统的动态响应较好，可以克服 PI 控制存在的缺点，但是单纯的模糊控制又具有稳态精度差，控制动作欠细腻的缺点，因此模糊 PI 控制对改善动车网侧变流器控制、抑制低频振荡有着很大潜在价值。

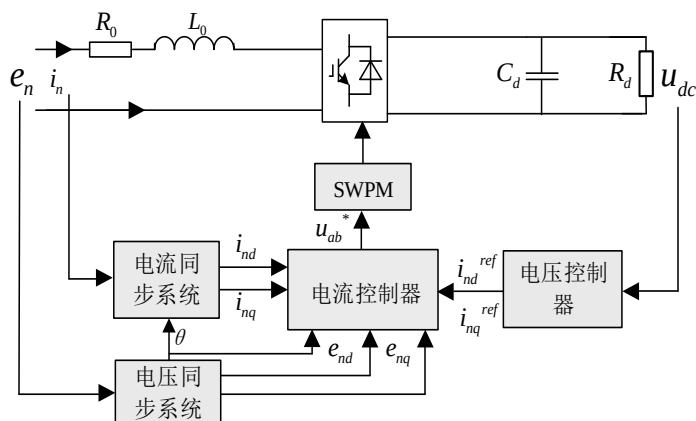
研究重要内容和创新点

两重化脉冲整流器拓扑结构与原理

两重化脉冲整流器由 2 个完全（参数、拓扑）相同的脉冲整流器并联而成。由于多数低频振荡现象发生时，牵引逆变器和电机都未参与工作，因此，CRH5 型动车组牵引传动系统主电路拓扑如图所示：



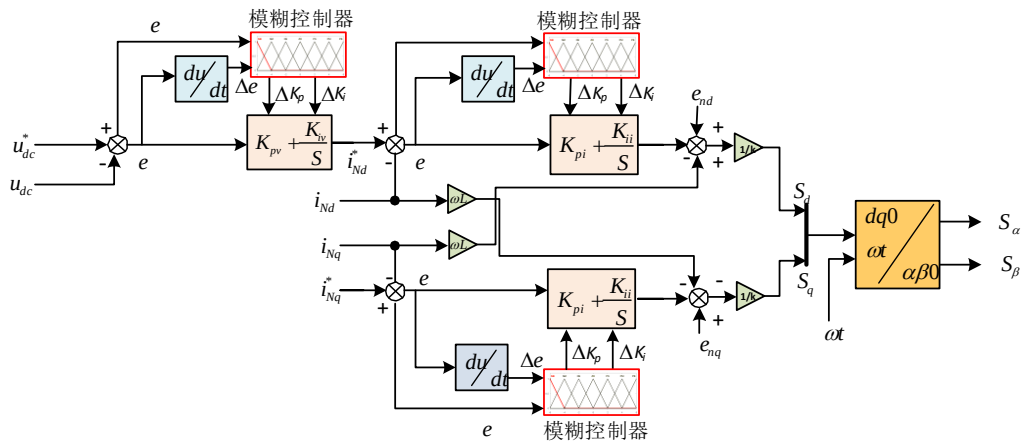
CRH5 型动车组牵引传动系统脉冲整流器采用 dq 电流解耦控制（PI 控制），此控制结构主要由电压同步系统模块、电流同步系统模块、电压控制器模块和电流控制器模块四个核心模块组成，控制结构框图如图所示：



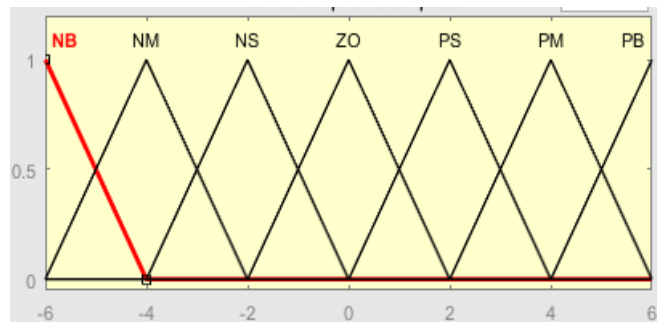
由图可知，dq 电流解耦控制（PI 控制）采用双闭环结构，其中电压控制环保证中间直流电压跟踪其给定值，其输出为 d 轴电流的参考值。电流控制环保证 d 轴电流和 q 轴电流分别跟踪其对应参考值，其输出为调制模块的输入信号。

基于脉冲整流器的模糊 PI 控制器设计与结果

模糊控制不需要精确的数学模型，鲁棒性、动态响应较好，可以克服 PI 控制存在的缺点，但单纯的模糊控制稳态精度较差，因此西南交大刘志刚团队提出将模糊控制与 PI 控制相结合，即模糊 PI 控制。模糊控制系统和传统控制系统的主要差异是用模糊控制器代替了传统控制器。而模糊 PI 控制是根据不同的误差和误差对时间的偏导，对 PI 控制器的参数进行调整。其控制原理如图所示：



模糊 PI 控制中的输入为误差和误差对时间的偏导，将这两个清晰值模糊化，再由模糊控制规则推理得到修正量 ΔK_p 和 ΔK_i ，最后进行清晰化，得到 PI 调节器的参数值。其中模糊控制器的隶属度函数曲线如图所示：



根据人工操作调试经验,控制规则可以用语言表示如下：

- (1) 当误差较大时,说明误差的绝对值较大,应考虑将 K_p 的取值增大,以提高响应的快速性;为了控制超调不过大, K_i 应取值很小。
- (2) 当误差在中等大小时,为保证系统的响应速度并控制超调,应减小 K_p ,增大 K_i 。
- (3) 当误差较小时,为保证系统具有良好的稳态特性,同时为避免产生振荡,应增大 K_p 和 K_i 的取值。

其它数学表达式详细推导详见西南交通大学科研团队发表的文章。

基于实时仿真器的算法验证

基于脉冲整流器的模糊 PI 控制方法有效性验证

研究在实验验证阶段，模拟了在负载恒定、负载突变情况下，两重化脉冲整流器的网侧电压、电流及直流侧电压的变化情况，并验证了所提控制方法的有效性。此外，还模拟了 8 台车运行时的车网耦合系统控制性能，验证了所提方法对低频振荡现象的抑制效果。一般来说，这种实验一般较难在实物系统上实现；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。实时仿真器可以同真实控制器连接，是基于牵引传动系统的控制策略验证的理想测试设备。

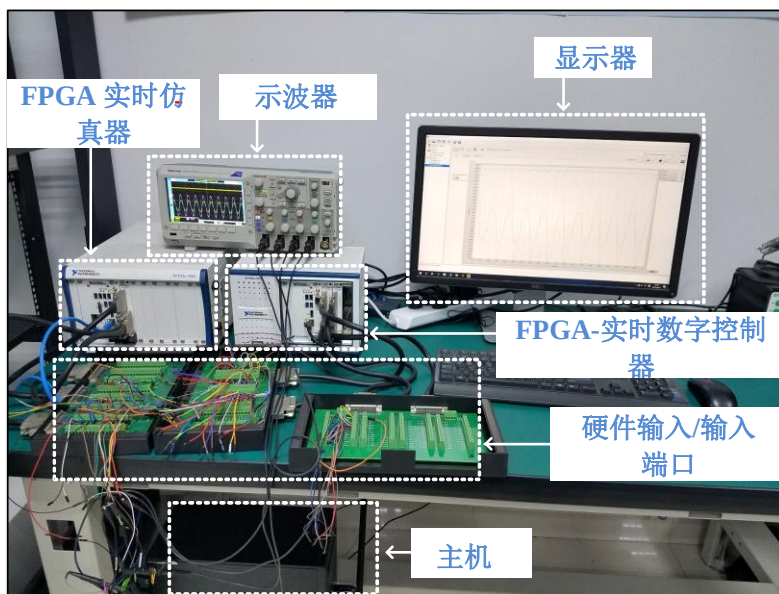
任意拓扑小步长实时仿真对于牵引传动系统的控制策略验证的重要性

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。

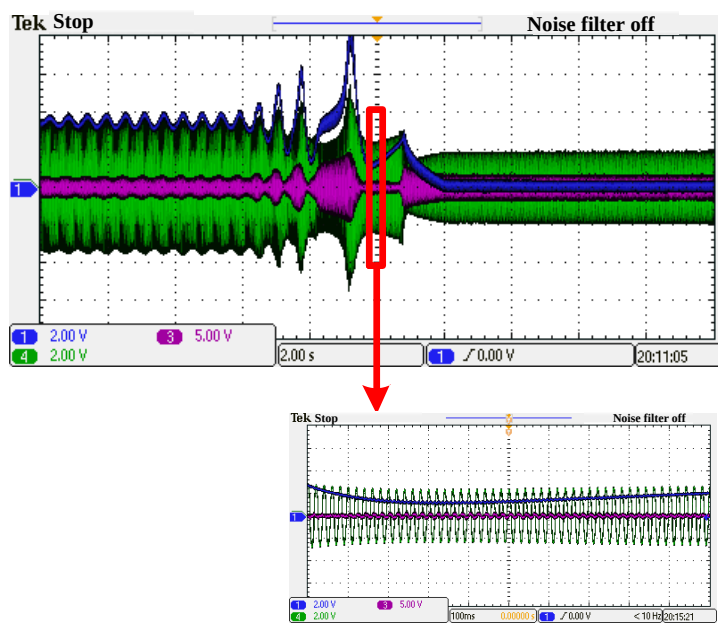
远宽能源 (www.modeling-tech.com) 提供的 StarSim 实时仿真器，基于电力电子器件的细节模型，利用最新的 FPGA 技术，可以实现 1 微秒步长、任意拓扑、任意工况的电力电子系统实时仿真，被广泛应用于牵引供电系统故障诊断、控制策略验证、可再生能源并网、电机驱动等的实时仿真中；西南交通大学的科研团队就采用了 StarSim 电力电子实时仿真器来进行所提出的针对高速列车牵引变流器的模糊比例积分控制策略试验验证。

下图是 HIL+RCP 测试平台示意图，它由基于 NI PXIe-1071 FPGA 的实时数字仿真器，具有建模技术快速控制原型的 NI PXIe-1082 实时数字控制器（RCP）模块，示波器，外部主机，硬件输入/输出端口和电源设备组成。

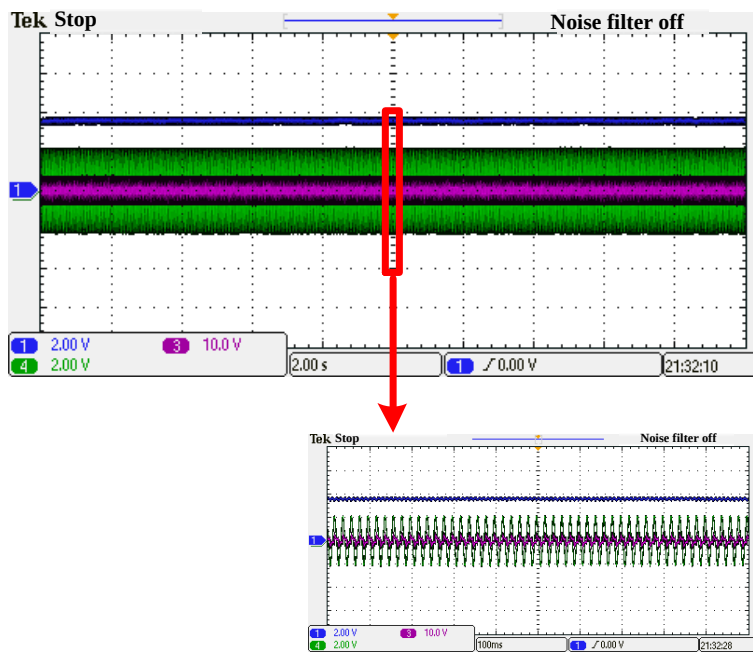
基于 MATLAB 的实时数字仿真器和控制算法是在 MATLAB/Simulink 中设计的，并使用建模技术 StarSim 软件下载到 NI PXIe-1082 实时数字控制器中。StarSim 是基于 LabVIEW 的电磁瞬态仿真软件，主要用于验证控制算法和系统模型。StarSim Express 加载并将 StarSim 模型文件转换为可执行的仿真代码。StarSim 模拟器无需任何 FPGA 编程即可将系统模型下载到 FPGA。NI PXIe-1082 包含建模示教 RCP 控制器。牵引电源系统电路模型在基于 FPGA 的实时仿真器上运行，而控制算法模型在建模技术 RCP 控制器上运行，从而形成闭环。



下图为在小步长实时仿真实验平台上基于不同控制策略的牵引网系统的网侧电压、电流及直流侧电压的实验波形。



(a) PI 控制



(b) 模糊 PI 控制

由图(a)和(b)可以看出, 基于所提控制方法可以有效抑制低频振荡现象的发生, 验证了所提策略的有效性。