



## 西南交通大学 - 一种基于滑模控制的车网多工况运行性能改善研究

## 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基于滑模控制的车网多工况运行性能改善方法，该方法与传统 PI 控制相比具有更好的控制性能，如多种工况下牵引侧电流的总谐波畸变小、制动时电压波动小、抗干扰能力强，并能有效抑制运行过程中 LFO 的发生；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出的动车组牵引网侧变流器控制策略的正确性，并把成果总结发表于《IEEE ACCESS》：

Y. Zhang, S. Wu, Z. Liu, Q. Yan and T. Chen, "An Approach to Improve System Performance in the Vehicle-Grid System Using Sliding Mode Control Under Multiple Operation Conditions," in IEEE Access, vol. 8, pp. 11084-11095, 2020.

## 课题研究背景

### 基于滑模控制的网侧整流器控制策略的研究意义与现状

随着我国科学技术不断完善，交流 - 直流 - 交流型机车在我国得到广泛应用。牵引供电系统的复杂性不断增加，当列车运行工况的变化或整流器侧采用的控制方法不同时，均会对车网系统的性能产生一定的影响，例如存在超调、响应速度慢、谐波失真率较大、制动时对系统造成较大干扰、负载变化时恢复至稳态的时间长等等现象。当动车组在牵引或制动条件下运行时，动车组的牵引功率会发生变化，并且电网侧电流的总谐波失真也将随之变化。功率越小，电网侧电流的 THD 越大。有研究指出低频振荡甚至可能发生在列车运行的情况下[8]，此时牵引动力的突然丧失可能导致严重后果。

滑模控制本质上是一种控制结构随着时间和受控系统的变化而变化的非线性控制策略，具有结构简单，参数范围广，对非线性系统适应性好等优点。相比于传统控制策略，滑模控制具有更好的动、静态特性。

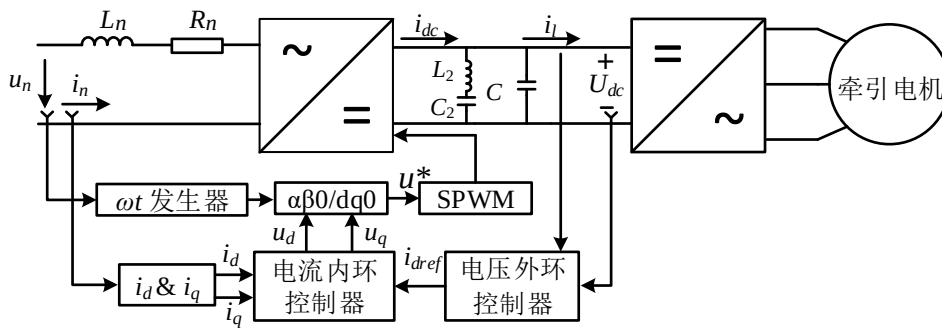
现有研究中对动车组的动、静态性能研究均将逆变器和电机等效为纯电阻，忽略了动车组在实际运行过程中的不同工况，因此研究提出将滑模控制应用在动车组整车中以提高整车在不同工况运行下的动、静态性能。

## 研究重要内容和创新点

### 动车组单个牵引传动单元拓扑结构

一个 CRH3 型动车组由四个牵引传动单元组成，每个牵引传动单元由受电弓、断路器、车载牵引变压器、双重化四象限整流器、中间直流环节、逆变器以及四台三相异步电动机组成。两个整流器并联连接，它们采用相同的控制方式和电气量参考值。CRH3 型动车组整流器的控制策略一般采用瞬态电流直接控制策略，牵引逆变器一般采用空间矢量调制和转子磁链定向控制策略

在此研究中，基于滑模控制的单个牵引传动单元模型如图所示：



### 滑模控制方法设计

滑模控制的设计包括两个部分。第一部分是外环电压滑模面的评估，第二部分是内环电流控制率的选择。滑模控制的控制目标是将整流器的直流侧电压  $U_{dc}$  稳定在 3000V，并使电网的功率因数接近 1，这意味着电网中的无功功率为 0，即  $i_q=0$ 。

建立滑模面  $s_1$ 、 $s_2$  分别与  $U_{dc}$ 、 $i_q$  对应：

$$\begin{cases} s_1(e_{i_q}, t) = \sigma(i_{q_{ref}} - i_q) = 0 \\ s_2(e_{U_{dc}}, e_{\phi}, t) = \sigma_1(U_{dc_{ref}} - U_{dc}) + \sigma_2(\phi_{ref} - \phi) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

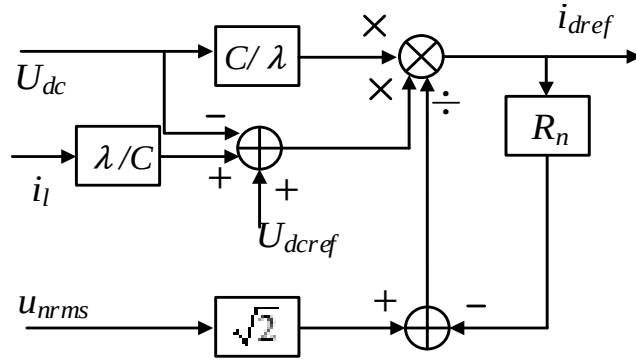
式中  $\sigma$ 、 $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  为放大增益。将滑模面  $s_2$  的表达式中的  $\sigma_2/\sigma_1$  用  $\lambda$  代替，并将动车组的数学模型考虑进来，得到  $i_{dref}$  的表达式：

$$i_{dref} = \frac{C}{\lambda} \times \frac{U_{dc}}{e_d - R_n i_d} \left[ \frac{(U_{dc_{ref}} - U_{dc}) + \frac{3\lambda m^2 U_{dc}}{8C} \sqrt{\frac{1+\rho^2 - 2\rho \cos \theta}{R^2 + (\omega L)^2}}}{\cos(\theta + \gamma) - e^{-t/\tau} \cos(\omega t + \theta + \gamma)} \right] \quad (2)$$

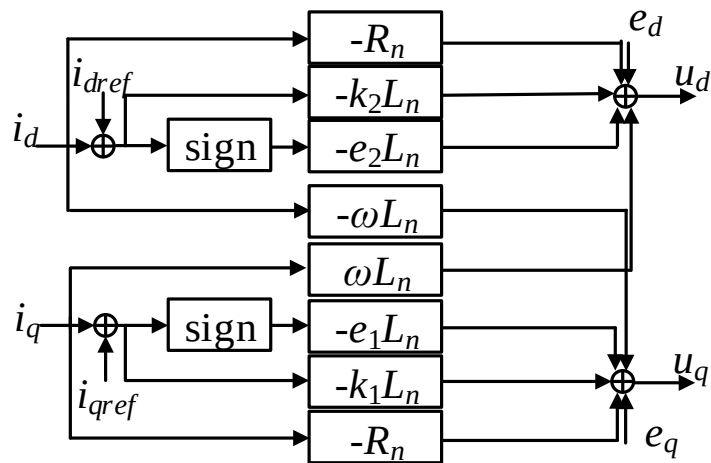
对上述所取得两个滑模面  $s_1$ 、 $s_2$  采用指数趋近率，得到：

$$\begin{cases} S_q = \frac{e_q - R_n i_q - \omega L_n i_d - k_1 L_n s_1 - e_1 \operatorname{sgn}(s_1)}{U_{dc}} \\ S_d = \frac{e_d - R_n i_d + \omega L_n i_q - k_2 L_n s_2 - e_2 \operatorname{sgn}(s_2)}{U_{dc}} \end{cases} \quad (3)$$

根据式(2)和(3)可搭建控制器模型： (a) 外环电压模块、 (b) 内环电流模块。



(a)



(b)

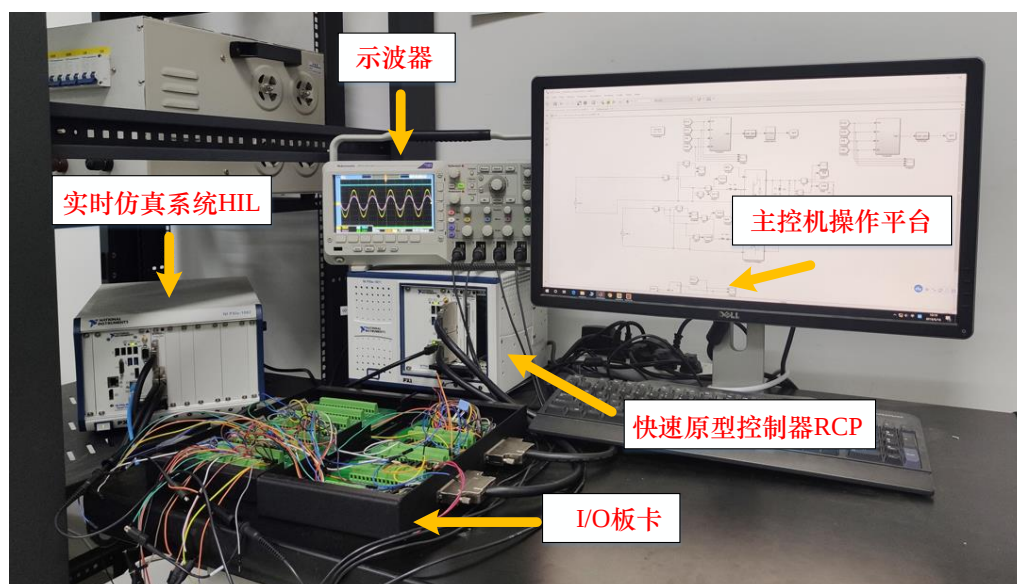
## 基于实时仿真器的算法验证

### 基于滑模控制的车网多工况运行性能方法验证

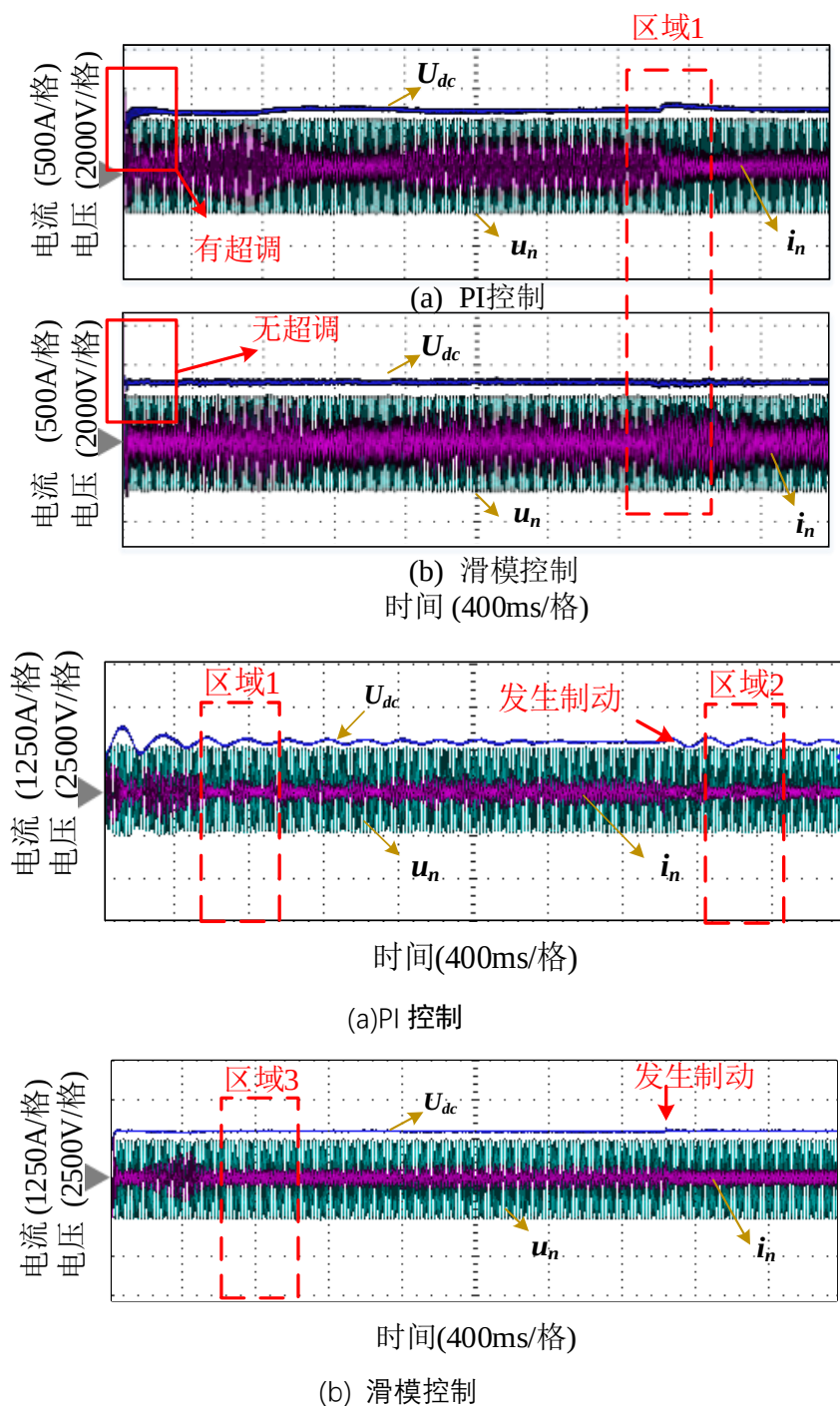
研究在实验验证阶段，模拟了分别基于 PI 控制和滑模控制车网耦合系统运行在多工况下直流侧电压  $U_{dc}$ 、网侧电流 THD 以及对不同工况下发生的 LFO 的抑制效果的变化情况，并验证了所提方法的可行性和鲁棒性。一般来说，车网耦合系统这种实验一般较难在实物系统上实现；纯软件仿真又有无法接入真实控制器的缺点，较难反应出真实控制器中的延迟和有限精度。实时仿真器可以同真实控制器连接，又不会有故障实验危险的问题，是动车组网侧整流器控制策略验证的理想测试设备。

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。

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控制策略下车网系统运行在不同工况时以及对低频振荡的抑制作用的实验波形。



通过实验验证可以得出，本课题提出的方法可以改善动车组整流器在不同工况下的动、静态性能，也能够抑制车网耦合系统的低频振荡现象，为进一步的研究奠定基础。