



湖南大学 - 单相 LCL 型整流器无源解耦控制算法验证

用户与研究成果简介：

交直交型电力机车网侧整流器采用 LCL 型滤波器能够有效的抑制高频谐波，但是存在高频谐振点，容易导致 LCL 型整流器系统出现不稳定性现象，为了进一步提高单相 LCL 型整流器系统的交直流侧电压电流性能和系统鲁棒性，湖南大学许加柱教授的科研团队提出了一种单相 LCL 型整流器无源解耦控制方法。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，通过半实物实时仿真实验结果验证了所提出的单相 LCL 型整流器无源解耦控制方法能够有效的提高单相 LCL 型整流器系统的性能，并把成果总结发表于《International Journal of Electrical Power & Energy Systems》：

Yuxing Liu, Jiazhu Xu, Zhikang Shuai, Yong Li, Guiping Cui, Sijia Hu, Bin Xie, Passivity-based decoupling control strategy of single-phase LCL-type VSRs for harmonics suppression in railway power systems, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 117, 2020, 105698, ISSN 0142-0615. 已录用。

课题研究背景

随着我国电气化铁路的迅速发展，电力机车及其牵引供电系统的安全稳定运行显得尤为重要。交直交型机车的网侧整流器产生的高频谐波注入牵引供电系统会导致牵引供电系统产生高频谐振现象，严重时甚至会损毁机车以及供电系统设备。相比与传统的网侧 L 型滤波器，LCL 型滤波器更加适合抑制高次谐波。为了提高单相 LCL 型整流器系统的性能，本研究团队提出了一种基于无源解耦（PBD）的变流器控制策略，该策略可提高交直交型机车系统的电能质量，获得更好的启动和动态性能，并且使系统具有全局稳定性。最后通过半实物实时仿真平台证明了所提出的控制策略的优势。

研究重要内容和创新点

单相 LCL 型整流器拓扑结构与原理

牵引供电系统的高频谐振现象产生的原因在于交直交型机车的网侧变流器采用 PWM 调制时产生的高次谐波，为了有效的抑制机车网侧变流器产生的开关次谐波注入牵引供电系统，借鉴于目前 LCL 型滤波器广泛应用于光伏逆变器的并网电能质量治理，本研究由 LCL 型滤波器取代传统的 L 型滤波器装置，将 LCL 滤波器应用于牵引网侧变流器，图 1 所示为单相 LCL 型网侧变流器的电路框图。

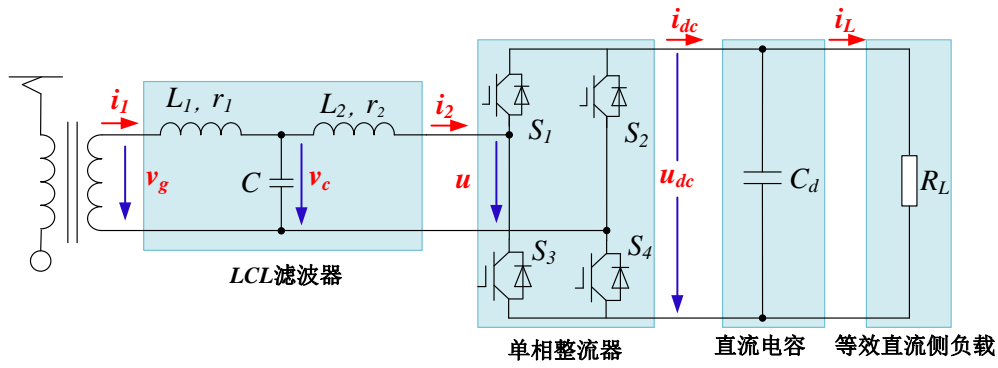


图 1.单相 LCL 型滤波器系统框图

无源解耦控制系统的设计

已知当正半定能量存储函数 $E(x)$ 和正定函数 $Q(x)$ 满足式(1)或者(2)时，系统是严格无源的：
 $E(x(t)) - E(x(0)) \leq \int_0^t u^T y d\tau - \int_0^t Q(x) d\tau, \forall t > 0$ (1) 或者 $\dot{E} \leq u^T y - Q(x)$ (2) 其中 $x(t), u(t)$ 和 $y(t)$ 分别是系统的状态、输入和输出矢量。而 $u^T y$ 代表能量供应率， $E(x(t)) - E(x(0))$ 表示系统中存储的能量，式(1)不等式右侧积分分别表示输入到系统和从系统耗散的能量。式(1)和(2)表示系统如果能够满足输入的能量不大于系统耗散的能量，则系统状态变量的误差函数将收敛于零，从而维持系统的全局稳定性，因此无源系统具有全局稳定的特性。

选择 $x = [i_{1d} \ i_{1q} \ i_{2d} \ i_{2q} \ v_{cd} \ v_{cq} \ v_{dc}]^T$ 作为状态变量，其中 T 代表转置矩阵。单相 LCL 型整流器系统的功率方程为

$$L_1 i_{1d} \frac{di_{1d}}{dt} + L_1 i_{1q} \frac{di_{1q}}{dt} + L_2 i_{2d} \frac{di_{2d}}{dt} + L_2 i_{2q} \frac{di_{2q}}{dt} + C v_{cd} \frac{dv_{cd}}{dt} + C v_{cq} \frac{dv_{cq}}{dt} + 2C_d u_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} + r_1 (i_{1d}^2 + i_{1q}^2) + r_2 (i_{2d}^2 + i_{2q}^2) = v_{gd} i_{1d} + v_{gq} i_{1q} - \frac{2u_{dc}^2}{R_L} \quad (3)$$

可以转换成

$$\frac{d}{dt} \left\{ \frac{L_1 i_{1d}^2}{2} + \frac{L_1 i_{1q}^2}{2} + \frac{L_2 i_{2d}^2}{2} + \frac{L_2 i_{2q}^2}{2} + \frac{C v_{cd}^2}{2} + \frac{C v_{cq}^2}{2} + C_d u_{dc}^2 \right\} = (v_{gd} i_{1d} + v_{gq} i_{1q}) - \frac{2u_{dc}^2}{R_L} - r_1 (i_{1d}^2 + i_{1q}^2) - r_2 (i_{2d}^2 + i_{2q}^2) \quad (4)$$

如果能设定

$$E = \frac{L_1 i_{1d}^2}{2} + \frac{L_1 i_{1q}^2}{2} + \frac{L_2 i_{2d}^2}{2} + \frac{L_2 i_{2q}^2}{2} + \frac{C v_{cd}^2}{2} + \frac{C v_{cq}^2}{2} + C_d u_{dc}^2 > 0 \quad (5)$$

$$u^T y = (v_{gd}i_{1d} + v_{gq}i_{1q}) - \frac{2u_{dc}^2}{R_L} \quad (6)$$

$$Q(x) = r_1 (i_{1d}^2 + i_{1q}^2) + r_2 (i_{2d}^2 + i_{2q}^2) > 0 \quad (7)$$

可以看出式(5)、(6)、(7)是符合方程(2)的，则可以证明单相 LCL 整流器系统具有无源性。因此根据单相 LCL 型整流器系统的无源性可以设计的无源解耦控制的框图为图 2 所示。

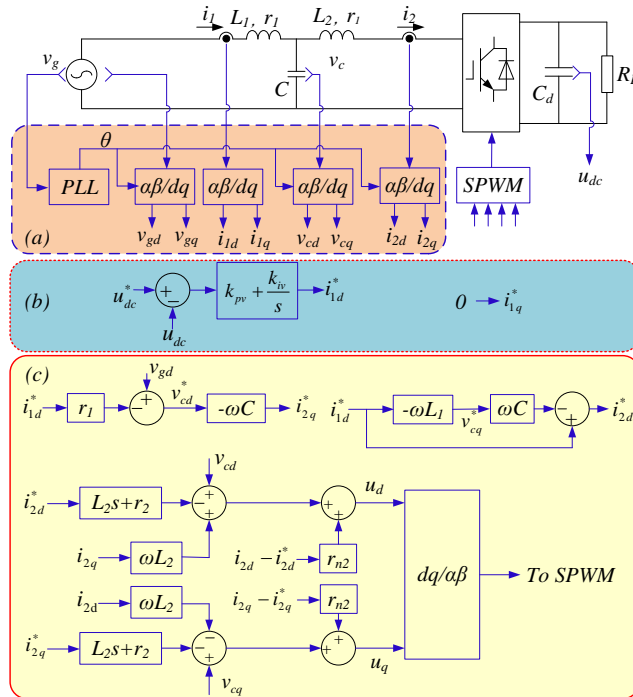


图 2. 单相 LCL 型整流器无源解耦控制框图

基于实时仿真器的算法验证

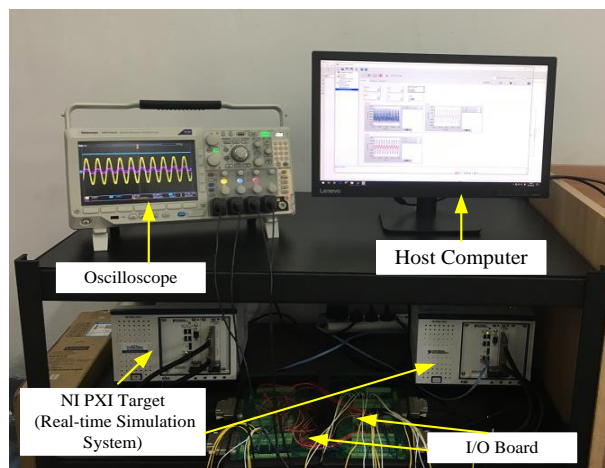


图 3. 基于 StarSim 的 RCP 和 HIL 平台

图 3 所示为采用上海远宽公司搭建的基于 StarSim 的快速原型控制器(RCP)和电力电子实时仿真器(HIL)的仿真实验平台, 无源解耦控制算法实时运行在 RCP 控制器的 CPU 上, 单相 LCL 整流器拓扑在实时仿真器 (HIL) 的 FPGA 上按 1us 步长实时仿真运行; RCP 控制器和 HIL 仿真器通过实际的物理 IO 连接。

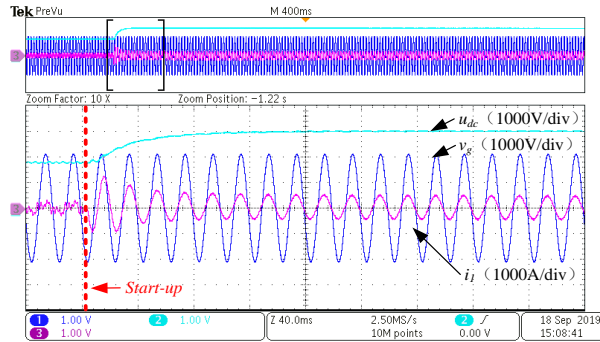
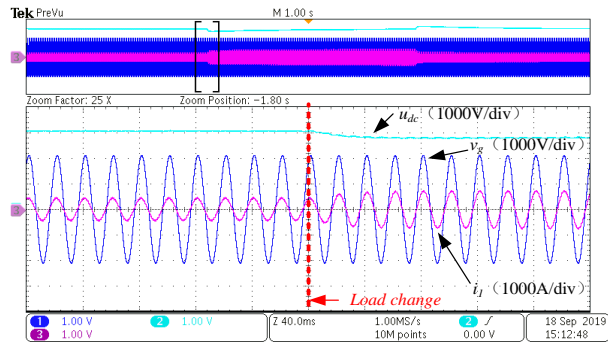
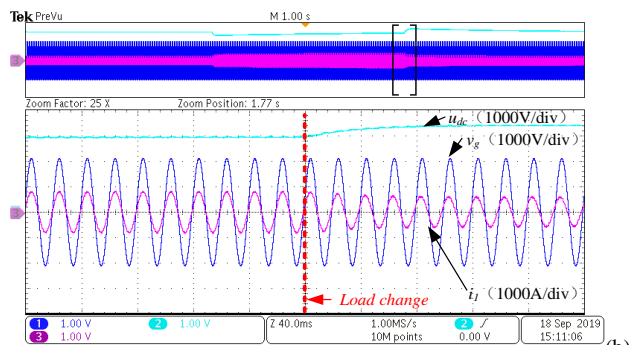


图 4. 基于无源解耦控制器的直流侧电压(u_{dc})网侧电压 (v_g)和网侧电流 (i_l) 的 HIL 半实物仿真波形



(a)



(b)

图 5. 基于无源解耦控制器的直流侧电压、网侧电压 (v_g)和网侧电流 (i_l) 负载波动时的 HIL 半实物动态仿真波形

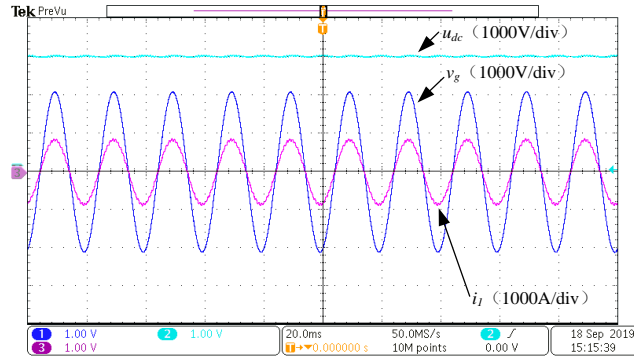


图 6. 基于无源解耦控制的直流侧电压(u_{dc})网侧电压 (v_g)和网侧电流 (i_l) 参数变动时的 HIL 半实物仿真波形

图 4-图 6 为基于无源解耦控制的单相 LCL 型整流器系统的电压、电流的半实物实时仿真波形。从图 4 可以看出在无源解耦控制控制下单相 LCL 型整流器系统启动时，输入电流的稳定以及电压和电流之间的同步快，并且直流母线电压迅速达到其参考值而不会出现过冲，直流母线电压的调整时间只需 0.16 s。图 5 分别为无源解耦控制器在负载阶跃变化时的电压、电流的动态响应波形。表明所提出的无源解耦控制控制器有助于实现快速，平滑和稳定的动态响应。图 6 为当滤波器参数变化时，由所提出的控制器控制的单相 LCL 型整流器的电网电压、电流波形，尽管存在滤波器参数变化，但单相 LCL 整流器系统的电网电流与电网电压能够维持同相运行，直流电压和电网电流能够维持在稳定值。这验证了所提出的无源解耦控制方法对于系统参数变化时的鲁棒性。

总而言之，通过上海远宽的 StarSim 半实物电力电子实时仿真平台，得出了所提出无源解耦控制控制器在启动、负载扰动和参数变动时单相 LCL 整流器系统的性能，验证了所提出的控制方法的优点。